

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de doctorado:

AUTOMÀTICA, ROBÒTICA I VISIÓ

Tesis doctoral:

**TRANSFORMACIÓN ESCALAR DE LA INTERFAZ
DE OPERADOR EN TELEOPERACIÓN ASISTIDA**

Luis Miguel Muñoz Morgado

Directora: Alicia Casals Gelpí

Enero, 2012

Agradecimientos

Llegado al fin de este trabajo de tesis quisiera dejar constancia de mi agradecimiento y reconocimiento a todas aquellas personas que han contribuido directa o indirectamente a dar algo de luz a este largo camino.

En primer lugar agradecer a mi directora de tesis, Alícia Casals, por su dedicación durante tantos años. Ha sido de inestimable ayuda para dar coherencia a las ideas y me ha ayudado a desarrollar el trabajo con rigor manteniendo un espíritu autocrítico.

También agradecer al profesor Josep Amat por las originales ideas aportadas.

A los compañeros de laboratorio que me ayudaron a poner en marcha las aplicaciones de teleoperación y a los que participaron en los ensayos.

A los alumnos y voluntarios que participaron en los experimentos.

A los compañeros de Vilanova que me han recordado que la tesis tiene un final.

A mi mujer, Elena, por su apoyo incondicional y por ayudarme a mantener la cordura.

Gracias.

Resumen

La interacción persona-máquina en teleoperación, a través de la interfaz de usuario, permite conseguir el nivel de inteligencia necesario para ejecutar en cooperación tareas complejas que no pueden ser realizadas por máquinas o robots por si solos o directamente por las personas. Las técnicas de interacción facilitan el desarrollo de dichas tareas haciéndolas más eficientes y eficaces, mediante la mejora de cualquier sistema que incorpore una interfaz de usuario.

Las personas poseen limitaciones motoras inherentes a la naturaleza humana (como el temblor fisiológico) y limitaciones perceptivas (como la percepción de la distancia o el tiempo) que impiden realizar una operación suficientemente suave y precisa en ciertas aplicaciones. Algunos estudios tratan este fenómeno y su efecto en los sistemas persona-máquina y sistemas teleoperados. Existen modelos psicomotores que muestran que la eficiencia de la manipulación humana en la selección de un objeto depende de determinados factores. Entre estos modelos, el más representativo corresponde a la Ley de Fitts en donde el tiempo de ejecución es una función logarítmica del tamaño y la distancia al objeto.

En teleoperación, y en base a estos modelos psicomotores, se demuestra que una modificación en la escala visual de la interfaz tiene un efecto directo en el tiempo de ejecución de una tarea y en la precisión alcanzable. Lo mismo ocurre con un cambio en la amplitud de movimiento que realiza el operador con respecto al realizado por el sistema, con lo que el escalado del movimiento entre maestro y esclavo tiene un efecto significativo en la eficiencia y eficacia con la que se ejecuta una tarea.

Este trabajo de investigación está orientado al diseño y desarrollo de un método concebido para mejorar la eficacia gracias a una mayor eficiencia visual y motora de la interfaz persona-máquina. El método se basa en la modificación del flujo de información entre persona, máquina e interfaz mediante el escalado tanto del movimiento de la persona como de la imagen de la tarea visualizada. El tiempo de operación, los movimientos de la mano de la persona y el grado de atención pueden reducirse con esta asistencia computarizada. Los cambios de escala se adaptan a la tarea, afectando positivamente al rendimiento en términos de precisión y rapidez.

Por lo tanto, la metodología propuesta está orientada a conectar el espacio de trabajo de la persona con el espacio de trabajo de la máquina o robot a través de la interfaz que introduce dos procesos de escala. Un primer cambio de escala se aplica entre el movimiento producido por el operador y el producido en la interfaz visual y un segundo cambio está orientado a escalar el espacio real de la tarea sobre la interfaz visual.

Estos cambios de escala deben ser ajustados a los objetos de interés, resultando en una modificación de la resolución espacial acorde con la tarea a realizar y el tamaño, forma, distancia y velocidad de los objetos.

Dichos cambios de escala modifican el flujo de información entre el operador y la máquina acordes con las características y limitaciones de ambos.

Palabras clave: Interacción persona-máquina, teleoperación, ley de Fitts, funciones de escala, factores humanos.

Abstract

Human-machine interaction in teleoperation, through the adequate user interface, allows achieving the level of intelligence necessary to execute complex tasks that cannot be executed by machines or robots alone neither directly by humans. H-R interaction techniques facilitate the execution of such tasks making them more efficient and effective through the improvement of their user interface.

Humans have inherent motor limitations (such as physiological tremor) and perceptive limitations (mainly perception of distance and time), which can prevent them from operating smoothly and precisely enough for certain applications. Some studies have already tackled this problem and its effect on the human-machine interaction and teleoperated systems. There are psychomotor models that show that the human manipulation efficiency, in actions such as pointing an object, depends on several factors. Among these models, the most representative corresponds to Fitts' Law, in which the execution time is a logarithmic function of the size and distance to the object.

In teleoperation, and based on these models, a modification of the visual scale in the user's interface has a direct effect on the task execution time and on the precision that can be achieved. The same occurs with a change in the amplitude of the movement executed by the human operator with respect to that performed by the system. Therefore, scaling the movement between master and slave has a significant effect on the efficiency and effectiveness executing a task.

This research work is oriented to the design and development of a method conceived to improve effectiveness thanks to a larger visual and motor efficiency of the human-machine interface. The method is based on the modification of the information flow between human, machine and interface by means of the scaling of both, the human movements and the image of the visualized task. Operation time, hand movements and the need for visual attention can thus be reduced with this computerized assistance. The changes of scale adapt to the task, which positively affects its performance in terms of precision and speed.

Therefore, the proposed methodology aims to link the human operator working space to the machine or robot working space through an interface that introduces two scaling processes. A first change of scale is applied between the movement produced by the human operator and the movement produced in the visual interface (for instance, movement of the robot end-effector that is visualized on the computer screen); and a second change oriented to scale the real space of the task over the visual space of the interface.

These changes of scale should be adjusted to the objects of interest, which result in a modification of the spatial resolution according to the task to be performed and to the size, shape distance and speed of the objects. Such changes modify the information flow between human and machine according to the characteristics and limitations of both.

Key words: Human-machine interaction, teleoperation, Fitts' Law, scale functions, human factors.

Resum

La interacció persona-màquina en teleoperació, a través de la interfície d'usuari, permet aconseguir el nivell d'intel·ligència necessari per executar en cooperació tasques complexes que no poden ser realitzades per màquines o robots per si sols o directament per les persones. Les tècniques d'interacció faciliten el desenvolupament d'aquestes tasques fent-les més eficients i eficaces, mitjançant la millora de qualsevol sistema que incorpori una interfície d'usuari.

Les persones posseeixen limitacions motores inherents a la naturalesa humana (com la tremolor fisiològica) i limitacions perceptives (com la percepció de la distància o el temps) que impedeixen realitzar una operació suficientment suau i precisa en certes aplicacions. Alguns estudis tracten aquest fenomen i el seu efecte en els sistemes persona-màquina i sistemes teleoperats. Existeixen models psicomotors que mostren que la eficiència de la manipulació humana en la selecció d'un objecte depèn de determinats factors. Entre aquests models, el més representatiu correspon a la Llei de Fitts, in on el temps d'execució es una funció logarítmica de la mida i la distància al objecte.

En teleoperació, i en base a aquests models psicomotors, es demostra que una modificació en l'escala visual de la interfície té un efecte directe en el temps d'execució d'una tasca i en la precisió assolible. El mateix succeeix amb un canvi en l'amplitud del moviment que realitza l'operador respecte al realitzat pel sistema, de manera que l'escalat del moviment entre mestre i esclau té un efecte significatiu en l'eficiència i eficàcia amb la que s'executa una tasca.

Aquest treball d'investigació està orientat al disseny i desenvolupament d'un mètode concebut per millorar l'eficàcia gràcies a una major eficiència visual i motora de la interfície persona-màquina. El mètode es basa en la modificació del flux d'informació entre persona, màquina i interfície mitjançant l'escalat tant del moviment de la persona com de la imatge de la tasca visualitzada. El temps d'operació, els moviments de la mà de la persona i el grau d'atenció poden reduir-se amb aquesta assistència computeritzada. Els canvis d'escala s'adapten a la tasca, afectant positivament el rendiment en termes de precisió i rapidesa.

Així doncs, la metodologia proposada està orientada a connectar l'espai de treball de la persona amb l'espai de treball de la màquina o robot a través de la interfície que introdueix dos processos d'escala. Un primer canvi d'escala s'aplica entre el moviment produït per l'operador i el produït a la interfície visual i un segon canvi està orientat a escalar l'espai real de la tasca sobre la interfície visual.

Aquests canvis d'escala han de ser ajustats als objectes d'interès, resultant en una modificació de la resolució espacial d'acord amb la tasca a realitzar i la mida, forma, i velocitat dels objectes. Aquests canvis d'escala modifiquen el flux d'informació entre l'operador i la màquina d'acord amb les característiques i limitacions d'ambdós.

Paraules clau: Interacció persona-màquina, teleoperació, llei de Fitts, funcions d'escala, factors humans.

Contenido

Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Abstract	v
Resum	vi
Contenido	vii
Parte I Introducción	1
1. Introducción.....	3
1.1. Motivación.....	3
1.2. Objetivos de la Tesis	4
1.3. Contenido de la Tesis	5
2. Interacción Persona-Máquina y Teleoperación	7
2.1. Interacción Persona-Máquina y Teleoperación	7
2.1.1. Requisitos de la interacción persona-máquina	9
2.1.2. Dispositivos de interfaz	11
2.1.2.1. Interfaz de salida	11
2.1.2.2. Interfaz de entrada.....	13
2.1.2.3. Realimentación háptica	19
2.2. Teleoperación	21
2.2.1. Orígenes de la teleoperación	21
2.2.2. Conceptos y definiciones.....	23
2.2.3. Tipos de control en Teleoperación	24
2.2.4. Limitaciones de la teleoperación	27
3. Factor Humano.....	29
3.1. Imprecisión en la Interacción Persona-Máquina	29
3.1.1. Temblor fisiológico	31
3.1.2. Percepción de la distancia	33
3.1.3. Flujo visual	34
3.1.4. Percepción del tiempo y del movimiento	35
3.2. La Ley de Fitts.....	36
3.2.1. La Ley de Fitts en dos dimensiones	38
3.2.2. Trayectorias	39
3.2.3. Objetos en movimiento.....	41
3.3. Modelo del operador	42
3.3.1. De la Ley de Fitts al modelo lineal de primer orden	43
3.3.2. El modelo de frecuencia de corte	44

Contenido

3.3.3.	Modelo estructural	45
3.3.4.	Modelo de control óptimo	45
3.3.5.	Otros modelos del operador.....	46
3.4.	Modelo motor del operador	47
4.	Métodos de ayuda a la Interacción Persona-Máquina	55
4.1.	Ayuda a la Interacción Persona-Ordenador.....	55
4.1.1.	Reducción de la distancia al objetivo	56
4.1.2.	Expansión del tamaño del objetivo.....	57
4.1.3.	Modificación del ratio Control-Display.....	61
4.2.	Ayuda a la Teleoperación.....	63
4.2.1.	Control semiautónomo	63
4.2.2.	Teleoperación y campos potenciales	70
4.2.3.	Realidad aumentada como ayuda a la teleoperación	72
4.2.4.	Realimentación háptica en teleoperación	74
4.2.5.	Superficies Virtuales.....	75
4.2.6.	Escalas en la interfaz de teleoperación	75
4.3.	Resumen	77
Parte II	Metodología	81
5.	Transformación escalar entre Persona-Interfaz-Robot	83
5.1.	Flujo de información en Teleoperación.....	83
5.2.	Triángulo Persona-Interfaz-Robot.....	84
5.2.1.	Los espacios del triángulo persona-interfaz-robot.....	85
5.2.2.	VARIABLES DE ESCALADO	87
5.3.	Transformación multiescalar	90
5.3.1.	VARIABLES DE ESCALADO COMO FUNCIÓN DE LA DISTANCIA.....	90
5.3.2.	Relaciones de movimiento.....	91
5.4.	Caracterización de las funciones de escala.....	94
5.4.1.	Límites del espacio visual.....	95
5.4.2.	Posición del centro de escalado visual.....	96
5.4.3.	Precisión requerida	97
5.4.4.	Forma de la función de escalado visual.....	97
5.4.5.	Forma de la función de escalado motor	105
5.4.6.	Efecto del escalado sobre la eficiencia	109
5.5.	Modelo de comportamiento motor	111
5.5.1.	Estados de movimiento.....	112
5.5.2.	Activación de objetos	114
5.5.3.	Objetos múltiples.....	116

5.6.	Escalado dinámico.....	117
5.6.1.	Distancia mínima y distancia de colisión	118
5.6.2.	Escalado motor en modo navegación	120
5.6.3.	Escalado motor en modo balístico.....	121
5.6.3.1.	Desplazamiento hacia un objetivo	121
5.6.3.2.	Desplazamiento anticolidión	126
5.6.3.3.	Efecto del escalado sobre la eficiencia.....	127
5.6.4.	Dinámica del escalado visual	128
6.	Ámbito de aplicación.....	131
6.1.	Interacción persona-ordenador	131
6.1.1.	Menús, botones e iconos.....	131
6.1.2.	Escalado motor estático	133
6.1.2.1.	Escala constante	134
6.1.2.2.	Escala variable	136
6.1.3.	Escalado motor dinámico	142
6.1.4.	Navegación entre menús.....	146
6.1.5.	Escalado Visual	148
6.1.6.	Escalado combinado visual y motor.....	153
6.2.	Teleoperación	157
6.2.1.	Relación entre espacios	157
6.2.2.	Disposición de los objetos de interés.....	160
6.2.3.	Consideraciones en la aplicación del escalado y el <i>panning</i>	161
Parte III	Evaluación.....	162
7.	Evaluación.....	163
7.1.	Interacción persona-ordenador	163
7.1.1.	Procedimiento de los ensayos.....	164
7.1.2.	Escalado motor versus escalado visual.....	166
7.1.2.1.	Ensayo de conexión unidireccional.....	166
7.1.2.2.	Ensayo de conexión multidireccional	169
7.1.2.3.	Ensayo de trazado unidireccional	172
7.1.2.4.	Ensayo de trazado multidireccional	176
7.1.3.	Escalado estático versus escalado dinámico.....	179
7.1.3.1.	Ensayo de conexión unidireccional.....	179
7.1.3.2.	Ensayo de conexión multidireccional	181
7.1.4.	Comparación de dispositivos de interfaz.....	183
7.1.4.1.	Ensayo de conexión unidireccional.....	184
7.1.4.2.	Ensayo de trazado multidireccional	186
7.2.	Tarea de teleoperación 2D.....	188

Contenido

7.2.1.	Entorno de experimentación	189
7.2.2.	Operación manual.....	191
7.2.3.	Modo teleoperado	191
7.2.4.	Resultados.....	192
7.3.	Tarea de teleoperación 3D.....	193
7.3.1.	Entorno de experimentación	194
7.3.2.	Procedimiento de los ensayos.....	196
7.3.3.	Resultados.....	196
Parte IV	Comentarios Finales.....	199
8.	Conclusiones	201
8.1.	Contribuciones.....	202
8.2.	Trabajos futuros.....	203
8.3.	Publicaciones en el campo.....	203
Parte V	Anexos	207
Anexo A.	Glosario	209
Anexo B.	Calibración.....	213
Anexo C.	Cálculo de distancias	217
Referencias	235

Parte I Introducción

1. Introducción

Este capítulo introducirá las ideas que motivan el desarrollo de la tesis, las pautas que se seguirán y los métodos que se emplearán. Se indican los contenidos de cada una de los bloques y capítulos y se resumen los objetivos y las contribuciones que aporta la tesis.

1.1. Motivación

La tendencia de la robótica es obtener cada vez mayor grado de autonomía, autonomía que se ve limitada en muchas aplicaciones por la existencia de entornos impredecibles o no estructurados. Por este motivo cada vez se hará más presente la colaboración persona-robot en ámbitos de la robótica de servicios como la exploración, mantenimiento, la medicina o asistencia a las personas en general. Se ha demostrado la eficacia de los robots en tareas repetitivas que por sus características puedan ser programables, pero no en otras tareas más complicadas que para las personas podrían incluso resultar triviales. Por otro lado las personas poseen una gran capacidad sensorial y con su inteligencia y capacidad de adaptación pueden tomar decisiones adecuadas en entornos impredecibles. Los sistemas teleoperados, donde se combinan las mejores características de los robots y de las propias personas, constituyen una solución a múltiples aplicaciones en que la limitada inteligencia de los robots les impide operar de forma autónoma en entornos o tareas con incertidumbres, o cuando la actuación del robot en cada momento debe responder a la voluntad del usuario. Es por esto que nos motiva una tesis en el campo de la teleoperación.

La evolución de la teleoperación robótica, desde su nacimiento, a mediados de siglo pasado con el desarrollo de la energía nuclear, hasta la actualidad ha sido muy significativa. En la presente década, con la ayuda de la evolución de la electrónica y la informática se ha experimentado una explosión en el desarrollo de herramientas que están permitiendo que la interacción entre persona y máquina sea cada vez más transparente, cómoda y eficiente, en términos de eficiencia, eficacia y ergonomía. Estando la tecnología de los robots manipuladores fuertemente consolidada, es en la interfaz con la persona donde reside la clave para aprovechar la inteligencia de ésta para llevar a cabo tareas, actualmente inviables de realizar de forma autónoma. La interfaz debe hacer posible interactuar con entornos en que por su naturaleza, las personas no puedan actuar de forma directa con métodos convencionales o lo hagan de forma pobre.

Aplicaciones de microcirugía, manipulación a pequeña escala o exploración de entornos de elevado grado de complejidad y riesgo, como el propio cuerpo humano en cirugía, requieren de métodos que aporten a la persona la facultad de interactuar con el robot o sistema teleoperado de forma precisa y segura. Estos métodos deben permitir compensar las características inherentes a la persona que introducen imprecisión al sistema, algunas de ellas relacionadas con el movimiento, como el temblor fisiológico, o relacionadas con la interpretación de la información, como son la percepción de la distancia y el tiempo.

1.2. Objetivos de la Tesis

En un sistema Maestro-Eslavo clásico existe un acoplamiento directo, ya sea mecánico o electrónico, entre el operador y el robot o dispositivo teleoperado. Idealmente, este acoplamiento permite al operador realizar la tarea como si estuviese en el mismo lugar donde se ejecuta, y de esta manera, es su propia inteligencia y estrategia la que rige el éxito de la operación a realizar y el sistema de teleoperación no es más que un mecanismo de interfaz. No obstante, en general, el dispositivo maestro no podrá captar fielmente todas las acciones del operador, ni el esclavo transmitir toda la información de la tarea al operador. Por otro lado, el operador posee una determinada capacidad de acción y percepción, lo que conlleva que no pueda manejar un flujo ilimitado de información.

Modelos psicomotores como el de la Ley de Fitts, [Fitts 1954], muestran que en la manipulación humana la selección de un objeto depende de su tamaño y de la distancia a la que se encuentra. Esta ley ha sido utilizada ampliamente en disciplinas relacionadas con la interfaz a un ordenador, como en la visualización de cartografía, en exploración de extensos documentos, o en navegación virtual, y se muestra como la modificación de la escala visual y de la amplitud de movimiento por parte de la persona intervienen directamente sobre el tiempo y precisión de la tarea. La introducción de mapas de escalado de velocidad entre maestro y esclavo, ha demostrado su eficacia para la reducción del tiempo de ejecución de una tarea. Los modelos psicomotores ampliamente utilizados en la interacción persona-ordenador pueden ser también de gran utilidad en teleoperación.

Estamos en una era en que la interacción de la persona con el mundo, natural y artificial, se realiza a menudo con el ordenador como instrumento intermediario, y en disciplinas de la ciencia, la tecnología, la producción industrial, la información, la comunicación interpersonal, los negocios, el arte y la cultura en general. Esto coloca al ordenador en una posición como una extensión de nuestros sentidos y de nuestros miembros, compensando o supliendo nuestras carencias y amplificando nuestras habilidades. Con esto, las interfaces con el ordenador han de diseñarse con el propósito de que esta extensión sea natural, eficiente, ergonómica. Y así debe ser también en un entorno de teleoperación. Con esto, esta tesis está orientada a la formulación de una metodología que intervenga en los distintos estamentos que conforman la interfaz de la persona con el ordenador dirigida a la interacción persona-máquina y en particular la teleoperación. Se trata el concepto de triángulo persona-interfaz-robot, que nos sirve como base para introducir elementos que intervengan tanto en las acciones del operador sobre la tarea, como en la percepción que recibe de esta, actuando sobre el flujo de información en ambas direcciones. El concepto de escalado se aplica en ambas direcciones, permitiendo de esta manera modificar la resolución en el movimiento y la velocidad del robot, así como la dimensión aparente de los objetos en la interfaz visual, dependiendo del tamaño de estos, distancia, forma y número. Todo ello con el fin de mejorar la eficacia de la tarea de teleoperación en términos de tiempo, precisión y ergonomía.

1.2. Objetivos de la Tesis

El objetivo general de la tesis es profundizar en el estudio de las técnicas de escalado aplicadas a la interfaz de usuario para el desarrollo de interfaces persona-máquina más eficientes y eficaces, susceptibles de ser utilizadas en tareas de teleoperación asistida. Para este fin se contemplarán los siguientes objetivos:

-
- Establecer un modelo de interfaz persona-máquina que relacione el espacio del operador (espacio motor), el espacio visual y el espacio de trabajo (espacio de la tarea), a través de las funciones de escala motora y visual.
 - Caracterizar las funciones de escala motora y visual en función de los requisitos de la tarea y las características de la interfaz.
 - Establecer una metodología en donde las escalas visual y motora puedan trabajar de forma sinérgica para obtener un resultado más favorable que el obtenido por cada una de ellas por separado.
 - Establecer modelos de comportamiento motor que contemplen la evolución dinámica del movimiento de las acciones del operador y crear mecanismos para diferenciar los modos de funcionamiento de las funciones de escala.
 - Evaluar de forma experimental la caracterización de los métodos de escalado y su impacto sobre la eficiencia, eficacia y ergonomía.

1.3. Contenido de la Tesis

La estructura de esta tesis queda organizada en tres grandes bloques. Un primer bloque de introducción en donde, tras la presente introducción, se resumen los conceptos fundamentales que se tratan a lo largo de la tesis.

El capítulo 2 introducirá conceptos fundamentales sobre la interacción persona-máquina (IPM) y la teleoperación, se analizarán las imprecisiones causadas por la IPM y se describirán algunas de las técnicas para ayuda a la teleoperación. En el capítulo 3 se introducen los conceptos relacionados con el factor humano, analizando cuales son los factores humanos que introducen algún comportamiento no deseado e imprecisión en la IPM, como el temblor fisiológico o la percepción del tiempo y la distancia. Se introduce el modelo psicomotor de la Ley de Fitts por su relevancia en la IPM, el cual es citado en sus distintas formas en sucesivas ocasiones a lo largo de la tesis. Seguidamente se hace un análisis del estado del arte sobre la reducción del tiempo de ejecución de tarea utilizando una adecuada IPM. Al final del capítulo 3 se describen algunos de los modelos del operador trabajando en un sistema de control en lazo cerrado y el modelo que caracteriza el comportamiento motor de la persona. En el capítulo 4 se introducen los principales métodos de ayuda a la interacción persona máquina, en primer lugar sobre la interacción persona ordenador, y finalmente algunas de las técnicas empleadas en la ayuda a la teleoperación.

Tras la introducción de conceptos, en el segundo bloque de la tesis se describe la metodología propuesta. En el capítulo 5 se introduce el concepto del triángulo Persona-Interfaz-Robot, del flujo de información y de las variables de escalado. Se describe la transformación multiescala y las funciones de escala. Posteriormente se introduce un modelo de comportamiento motor que permite la aplicación de las funciones de escala según la disposición de los objetos involucrados en una tarea y la naturaleza del movimiento que se realiza, distinguiendo las formas de actuar cuando el movimiento es muy rápido, o de tipo balístico, o cuando es un movimiento controlado, o de tipo navegación. El capítulo 6 trata sobre el ámbito de aplicación del método donde se describe como introducir la metodología de escalado a ámbitos de la IPM y de la teleoperación. En este capítulo se realizan pruebas experimentales que permiten caracterizar los métodos de escalado propuestos.

1.3. Contenido de la Tesis

El tercer bloque, que es recogido en el capítulo 7, engloba la experimentación que se ha llevado a cabo para la evaluación de la metodología. En una primera fase los experimentos están dirigidos a la interacción con el ordenador y se trata de un conjunto de pruebas de movimiento a través de una interfaz gráfica y un ratón en donde se evalúan los tiempos de ejecución, los desplazamientos, la precisión y el número de errores, así como otras magnitudes más subjetivas como el grado de atención o la carga de trabajo. Este conjunto de pruebas está relacionado con una norma particular [ISO 241-9:2000] que trata sobre los requisitos ergonómicos para dispositivos de entrada diferentes al teclado. Posteriormente se analiza la metodología estudiando el comportamiento con diferentes dispositivos de interfaz de entrada. Seguidamente se describe el conjunto de pruebas realizadas en una serie de tareas de teleoperación. Se implementa la metodología en una aplicación a través de una interfaz gráfica y un *joystick* donde se gobierna un robot realizando tareas como la navegación en un circuito de barreras estrechas o el enhebrado de una aguja, evaluando la eficiencia y la eficacia conseguida en la ejecución de la tarea, con y sin la ayuda del método.

El último bloque recoge las conclusiones finales, resumiendo el trabajo llevado a cabo y las contribuciones de la tesis. Finalmente se exponen las líneas futuras de trabajo.

2. Interacción Persona-Máquina y Teleoperación

Este capítulo aborda los conceptos y definiciones que serán empleados a lo largo de la tesis relativos a la interacción persona-máquina en general y a la teleoperación en particular. Si bien la teleoperación es una forma de interacción persona-máquina, estos conceptos son tratados de forma diferenciada dadas sus características particulares. Se introducen las ideas generales sobre interacción persona-máquina y se analizan las características y objetivos de la interacción persona ordenador. Posteriormente se describen algunos de los principales dispositivos de interfaz empleados en la interfaz persona ordenador y en teleoperación. Se analizan las características de los sistemas de teleoperación y sus limitaciones

2.1. Interacción Persona-Máquina

La Interacción Persona-Máquina (IPM) es el concepto relativo al intercambio de información entre las personas y las máquinas para realizar una tarea determinada. Aquí, el término “máquina” se toma desde una perspectiva amplia dentro del contexto actual social y tecnológico. Así, entenderemos como máquinas a las herramientas, instrumentos, vehículos, ordenadores o robots que utilizan las personas para realizar una tarea o un trabajo sobre el entorno. Gracias a estas máquinas es posible realizar tareas que sin ellas no sería posible, o que con ellas es posible realizar con mayor rapidez, precisión, comodidad y seguridad.

El medio con el cual se realiza ese intercambio de información que representa la interacción es lo que se conoce como interfaz. Dicho intercambio de información puede producirse en dos direcciones. En una dirección, la información va de la persona hacia la máquina, y trata de las acciones que desea realizar la persona y que controla de forma activa con sus miembros o con órdenes voluntarias y que son ejecutadas por la máquina. En la otra dirección, la información va de la máquina a la persona, y se traduce en las sensaciones que percibe la persona a través de sus sentidos.

A modo de ejemplo la interacción de un carpintero con un martillo para realizar una tarea de clavar un clavo, aquí la máquina sería el martillo, la interfaz el mango, la información de salida, los movimientos con la mano para desplazar convenientemente el martillo, y la información de entrada relativa a la evolución de la tarea se percibe a través de la vista, que da una visión global de la posición de los objetos; del oído que da información al golpear el clavo; y del tacto y músculos que da información sobre la dinámica del martillo al desplazarlo y al golpear con el clavo (Figura 2.1a). En el caso de conducir un automóvil (Figura 2.1b), la máquina es el propio automóvil, y el conductor actúa sobre la interfaz compuesta por el volante, pedales y otros mandos (interfaz de persona a máquina) y recibe información visual directa y auditiva del entorno (sin interfaz), así como de los instrumentos (interfaz de máquina a persona). La Figura 2.1c muestra el caso de la interacción persona-ordenador, la máquina es el ordenador en sí, la tarea cualquier aplicación informática, un ratón y un teclado como la interfaz hacia el ordenador y un monitor la interfaz hacia la persona. En el caso de teleoperar un robot (Figura 2.1d), la máquina es el

2.1. Interacción Persona-Máquina

robot teleoperado, y la interfaz puede ser un *joystick* (interfaz de persona a máquina), y un monitor (interfaz de máquina a persona), en este caso el conjunto ordenador-monitor-joystick conforman la interfaz entre persona y robot.

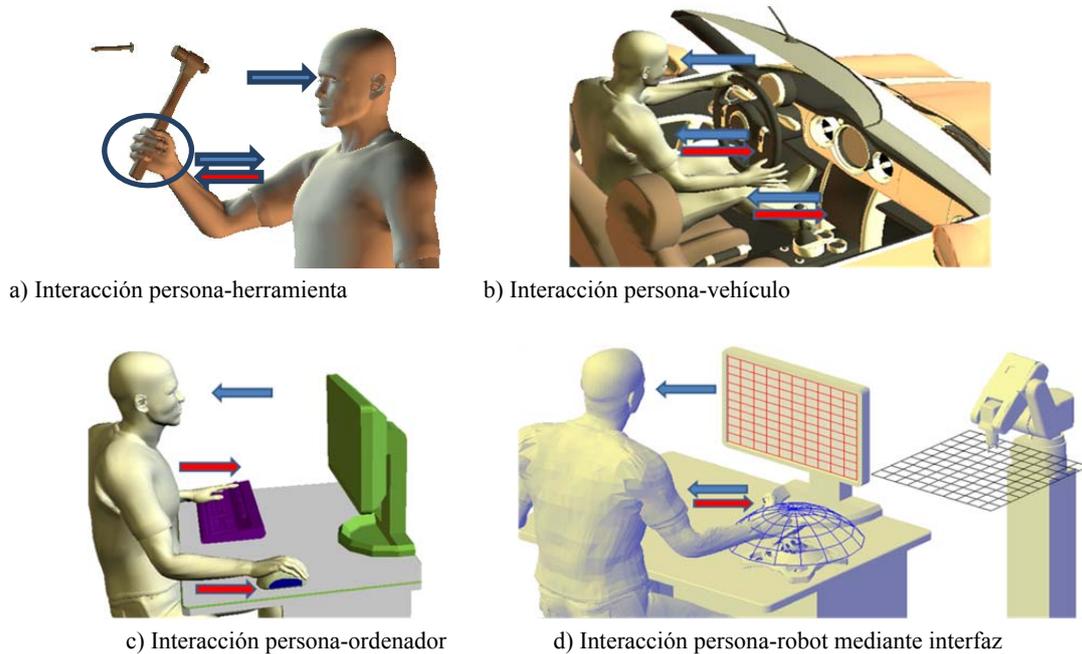


Figura 2.1 Ejemplos de interacción persona-máquina. Las flechas indican la dirección de la información, en rojo información desde la persona, en azul hacia la persona.

Dependiendo de sus características, los sistemas de interacción persona-máquina pueden clasificarse en sistemas de diálogo o sistemas dinámicos [Kraiss 2006]. Los sistemas persona-máquina de diálogo son aquellos que requieren de acciones discretas de la persona al interactuar con la máquina, como entradas de teclado, movimientos de ratón o acciones de voz, y lo forman los teléfonos móviles, PDA, ordenadores personales, sistemas de supervisión de plantas de proceso, centralitas, etc. En los sistemas persona-máquina dinámicos la persona actúa en un control en lazo cerrado realizando acciones continuas de control manual, como en la conducción de vehículos o la teleoperación de robots.

En general esta caracterización no ocurre de forma separada ya que en ambos casos pueden necesitarse acciones discretas o continuas en un momento dado, por ejemplo al desplazar el cursor del ratón en una aplicación ofimática para dibujar una línea deberá hacerse en un control continuo, o al conducir un vehículo además de la acción continua sobre el volante también se realizan acciones discretas como accionar los intermitentes. A medida que aumenta el grado de complejidad de los sistemas persona-máquina dinámicos ciertas funciones tienden a ser automatizadas. En este caso la persona ya no será necesaria en un control continuo y pasa a ser un supervisor o a trabajar de forma cooperativa, compartiendo tareas.

La Figura 2.2 muestra un diagrama de bloques propuesto por [Kraiss 2006] como concepto de ayuda a la interacción persona-máquina, donde la máquina puede ser un vehículo, robot, un proceso o un entorno simulado. Persona y máquina se relacionan vía dos canales unidireccionales, uno que transmite información de la máquina a la persona y otro en la dirección opuesta. La interacción tiene lugar con una máquina real en el mundo real. Puede influirse en la mejora de la interfaz persona-máquina interviniendo en tres conceptos: interacción multimodal, operación en realidad virtual y asistencia al usuario.

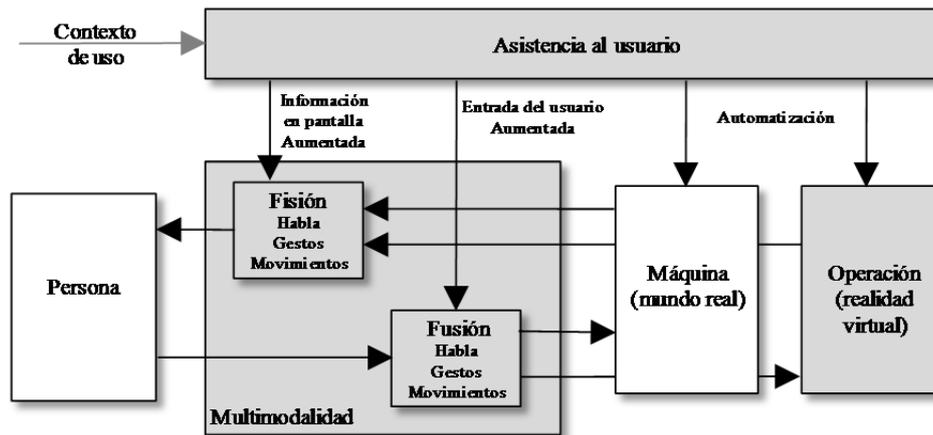


Figura 2.2. Interacción mejorada a través de técnicas de Multimodalidad, asistencia al usuario y realidad virtual.

La Multimodalidad hace referencia a una comunicación utilizando múltiples vías, el habla, los gestos, movimientos, postura del cuerpo, el tacto, etc. La fusión multimodal hace referencia a la combinación de modalidades de entrada, mientras que la fisión multimodal es la combinación de diferentes modalidades para la visualización de la información. Las interfaces deben contemplar aspectos multimodales para la mejora de la interacción. La realidad virtual permite operar sobre máquinas virtuales en entornos virtuales, como los simuladores de vuelo o de conducción de automóviles. Mediante canales de información multimodal es posible una telepresencia realista que permite teleoperar en entornos poco accesibles a causa de la distancia o la escala, como las aplicaciones en micro y nano escala, o las aplicaciones espaciales. En un sistema maestro-esclavo, el operador actúa sobre una máquina local real y las acciones se trasladan a la máquina remota. La interacción también puede ser mejorada mediante la realidad aumentada, en donde se superpone información no intrusiva sobre las imágenes del mundo real o virtual. El concepto de asistencia al usuario lo constituye el conjunto de ayudas que recibe la persona en el momento justo para reducir su carga de trabajo.

2.1.1. Requisitos de la interacción persona-máquina

Para que la interacción entre persona y máquina sea eficiente, eficaz, segura y libre de errores, la interfaz debe diseñarse apropiadamente. Esto está ligado al concepto de *usabilidad*. La usabilidad se refiere a la facilidad con que un producto o sistema puede ser utilizado por las personas para un fin determinado, es decir, que pueda ser utilizado de forma efectiva, eficiente y satisfactoriamente.

- La *eficiencia* hace referencia a la carga trabajo o esfuerzo, físico o/y mental, así como el tiempo que necesita una tarea para ser realizada por humanos.
- La *efectividad* se refiere a la precisión o adecuación a los objetivos con que esas tareas son realizadas.
- La *satisfacción* hace referencia a la aceptación por parte de las personas de esos productos (los sistemas interactivos).

La norma ISO 9241 regula ampliamente este concepto, aunque orientado originariamente para la interacción con ordenadores. Por otro lado, la interfaz persona-máquina tiene que ser segura, lo que significa que deberá ser comprensible, predecible, controlable y robusta. Que sea comprensible se refiere a que su funcionamiento pueda ser entendido adecuadamente por las personas. Predecible implica que las

2.1. Interacción Persona-Máquina

personas puedan prever los límites del sistema. Que sea controlable, en el sentido que las personas puedan hacerlo funcionar dentro de los límites de control y decidir a voluntad si el sistema debe ser desconectado o anulado. La robustez hace referencia a como el sistema reacciona ante una situación impredecible o que implique un riesgo, malfuncionamiento o trabaje fuera de límites.

Si bien la interacción persona máquina es un concepto general, la disciplina que trata particularmente de la Interacción Persona Ordenador (IPO) también se le suele llamar interacción persona máquina. No obstante en este trabajo se tratarán ambos conceptos de forma diferenciada.

La ACM (Association for Computer Machinery) define a la IPO como la disciplina relacionada con el diseño, evaluación e implementación de sistemas informáticos interactivos para su uso por seres humanos, y con el estudio de los fenómenos más importantes con los que está relacionado. En la IPO [Dix et al 1993] el *usuario*, se refiere a persona individual o usuarios trabajando en grupo, cada uno tratando con alguna parte del proceso. El ordenador puede ser un PC u otro tipo de estación de trabajo. La interacción es la comunicación directa o indirecta entre usuario y ordenador.

La IPO tiene como objetivo desarrollar o mejorar la seguridad, utilidad, efectividad, eficiencia y usabilidad de sistemas que incluyan ordenadores [Diaper 1989].

La IPO es un área interdisciplinar donde interviene la informática para el diseño e ingeniería de las interfaces; la psicología, en donde se aplican las teorías de los procesos cognitivos y el análisis empírico del comportamiento de los usuarios; la sociología, para la estudio de las interacciones entre tecnología, trabajo y organización; el diseño industrial para la creación de productos interactivos; la ergonomía para garantizar la seguridad, eficiencia, el confort y la satisfacción.

La interacción contempla factores relativos a la propia naturaleza de la interacción persona-ordenador, del uso y contexto de los ordenadores, de las características humanas, de los sistemas de ordenadores y la arquitectura de la interfaz y desarrollo del proceso. Estos factores descritos por [Hewett et al. 1992] se resumen en la Figura 2.2.

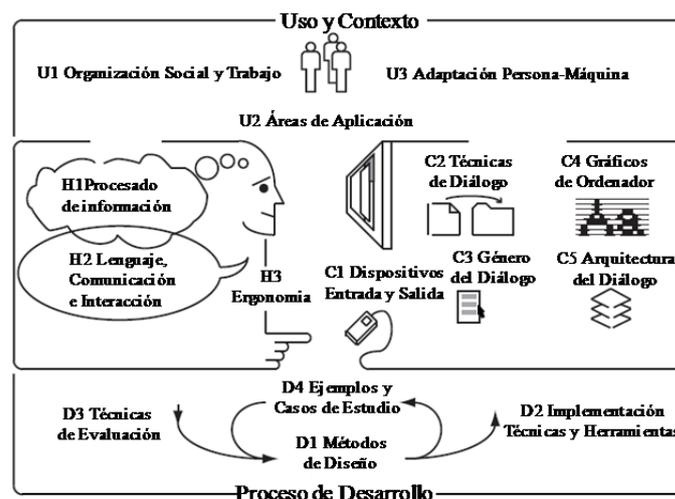


Figura 2.2. Factores de la Interacción Persona-Ordenador según [Hewett et al. 1992]. Se consideran cinco aspectos interrelacionados de la interacción persona-ordenador: (N) la naturaleza de la interacción persona-ordenador, (U) el uso y contexto de los ordenadores, (H) las características de los humanos, (C) la arquitectura de los ordenadores y la interfaz, y (D) el proceso de desarrollo.

Los requisitos que deben tener los sistemas interactivos para mejorar la usabilidad [Dix et al 1993] son: facilidad de aprendizaje, capacidad de síntesis, consistencia, flexibilidad, robustez, recuperabilidad, tiempo de respuesta acorde a los usuarios, adecuación de las tareas y disminución de la carga cognitiva. Adicionalmente, los sistemas interactivos deben seguir un *diseño centrado en el usuario*, haciéndole partícipe del diseño dentro de un equipo multidisciplinar, atendiendo a las necesidades específicas de estos usuarios en función de las tareas o aplicaciones y finalmente evaluar el diseño a través de un test de usuario. Existe cinco atributos de usabilidad sugeridos por [Nielsen 1993]: facilidad de aprendizaje, eficiencia, memoria, recuperación de errores y satisfacción subjetiva. Los sistemas interactivos también deben contemplar el factor *utilidad*, la capacidad del sistema de hacer lo que se desea, su funcionalidad.

2.1.2. Dispositivos de interfaz

En este apartado se enunciarán y clasificarán los principales dispositivos de interfaz empleados en un entorno de interacción persona máquina asistido por ordenador. Algunos de estos elementos serán empleados a lo largo del desarrollo experimental. Si bien existen multitud de dispositivos de interfaz, se hará principalmente hincapié en los dispositivos manuales que engloban el “área prensil” del sistema brazo-mano (HAS Hand-Arm System), no se consideraran los relativos al “área de paso” del sistema pierna-pié (FLS Foot-Leg System). En estos últimos se engloban elementos como los pedales, palancas y pulsadores de pie. También existen una serie de dispositivos que son accionados a partir de otras partes del cuerpo como la cabeza, el tronco o incluso algunas partes de la cara como los ojos o la boca.

Los dispositivos de interfaz pueden clasificarse en dispositivos de entrada y dispositivos de salida, si bien algunos de estos también pueden proporcionar información percibida de la tarea como son los dispositivos de realimentación háptica. En este último caso la interfaz es de entrada y salida.

2.1.2.1. Interfaz de salida

Los dispositivos de interfaz de salida son los que proporcionan información desde el entorno de la tarea hacia la persona como los monitores y cascos virtuales, indicadores luminosos, avisadores acústicos y altavoces. A continuación se hará una breve descripción de los dispositivos de realimentación visual.

Monitores 2D

Son los dispositivos de visualización más empleados. Son muy versátiles y económicos. Proyectan una imagen en una superficie bidimensional y el principal inconveniente proviene de cuando se proyectan imágenes del mundo real, lo que supone una pérdida en la información de profundidad. Para solucionar esto pueden emplearse múltiples vistas de la escena.

Monitores 3D

Permiten reproducir la sensación de profundidad. Existen pantallas estereoscópicas de tipo pasivo, las cuales precisan del uso de gafas polarizadas que dejan pasar a cada ojo la imagen que le corresponde. Por otro lado están las pantallas estereoscópicas activas, en donde las gafas poseen obturadores en cada ojo que muestran de forma alternativa las imágenes que corresponden. Las llamadas pantallas autoestereoscópicas o de paralaje, de aspecto similar a una pantalla convencional, no requieren del uso de

2.1. Interacción Persona-Máquina

gafas, utilizan ciertas barreras de refracción distribuidas sobre la pantalla, dispuestas de tal forma que cada ojo solo recibe la información adecuada de cada píxel de la imagen, suelen ser de tipo barrera de paralaje (Figura 2.3a) o de tipo lenticular (Figura 2.3b).

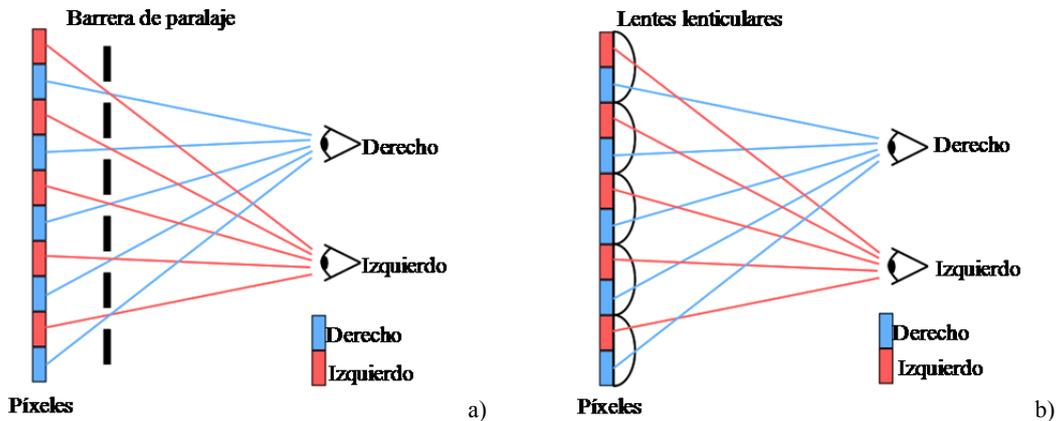


Figura 2.3 Monitores autoestereoscópicos a) de paralaje b) lenticular

Cascos virtuales

Conocidos como HMD (Head Mounted Display) se componen de dos pequeñas pantallas situadas a pocos milímetros delante de cada ojo, cada uno de ellos es independiente y proyecta a cada ojo la información que le corresponde. Suelen ir asociados a sistemas de posicionamiento de la cabeza para determinar la orientación o/y posición de la misma y así poder proyectar las imágenes en función de hacia dónde mira la persona. El sistema suele ir montado o bien en un casco o en unas pseudogafas (Figura 2.4). Los *visualizadores transparentes* son similares a los cascos virtuales, permiten mezclar las imágenes reales obtenidas directamente mediante pantallas transparentes situadas delante de los ojos, e imágenes o información generada por ordenador (Figura 2.5). Están asociadas a aplicaciones de realidad aumentada.



Figura 2.4 Head Mounted Display (HMD).



Figura 2.5 HMD con visualizador transparente.

2.1.2.2. Interfaz de entrada

Los dispositivos de interfaz de entrada son los que transmiten la información desde la persona hacia el entorno de la tarea. Lo conforman teclados, palancas de control, ratones, micrófonos, guantes virtuales y exoesqueletos. A continuación se describe la terminología asociada a los dispositivos de interfaz de entrada, necesaria para la clasificación de los mismos:

- Modo *absoluto* o *relativo*. En un dispositivo absoluto cada posición del dispositivo corresponde a una posición en la pantalla del cursor, como una tableta digitalizadora; en caso de ser relativo o incremental, el movimiento traslacional del cursor es función del movimiento traslacional del dispositivo y no de su posición absoluta, como un ratón o un *TrackBall*.
- Modo *directo* o *indirecto*. Cuando el movimiento del dispositivo está estrechamente ligado al movimiento del cursor en la pantalla, es decir la superficie de la pantalla corresponde a la superficie de trabajo del dispositivo, se trabaja en modo directo, como por ejemplo una pantalla táctil, en caso contrario se trabaja en modo indirecto, como la mayoría de dispositivos.
- Modo *lineal* o *angular*. El desplazamiento del cursor en la pantalla es causado por un dispositivo lineal en el sentido de que su movimiento sigue trayectorias rectilíneas, como en un ratón, y será angular cuando el origen del movimiento es angular, como en un *joystick* o un volante.
- *Ganancia*. Es la relación entre el movimiento del dispositivo y el movimiento del cursor. También se conoce como ratio Control-Display (C-D ratio).
- *Grados de libertad*. El número de dimensiones o direcciones de movimiento que el dispositivo puede medir.
- *Rango*. Cantidad de espacio o desplazamiento, en sus diferentes dimensiones, necesario del dispositivo para una determinada acción de movimiento.
- *Frecuencia de muestreo*. Cadencia con la que se toman medidas de los sensores de movimiento del dispositivo. Al aumentar proporciona control más fino.
- *Resolución*. Mínimo incremento de posición capaz de medir y enviar al ordenador. En dispositivos como el ratón suele medirse en puntos por pulgada.
- *Retardo*. Tiempo de desfase entre el movimiento del dispositivo y su acción sobre un cursor en la pantalla.

La Tabla 2.1 clasifica algunos de los dispositivos de interfaz de entrada con algunos de sus correspondientes parámetros, así como los valores que comúnmente pueden encontrarse para cada uno de ellos.

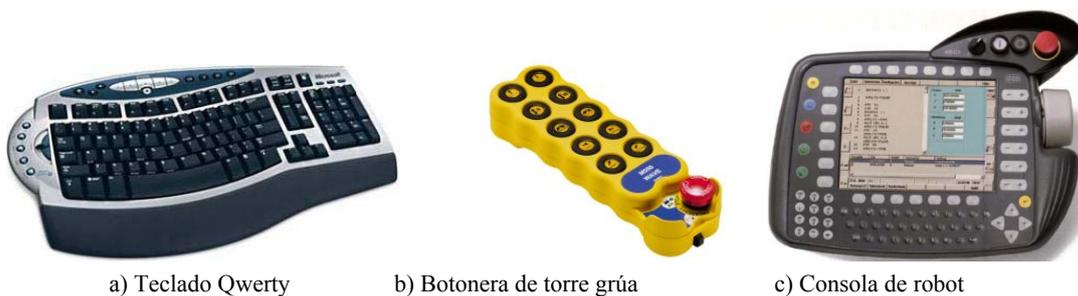
2.1. Interacción Persona-Máquina

	Relat./Abs.	Dir./Indir.	Lin./Ang.	GDL	Rango
Botonera	Relativo	Indirecto	Lineal Angular	1	Binario
Ratón	Relativo	Indirecto	Lineal	2	∞
<i>TrackBall</i>	Relativo	Indirecto	Angular	2	360°
<i>Joystick</i>	Relativo Absoluto	Indirecto	Angular	2-3	45°
Volante	Relativo Absoluto	Indirecto	Angular	1	360°
Pantalla táctil	Absoluto	Directo	Lineal	2	Monitor
Tableta	Absoluto	Indirecto	Lineal	2	A5-A3
Ratón 3D	Relativo	Indirecto	Lineal Angular	6	5mm/15°
<i>Tracker</i>	Relativo Absoluto	Indirecto	Lineal Angular	6	1,5m/360°
Exoesqueleto	Absoluto	Indirecto	Angular	6	Antrop.

Tabla 2.1. Clasificación y características de dispositivos de interfaz de entrada.

Teclados y botoneras

El conocido teclado *Qwerty* es el dispositivo más utilizado para la introducción de información hacia el ordenador, Figura 2.6a. Su configuración fue heredada de los antiguos teclados mecánicos, sin ninguna consideración por la ergonomía. Actualmente los teclados incorporan teclas de función, teclado numérico y teclas de cursor. Mediante el teclado de ordenador pueden realizarse tareas de teleoperación, no obstante las órdenes de movimiento quedan relegadas al control de la dirección mediante teclas como las de dirección, así como acciones de velocidad con otras combinaciones de teclas. No habrá pues una relación de movimiento de la mano del operador con el dispositivo a teleoperar. Esto es extensible a los dispositivos de botonera en general, si bien se siguen empleando en teleoperación, como por ejemplo las botoneras empleadas en el manejo de grúas en construcción, Figura 2.6b, o el “teach pendant”, o consola de robot, que incorporan los robots industriales. Si bien estos últimos pueden incorporar elementos de tipo *joystick*, Figura 2.6c.



a) Teclado Qwerty

b) Botonera de torre grúa

c) Consola de robot

Figura 2.6. Dispositivos de botonera.

Ratón y TrackBall

El *ratón*, después del teclado, es el dispositivo interfaz de ordenador más utilizado, y su llegada vino con el nacimiento de las interfaces gráficas. Se engloba dentro de los dispositivos de puntero. Tradicionalmente han empleado una bola giratoria que moviendo unos rodetes generan un tren de pulsos a partir de un codificador incremental, Figura 2.7a. Este mecanismo ha ido siendo sustituido por sistemas ópticos que emplean la reflexión de un diodo LED sobre la superficie para medir el desplazamiento, o incluso diodos láser para una mayor resolución en el movimiento o cámaras de vídeo. Dos o tres botones proporcionan las funciones de selección y activación de menús, a los que se le han ido añadiendo otros para avance de página, zoom, o deslizamiento de página con la conocida rueda de “*scroll*”, Figura 2.10b. De un modo indirecto y relativo desplaza el cursor de la pantalla y el ratio C-D determina la relación de movimiento. Otras técnicas como el factor de aceleración modifican el movimiento del cursor a velocidades rápidas para reducir el desplazamiento total, o el rastro del puntero para mejorar la percepción de su movimiento. Proporciona 2GDL lineales sobre un plano, generalmente horizontal y permite un posicionamiento puntual con una eficacia similar a la propia mano. El ratón es un dispositivo de interfaz cuyo rango de acción cubre desde los dedos, la mano, el antebrazo o el brazo completo. En función de la combinación de articulaciones y músculos empleados dará lugar a una precisión y velocidad de tareas diferente, con lo que es un factor a tener en cuenta a la hora de determinar la ganancia o funciones de transferencia del movimiento.



a) Ratón mecánico



b) Ratón óptico con teclas adicionales

Figura 2.7. Tipos de Ratón.

La Bola Trazadora o “*TrackBall*”, Figura 2.8, es un dispositivo de puntero con un principio de funcionamiento similar al ratón, en donde la rueda permanece fija y es rotada por los dedos proporcionando dos grados de libertad a partir de la rotación de la bola en dos direcciones. Dado que en este dispositivo el accionamiento se realiza empleando tan solo entre uno y tres dedos de la mano, o a lo sumo alguna combinación del movimiento de la mano con el resto del brazo fijo, proporciona mayor confort para un uso muy continuado en comparación con el ratón y puede situarse en cualquier posición sin tener que estar relegado necesariamente a un plano horizontal.



Figura 2.8. TrackBall.

2.1. Interacción Persona-Máquina

Joystick

El uso del *joystick* viene heredado de la aviación, para el control de los alerones. Consta de una palanca que pivota sobre su propio centro proporcionando inicialmente dos grados de libertad sobre una articulación de tipo rótula. Para disponer de grados de libertad adicionales se le proporciona, o bien una palanca adicional o/y se le dota de movilidad sobre el propio eje de la palanca, rotando sobre sí misma. Adicionalmente incorpora una serie de botones, cuya función dependerá de la aplicación. Ha sido ampliamente utilizado en simuladores de vuelo, y popularmente también en videojuegos, también en el manejo de grúas, en teleoperación y programación gestual de robots. Los *joysticks* pueden clasificarse en dos tipos básicos, según su forma de funcionamiento: *isotónicos* e *isométricos*. En un *joystick* isotónico, o de desplazamiento, el operador desplaza la palanca y la orden de movimiento es proporcional a dicho desplazamiento, con lo que existirán sensores de posición que midan el desplazamiento, Figura 2.9a. En un *joystick* isométrico, u operado por fuerza, no existe desplazamiento de la palanca, esta es rígida y el operador no nota ningún tipo de desplazamiento, o es muy pequeño, existirán, pues, sensores de fuerza, generalmente de tipo extensiométrico, que medirán los esfuerzos creados por el operador, donde las órdenes o desplazamiento del cursor serán proporcionales a dichos esfuerzos. Suelen ser de menor tamaño, algunos de estos se incorporan en los ordenadores portátiles operados mediante un dedo, *Trackpoint*, Figura 2.9b. Los *joysticks* poseen una zona de reposo central, la palanca retorna mediante resortes (en el isotónico), lo que requiere de una zona muerta en la cual las acciones del operador no tienen efecto. Esta característica junto con su elevada ganancia, dado el poco recorrido que suelen presentar, lo hacen poco factible para funcionar en modo absoluto, y normalmente lo hacen en modo relativo, para modificar direcciones de movimiento y velocidades.



Figura 2.9. Ejemplos de *joystick*.

Volante

Tradicionalmente empleado en la conducción de automóviles, el volante es un dispositivo de entrada que proporciona un solo grado de libertad de dirección, con lo que generalmente viene asociado a una variable adicional de velocidad (pedal acelerador), disponiendo así de un vector, que lo relega a la conducción sobre un plano, vehículos terrestres o marítimos, simuladores de conducción y videojuegos. La ganancia relacionará el ángulo de giro sobre el volante con el ángulo girado en el dispositivo controlado, o dirección de movimiento del cursor. Su modo de trabajo, en general, será relativo, no obstante puede proporcionar un valor absoluto de la dirección.

Dispositivos táctiles y tabletas

Funcionan mediante presión, generalmente empleando un conjunto de membranas con elementos capacitivos o resistivos, aunque algunos utilizan elementos ópticos o ultrasónicos. La pantalla táctil, *touch screen*, Figura 2.10a, es un dispositivo táctil de entrada, básicamente es el único interfaz directo, en donde el movimiento del operador y el cursor están directamente ligados, los dispositivos de entrada y salida son los mismos, con lo cual, no tiene sentido introducir ningún factor de ganancia en el desplazamiento. Cuando el número de acciones a realizar está bien definido, estos dispositivos reducen la carga de trabajo para el usuario, pero por otro lado no permiten realizar tareas de posicionamiento preciso, su resolución aunque electrónicamente puede ser alta, queda restringida por el elemento de contacto, ya sea el dedo o un lápiz de señalización. Solo se puede seleccionar un elemento a la vez.

Como dispositivo señalizador, generalmente aplicado a los ordenadores portátiles se emplea el conocido *touch pad*, Figura 2.10b, tienen un principio de funcionamiento similar al de las pantallas táctiles. Estos poseen una ganancia muy alta para relacionar el movimiento del dedo con el del cursor y trabajan en modo relativo.

Las tabletas digitalizadoras, Figura 2.10c, también poseen tecnología táctil, aunque actualmente se emplean dispositivos de posicionamiento electromagnético y se accionan utilizando normalmente un lápiz activo. Se colocan sobre el escritorio, permite trabajar en modo absoluto y la ganancia relaciona el tamaño relativo entre pantalla y tableta. Suelen poseer mayor resolución que las pantallas táctiles.



a) Pantalla táctil



b) Touch pad



c) Tableta digitalizadora

Figura 2.10. Dispositivos táctiles.

Dispositivos 3D

Los elementos anteriores están relegados mayoritariamente para su uso en dos dimensiones, a excepción del *joystick*, que podríamos decir que genera un vector de dirección esférico, de ahí su orientación en el pilotaje de aeronaves. Existen una serie de dispositivos conocidos como Ratón 3D, por su aspecto, que poseen 6GDL, 3 de orientación y otros 3 de dirección, Figura 2.11a. Se utilizan mayoritariamente en navegación tridimensional, en entornos virtuales y diseño asistido por ordenador. Se emplean solo dos o tres dedos de la mano, poseen un corto rango de acción en cada movimiento, con lo que se utiliza una ganancia elevada, funcionando siempre en modo relativo.

Otro grupo de dispositivos 3D son los de movimiento libre, es decir, un elemento situado en la mano (u otra parte del cuerpo), mide el desplazamiento y orientación de ésta en el espacio, pero sin estar vinculado a una estructura mecánica. Algunos de estos dispositivos son los *trackers* magnéticos, Figura 2.11b. Se

2.1. Interacción Persona-Máquina

emplea un transmisor que genera 3 dipolos magnéticos ortogonales, y un receptor de 3 antenas ortogonales que permiten determinar la posición y orientación del receptor respecto al emisor. Su rango de acción es en torno al metro y proporcionan un posicionamiento absoluto, muy empleado en realidad virtual, en rendimiento para el deporte y en rehabilitación médica, el inconveniente principal es su elevado coste y la sensibilidad ante la presencia de elementos metálicos. Otro grupo de dispositivos mucho más económicos emplean un modo de funcionamiento inercial, los más utilizados emplean acelerómetros, como el empleado en la consola Wii® de Nintendo, Figura 2.11c. En este caso, su modo de funcionamiento es relativo, ya que trata de integrar cambios en la velocidad de movimiento.

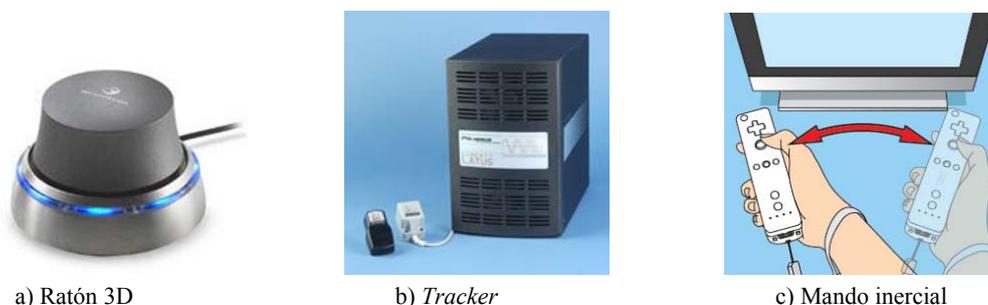


Figura 2.11. Dispositivos de posicionamiento 3D.

Exoesqueletos

Concebidos para capturar fielmente la posición de los dedos, brazos y otras partes del cuerpo, los exoesqueletos como interfaz de entrada pasivo, sin realimentación de fuerza, se emplean en realidad virtual, teleoperación y diseño por ordenador. Los exoesqueletos que toman la posición de los dedos son los guantes virtuales, existen comercialmente que miden los dedos independientemente o incluso las falanges de los dedos, algunos combinan un sistema de posicionamiento absoluto de la mano, como el *P5 Glove*, de tipo óptico, Figura 2.12a. Los exoesqueletos que toman la posición del brazo nacieron paralelamente con los primeros robots teleoperados, de concepción totalmente mecánica, y accionamiento mediante poleas. Los exoesqueletos están presentes en el campo de la investigación en realimentación háptica, ver apartado 2.5.3. Comercialmente se están introduciendo en el campo de la rehabilitación, principalmente para la rehabilitación de miembros inferiores.

Como dispositivo interfaz, menos costoso e invasivo se emplean combinaciones de seguidores (*trackers*) distribuidos por los distintos miembros y articulaciones, para de esta manera poder determinar la posición de dedos, manos, brazos y demás como si de un exoesqueleto se tratara, Figura 2.12b. Como dispositivos de interfaz, los exoesqueletos proporcionan la máxima maniobrabilidad, accesibilidad y naturalidad en las órdenes dadas por el operador, en un posicionamiento absoluto desde el punto de vista de las articulaciones, y hasta 6GDL.

Si un exoesqueleto completo del brazo se emplea para teleoperar un brazo mecánico de la misma configuración que el brazo humano no tiene sentido aplicar factores de ganancia en el posicionamiento articular, si se emplea para el posicionamiento de un objeto por la mano, tiene sentido aplicar factores de ganancia en el posicionamiento en el espacio aunque no en la orientación.



Figura 2.12. Ejemplo de exoesqueletos pasivos.

2.1.2.3. Realimentación háptica

Del griego *haptesthai*, que significa tocar, la sensación táctil es percibida a través de la piel mediante termorreceptores, nociceptores y mecanorreceptores: Estos últimos son los que proporcionan información mediante el tacto, la presión, vibración, forma, tamaño, peso, consistencia y cualidades superficiales. Cada tipo de estímulo provoca un tipo de deformación diferente sobre la piel. Por otro lado, la sensación propioceptiva es la que proporciona información de movimiento, orientación y fuerza. La información proviene del sistema somatosensorial, cuyos receptores se distribuyen por todo el cuerpo, proporcionando la sensación sobre la posición y movimiento de las partes del cuerpo entre sí. Los receptores se encuentran en los husos neuromusculares que informan sobre la longitud del músculo; los receptores de Golgi en la unión tendino-muscular a través del alargamiento pasivo o contracción activa de las fibras proporcionan el reflejo miotático para mantener la postura; los corpúsculos articulares de Ruffini, que proporcionan información sobre la posición articular, dirección y velocidad. Las sensaciones táctil y propioceptiva están estrechamente ligadas y son difíciles de separar. A diferencia de la sensación visual o auditiva, la estimulación háptica es más difícil de crear dado que sus receptores se distribuyen por todo el cuerpo y son muy sensibles y pequeños. Para poder crear las sensaciones hápticas y cinestésicas o propioceptivas, se emplean los dispositivos de realimentación táctil o de fuerza (*force feedback*).

Para la realimentación táctil se emplean dispositivos de estimulación de tipo neumática, vibrátil o eléctrica. Los dispositivos neumáticos, pueden ser a través de micro-chorros de aire, que emplean una matriz de chorros de aire, como los utilizados para la representación de letras en Braille; anillos de aire, basados en dispositivos inflables colocados en las yemas de los dedos en donde se controla la presión sobre los dedos y así simular la presencia táctil, Figura 2.13a; guantes de cápsulas de aire, que modifican la presión ejercida sobre unos tubos o cápsulas distribuidos por los dedos y la palma de la mano, estos cambian de forma estimulando la sensación táctil, como el *teletact glove*, [Stone 1991], Figura 2.13b.

En cuanto a la estimulación vibrátil, se emplean dispositivos electromagnéticos, basado en bobina móvil (micro-altavoces), o motores con excéntrica, como los empleados en algunos mandos de videojuego, otros basados en accionamiento de micro-pines, ya sea de accionamiento electromagnético, más voluminosos, de tipo piezoeléctrico, Figura 2.13c, o a través de dispositivos de memoria de forma, más compactos que emplean filamentos de aleaciones como el níquel-titanio (nitinol), que al calentarse se contraen, Figura 2.13d. La electroestimulación, inyectando pequeños pulsos eléctricos a través de electrodos sobre la piel, también se emplea para emular la sensación táctil, muy compactos y sin partes móviles, aunque altamente invasivos.

2.1. Interacción Persona-Máquina

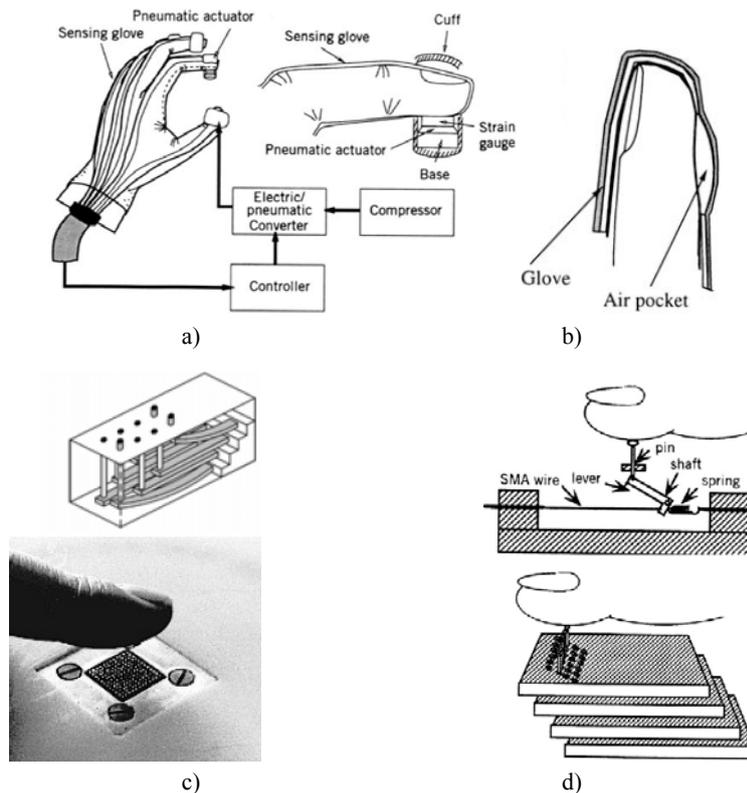


Figura 2.13. Sistemas de estimulación táctil. a) Guante de anillos neumáticos b) Guante de aire *Teletact* c) Matriz de pines con actuación piezoeléctrica d) Matriz de pines con actuación de memoria de forma.

Para la realimentación de fuerza, existen dispositivos de interfaz convencionales como ratones, *joystick* o volantes, que incorporan motores internos para poder simular un efecto de obstáculo, estos últimos empleados en videojuegos o simuladores de vuelo y en conducción virtual, Figura 2.14.

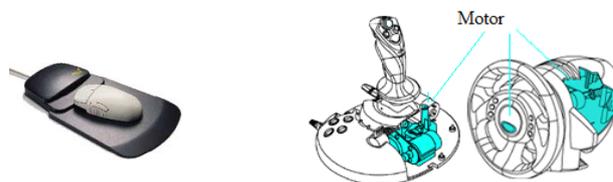


Figura 2.14. Dispositivos tipo ratón, *joystick* y volante con realimentación de fuerza.

Otro grupo de dispositivos lo conforman aquellos que incorporan entrada gestual, como los exoesqueletos o guantes virtuales. Entre estos se encuentra el *Cybergrasp* de *Immersion*, Figura 2.15a, realimenta la posición de los dedos hacia la mano mediante cables, de esta manera puede simularse la presión de un objeto, con su forma y elasticidad, un modelo similar es el *EXOS* desarrollado en el *MIT*. El sistema permite realimentar la fuerza de forma cinestésica y a la vez mide las fuerzas de los dedos para ser transmitidas al dispositivo remoto o para actuar sobre el mundo virtual. Otros modelos emplean cilindros neumáticos, como el *Rutgers Master II-ND glove*, [Bouzit et al. 2002], Figura 2.15b.

La completa realimentación cinestésica del brazo la otorgan los exoesqueletos, también denominados “brazo maestro” (*master arm*), suelen comprender los siete grados de movilidad del brazo humano y según como se disponen, pueden ser de fijación cenital, sobre pared, de escritorio o sobre la espalda. Algunos ejemplos como el *Sarcos Dexterous Arm*, de pared, Figura 2.16a; el creado por la *Southern Methodist University* de accionamiento neumático, de fijación a la espalda, o el de la *Agencia Espacial Europea*, [Schiele & Visentin 2003], de accionamiento eléctrico, Figura 2.16b.



a) Ciberglove

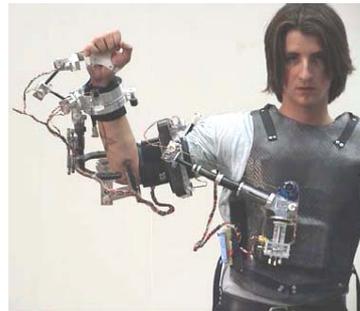


b) Rutgers Master II-ND glove

Figura 2.15. Exoesqueletos de mano.



a) Sarcos



b) ESA

Figura 2.16. Exoesqueletos de brazo maestro.

Otros dispositivos hápticos de 6 GDL lo conforman los tipo “lápiz” (*pen-based masters*). Están formados por una estructura articulada angular, en cuyo extremo se sitúa un apéndice en forma de lápiz el cual es manipulado por el operador. Un dispositivo comercial es El PHANTOM (Personal Haptic Interface Mechanism) de *Sensable Technologies*, Figura 2.17.



Figura 2.17. Dispositivo tipo-lápiz PHANTOM.

2.2. Teleoperación

2.2.1. Orígenes de la teleoperación

La teleoperación es una parte de la robótica dirigida al control remoto de un vehículo o robot manipulador. El origen técnico del dispositivo de teleoperación podría dirigirse hacia las primeras pinzas de herrero, Figura 2.18a. Este dispositivo permitía alargar la distancia de prensión de la mano a decenas de centímetros multiplicando la fuerza de prensión manteniendo tres grados de libertad en la orientación. A principios de la década de los 40, con el auge de la energía nuclear y la correspondiente manipulación

2.2. Teleoperación

de materiales radiactivos se desarrollaron sofisticadas pinzas para manipular los materiales a través de las gruesas paredes con la ayuda de espejos, Figura 2.18b.

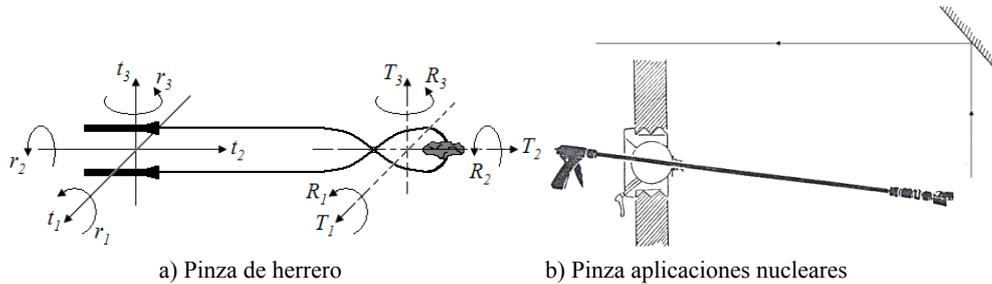
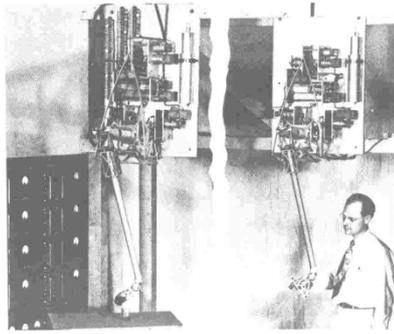


Figura 2.18. Concepto de teleoperación a través de pinzas.

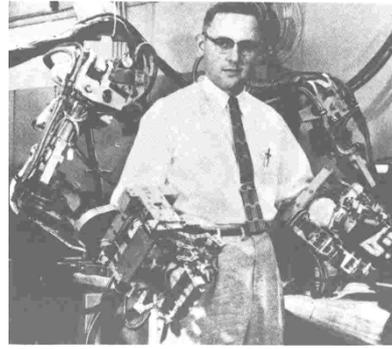
En el año 1948 se construyó el primer manipulador Maestro-Escavo por Ray-Goertz de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, en el Argonne National Laboratory. Se trataba de un dispositivo llamado “Esclavo” que respondía a otro dispositivo de control llamado “Maestro”. La necesidad del manipulador Maestro-Escavo era para la protección de los trabajadores de la radiación y que permitiese la manipulación de materiales con precisión. Se trata de un *control bilateral* en donde las fuerzas en el esclavo final deben ser reflejadas en el maestro, del mismo modo los desplazamientos producidos en el esclavo también deben de producirse en el maestro, no obstante es un control bilateral muy rudimentario. En un principio las uniones entre ambos elementos se realizaban mediante estructuras mecánicas y cables. En 1954 se desarrollaron servomecanismos hidráulicos y eléctricos donde se podían controlar los esfuerzos y los movimientos amplificando las señales y dotando de escalabilidad al sistema, en donde el control bilateral era más eficiente, Figura 2.19a.

A partir de 1954, (Argonne) se desarrollaron los primeros telemanipuladores móviles, maestro-esclavo sobre vehículo con TV. En 1958, Ralph Mosher de General Electric construyó el primer telemanipulador con realimentación de fuerza electrohidráulica con una pinzas de dos dedos articulados, Figura 2.19b. A partir de los 60, en el mismo laboratorio de Argonne, se añadieron circuitos cerrados de TV mejorando así la realimentación del entorno a manipular. En 1965, Carl Flatau (Brookhaven Laboratory), utilizó por primera vez sensores de fuerza en un prototipo de brazo telemanipulador con motores DC. K. Wilson, 1976, desarrolla un servobrazo con realimentación de fuerza hidráulica para funcionamiento con agua.

Paralelamente, General Mills construye un vehículo blindado para mantenimiento de reactores nucleares de mando unilateral. Los primeros telemanipuladores mecánicos europeos se construyeron en Francia en 1956 por Pesanti y Cherel del CEA en Saclay, de accionamiento neumático por Germond en 1959 y de brazo hidráulico por la sociedad Som. En 1958 Cherel y Valentín construyeron un manipulador de transmisión mecánico magnético. Jean Vertut diseñó un telemanipulador en 1965 que se fabricó industrialmente del que se vendieron 1000 unidades, del cual evolucionaron posteriores modelos. Paralelamente, el equipo Köhler en Alemania realizó un telemanipulador eléctrico. Algunos fueron destinados a tareas de mantenimiento para aceleradores de partículas. Otro gran telemanipulador construido en la década de los 70 fue el *Piade* diseñado para desmantelamiento de centrales nucleares.



a) Manipulador maestro-esclavo (Argonne)



b) Manipulador de General Electric

Figura 2.19. Primeros manipuladores maestro esclavo.

2.2.2. Conceptos y definiciones

Se define entonces un *telemanipulador* como un dispositivo que extiende la habilidad de manipulación de una persona a un lugar remoto. Inicialmente pueden diferenciarse tres niveles:

- Telemanipulación, todo el control realizado por la persona.
- Telemanipulación asistida, control realizado por la persona, pero el ordenador supervisa algunos aspectos de la operación.
- Telerrobótica, el robot realiza ciertas operaciones de forma autónoma o programada.

Con esto, para diferenciar un robot y un telemanipulador, tenemos que un telemanipulador es un dispositivo que combina persona y máquina, por otro lado un robot no se considera un sistema persona-máquina en condiciones normales, la interacción de la persona se limita a la programación y mantenimiento y al inicio y parada de la actividad del robot. Un robot ejecuta una serie de comandos almacenados por el programador, un telemanipulador actúa según las señales que le proporciona una persona en tiempo real. Los robots poseen una flexibilidad limitada, son incapaces de responder a un entorno más allá del alcance de su programación y de desarrollar nuevas estrategias en tiempo real. El funcionamiento de los telemanipuladores depende de la persona, su creatividad e inteligencia, permitiéndole responder a un entorno cambiante y desarrollando, si es preciso, nuevas estrategias. Puede decirse que un mismo brazo robot puede trabajar en modo teleoperado o realizar tareas automáticas.

Un tipo de telemanipulador es el *telerobot*, en este el operador puede teleoperarlo hasta unas determinadas circunstancias y a partir de ese instante el telerobot, mediante una serie de tareas objetivo ha de desenvolverse por él mismo, hasta que de nuevo el teleoperador toma el control. Los ejemplos más claros son en la telerrobótica espacial, como la misión a Marte del Pathfinder.

Otros conceptos relacionados con la teleoperación son la *Telepropiocepción* y la *Telecinestesia*. Los conceptos derivan respectivamente de la propiocepción y la cinestesia. En los humanos, la propiocepción es la percepción sobre la posición y movimiento de los miembros, percibido a través de los receptores situados en músculos, articulaciones, tendones y piel. La información propioceptiva relativa al movimiento se llama cinestesia o kinestesia. De aquí que la telepropiocepción es la sensación del operador de mantener la posición del dispositivo teleoperado y el entorno remoto en relación a su cuerpo, es decir que el operador perciba la posición del telemanipulador como si estuviese en su lugar. La telecinestesia es la habilidad del operador de identificar los movimientos dinámicos del dispositivo teleoperado, se añade velocidad y sensación de fuerza a la telepropiocepción. Los problemas de la

2.2. Teleoperación

telepropriocepción y la telecinestesia son perder el seguimiento de la posición y orientación relativa del manipulador remoto y la velocidad con que se está moviendo y en qué dirección. Otros problemas son debidos a observar el manipulador remoto a través de un video sin una buena percepción de la profundidad y a no tener una correspondencia maestro-esclavo de la posición, como por ejemplo cuando se usa un *joystick*. Como posibles soluciones a esto sería disponer de múltiples vistas, utilizar sistemas de visión 3D, o generar distintos tipos de imágenes por ordenador para completar la información, pudiendo llegar a la realidad virtual.

También se deben distinguir los conceptos de *telepresencia* y *presencia virtual*. En la telepresencia el operador tiene la sensación de estar en tiempo real en otro lugar diferente al que está y puede interactuar con el lugar remoto o virtual. La presencia virtual es igual que la telepresencia excepto que la información sensorial se crea completamente por ordenador. Con una tecnología suficientemente desarrollada una persona podría no distinguir entre presencia actual, telepresencia y presencia virtual.

Cabe distinguir adicionalmente entre realidad virtual y *realidad aumentada*, en donde en la realidad virtual toda la información es creada por ordenador, la persona está inmersa en un entorno virtual, la información visual y demás informaciones sensoriales son controladas por el sistema. Por otro lado, en un sistema de realidad aumentada se aumenta la información del entorno real proporcionando al usuario la sensación de presencia en ese entorno. Las imágenes virtuales se mezclan con las imágenes reales para crear una visión aumentada. En [Milgram & Kishino 1994] se describe una clasificación para relacionar realidad virtual y realidad aumentada, definiendo el continuo “realidad-virtualidad” (Figura 2.20). Los mundos real y virtual estarían en extremos opuestos y en el medio quedaría lo que sería la “realidad mezclada”. Cerca del mundo real tendríamos la realidad aumentada, la principal percepción vendría del mundo real que sería aumentada con la ayuda del ordenador. La “virtualidad aumentada” partiría de un mundo creado por ordenador al que se le añade información directa del entorno, para que se aproxime a la realidad.

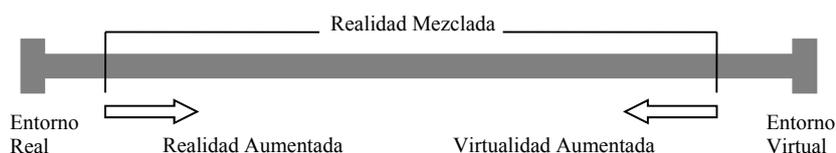


Figura 2.20. Continuo realidad-virtualidad.

2.2.3. Tipos de control en Teleoperación

En teleoperación el elemento de control es la persona u operador. Pueden distinguirse cuatro tipos de control:

- Control manual
- Control manual asistido
- Control semiautónomo
- Control automático

En el control manual no existe ningún tipo de control asistido por computador, las decisiones relativas al control dependerán exclusivamente del operador. La Figura 2.21 muestra un esquema del control teleoperado totalmente manual.

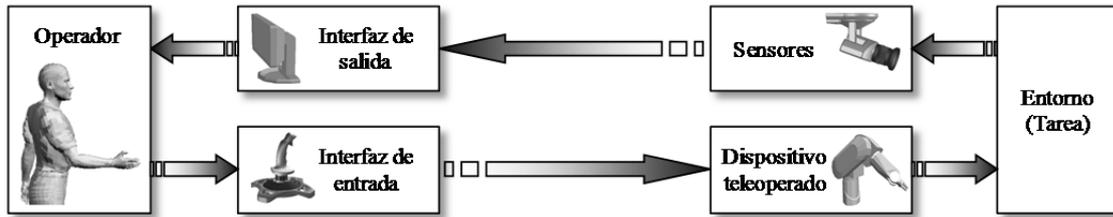


Figura 2.21. Control manual.

En el control manual puede existir un ordenador que asista en los lazos de realimentación o de acción de control, Figura 2.22, pero las decisiones continúan siendo tomadas por el operador, la existencia del ordenador se limitará a transmisión de datos y coordinar transformaciones entre el operador y la tarea remota.

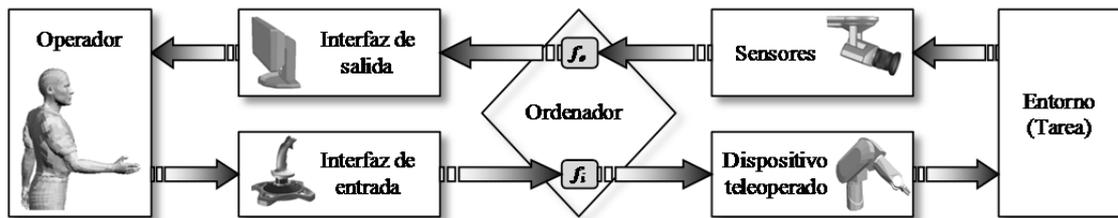


Figura 2.22. Control manual asistido por ordenador.

En el control supervisado, una fracción del control es realizada por el ordenador, mediante control en lazo cerrado de los parámetros de fuerza y posición, pero el operador continúa tomando las decisiones, solo que el ordenador puede decidir si una determinada tarea puede llevarse o no a cabo impidiendo al operador realizar ciertos movimientos, Figura 2.23.

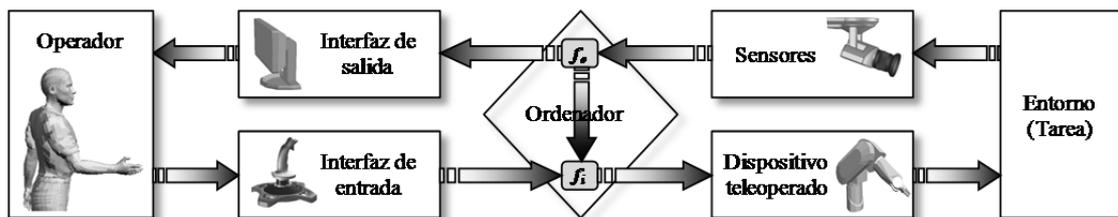


Figura 2.23. Control supervisado.

Las funciones del supervisor serían las de planificar la actuación, indicar o programar en el ordenador el plan a ejecutar, monitorizar las acciones para asegurar que todo funciona según lo planeado, intervenir en su caso para tomar el control o interrumpir en caso de emergencias, así como aprender sobre el funcionamiento del proceso para modificar las acciones de control posteriormente.

El concepto de control supervisado originado por [Ferrell & Sheridan 1967] deriva el concepto de control semiautónomo. En el control semiautónomo se pretende hacer llegar, al dispositivo teleoperado que realiza la tarea, las órdenes provenientes del operador, control manual, y de un sistema autónomo o

2.2. Teleoperación

función autónoma que controlaría el proceso siguiendo un determinado criterio independiente de las órdenes manuales. El control semiautónomo puede clasificarse en dos categorías: tipo serie y tipo paralelo, [Yokokohji et al. 1992].

En el control tipo serie, el modo manual y el modo autónomo son conmutados en serie, es decir no coexisten simultáneamente. El concepto más general de control supervisado entraría dentro de esta categoría.

En el control tipo paralelo, ambos controles manual y autónomo funcionan en paralelo. En este tipo existen dos modos, el modo combinado y el modo compartido.

En el modo combinado, las entradas de control provenientes de control manual y del control autónomo son mezcladas de alguna manera. Este modo será utilizado cuando la función autónoma modifica los comandos provenientes del operador o cuando el operador desea modificar el movimiento proveniente de las funciones autónomas, como es el caso de evitar obstáculos.

En el control paralelo en modo compartido la realización de la tarea es compartida entre el operador o control manual y el sistema autónomo o control autónomo. Imaginemos que se desea teleoperar el llenado de un recipiente con un fluido peligroso, en el control compartido las componentes de orientación del recipiente serían controladas por el control autónomo, mientras que la posición del recipiente sería gobernada por el operador.

En el control totalmente automático, que ya no sería teleoperación, el operador puede observar el proceso pero no puede influir en él, su intervención queda supeditada al establecimiento inicial de la estrategia de control que el ordenador deberá seguir. Como se observa en la Figura 2.24 el operador solo puede visualizar si el proceso evoluciona correctamente, el ordenador tomará las decisiones.

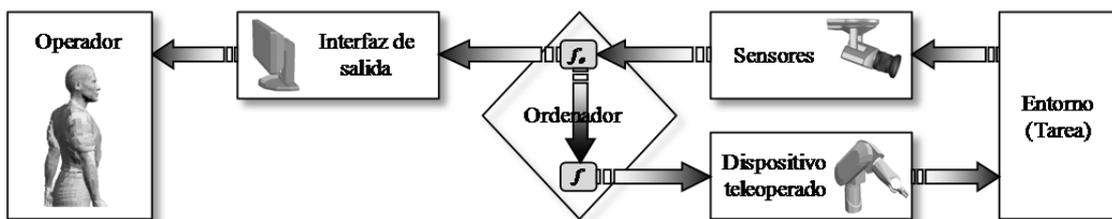


Figura 2.24. Control totalmente automático.

La Figura 2.25 resume los diferentes tipos de control y el grado de responsabilidad que tiene el operador y el ordenador o la máquina de forma general cuando el ordenador no existe.

TIPO DE CONTROL	TAREA OPERADOR	TAREA MAQUINA
SEMIAUTONOMO	CONTROL Y MONITORIZACION	TAREAS DE CONTROL
MANUAL ASISTIDO	CONTROL E INDICACION	MODIFICACION ENTRADA/SALIDA
MANUAL	CONTROL	COMUNICACION

Entre las columnas de TAREA OPERADOR y TAREA MAQUINA, hay una flecha vertical que apunta hacia abajo etiquetada como 'Responsabilidad Operador' y una flecha vertical que apunta hacia arriba etiquetada como 'Responsabilidad Máquina'.

Figura 2.25. Comparación entre los tipos de control y las tareas del operador y máquina.

2.2.4. Limitaciones de la teleoperación

La localización remota del dispositivo telemanipulador supone una pérdida de información visual, táctil, auditiva y de otras magnitudes respecto a las que tendría el operador si estuviese en el lugar propio de la tarea. La captación de dicha información con los correspondientes sensores y su posterior interpretación no será perfecta y supondrá una pérdida de información. Generalmente la información visual es fácil de adquirir y representar con ayuda de cámaras, pero más difícil resulta la información de fuerza o táctil. No obstante, como se muestra en [Sheridan 1992], en la mayoría de los casos en teleoperación es vital la realimentación visual, de tal manera que en presencia de realimentación de fuerza una disminución de la visibilidad tendrá menor efecto negativo en la eficacia de la teleoperación que si solo existe la información visual, [Maximino & Sheridan 1994]. Inicialmente la imagen monocular era la más extendida por sencillez y disponibilidad en el uso de las tareas de teleoperación, no obstante presenta inconvenientes como la falta de información de profundidad, aunque pueden obtenerse detalles de profundidad a partir de información sobre sombras, interposición de luz, perspectiva o comparación de tamaño en objetos familiares, [Sedgwick 1986]. Por ello, la imagen binocular es importante para la localización de los objetos en el espacio y su identificación.

El control maestro-esclavo manual se ve también limitado por el retardo de propagación entre la señal de mano y la posterior respuesta visual de realimentación. El control en lazo cerrado se vuelve inestable cuando el retardo es mayor que la mitad del periodo de muestreo. Esta inestabilidad puede eliminarse, cuando el operador está en el lazo cerrado de control, con la estrategia de “mueve y espera” donde el operador realiza un pequeño movimiento en lazo abierto y espera la información correspondiente a la nueva posición del robot. Las causas del retardo se deben a la distancia entre maestro y esclavo, velocidad de comunicación y procesado de la información. En algunas aplicaciones a veces no es posible el uso de cables, como en robótica submarina, [Dunbar et al. 1990], donde el retardo aumenta al utilizar ultrasonidos, infrasonidos u otros medios de bajo ancho de banda.

En el control maestro-esclavo, el control manual del manipulador esclavo requiere en muchos casos un cierto grado de entrenamiento para lograr realizar las tareas eficientemente, [Mckinnon & King 1988]. La inercia o restricciones impuestas en la aceleración del esclavo suponen una lenta respuesta que se suma al problema del retardo, lo que lleva al operador a recurrir a la estrategia de “mueve y espera”. En estos casos el operador inmerso continuamente en el lazo de control soporta una tarea pesada y monótona, que lleva por otra parte a la inestabilidad del sistema.

La tarea de evitar obstáculos es necesaria para evitar dañar el manipulador esclavo y los objetos del entorno de trabajo. Esto puede ocurrir cuando el manipulador debe desplazarse a gran velocidad y deben aplicarse restricciones en el movimiento, como se muestra en el trabajo sobre seguridad en la teleoperación, [Sturges 1991]. En tareas donde el manipulador está en contacto con otros objetos se requiere realimentación de fuerza o acomodación para controlar el esfuerzo.

Errores causados por el operador en el control manual por su condición humana o por falta de realimentación provocan errores de posicionamiento del manipulador, pérdida del objeto agarrado, errores de contacto o colisiones con otros objetos.

2.2. Teleoperación

Estas limitaciones de la teleoperación manual pueden subsanarse con la ayuda de ciertas funciones de supervisión que permiten mantener el control de la tarea a alto nivel por el operador, mientras que un sistema autónomo se encarga de niveles inferiores de control del manipulador. Este control permitirá que:

- La eficacia del operador se ve menos afectada por el retardo o ancho de banda en la comunicación.
- Se reduce la carga de percibir múltiples datos e información diversa de bajo nivel por parte del operador, pudiendo así dedicarse a tareas de mayor nivel.
- El manipulador esclavo se ve menos limitado por las restricciones de movimiento del operador.
- Se requiere menor ancho de banda en la comunicación entre maestro y esclavo al simplificar la comunicación pudiéndose aumentar la eficiencia y reducir su coste.
- Se reduce la fatiga del operador y la necesidad de la estrategia “mueve y espera” aumentando así la seguridad de la teleoperación.

3. Factor Humano

Este capítulo trata del concepto de los *Factores Humanos*: características físicas o psíquicas del comportamiento de las personas y propias de ellas que influyen en el funcionamiento de las máquinas o sistemas. Se tratarán las principales fuentes de imprecisión inherentes de las personas como el temblor fisiológico y la percepción del tiempo y el espacio. Posteriormente se analizará uno de los modelos más empleados en los factores humanos como es La Ley de Fitts y se analizarán algunos modelos generales en que la persona forma parte del lazo de control.

3.1. Imprecisión en la Interacción Persona-Máquina

La caracterización de un método de ayuda a la teleoperación viene condicionada por los factores que introducen imprecisión o incertidumbre en el proceso de teleoperación. Esta imprecisión viene determinada por un lado por el propio sistema de teleoperación, y por otro lado por la imprecisión de la persona que actúa de operador. A continuación se resumen los elementos de imprecisión que pueden intervenir en mayor medida en el proceso de teleoperación en ambos casos.

- Imprecisión del sistema:
 - Resolución del dispositivo interfaz
 - Histéresis del dispositivo interfaz
 - Retardo de la orden de teleoperación
 - Retardo de la realimentación al operador
 - Repetibilidad del robot teleoperado
- Imprecisión del operador:
 - Temblor fisiológico
 - Percepción de la distancia
 - Percepción del tiempo
 - Fatiga, distracción,...

Estos factores intervienen en el proceso de teleoperación como muestra la Figura 3.1, en donde todos los elementos que introducen imprecisión o indeterminación en el sistema se intercalan en el lazo de control de la teleoperación.

3.1. Imprecisión en la Interacción Persona-Máquina

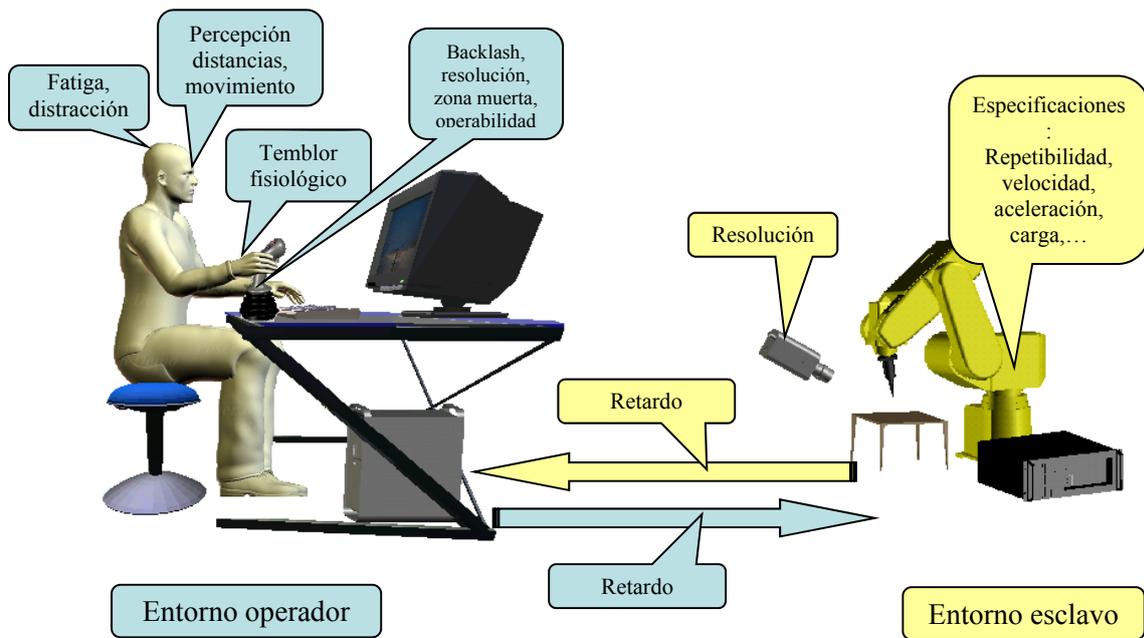


Figura 3.1. Esquema conceptual de los elementos de imprecisión en la teleoperación.

De forma general los factores de imprecisión introducidos por el sistema, pueden ser cuantificados objetivamente, ya sea a través de las especificaciones de los dispositivos, o mediante una medición sistemática, y sus valores permanecerán prácticamente constantes durante la vida útil de dichos dispositivos. Por otro lado, la imprecisión introducida por el operador será fuertemente dependiente de cada individuo y los valores pueden variar con el tiempo. El sistema de ayuda a la teleoperación deberá compensar estas dependencias y minimizar el impacto de las fuentes de imprecisión.

Las técnicas de asistencia a la teleoperación que se desarrollan en este estudio se han ensayado utilizando dispositivos de interfaz convencional de tipo puntero. Distinguimos los dispositivos directos, en donde el operador no necesita visualizar la posición del cursor (pantalla táctil, cursor), ya que es el cursor el que es movido directamente por el operador. Por otro lado, en los dispositivos indirectos, el operador no señala el objeto deseado, sino que se utiliza el dispositivo para mover el cursor sobre el objeto deseado (*joystick*, ratón, *trackball*, tableta digitalizadora, Polhemus[®]). Son estos segundos, los de tipo indirecto, sobre los que resulta viable el uso de modificaciones en las relaciones de movimiento del operador con el dispositivo y el movimiento final del dispositivo teleoperado.

Los llamados *modelos psicomotores* describen la manera en que las personas planifican y ejecutan los movimientos en el ámbito de operación con dispositivos de puntero. Algunos de estos modelos son el SOS (Stochastic Optimized Submovement) [Meyer et al. 1990] en donde se define la acción de señalización como una secuencia de submovimientos por los cuales se predice el desplazamiento y la precisión. Se basa en tres fases de movimiento, las cuales consumen un determinado tiempo:

- La fase de iniciación, en donde se selecciona el objetivo y se planifica el movimiento espacial (30 ms).
- La Fase de ejecución, basada en una secuencia de movimientos y pausas (331-628 ms).
- La Fase de verificación, el tiempo se mide al final del movimiento del ratón y la selección o "clic" (157-227 ms).

El estudio de estos modelos permite mejorar la eficacia en la utilización de los dispositivos de puntero. Se buscan “funciones de transferencia” entre los movimientos realizados por la persona mediante el dispositivo puntero y el movimiento del cursor en la pantalla. En general estas funciones son lineales, relacionando los movimientos mediante un factor de “ganancia”, pero también se introducen técnicas similares a las empleadas en teleoperación, para así facilitar el movimiento del cursor en las inmediaciones de los objetos “clicables”. Para esto se emplean funciones que modifican la velocidad en el acercamiento a dichos objetos, con el objetivo de reducir el tiempo de selección y hacer más ergonómica o más comfortable las tareas.

La Ley de Fitts, que será tratada posteriormente, es un modelo psicomotor ampliamente utilizado siendo también tenido en cuenta en la evaluación de la ergonomía como recoge la norma ISO 9241-9.

3.1.1. Temblor fisiológico

El temblor fisiológico es inherente a todos los movimientos de la persona, puede definirse como todo movimiento involuntario rítmico y aparentemente sinusoidal. El temblor fisiológico es un fenómeno presente tanto en individuos enfermos como sanos. Puede medirse esta oscilación en un rango en torno a los 10Hz, aunque es el resultado de la composición de distintas frecuencias las cuales pueden obtenerse a través de un EEG.

El origen del temblor fisiológico parte de diferentes fuentes [McAuley & Mardsen 2000], [Kulisevsky & Grau 2003]: propagación del impulso cardiaco, descargas de las motoneuronas espinales, sincronización de las respuestas reflejas de los husos neuromusculares, efectos de neurotransmisores circulantes por la sangre periférica, influencias de osciladores centrales supraespinales o características elásticas musculares y ligamentosas. La frecuencia de este tipo de temblor varía entre 8 y 12 Hz, y su amplitud está relacionada con la fuerza muscular desarrollada.

Por definición, el temblor fisiológico es subclínico, de forma que no genera problemas funcionales, pero los límites con el llamado temblor fisiológico "exagerado" y con el temblor esencial son bastante discutibles y a veces difíciles de establecer. Algunas situaciones fisiológicas, como la ansiedad y la fatiga, o patológicas, como el hipertiroidismo o la abstinencia alcohólica, producen un aumento de la amplitud del temblor fisiológico, dando lugar al temblor exagerado, pero sin modificar su frecuencia, que se mantiene entre 8 y 12 Hz. El temblor esencial se presenta al mantener ciertas actitudes. Se pone de manifiesto por ejemplo en las pruebas de enfrentamiento de los índices o de las manos extendidas. Desaparece en reposo y disminuye al realizar un movimiento con desplazamiento articular. Aumenta al final del movimiento, por ejemplo, al final de la prueba dedo-nariz (tocar la nariz partiendo del brazo extendido). Puede afectar a cualquier parte del cuerpo; las manos y la cabeza son las localizaciones más frecuentes, seguidas de las piernas y la voz. Es frecuente un inicio unilateral, pero a lo largo de la evolución casi siempre se hace bilateral. No obstante, es frecuente que se mantenga una cierta asimetría, que no tiene relación con la dominancia manual.

El temblor suele clasificarse como “de reposo” o “de acción”. El primero se presenta cuando el individuo no está realizando ninguna actividad motora voluntaria, pero se encuentra despierto y conserva el tono muscular permanente de reposo. El temblor desaparece durante el periodo de sueño. Es el temblor típico de la enfermedad de Parkinson. El temblor de acción se presenta al contraer voluntariamente uno o varios

3.1. Imprecisión en la Interacción Persona-Máquina

grupos musculares para mantener una postura o actitud (temblor postural o de actitud) o para desplazar una o varias articulaciones (temblor cinético). Los temblores posturales más frecuentes son el temblor esencial y el temblor fisiológico acentuado.

Independientemente de la solución médico-farmacológica del temblor ya sea patológico o no, existen trabajos que pretenden cancelarlo con el uso de dispositivos y métodos que lo modelizan y compensan. La medida de uno de los métodos de cuantificación más empleados reside en el análisis espectral basado en FFT, en [Riviere & Thakor 1996] se emplea un cancelador de ruido adaptativo modelizando el temblor con un retardo de fase cero. Mediante un *Weighted-frequency Fourier Linear Combiner*¹ se puede suprimir “on-line” el temblor patológico en el uso de dispositivos tipo ratón o lápiz digitalizador en escritura manual, así como realizar el modelizado “off-line” de dicho temblor para uso clínico. Así mismo, su implementación a través de un dispositivo piezoeléctrico permite la cancelación del temblor fisiológico en microcirugía manual.

Otro método para la cancelación del temblor es el empleo de redes neuronales. En [Riviere & Khosla 1997] se emplea una arquitectura de red neuronal en cascada entrenada con un filtro de Kalman extendido permitiendo discriminar entre error y otros componentes del movimiento de la mano reduciendo en un 50% el error *rms*. En la misma línea los autores en [Jakubowski, Osowski & Chwaleba 2001] utilizan métodos estadísticos de orden superior (*Hight Order Statistics*) de la distribución de las medidas en potencia a lo largo de las frecuencias y un perceptrón multicapa como clasificador neuronal, permitiendo separar con un error inferior al 4% los temblores patológicos (esencial y Parkinson) del temblor fisiológico.

Algunos experimentos para obtener parámetros de desviación en teleoperación como los realizados en [Riviere & Thakor 1994] el seguimiento de una línea vertical arriba-abajo emulando un movimiento sinusoidal, o la realización de una circunferencia, pueden dar una medida del grado de linealidad del movimiento en función de la frecuencia de las órdenes del operador. Para medidas muy precisas se emplean dispositivos inerciales de 6GDL como el empleado en [Singh & Riviere 2002] para la medida del temblor fisiológico en cirujanos durante microcirugía retinal, ver Figura 3.2.

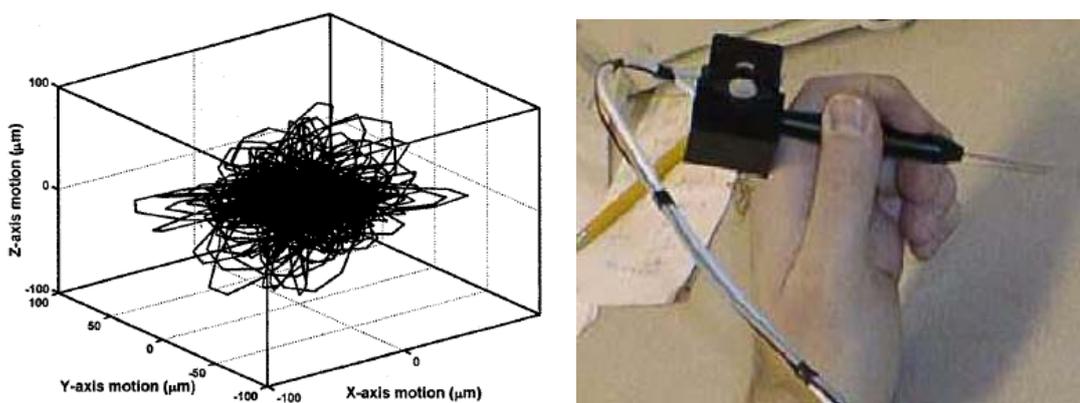


Figura 3.2. Medida del temblor fisiológico en microcirugía.

¹ El *WFLC* es un algoritmo adaptativo que se ajusta a una entrada periódica utilizando un modelo sinusoidal, estimando su frecuencia, amplitud y fase.

Otros estudios [McAuley et al. 1999] proporcionan una medida que relaciona los movimientos de ojos con el seguimiento de una señal sinusoidal con el dedo, realizando un análisis de coherencia de los movimientos. El movimiento de los ojos es medido mediante reflexión infrarroja mientras el ojo sigue una señal sinusoidal en un monitor, midiendo a su vez el movimiento de la cabeza con acelerómetros para su compensación, y el movimiento del dedo índice es medido mediante un goniómetro. Estos estudios mostraron dos rangos de frecuencias acopladas, una en el rango de 3Hz debida al efecto de la realimentación visual, y otra en torno a los 10Hz, independiente de la realimentación visual y originada por la oscilación motora.

3.1.2. Percepción de la distancia

Otro fenómeno que afecta a la precisión del operador reside en la percepción de la distancia. El cambio de escala y la disposición del entorno teleoperado respecto a la información que recibe el operador, influyen en la manera en cómo éste interpreta la distancia percibida con respecto a la real. Al igual que el temblor fisiológico, la percepción de la distancia también es una medida subjetiva de cada individuo, de cómo éste percibe las distancias, profundidades y formas respecto a los valores físicos o reales. En este sentido, no percibimos de igual modo la altura de un objeto colocado en posición horizontal que en vertical, apreciamos peor las proporciones a escalas muy pequeñas o en perspectiva, así como si aparecen proyectadas sobre un plano o si por el contrario se aprecian en 3D.

El ser humano utiliza dos tipos de indicadores diferentes para poder determinar la distancia y profundidad de los objetos, que son los indicadores binoculares y los monoculares. Por un lado, los indicadores binoculares, es decir basados en la visión binocular humana, proporcionan una información más precisa de la distancia, se subdividen en la *disparidad retiniana*, responsable de la percepción de la profundidad debida a la fusión de las imágenes percibidas por cada ojo, y la *convergencia visual*, en donde la dirección de cada ojo tiende a converger en un solo punto, ésta permite calcular la distancia. Por otro lado, los indicadores monoculares, son los que dependen de la visión de un solo ojo, como son la interposición, un objeto se interpone sobre otro dando información de profundidad; el sombreado y textura, en donde las luces y las sombras proporcionan información sobre la distancia y la dimensión del objeto; el paralaje del movimiento, en donde las posiciones relativas de los objetos cambian a consecuencia del movimiento; el gradiente de textura, donde los objetos más cercanos aparecen más espaciados; la perspectiva, que proporciona información de profundidad; y el tamaño acostumbrado, que proporciona información cuando estamos habituados a las dimensiones de un determinado objeto.

Una de las características de la visión binocular humana puede ser modelizada a través de un experimento en donde una serie de puntos dispuestos en línea recta a la altura de los ojos son vistos por el sujeto como una curva a una determinada distancia (x_A en la Figura 3.3a). Pero cuando los puntos se disponen en una curva convexa a una distancia mayor que x_A , o cuando los puntos se disponen en una curva cóncava a una distancia menor que x_A , se observan subjetivamente como una línea recta, estas curvas son denominadas horópteros. Cada persona posee una distribución de estas curvas particular. Si la distribución de puntos de estas curvas fuese perfectamente simétrica tendríamos el llamado horóptero teórico o circunferencia de Vieth-Müller. Figura 3.3b.

3.1. Imprecisión en la Interacción Persona-Máquina

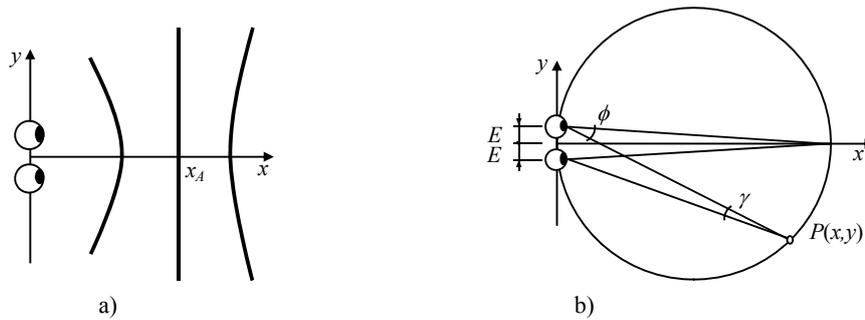


Figura 3.3. Curvas del horóptero. a) Experimentales b) Horóptero teórico

Puede obtenerse un modelo de la percepción espacial basada en el horóptero, de un punto $P(x,y)$, Figura 3.3b:

$$x = \frac{E}{\sin \gamma} (\cos \gamma + \cos(2\phi)) \quad (3.1)$$

$$y = \frac{E}{\sin \gamma} \sin(2\phi) \quad (3.2)$$

siendo $2E$ la distancia entre ambos ojos, γ el ángulo de convergencia y ϕ la latitud bipolar obtenida del horóptero. A partir de este modelo, los autores en [Maeda & Tachi 1991] utilizan un método de aprendizaje basado en redes neuronales para relacionar los ángulos γ, ϕ con las coordenadas x, y .

Tener un modelo o una medida de esta percepción de la distancia, es un factor a considerar con la idea de mejorar las tareas de teleoperación. En este sentido, existen estudios que proporcionan estos modelos, como los que se llevan a cabo en [Wu, Tsukamoto & Kitazawa 2000], donde el experimento se realiza utilizando información visual y táctil. El modelo obtenido de la distancia percibida (PD) con respecto a la real (AD) sigue una ley del tipo:

$$PD = k (AD)^n \quad (3.3)$$

Se observa que con la ayuda de la información táctil la distancia percibida es mayor que la real y menor en el caso de no usar dicha información táctil. También llevaron a cabo un experimento similar aplicado al movimiento de las extremidades inferiores.

Debido a la compleja naturaleza del funcionamiento de la percepción humana se hace necesario recurrir a la experimentación para la obtención de índices, relaciones y modelos que proporcionen una idea de la interpretación de la información de las variables espaciales y de su posterior acción en movimientos consecuentes para llevar a cabo acciones, como las de teleoperación. Algunos experimentos en esta dirección, como los que se proponen en [Katano & Takahashi 1999], proporcionan índices que relacionan las discrepancias entre las informaciones visuales recibidas y reproducidas junto con las propioceptivas. En estas últimas los experimentos se realizan con sujetos con los ojos vendados para que indiquen la posición de determinados puntos utilizando su propia percepción de la posición de sus articulaciones. Los resultados obtenidos muestran diferencias según los sistemas de coordenadas utilizados como referencia.

3.1.3. Flujo visual

El flujo visual puede definirse como la cantidad de información visual que pasa delante de los ojos por unidad de tiempo. Existen estudios sobre la percepción visual que concluyen que el ojo humano integra

las señales durante un periodo de 120-125 ms [Card et al. 1987][Burr 1980][Zagier 1997]. Así una imagen que se desplaza permaneciendo visible por un tiempo inferior a 125 ms aparecerá borrosa, si bien este tiempo puede ser algo menor debido al seguimiento del ojo [Eckert & Buchsbaum 1993]. Seguir objetos en movimiento con los ojos reduce la velocidad relativa de la imagen sobre la retina. Según [Morgan & Benton 1989] una imagen puede desplazarse sobre la retina a unos 3 grados por segundo sin perder agudeza. La velocidad de visualización puede aumentarse mediante movimientos oculares conjugados [Missal & Keller 2002]. Los movimientos oculares conjugados pueden ser de seguimiento o sacádicos. Los movimientos de seguimiento (o persecución) suceden cuando el objeto visualizado se mueve a menos de 100 grados por segundo [Krauzlis & Stone 1999], los ojos siguen el movimiento del objeto reduciéndose así la velocidad relativa sobre la retina. En el movimiento sacádico se crea un rápido desplazamiento del eje visual entre diferentes posiciones. Dado que no existe realimentación visual para guiar la orientación de los ojos durante el movimiento, la velocidad puede ser mucho mayor, hasta 1000 grados por segundo, aunque penalizándose la agudeza visual.

El procesamiento preatentivo permite a las personas procesar de forma automática la organización del campo visual. El procesamiento preatentivo de la información visual se realiza automáticamente sobre todo el campo visual, detectando características básicas de los objetos, como color, contraste, curvatura o tamaño. Estas características se extraen de la pantalla en el sistema preatentivo y posteriormente se fusionan con el sistema de atención focalizada dando lugar a objetos coherentes. El procesamiento preatentivo se realiza rápidamente y en paralelo sin necesidad de atención focalizada [Treisman, 1986]. Las tareas que se consideran preatentivas pueden realizarse en menos de 200 ms [Healey et al. 1996], esto es debido a que los ojos tardan unos 200 ms en iniciar su movimiento. Una técnica que aprovecha la ventaja de la visión preatentiva es la *representación visual rápida en serie* (RSVP: Rapid Serial Visual Presentation) en donde palabras o imágenes se muestran en la pantalla de forma secuencial. Los objetos en RVSP pueden ser perceptibles si son visibles entre 200-400 ms [Spence 2002], aunque las personas tienen la habilidad de reconocer la presencia de una imagen objetivo en menos de 100ms [Healey et al. 1996].

3.1.4. Percepción del tiempo y del movimiento

De la Figura 3.1 observamos como interviene el operador en lazo de realimentación de la teleoperación, es un claro ejemplo del concepto “human in the loop”. El operador en el lazo de control también introduce retardos que intervienen en la estabilidad y controlabilidad del sistema. Por otro lado, los retardos producidos por el sistema en la transmisión y realimentación de la información deben ser procesados e interpretados por el operador para llevar a cabo, en definitiva, el posicionamiento correcto y deseado del dispositivo teleoperado. La percepción del tiempo no es una variable que pueda ser “sentida” directamente por la persona a diferencia del resto de los sentidos. El umbral temporal, o mínimo tiempo que la persona puede diferenciar entre dos eventos, puede ser medido en función de los sentidos utilizados para percibir el estímulo. En el caso de un estímulo auditivo se encontraría entorno a los 2 ms, para un estímulo táctil sobre los 30 ms, y un estímulo visual en torno a los 40 ms.

El concepto de “presente psicológico” se define como el intervalo de tiempo que se percibe como presente cuando un determinado fenómeno ocurre continuamente, distintos modelos se describen en [Ando, Lee & Hashimoto 1999]. Existen modelos basados en procesamiento sensorial, en donde de alguna manera las personas poseen un “reloj interno”, ya sea en forma de pulsos internos o en forma de

3.2. La Ley de Fitts

“cuantos de tiempo” como proponen otros autores, estos modelos permiten el computo del tiempo mediante la acumulación de estos pulsos.

Existen modelos de procesamiento cognitivo en donde el paso del tiempo viene dado de alguna manera por la acumulación de procesos cognitivos provocados por los estímulos recibidos. Por otro lado los modelos integrativos aúnan las características de los dos modelos anteriores. Los autores definen tres modos de operación dependiendo del retardo de la acumulación en la teleoperación: por un lado tendríamos el modo de operación en tiempo real, en donde el retardo de tiempo está entre 0 y pocos milisegundos, el operador actúa como si de un sistema totalmente continuo se tratara; en segundo lugar estaría el modo de operación de retardo perceptivo, con retardos hasta algunas décimas de segundo, en este modo el operador percibe el retardo y adaptándose a él actúa prediciendo el movimiento futuro dentro de dicho retardo, por ejemplo dando una orden de posición en donde deberá posicionarse transcurrido el tiempo correspondiente a dicho retardo. Esta distancia d_p puede ser escrita como:

$$d_p = v_o \cdot t_p \quad (3.4)$$

donde v_o es la velocidad del objeto teleoperado y t_p el retardo de tiempo percibido.

Un último modo sería el modo de operación de tiempo estimado. Cuando este retardo es de varios segundos el operador estima el tiempo de operación t_o para desplazar una distancia d_o el objeto teleoperado a la posición deseada. Es una teleoperación del tipo “mueve y espera”.

$$t_o = \frac{d_o}{v_o} \quad (3.5)$$

Los autores en [Ando, Lee & Hashimoto 1999] experimentan con diferentes retardos de tiempo en una tarea sobre monitor y *joystick* para colocar un círculo dentro de otro. Se observa una relación lineal entre el retardo introducido y el tiempo de realización de la tarea, aunque restando los tiempos de retardo a los tiempos totales el tiempo de tarea se estabiliza para retardos mayores de 1 segundo. Un comportamiento similar se observa en el número de operaciones con el *joystick* respecto al tiempo de retardo.

3.2. La Ley de Fitts

Un modelo psicomotor ampliamente aceptado del movimiento humano fue introducido por el psicólogo Paul Fitts, pionero en la seguridad en aviación. En 1954 publicó su trabajo sobre la ley que lleva su nombre, [Fitts 1954]. La ley recoge el fenómeno que cuando una persona señala directamente un objeto o indirectamente a través de un dispositivo de interfaz, el tiempo que tarda en la selección de dicho objeto depende de la distancia y de su tamaño. La formulación más empleada, [MacKenzie 1992], es la que deriva del teorema de *Shannon*:

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (3.6)$$

MT representa el tiempo que tarda una persona en seleccionar un objeto de tamaño W , ver Figura 3.4, para realizar un desplazamiento de una distancia D . a y b son constantes determinadas experimentalmente mediante una regresión lineal y dependen de cada persona y del dispositivo de señalización empleado. Esta ley también puede escribirse de la siguiente forma:

$$MT = a + b ID \quad (3.7)$$

donde ID corresponde al término logarítmico de la ecuación (3.6) y se le denomina índice de dificultad.

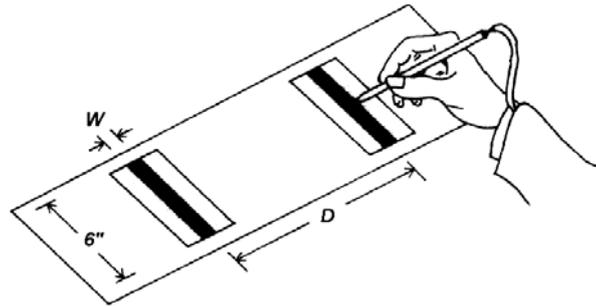


Figura 3.4. Experimento de la ley de Fitts.

La analogía empleada con el teorema de Shannon en donde la capacidad C de información en bits/s de un canal de comunicación viene dada por:

$$C = B \log_2 \left(\frac{S+N}{N} \right) \quad (3.8)$$

donde B es el ancho de banda del canal en s^{-1} , S es la potencia de la señal y N la potencia del ruido. Dicha analogía establece a la persona como un canal de comunicación, y la idea es buscar la capacidad de este canal en las tareas de movimiento. La capacidad de este canal dependerá de los miembros en movimiento, músculos, nervios empleados y tipo de tarea a realizar. Así, el tiempo para realizar una tarea depende del índice de dificultad ID que representará la cantidad de información en bits, necesaria para realizar los movimientos. El análogo a la capacidad del canal C del teorema de Shannon, es el índice de eficacia IP en la ley de Fitts, medida en bits/s, que es el recíproco de la constante b de (3.6), o también es utilizado el término “ThroughPut”, TP :

$$IP = \frac{1}{b} \quad (3.9)$$

$$TP = \frac{\overline{ID}}{\overline{MT}} \quad (3.10)$$

donde \overline{ID} es el índice de dificultad medio y \overline{MT} el tiempo de movimiento medio observado en un conjunto de ensayos repetidos.

La constante a , en (3.6), representaría un tiempo de retardo, en segundos, necesario para iniciar y finalizar los movimientos, (tiempo de reacción de la persona, contracción muscular, tiempo necesario para realizar un “click” con el ratón,..). Siguiendo con la analogía de Shannon para interpretar la ecuación (3.6), cuando la persona desea seleccionar el objeto de interés, primero reducirá el “ruido inicial” al acercarse a dicho objeto hasta que el “ruido” es lo suficientemente pequeño como para que el elemento de señalización caiga sobre el objeto. Dado que se emplea el logaritmo en base 2, reducir el ruido por 2 requerirá un tiempo de b segundos que corresponde a transmitir un bit de información. Así, el número de reducciones necesarias corresponde al índice de dificultad ID , la transmisión de ID bits requiere $b \cdot ID$ segundos.

Una de las características que presenta la ley de Fitts es la invariancia de MT con la escala, dado que la función depende del cociente D/W , con lo que un factor de escala aplicado a ambos términos dejará invariante el resultado. Esto implicará, ver Figura 3.5, que el tiempo necesario para la selección de un

3.2. La Ley de Fitts

objeto de tamaño W a distancia D será el mismo que el necesario para un objeto de $2W$ a una distancia $2D$.

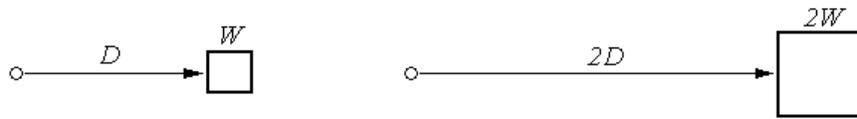


Figura 3.5. Independencia de la ley de Fitts con la escala.

3.2.1. La Ley de Fitts en dos dimensiones

La ley de Fitts fue concebida de un modo unidimensional, es decir un movimiento en dirección al objeto midiendo su amplitud en la dirección de movimiento. Solo en el caso de que el objeto sea circular de radio W , la dificultad de selección será independiente de la dirección de movimiento. En el caso de un rectángulo como el de la Figura 3.6a, la amplitud del objeto en las direcciones horizontal H o vertical W , intervendrán en la dificultad de selección de forma diferente, con lo que será más fácil la selección en la dirección vertical por su mayor amplitud. En [MacKenzie & Buxston 1995] propusieron como amplitud equivalente del objeto de selección la correspondiente al vector de dirección hacia dicho objeto, ver Figura 3.6b, utilizando la misma formulación unidimensional de la ley de Fitts, según la ecuación (3.11). Un modelo alternativo contemplaba el mínimo de ambas dimensiones, ecuación (3.12), siendo este último modelo el que proporcionaba la mejor correlación con los datos experimentales.

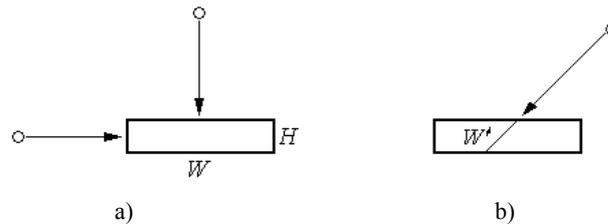


Figura 3.6. Dependencia de la dirección.

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W'} + 1 \right) \quad (3.11)$$

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{\min(H, W)} + 1 \right) \quad (3.12)$$

A la hora de evaluar la eficiencia de estos modelos bidimensionales [Accot & Zhai 2003] establecieron una serie de propiedades deseables que esos modelos debían tener:

- Independencia con la escala, el producto de H y W por una constante deja invariable al MT.
- Que se acerque al modelo 1D cuando H o W tienden a infinito.
- Efecto dominante de la dimensión menor de H o W .
- Dualidad de H y W , ambos valores deben estar presentes y ser de naturaleza similar.
- Continuidad, efecto continuo de H y W en el modelo.

A partir de estas propiedades y utilizando el concepto de la norma l_p con pesos², los autores definieron un nuevo modelo de la ley de Fitts:

² La norma l_p de x con pesos w es: $\|x\|_{p,w} = \left(\sum_{i=1}^n w_i |x_i|^p \right)^{1/p}$

$$MT = a + b \log_2 \left(\sqrt{\left(\frac{D}{W}\right)^2 + \eta \left(\frac{D}{H}\right)^2} + 1 \right) \quad (3.13)$$

donde η es un peso determinado experimentalmente que se encuentra entre 1/3 y 1/7 y que permite modificar el efecto de las dimensiones W y H . Este modelo representa una mejora en cuanto al efecto del tiempo MT respecto a la variación de las dimensiones del objeto comparado con el anterior modelo mostrado en (3.12), no obstante continua siendo orientado a objetos rectangulares y no tiene en cuenta el ángulo de movimiento hacia el objeto. Variar el ángulo de movimiento tiene efecto sobre el tiempo MT ya que los grupos musculares que entran en juego son diferentes según dicho ángulo. Para compensar esto en [Grossman & Balakrishnan 2005] definen una función del índice de dificultad probabilístico ID_p como una función de probabilidad, Figura 3.7a, según la dispersión que toman los intentos de selección de los objetos, siendo:

$$ID_p = F \left(\iint_R bndf(X', Y') dY' dX' \right) \quad (3.14)$$

$$bndf(X', Y') = \frac{1}{cA\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{X'^2}{2(cA^2)}\right)} \frac{1}{dA\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{Y'^2}{2(dA^2)}\right)} \quad (3.15)$$

con $bndf$ la función densidad de probabilidad normal de dos variables, siendo X' , Y' las variables probabilísticas de desviación en las direcciones horizontal y vertical, siguiendo una distribución normal, ver Figura 3.7b, c y d son constantes determinadas empíricamente, A es la distancia al objeto y R es la región de dispersión que dependerá de la forma del objeto. A través de diversos experimentos los autores muestran una mejora en la predicción del tiempo MT con respecto a los modelos anteriores.

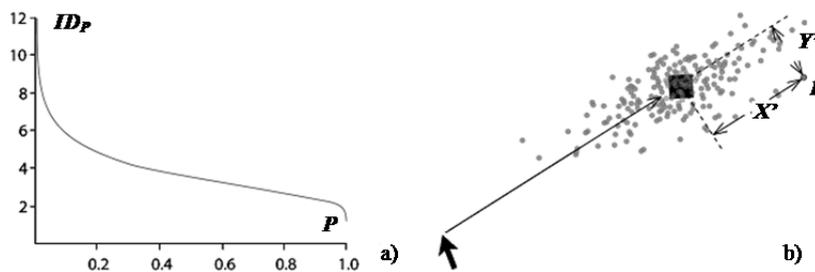


Figura 3.7. Índice de dificultad bidimensional probabilístico a) índice de dificultad como función de la probabilidad b) distribución de los movimientos en torno al objeto de interés.

3.2.2. Trayectorias

En la interacción con ordenador se ha aplicado la metodología del modelizado mediante la ley de Fitts con el propósito de facilitar el interfaz con el usuario. La ley de Fitts se ha utilizado ampliamente en tareas de selección o señalización (relacionadas con el uso del ratón), no obstante existen otro tipo de tareas relacionadas con la generación de trayectorias, como las descritas al dibujar, escribir o navegar por el entorno del interfaz gráfico (realizadas con dispositivos como el lápiz sobre tableta digitalizadora).

Aunque inicialmente la ley de Fitts se formuló para modelizar tareas de selección o señalización, puede observarse que es apropiada también para tareas de realización de trayectorias. En [Accot & Zhai 1997] muestran mediante el experimento de cruce entre dos objetos de amplitud W y longitud D , Figura 3.8, que

3.2. La Ley de Fitts

el tiempo de finalización de esta tarea se relaciona con el índice de dificultad, de la misma manera que la ley de Fitts (3.6).

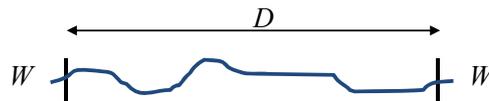


Figura 3.8. Experimento de cruce entre dos objetos de amplitud W .

Extendiendo de forma continua infinitos tramos de amplitud W puede obtenerse una ley para el experimento de navegación a lo largo de un “túnel”, Figura 3.9. Dicha ley sigue la forma:

$$MT = a + b \frac{D}{W} \quad (3.16)$$

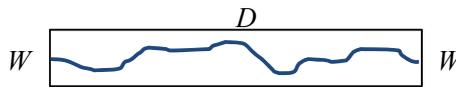


Figura 3.9. Experimento de cruce de un túnel.

Extendiendo la ley a cualquier “camino” los autores propusieron una ley global. Así, teniendo un camino curvo C , puede obtenerse un índice de dificultad del seguimiento de dicho camino ID_C , como la suma a lo largo del camino de índices de dificultad elementales, Figura 3.10, teniéndose:

$$ID_C = \int_C \frac{ds}{W(s)} \quad (3.17)$$

donde $W(s)$ es la amplitud a lo largo del camino. Con esto el tiempo de recorrido del camino puede representarse como:

$$T_C = a + b \int_C \frac{ds}{W(s)} \quad (3.18)$$

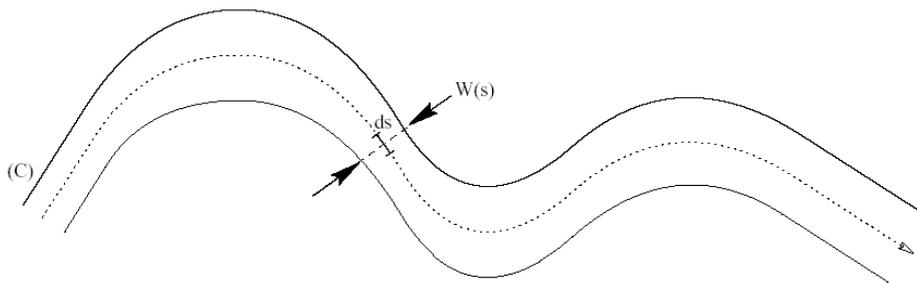


Figura 3.10. Seguimiento de un camino.

Otros modelos para el modelizado del tiempo de seguimiento en tareas de guiado de vehículos, como el llevado a cabo en [Drury 1971], encontraron una relación experimental del tiempo T a lo largo del camino:

$$T = \frac{D \theta k_1 t_s}{w} \quad (3.19)$$

donde D es el desplazamiento, θ es la desviación estándar de la precisión angular del movimiento, k_l es un factor de seguridad, t_s es el periodo de muestreo y w es el ancho medio del camino.

[Accot & Zhai 1997] mostraron una relación entre la velocidad de desplazamiento $v(s)$ y el ancho del camino $W(s)$ en las tareas de navegación, representada por:

$$v(s) = \frac{W(s)}{\tau} \quad (3.20)$$

donde τ es una constante de tiempo determinada experimentalmente. Posteriormente una formulación más completa similar a (3.19) la obtuvieron en [Accot 2001]:

$$v = \frac{W}{2\Delta t \sigma \varphi^{-1}(p)} \quad (3.21)$$

siendo Δt el tiempo de reacción del estímulo visual, σ la desviación estándar del error de dirección del movimiento, p la probabilidad de error en el intervalo Δt , y $\varphi(p)$ la integral de probabilidad:

$$\varphi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-p}^p e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (3.22)$$

3.2.3. Objetos en movimiento

Cuando los objetos a seleccionar están en movimiento, se emplean otras modificaciones de la ley de Fitts para la medida del tiempo de selección. [Jagacinski et al. 1980] propuso de forma experimental un índice de dificultad como función de la velocidad del objeto. Los datos proporcionados por estos autores fueron formalizados en una ley matemática propuesta por [Hoffmann 1991], en donde el tiempo necesario MT aumenta con la velocidad v del objeto de interés:

$$MT = c + dD + e(v+1) \left[\frac{1}{W} - 1 \right] \quad (3.23)$$

con D distancia al objeto, W tamaño del mismo, y c, d, e constantes. Esta ley, además, permite predecir la velocidad crítica del objeto, a partir de la cual ya no puede ser capturado. Esta velocidad crítica es proporcional a su tamaño W , de esta manera cuanto menor es el objeto la velocidad crítica es menor, es decir, es más difícil de capturar:

$$V_{critica} = \frac{1}{2} k W \quad (3.24)$$

con la constante de proporcionalidad k la ecuación (3.23) se expresa:

$$MT = \frac{1}{k} \left(\frac{D + \frac{v}{k}}{\frac{W}{2} - \frac{v}{k}} \right) \quad (3.25)$$

3.3. Modelo del operador

El modelo psicomotor de la Ley de Fitts, así como sus variantes, ha mostrado validez como método de evaluación de la eficiencia de una tarea con el uso de interfaces con ordenador. Desde el punto de vista de la teoría de control, la introducción del operador para el gobierno de una planta ha necesitado de un modelo dinámico de su comportamiento en el lazo de control de dicha planta. El control de plantas con comportamientos no lineales, con elevados retardos en su respuesta y altamente cambiantes o poco deterministas, recurren a la presencia de la persona operador. Además de la teleoperación en robótica, áreas relacionados con la navegación aeroespacial, marina o en automoción han sido fructíferas en el análisis del modelo de operador en el lazo de realimentación para el estudio de la estabilidad, eficacia, precisión del sistema, así como permitir la experimentación sin la presencia física de las personas en aras de conseguir seguridad o reducción de costes, así como facilitar el diseño de sistemas, sensores o actuadores que intervengan en el lazo de control con el operador, o controladores que sustituyan a la persona. Lamentablemente, la búsqueda de los modelos del operador se inició a raíz de la segunda guerra mundial con la idea de mejorar la eficacia de las armas y los pilotos de combate.

No obstante la obtención del modelo del operador entraña dificultades debidas a la poca consistencia de sus resultados, en donde el mismo operador no se comporta de igual forma a la misma situación del sistema en diferentes instantes. El modelo resultante es altamente cambiante y afectado por el estado de la persona en cada momento, así como el efecto del aprendizaje. También existe poca uniformidad en los resultados, debido a una considerable variación en el comportamiento de diferentes operadores para la misma planta a controlar.

En [Sheridan & Ferrell 1974] se describe la tarea de control manual en lazo cerrado en 4 modos bien diferenciados: compensación, persecución, previsualización y control precognitivo.

En un modelo de teleoperación en donde la persona operador debe cerrar el lazo recibiendo realimentación mediante la interfaz visual, la tarea a realizar puede resumirse en el seguimiento de un objeto o trayectoria. Cuando el operador solo recibe una entrada, dicese el error entre la posición deseada y la actual, el operador debe realizar acciones para minimizar este error, a esta tarea se le denomina de *compensación*. El modelo del operador poseería una entrada y una salida.

Cuando el operador visualiza simultáneamente el cursor o elemento “perseguidor”, que en teleoperación podría representar al ET del robot, y también se visualiza el objeto o trayectoria a seguir, nos hallamos en una tarea de *persecución*. En este caso el modelo de operador tendría dos entradas. Una variación del modo de persecución se denomina modo de *previsualización*, en este caso el operador no solo observa la posición actual deseada sino posiciones futuras.

El control precognitivo alude al hecho de que el operador tiene conocimiento del comportamiento de la planta a controlar, de los rangos y dinámica de las variables en juego de tal forma que puede prever la futura evolución de la variable a controlar y no siempre requiere un control continuo en lazo cerrado, si por ejemplo observa un movimiento sinusoidal del objeto a seguir el operador puede captar el “ritmo” sin necesidad de un control continuo, en ciertos periodos podrá trabajar en lazo abierto. El control precognitivo siempre estará presente en cualquier tarea en donde la persona operador se encuentre en un lazo de control.

Muchos de los modelos que se han desarrollado de la persona operador fueron motivados a partir de las tareas de pilotaje de aeronaves u otros vehículos. A continuación se describirán los principales modelos de la persona operador.

3.3.1. De la Ley de Fitts al modelo lineal de primer orden

El comportamiento del operador en la selección de un objeto en la pantalla, tal como muestra la Ley de Fitts, sigue dos fases, una inicial de acercamiento rápido, digamos en lazo abierto, y una final de movimientos correctivos más lentos de la posición del cursor con respecto a la posición deseada, en lazo cerrado. Siguiendo la ley de Fitts (3.6) y despreciando el término a , la respuesta temporal del tiempo de tarea se observa en la Figura 3.11a. En [Phillips & Repperger 1997] se muestra la relación existente entre la ley de Fitts, término b , y un sistema de primer orden con constante de tiempo τ_M , considerando al operador como el sistema en lazo cerrado mostrado en la Figura 3.12, en donde la respuesta temporal del sistema ante un escalón de amplitud A viene dada por:

$$X_o(t) = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_M}} \right) \tag{3.26}$$

Resolviendo para $t = MT$ en donde $X_o = A \pm W/2$ y tomando la aproximación de la Ley de Fitts en que $MT = b \cdot \log_2(2A/W)$ e igualando se concluye que $b = \tau_M \ln(2)$. La Figura 3.11b compara ambas respuestas. El modelo simple de primer orden permite mostrar como al igual que la Ley de Fitts, el objetivo se alcanza en un tiempo MT . La respuesta de este modelo correspondería a un modelo de operador con masa cero de su brazo en donde el objeto se alcanza en una respuesta en lazo cerrado, es decir una visualización continua de cursor y objeto a seleccionar.

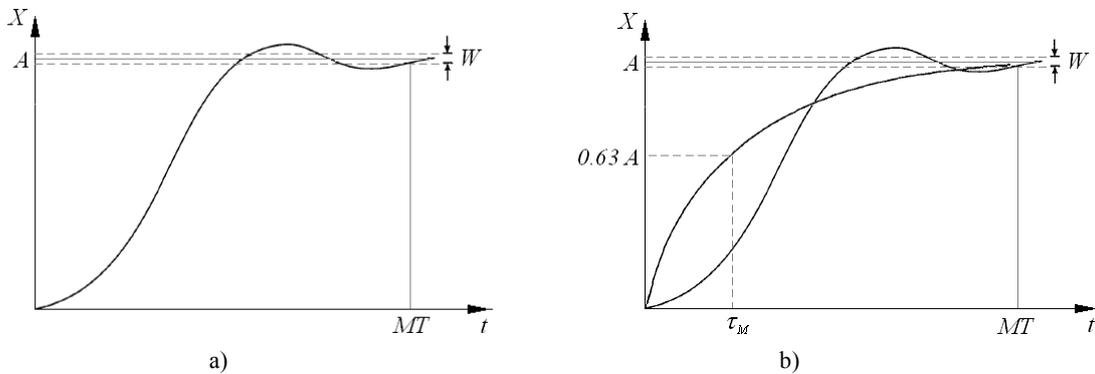


Figura 3.11. Respuesta temporal del operador en selección de objetivo a) según el comportamiento de Fitts b) Comparación con el modelo de primer orden

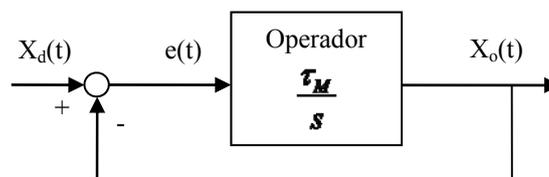


Figura 3.12. Sistema de primer orden del modelo de operador.

Los autores en [Phillips & Repperger 1999] denominan “modelo informático del operador” definiendo el tiempo de acción del operador AT como suma del tiempo de reacción RT más el tiempo de movimiento MT pero en vez de partir de la Ley de Fitts lo hacen a partir de la Ley Hick-Hyman, la cual tiene en

3.3. Modelo del operador

cuenta el número de acciones posibles (como pulsar distintos botones), la función de transferencia que resulta es:

$$\frac{X_o}{X_d} = \frac{\alpha_M e^{-T_D}}{s + \alpha_M} \quad (3.27)$$

donde $\alpha_M = 1/\tau_M$ y $T_D = a + b \cdot H_s$, tiene una analogía con la ley de Fitts, pero ahora H_s no es el índice de dificultad sino que depende del logaritmo del número de opciones o de elementos a seleccionar. La respuesta temporal tras un escalón de amplitud A queda:

$$X_o(t) = A(1 - e^{-\alpha_M(t - T_D)}) \quad (3.28)$$

Los autores orientan la aplicación del modelo a un operador de sonar de barco donde se ajusta el tiempo de respuesta al necesario para pulsar una serie de botones de alarma.

3.3.2. El modelo de frecuencia de corte

El modelo basado en la frecuencia de corte (crossover model), [McRuer 1967], ha sido uno de los primeros y más empleados modelos del operador humano principalmente en el estudio del control de pilotaje de aeronaves. En este modelo el operador, el cual tendrá su propia dinámica Y_p , trabaja en un lazo de control de compensación, ver Figura 3.13. El operador debe actuar sobre el joystick y la interfaz de usuario para comandar el dispositivo a controlar (vehículo a pilotar), con su correspondiente dinámica Y_c , con el objetivo de minimizar el error de seguimiento, el cual viene alterado por una perturbación interna (propia del operador o estímulo externo) que se modeliza mediante una señal aleatoria de amplitud Gausiana. Experimentalmente se observa que para una gran variedad de sistemas dinámicos a controlar con movimientos continuos del objetivo sobre la pantalla, el comportamiento del operador junto al joystick, sigue una ley del tipo:

$$G = Y_p Y_c = \frac{\omega_c e^{-s\tau_e}}{s} \quad (3.29)$$

donde ω_c es la frecuencia de corte y τ_e es el tiempo de respuesta del operador, los cuales dependen del tipo de tarea y varía con el aprendizaje del propio operador. Este tiempo de respuesta comprende los retardos de procesado de la información por parte de la persona (visual, neuronal, etc), los efectos de la dinámica del operador como la acción muscular y la propia dinámica del elemento a controlar. A este modelo se le conoce como el modelo basado en la frecuencia de corte (*crossover model*), dado que se considera válido su funcionamiento cerca de dicha frecuencia (entre 1 y 1,5 décadas), en donde $|G(s)|=1$.

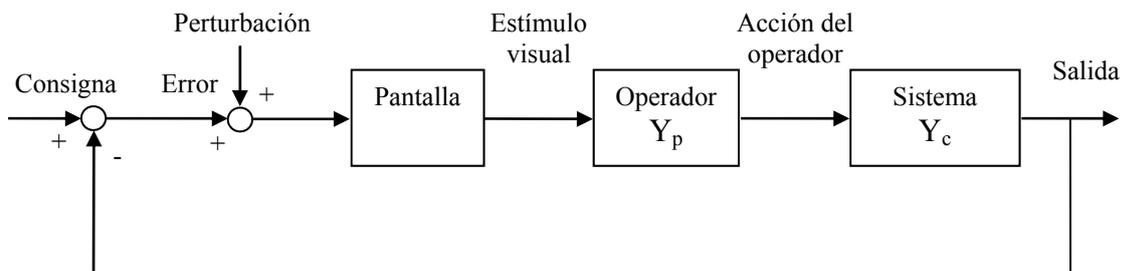


Figura 3.13. Modelo de control manual en lazo de compensación.

El modelo operador de frecuencia de corte se caracteriza por su simplicidad, ya que modeliza al operador empleando funciones de bajo orden necesitando pocos parámetros y su elección puede seguir técnicas clásicas de diseño de control. En el caso de la ecuación (3.29) el operador se ha caracterizado por $Y_p = w_c \cdot e^{-s\tau_e}$, siendo la planta un integrador. Una función de transferencia del operador usual en el modelo de frecuencia de corte en lazo abierto se describe como:

$$Y_p = K_p \frac{(sT_L + 1)}{(sT_I + 1)} e^{-s\tau_e} \quad (3.30)$$

donde K_p es la ganancia del operador, T_L es la constante de tiempo de adelanto, T_I es la constante de tiempo de retardo de primer orden que suele estar comprendida entre 100 y 200 ms y τ_e es el retardo efectivo en donde se incluye los retardos de transporte y los retardos neuromusculares de alta frecuencia.

3.3.3. Modelo estructural

El modelo estructural del operador, [Hess 1990], también llamado modelo isomórfico, sigue la forma del modelo de frecuencia de corte pero le añade más información acerca de la dinámica del operador, introduciendo aspectos de la propiocepción de la persona en el lazo de realimentación, como se muestra en la Figura 3.14. Ahora el modelo del operador Y_p se describe mediante una parte correspondiente a la dinámica del sistema nervioso central, y otra parte correspondiente a la dinámica del sistema neuromuscular, los dos bloques inferiores de la Figura 3.14 representan las respectivas realimentaciones propioceptivas en ambos sistemas. A partir de la dinámica del sistema neuromuscular se generará la señal de fuerza hacia el elemento a controlar.

Existen algunos trabajos [Peñín et al. 1998] en donde se modifica el modelo estructural añadiendo un lazo de realimentación de fuerza transformando el modelo en un sistema de control bilateral.

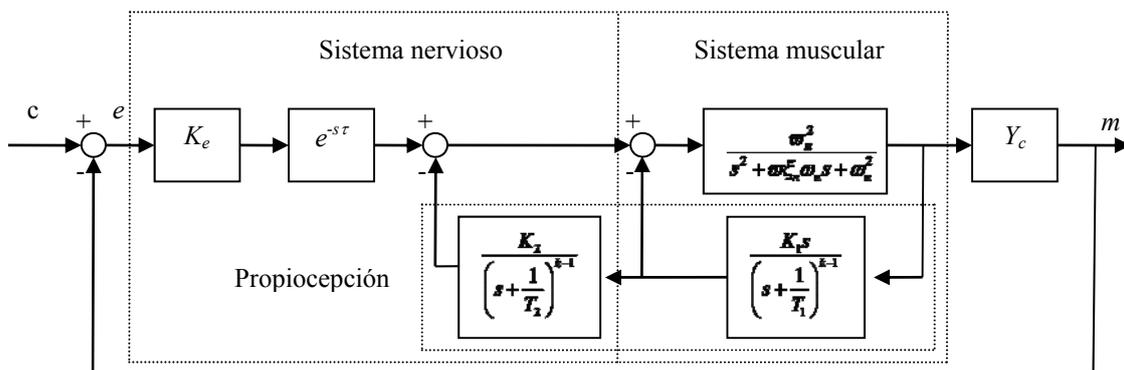


Figura 3.14. Modelo estructural del operador.

3.3.4. Modelo de control óptimo

Si el modelo de frecuencia de corte y el modelo estructural representan a un grupo de modelos del operador en el dominio frecuencial, existe también otro grupo de modelos que se situarían en el dominio del tiempo. Uno de estos modelos del operador son los basados en control óptimo que emplean teorías de control lineal-cuadrática-gausiana o LQG. El modelo, inicialmente establecido por [Kleinman, Baron & Levison 1970], es de tipo algorítmico, utiliza una representación en el espacio de estados y criterios de eficacia en el dominio del tiempo. Este modelo permite su uso en sistemas con múltiples entrada/salida.

3.3. Modelo del operador

Una ventaja adicional que proporciona este método es el índice de eficacia para la minimización del error de seguimiento, proporcionando un vínculo directo con la tarea del operador durante el seguimiento de compensación del error. La Figura 3.15 muestra el diagrama en bloques de este modelo, el cual incluye el retardo de tiempo del control LQG, el predictor lineal para contar el retardo y el bloque de la dinámica neuromuscular como un retardo de primer orden. La combinación de controlador-predictor forma el elemento de equalización del modelo de control óptimo.

Otros modelos que reducen la sobreparametrización que puede necesitar el modelo de control óptimo aplican técnicas de reducción del orden del controlador, lo que resulta en los modelos modificados de control óptimo (MOCM) como los que presenta el autor en [Doman 1998] para modelizar al operador.

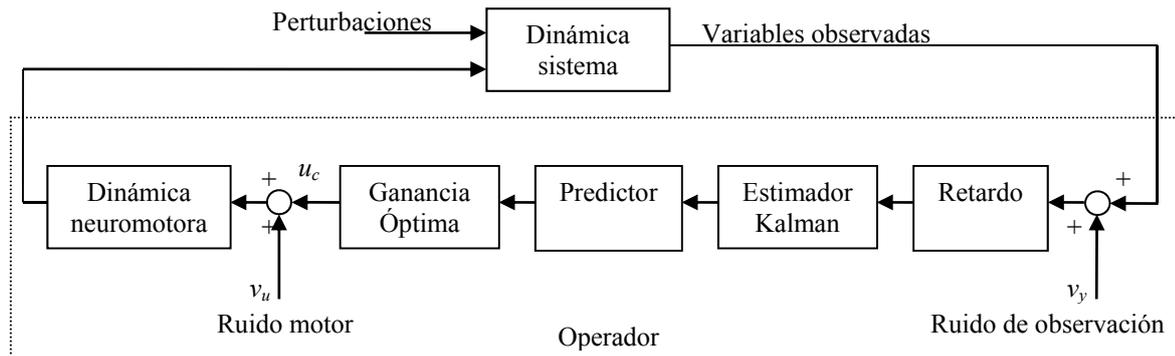


Figura 3.15. Modelo de control óptimo del operador.

3.3.5. Otros modelos del operador

Dada la compleja naturaleza del comportamiento del operador en un lazo de control en los sistemas teleoperados, existe un conjunto de técnicas heredadas de métodos de identificación no lineal y de las técnicas de inteligencia artificial. Entre estas técnicas en [Abdel-Malek & Marmarelis 1990] se emplean los modelos autoregresivos de media móvil (ARMA) creando un modelo no lineal estructurado en bloques del operador que partiendo de la base de que las acciones de dicho operador son principalmente activadas a partir de los cambios de dirección del objetivo. De la Figura 3.16, el operador determina el número de cambios de dirección del objetivo en un periodo T_{scan} , el filtro detecta los pasos por cero del objetivo generando impulsos, el número de cambios de dirección en T_{scan} será una medida de lo frecuentes que deberán ser las acciones del operador. El operador debe reducir el error de posición estimado entre su respuesta y la del objetivo a seguir.

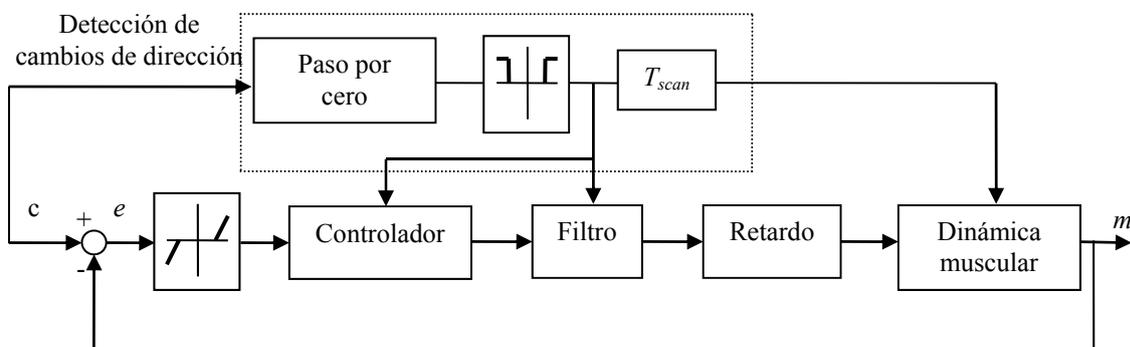


Figura 3.16. Modelo no lineal del operador.

En [Goto, Chatani & Fujita 1995] se emplea el modelo H_∞ para modelizar al operador en una tarea de pilotaje de aeronaves en situación inestable. También el uso de las técnicas de lógica difusa se han aplicado al modelo del operador como en la conducción de bicicletas en [Liu & Wu 1993] o automóviles en [Kramer 1985], en donde el modelizado en situaciones complejas requiere de técnicas propias de la inteligencia artificial. En este sentido, es habitual partir de la información de un conjunto de datos de entrada y salida del sistema con el operador para entrenar el modelo, como muestran los autores [Krüger 1990] en el modelizado de la tarea de seguimiento.

Otros métodos difusos, para modelizar el comportamiento del operador en el seguimiento de trayectorias, obtienen el modelo a partir de los datos de entrada/salida mediante un método de modelizado probabilístico [Riddley, Shaw & Krüger 1988] en que a diferencia de los sistemas difusos convencionales, se mejora la capacidad de modelizado estocástico, como en el creado en el PFLS (Probabilistic Fuzzy Logia System), [Liu & Li 2005]. En [Alvarez, Harrop & Yoneyama 1999] en vez de obtener las reglas difusas directamente de los datos experimentales, se utiliza un modelo intermedio de comportamiento del operador empleando un modelo identificativo ARMA proporcionando una medida más uniforme de los datos de partida, minimizándose el efecto de los errores introducidos en las muestras. El empleo de sistemas híbridos neuro-difusos permite emplear la capacidad identificativa de las redes neuronales en la ordenación y clasificación de los datos experimentales para la posterior creación del sistema difuso, [George & Cardullo 1999].

3.4. Modelo motor del operador

En el apartado anterior se trató de describir algunos de los modelos del operador en un lazo de control realimentado como elemento controlador. En este punto se describirán algunos modelos específicos del movimiento del operador, es decir modelos que pretenden describir el proceso de movimiento de los miembros del operador, y forman parte de los llamados modelos motores o de “control motor” de la persona. Aquí se tratarán fundamentalmente algunos de los modelos de movimiento del brazo humano.

Control motor es el estudio de la postura, el movimiento y las funciones de la mente y el cuerpo que gobiernan la postura y el movimiento. Es decir, modela la complejidad de cualquier movimiento de la persona para cualquier tarea como caminar, saltar, sentarse, etc. El sistema nervioso central, nervios, músculos y articulaciones trabajan como un sistema para llevar a cabo los movimientos deseados por la persona. El estudio de estos movimientos en los seres humanos, en los primates, así como en algunos mamíferos muestra una serie de características comunes.

La Figura 3.17 muestra el registro de movimiento del antebrazo de un gato para distintas velocidades de movimiento. Los perfiles de velocidad muestran una forma de campana simétrica con cierto sesgo hacia la izquierda para movimientos más lentos, Figura 3.17a, así como cierta constancia en el tiempo en el que se alcanza la velocidad máxima, Figura 3.17b. Los perfiles de aceleración para cada caso se muestran en la Figura 3.17c.

3.4. Modelo motor del operador

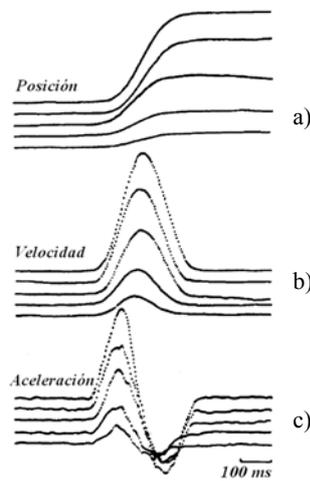


Figura 3.17. Perfiles de movimiento típicos de los mamíferos.

La Figura 3.18 muestra un esquema propuesto por [Arbib 1985] como programa de control coordinado para la tarea de alcanzar y agarrar objetos. En él se muestran las fases desde el reconocimiento de la escena para extraer información relevante, hasta el ajuste de los dedos de la mano para realizar el agarre. En la parte inferior se encuentran los dos bloques correspondientes a los aspectos motores. A bajo a la izquierda se muestra la fase de “alcance”, en donde se lleva a cabo el movimiento de aproximación del brazo, y a la derecha la fase de “agarre”, que implica el ajuste de los dedos según la forma del objeto y la rotación de la muñeca hasta el contacto final en el agarre. Según este esquema, el movimiento “balístico”, el ajuste de los dedos y la rotación de la mano, son movimientos libres sin ligaduras, una vez la mano toca el objeto, el movimiento pasa a ser de acomodación con el objeto y la superficie de contacto.

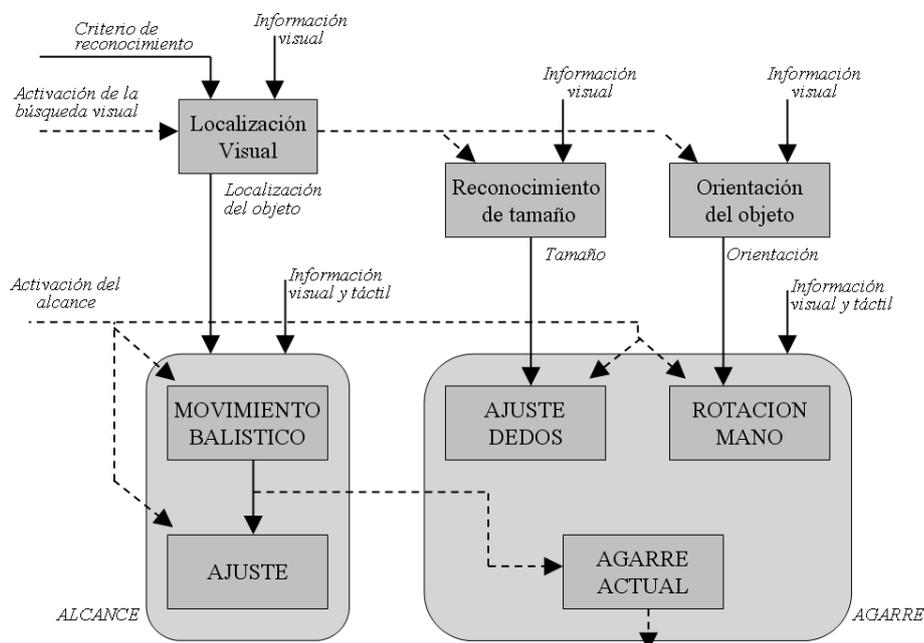


Figura 3.18 Esquema de control coordinado para el alcance y el agarre.

Durante el movimiento balístico de aproximación, los músculos agonistas se activan para iniciar el movimiento, y cerca del final, se activan los antagonistas para decelerar el brazo. Este es un comportamiento similar al de un control *feedforward*, donde la trayectoria es preplaneada, a diferencia de

un control *feedback* donde continuamente se sensoriza la diferencia entre posición actual y deseada y se realizan ajustes para reducir la diferencia, este sería el caso del bloque de “ajuste” en la figura.

Desde el punto de vista de la especificación de la tarea, posicionar y orientar la mano en el espacio supone un total de 6 GDL (3 de orientación y 3 de posición), pero desde el punto de vista articular, el brazo humano presenta 11 GDL (3 de la faja pectoral, 3 del hombro, 2 del codo, 1 radio-cubital, 2 de la muñeca) con lo que hay una redundancia de 5 GDL. A nivel muscular, el brazo posee 33 músculos, con lo que la redundancia en este caso aporta 27 GDL extras, y aún puede bajarse a nivel de fibras musculares donde cada músculo está compuesto por cientos de ellas. Esto da lugar a un problema de indeterminación. Para realizar cualquier movimiento los músculos trabajan en sinergias, en estas sinergias los grupos musculares que intervienen se contraen en sincronía en el tiempo (un concepto similar en robótica se conoce como movimiento isócrono o coordinado, en donde todas las articulaciones empiezan y acaban el movimiento simultáneamente). Dado que los rangos de movimiento de los distintos músculos son diferentes entre sí, existe un control de velocidad para lograr la sincronía.

Se ha observado [Abend, Bici & Morasso 1982] que la integración de los sistemas neuronales, sensoriales y musculares produce perfiles de velocidad cuya forma global es remarcablemente invariante sobre un amplio rango de amplitudes y formas de movimiento. Estos perfiles de velocidad han dado lugar a una serie de modelos del movimiento humano. Algunos de estos modelos se basan en la optimización de algún criterio, como el movimiento de mínima sobreaceleración [Hogan 1984], aquí los autores utilizan la teoría de optimización dinámica para determinar el movimiento que minimiza el ratio de cambio de la aceleración de una articulación del brazo humano. En [Flash & Hogan 1985] lo extendieron al brazo completo en movimientos en el plano (x,y) . Aquí la trayectoria se planifica para minimizar la sobreaceleración según la siguiente función de coste C :

$$C = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left[\left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right)^2 + \left(\frac{d^3 y}{dt^3} \right)^2 \right] dt \quad (3.31)$$

con t_f la duración de la trayectoria. Si $\theta(t)$ es la función de la posición con respecto al tiempo, aplicando el criterio de optimización se debe cumplir que la derivada sexta de la posición con respecto al tiempo debe ser cero, con lo que la posición debe evolucionar según un polinomio de orden cinco:

$$\theta(t) = b_5 t^5 + b_4 t^4 + b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \quad (3.32)$$

En el plano cartesiano la trayectoria óptima para ir de la posición inicial (x_0, y_0) a la posición final (x_f, y_f) da como resultado los polinomios:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + (x_0 - x_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3) \\ y(t) &= y_0 + (y_0 - y_f)(15\tau^4 - 6\tau^5 - 10\tau^3) \end{aligned} \quad (3.33)$$

con $\tau = t/t_f$. La evolución de la velocidad de este movimiento sigue una forma de campana simétrica, Figura 3.19.

3.4. Modelo motor del operador

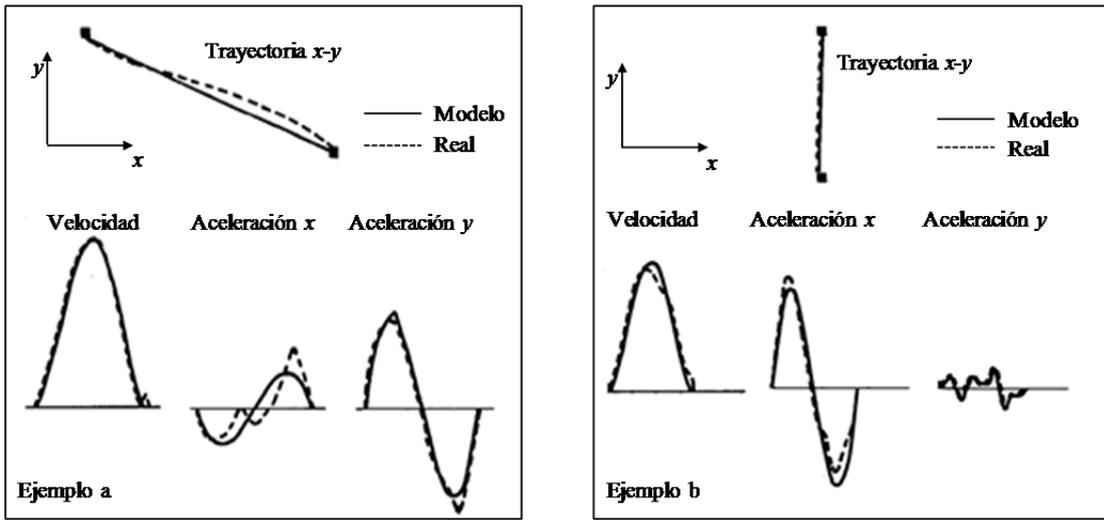


Figura 3.19. Los ejemplos a y b muestran los perfiles de velocidad y aceleración para dos trayectorias diferentes comparando la medición real con el modelo de “minimum jerk” [Flash & Hogan 1985].

En [Feng, Woch & Plamondon 2002] se compara este modelo con otro basado en la función lognormal [Plamondon 1995;1995b], la función normal con tiempo logarítmico, con la idea de representar los músculos agonistas y antagonistas en donde la velocidad del movimiento sigue la función:

$$v(t-t_0) = \Delta \Lambda(t-t_0) = D_1 \Lambda_1(t; t_0, \mu_1, \sigma_1) - D_2 \Lambda_2(t; t_0, \mu_2, \sigma_2) \quad (3.34)$$

$$\Lambda_i(t; t_0, \mu_i, \sigma_i) = \frac{e^{-\frac{(\ln(t-t_0) - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}}{\sigma_i \sqrt{2\pi}(t-t_0)} \quad (3.35)$$

donde D_i representa las amplitudes, Λ_i las respuestas de impulso de los músculos agonistas y antagonistas, σ_i los tiempos de respuesta y μ_i el retardo logarítmico. Se muestra mejor ajuste del perfil de velocidad respecto a la anterior debido a que la función lognormal permite asimetría, ver Figura 3.20.

El uso de estas funciones ha sido encaminado a modelizar los movimientos de la mano en la escritura manual. En este sentido otros estudios [Bezine, Alimi & Sherkat 2004] utilizan un modelo *beta* del tipo:

$$\beta(t, t_0, t_1, p, q) = \left(\frac{t-t_0}{t_c-t_0} \right)^p \left(\frac{t_1-t}{t_1-t_c} \right)^q \quad (3.36)$$

$$t_c = \frac{p t_1 + q t_0}{p + q} \quad (3.37)$$

siendo t_c el tiempo donde la velocidad es máxima, t_0 y t_1 el tiempo inicial y final, y p y q parámetros intermedios, combinando estos adecuadamente se obtienen perfiles de velocidad con diferentes formas y simetrías, Figura 3.21. El uso de funciones *beta*, se justifica partiendo de que los grupos musculares agonistas y antagonistas están compuestos por n sistemas neuromusculares caracterizados por una respuesta normalizada, si esta n es suficientemente grande la respuesta impulsional global puede describirse por una función beta según el teorema central del límite.

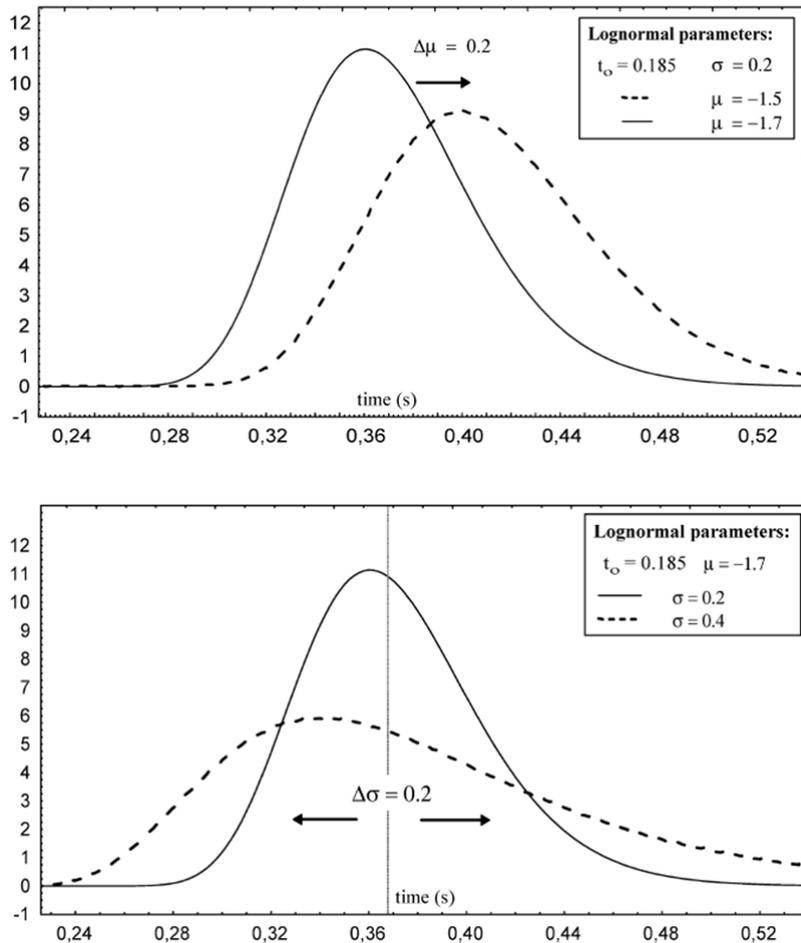


Figura 3.20. Variación de la función lognormal según sus parámetros σ y μ .

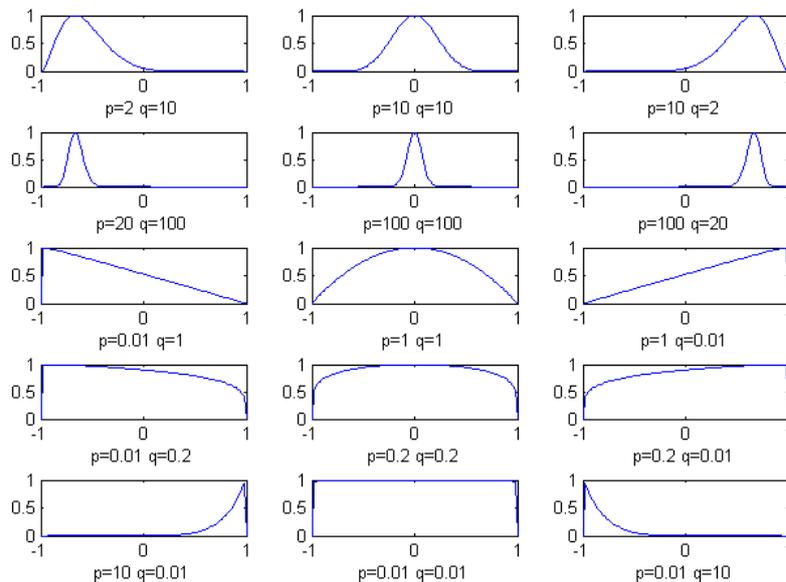


Figura 3.21. Perfiles de la función beta utilizada por [Bezine, Alimi & Sherkat 2004] para distintos valores de p y q .

Otro tipo de modelos del movimiento humano son los basados en osciladores automantenidos. En [Mottet & Bootsma 1999] se propone un modelo de ciclo límite para emular el movimiento de desplazamiento según la tarea de Fitts descrita en el apartado 3.2, con un índice de dificultad entre 3 y 7. En este modelo

3.4. Modelo motor del operador

se muestra que deben incluirse como mínimo una amortiguación no lineal en la forma automantenida, un oscilador accionado por velocidad, y una rigidez no lineal dando lugar a la ecuación diferencial:

$$\ddot{x} + c_{10}x - c_{30}x^3 - c_{01}\dot{x} + c_{03}\dot{x}^3 = 0 \quad (3.38)$$

con x el desplazamiento normalizado con tiempo normalizado, en donde los coeficientes c_{ij} se ajustan de datos experimentales según los índices de dificultad, ver Figura 3.22. En la Figura 3.23 se muestran los perfiles de velocidad promedio para distintas combinaciones del índice de dificultad resaltándose la asimetría que se produce al reducirse la anchura W y aumentar el índice de dificultad.

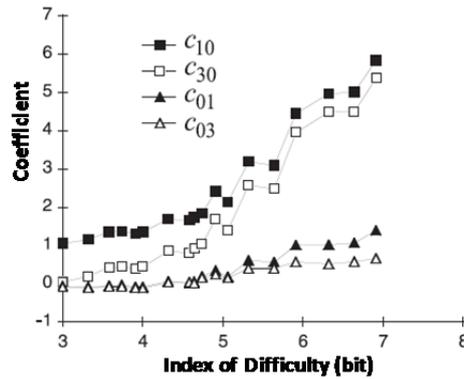


Figura 3.22. Relación de los coeficientes con el ID en el modelo propuesto por [Mottet & Bootsma 1999].

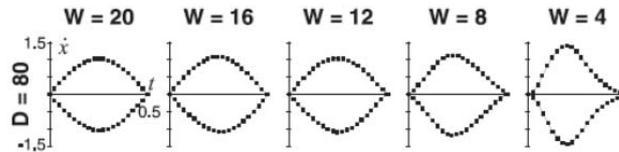


Figura 3.23. Perfiles de velocidad para distintos valores del índice de dificultad.

Los modelos anteriores propuestos emulan la respuesta global del movimiento muscular incorporando o no propiedades de simetría o asimetría en una curva de velocidad en forma de campana. Existen por otro lado modelos que recogen el movimiento de los miembros a nivel neuronal. En este sentido un modelo ampliamente reconocido es el modelo VITE (Vector de Integración al Punto Final), [Bullock & Grossberg 1988]. Este modelo, que emula las sinergias musculares, se comporta como un circuito neuronal generador de trayectorias y que produce perfiles de velocidad simétricos y asimétricos. El modelo parte de la idea de que existe un grupo de nervios estimulado por la diferencia entre la posición deseada u objetivo y la posición actual de la mano, que es el *vector diferencia*. La actividad de esos nervios codifica la diferencia percibida respecto al objetivo y envía órdenes motoras a los músculos. El modelo está representado en la Figura 3.24 en donde una consigna de posición T , contiene, en forma de vector, los valores deseados de las longitudes de las sinergias musculares a controlar. P representaría el modelo de la posición actual de las longitudes musculares. La trayectoria del brazo será consecuencia de la evolución de P . V representa el vector diferencia encargado de medir los incrementos de las longitudes musculares necesarios para alcanzar el objetivo deseado. GO es una señal de modulación que ajusta V al modelo interno integrándolo en el tiempo. La amplitud de la señal GO determina la velocidad del movimiento. El vector de diferencia evoluciona según:

$$\dot{V}_i = \alpha(-V_i + T_i - P_i) \quad (3.39)$$

con α constante. El subíndice i ($i = 1,2,3,\dots$) indica el i -ésimo músculo que interviene. El vector correspondiente a la posición actual sigue la ecuación diferencial:

$$\dot{P}_i = G[V_i]^+ \tag{3.40}$$

en donde $[V_i]^+ = \max(V_i, 0)$, es decir satura los valores negativos. La señal GO se expresa según:

$$G(t) = G_0 \cdot g(t) \tag{3.41}$$

donde G_0 es la amplitud de la señal GO y $g(t)$ es la función de activación, la cual los autores proponen de la forma:

$$g(t) = \begin{cases} \frac{t^n}{\beta^n + \lambda t^n} & \text{para } t \geq 0 \\ 0 & \text{resto} \end{cases} \tag{3.42}$$

con β y λ de 0 o 1 se generan perfiles de P acordes con los datos experimentales. Si $\beta = 1$ y $\lambda = 0$ entonces $g(t)$ es una función lineal en el tiempo con $n = 1$, y más rápida que lineal con $n > 1$. Si $\beta = 1$ y $\lambda = 1$ y $n = 1$ resulta una función más lenta que lineal. Dependiendo de la forma de la función de activación se conseguirán distintos grados de asimetría en los perfiles de velocidad.

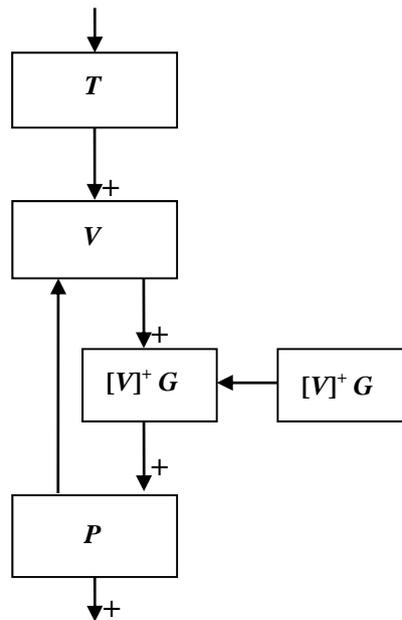


Figura 3.24. Modelo del Vector de Integración al Punto Final (VITE) por [Bullock & Grossberg 1988].

Una de las características que hace interesante al modelo VITE es que emula las relaciones cuantitativas de tiempo, error y distancias de la ley de Fitts. También respeta las relaciones de invariancia y asimetría de los perfiles de velocidad y el cambio en la asimetría del perfil de velocidad a velocidades altas, así como la relación inversa entre duración del movimiento y pico de velocidad. El modelo VITE actúa de generador de trayectorias de movimiento para una extensión de este modelo encargada de generar los patrones de fuerza y tensión muscular llamado modelo FLETE (Factorización de Longitud y Tensión) [Bullock & Grossberg 1988b]. A parte del modelado de sistemas musculares por sus características, los modelos de VITE y FLETE han sido empleados para controlar actuadores como el propuesto por [García, López & Guerrero 1999] para controlar un dedo antropomórfico, el de [Linares et al. 2006] para controlar una mano robótica y el propuesto por [Smagt 1998] para sistemas de brazos robot.

4. Métodos de ayuda a la Interacción Persona-Máquina

Este capítulo trata de describir los trabajos más significativos realizados en el entorno de los métodos de asistencia y ayuda a la interacción persona-máquina. En primer lugar se describirán algunas de las técnicas encaminadas a la reducción del tiempo de tarea y número de errores, es decir la eficiencia y eficacia de las tareas en un entorno persona-ordenador. Se contemplan las técnicas que intervienen sobre la disposición, amplitud y distancia de los objetos, técnicas que se apoyan en la Ley de Fitts. Posteriormente se analizarán algunas de las técnicas de ayuda a la teleoperación, se describirán algunos trabajos en el campo del control semiautónomo, los campos potenciales, la realimentación háptica, las superficies virtuales, y la introducción de escalas en la interfaz de teleoperación.

4.1. Ayuda a la Interacción Persona-Ordenador

Una interpretación aceptada de la ley de Fitts propuesta por [Meyer et al. 1988] se conoce como “modelo optimizado del impulso inicial”. El proceso que se describe parte del movimiento inicial hacia el objeto de interés y la tarea finaliza si se alcanza el objeto, Figura 4.1a, de no ser así se inicia un nuevo movimiento y se repite hasta alcanzar el objeto, Figura 4.1b y c. La Figura 4.2 muestra los perfiles de movimiento típicos en donde se aprecia la presencia del impulso inicial de mayor magnitud seguido por una secuencia de submovimientos. Si se desea alcanzar el objeto en el mínimo tiempo posible, debería de conseguirse en un único intento a gran velocidad, no obstante se demuestra que la desviación estándar S en el punto final del movimiento aumenta con la distancia D y decrece con la duración T , con k como constante de proporcionalidad:

$$S = k \frac{D}{T} \quad (4.1)$$

Los últimos movimientos correctivos para llegar al objeto se realizan en lazo cerrado, de esta manera la realimentación visual a la persona es clave para la minimización del tiempo de la tarea, a parte de la disminución de la distancia inicial.

Para la disminución del tiempo de las tareas actuando sobre las dimensiones W y distancias D de los objetos de interés, pueden considerarse tres factores: el espacio motor (en donde se realizan los movimientos por la persona), el espacio visual (de realimentación visual mediante el monitor o display) y la función de transferencia entre los espacios de control y visual. Así bien, la modificación de las dimensiones W y distancias D de los objetos puede llevarse a cabo actuando sobre alguno de estos factores.

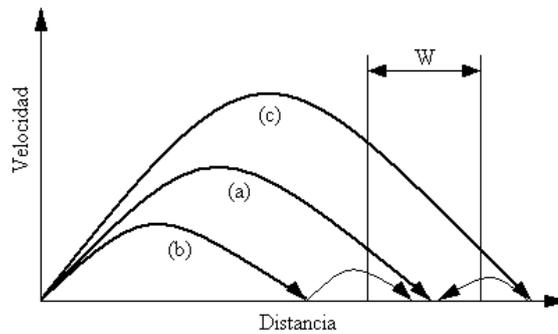


Figura 4.1. Interpretación de la ley de Fitts con el modelo optimizado del impulso inicial.

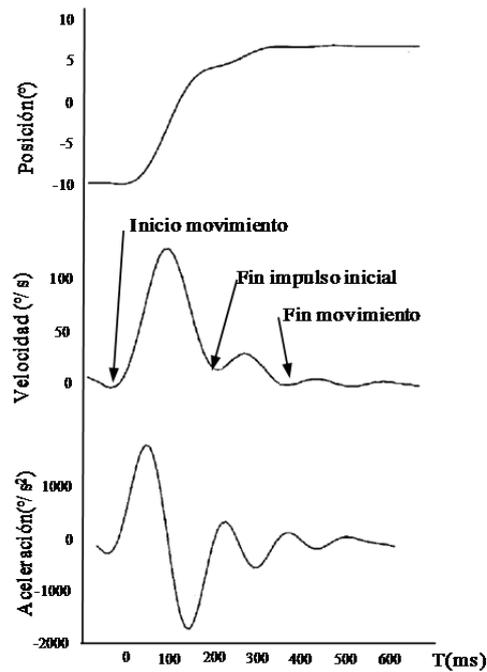


Figura 4.2. Perfiles de posición, velocidad y aceleración durante un movimiento rápido entre dos puntos.

4.1.1. Reducción de la distancia al objetivo

La reducción de la distancia D de los objetos al cursor actúa directamente reduciendo el tiempo de selección. Esto puede llevarse a cabo de diferentes formas, en las interfaces de usuario pueden agruparse los objetos para que las distancias recorridas al seleccionarlos sean mínimas, formando menús o distribuyéndolos en forma de “trozos de pastel”, [Callahan et al. 1988]. Otros estudios [Baudisch et al. 2003, 2005] muestran métodos para acercar virtualmente al cursor los objetos potenciales de ser utilizados, técnica “drag-and-pop” (Figura 4.3); o “drag-and-pick”, donde la dirección de movimiento del cursor se calcula para capturar el objeto que se encuentra en la dirección más cercana. Son métodos que permiten reducir el tiempo de selección para objetos relativamente dispersos, aunque tienden a ser contraproducentes con la pantalla plagada de objetos, lo que provoca la activación de elementos a distintas distancias o/y direcciones, aunque esto último puede resolverse si el sistema recuerda los elementos de mayor probabilidad de selección.



Figura 4.3 Técnica “drag-and-pop” se acercan al cursor los objetos potenciales.

[Guiard, Blanch & Beaudouin 2004] Proponen minimizar el tiempo de selección observando que la proporción del espacio de los objetos de interés respecto al resto de la superficie de visualización es muy pequeña, así, la idea se basa en aumentar el tamaño de los objetos cubriendo los espacios muertos para que de esta manera el cursor navegue entre los objetos que están pegados los unos a los otros. Este método no es aplicable siempre ya que ciertas aplicaciones como los procesadores de texto si necesitan los espacios en blanco.

4.1.2. Expansión del tamaño del objetivo

La expansión del tamaño W de los objetos interviene en el índice de dificultad de la ecuación (3.5) en la misma proporción que la distancia, a mayor W menor tiempo de tarea. Basándose en el modelo optimizado del impulso inicial comentado en el apartado anterior, [McGuffin & Balakrishnan 2005] mostraron la idea de que el tiempo total de la tarea de selección es fuertemente dependiente de las correcciones finales en lazo cerrado en las cercanías del objeto, con esto proponen la idea de expandir el objeto cuando se alcanza el 90% de la distancia inicial, ver Figura 4.4, considerando que este tiempo de tarea es fuertemente dependiente del tamaño final del objeto. Sus experimentos mostraron una mejora con este método empleando una relación de ampliación $\times 2$.

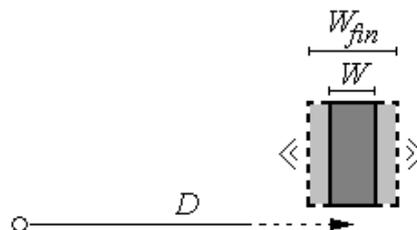


Figura 4.4. Expansión del objeto al final del recorrido.

En el caso de múltiples objetos, la expansión de estos debe tener en cuenta la posición de los demás, ya que las oclusiones o la expansión de objetos diferentes a los deseados pueden producir un empeoramiento de la tarea en vez de una mejora. Un ejemplo de expansión se utiliza en el sistema operativo Mac OS X Dock, en donde los objetos se expanden suavemente a medida que se acerca el cursor produciéndose también un desplazamiento. Este método es similar al efecto ojo de pez, y se demuestra en [Gutwin 2002] que no aporta ventaja, ya que el desplazamiento de los objetos unido a la expansión, al no tener variación en el espacio de control, el efecto es el mismo que si no hubiera expansión, Figura 4.5a. La solución de [Gutwin 2002] pasa por reducir la magnificación de las “lentes de ojo de pez” en función de la velocidad del cursor.

4.1. Ayuda a la Interacción Persona-Ordenador

Otra solución propuesta por [Zhai et al. 2003] trata de predecir la dirección del cursor para realizar la expansión de los objetos centrada en el objeto predicho por la dirección, Figura 4.5b, no obstante estas predicciones no garantizan la correcta selección del objeto deseado. Algunos métodos de expansión con múltiples objetos sugeridos por [McGuffin & Balakrishnan 2005] se muestran en la Figura 4.6, en la Figura 4.6a el método de expansión se aplica a objetos separados entre sí, con lo que la expansión no produce oclusiones con los otros objetos, en la Figura 4.6b, cuando los objetos están juntos se deben de expandir de forma que no se produzca el fenómeno de ojo de pez comentado arriba y en caso de oclusión que esta no empeore la tarea cuando el objeto a seleccionar no corresponda con el deseado. Esta expansión resulta eficiente en las direcciones normales a la fila de objetos pero no tanto en la misma dirección.

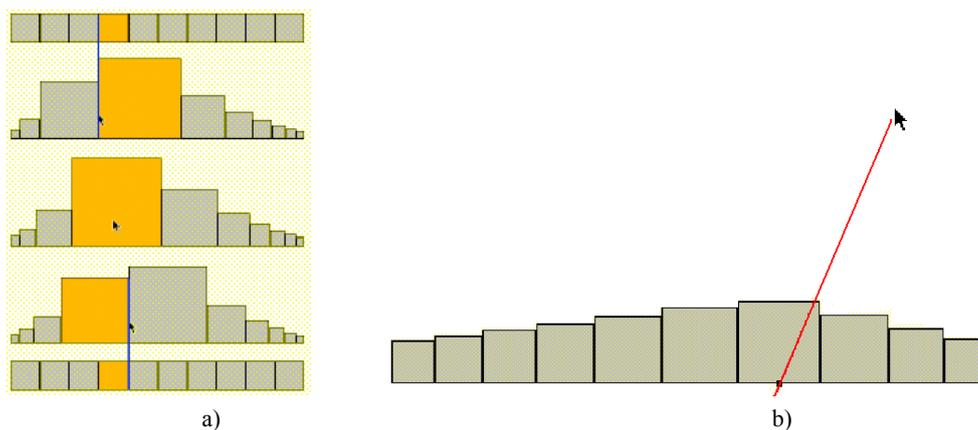


Figura 4.5. a) Efecto del ojo de pez. b) Solución de predicción de selección.

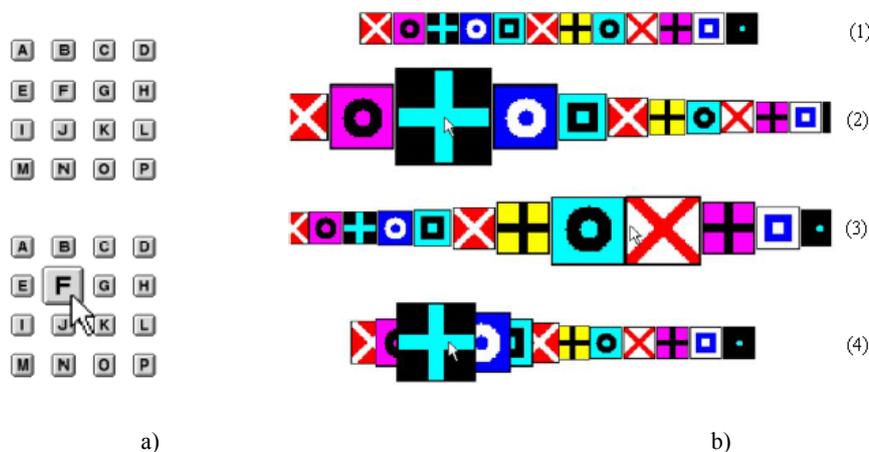


Figura 4.6. a) Objetos separados. b1) Objetos juntos. b2,3) Expansión con desplazamiento, efecto ojo de pez. b4) Expansión con oclusión parcial.

El “zoom automático dependiente de la velocidad” (SDAZ: Speed-dependent Automatic Zooming) es un concepto inicialmente propuesto por [Igarashi & Hinckley 2000] donde se modifica la escala de un documento (web, mapas, imágenes...), ver Figura 4.7, en función de la velocidad de *scrolling* de este sobre la pantalla:

$$escala = \frac{v_0}{velocidad} \quad (4.2)$$

donde v_0 es una velocidad predefinida antes de que el escalado se realice. Para evitar un cambio brusco en la escala cuando la velocidad de desplazamiento es próxima a cero los autores proponen adicionalmente

una relación de la escala con el desplazamiento del ratón dy , ver Figura 4.8a, así como cuando se cambia de dirección añadiendo un retardo al escalado, Figura 4.8b. Los experimentos propuestos sobre navegador Web, búsqueda de imágenes y navegación por mapas, aunque si bien no lanzan resultados significativamente diferentes con respecto a un *scrolling* manual a lo que el tiempo de ejecución se refiere, los resultados de la evaluación subjetiva del zoom automático sí que muestran una preferencia de los usuarios a este método en todas las pruebas.

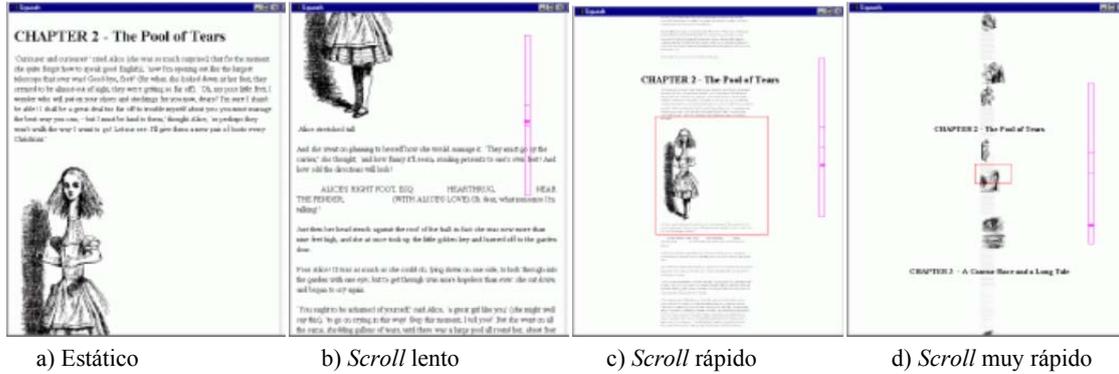


Figura 4.7. *Scrolling* sobre un documento extenso mediante zoom automático dependiente de la velocidad.

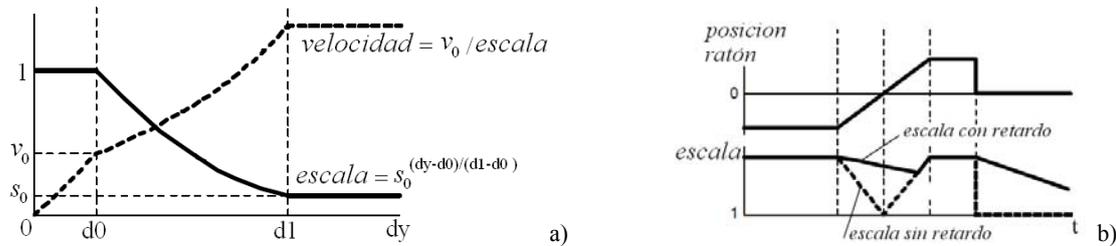


Figura 4.8. Variación de la escala y velocidad del documento propuesto por [Igarashi & Hinckley 2000]. a) La escala cambia a un ratio constante, d_0 , d_1 v_0 y s_0 son constantes predefinidas y dy es el movimiento del ratón b) Para evitar variación brusca en el zoom se le añade un retardo a la escala en los cambios de dirección del ratón.

En [Cockburn & Savage 2003] emplean el zoom automático para navegar sobre un documento de texto o Web siguiendo la siguiente ley dependiente de la velocidad de *scrolling*:

$$zoom = k \cdot velocidad - umbral \tag{4.3}$$

donde la constante k afecta al cambio del nivel de zoom, cuando el zoom es cero indica que la apariencia del documento es la que tiene en estático, y ésta no cambiará hasta no superar un determinado *umbral* de velocidad. Para navegar a lo largo de un documento (movimiento en vertical o eje y), el zoom del documento lo determinan con (4.3) siendo la velocidad de *scrolling*:

$$velocidad = |Y_{ip} - Y_{cp}| \tag{4.4}$$

siendo Y_{ip} e Y_{cp} las y -coordenadas inicial y actual del ratón. Y para navegar en un mapa (movimiento en x - y) la velocidad de scroll es:

$$velocidad = \sqrt{(Y_{ip} - Y_{cp})^2 + (X_{ip} - X_{cp})^2} \tag{4.5}$$

Los autores experimentan, utilizando OpenGL, sobre doce participantes en ambos casos (navegación en documento, Figura 4.9, y en mapa, Figura 4.10) para la búsqueda de un texto o una imagen, obteniendo

4.1. Ayuda a la Interacción Persona-Ordenador

una mejora en tiempo respecto a una aplicación de navegación convencional (*scroll*, *pan* y *zoom*), reduciéndolo en un 23% en la navegación por el documento y en un 43% en la navegación en mapa, teniendo también resultados favorables en los test subjetivos.



Figura 4.9. *Zoom* automático dependiente de la velocidad de *scroll* en la navegación por un documento de texto.

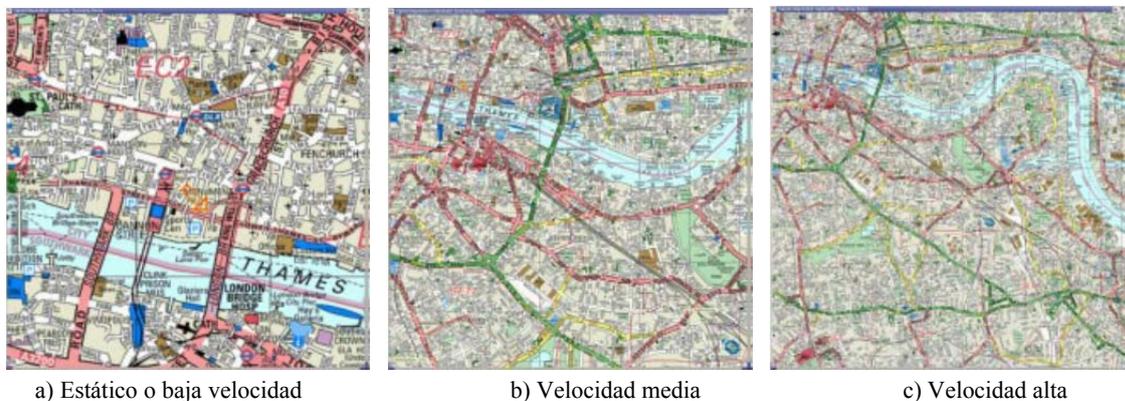


Figura 4.10. *Zoom* automático dependiente de la velocidad de *scroll* en la navegación por un mapa topográfico.

En [Savage & Cockburn 2005] aplican el SDAZ para la adquisición de objetos que se encuentran fuera de la pantalla. En un estudio sobre 35 participantes se consigue realizar significativamente más rápida la adquisición con el método *zoom* automático con respecto al *zoom* manual. Los autores modelan el proceso de forma precisa utilizando la Ley de Fitts. En [Cockburn et al. 2005] parametrizan las constantes del modelo SDAZ teniendo en cuenta las limitaciones de la visión humana.

Las técnicas *Zoom* automático también son aplicables a dispositivos con pantalla pequeña tipo PDA, como en los experimentos realizados por [Jones et al. 2005] que reducen el tiempo de navegación en texto en torno a un 29%, o en [Eslambochilar & Murray-Smith 2004] que emplean *zoom* automático a través del “tilt” captado por acelerómetros.

Otras técnicas se centran en la expansión del cursor obteniendo beneficios similares a los obtenidos mediante la expansión de los objetos en tareas de selección. En la técnica de “área cursor” propuesta por [Kabbash & Buxton 1995], el cursor se convierte en un área en lugar de un punto, mientras que en la técnica “bubble cursor” [Grossman & Balakrishnan 2005] el cursor se expande dinámicamente en función del objeto más cercano (Figura 4.11). En [Chapuis et al. 2009] el método “dynaspot”, el área del cursor varía dinámicamente en función de la velocidad mejorando el tiempo total invertido en el movimiento.

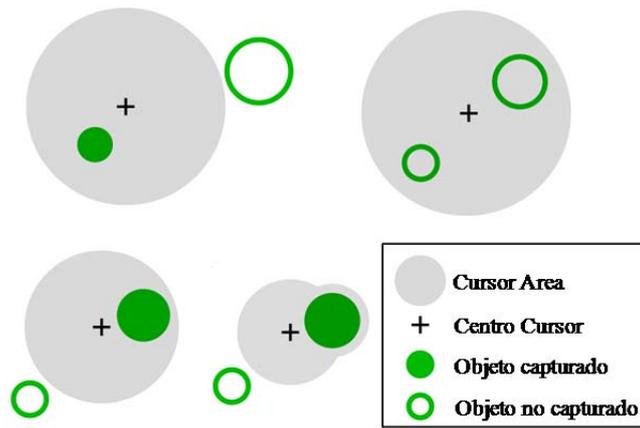


Figura 4.11. Técnica “bubble cursor”. El cursor forma un área para facilitar la captura de los objetos.

Aplicar de forma sistemática las técnicas de escalado o zoom en los sistemas de interfaz, requiere de modelos analíticos o geométricos, como el espacio-escala o los diagramas de espacio pan-zoom. El concepto de espacio-escala fue introducido por [Furnas & Bederson 1995] orientado especialmente para el uso de visualización de grandes volúmenes de información como por ejemplo en cartografía. Este concepto se muestra en la Figura 4.12, donde el espacio x-y es proyectado sobre distintos planos en un eje vertical que representaría la escala. Así, el efecto de magnificación o *zoom* es mayor cuanto más alto se halla el plano y un desplazamiento en horizontal representaría el concepto de pan, o desplazamiento de la imagen en la pantalla.

En la misma línea en [Wijk & Nuij 2004] también presentan un diagrama de espacio *pan-zoom* para la animación automática en la navegación sobre imágenes.

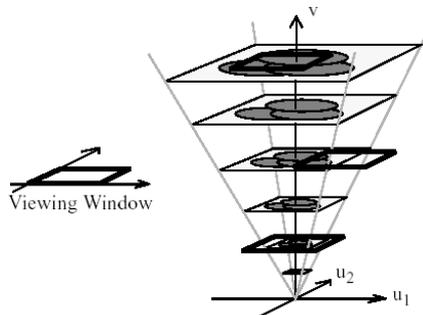


Figura 4.12. Concepto de espacio-escala introducido por [Furnas & Bederson 1995].

4.1.3. Modificación del ratio Control-Display

La modificación del ratio entre el movimiento entre el espacio de control y el espacio visual, conocido también como ratio C-D, interviene también en el índice de dificultad de la tarea y por consiguiente en el tiempo de la misma y también en su precisión por el efecto de escalado. Una modificación comúnmente utilizada en el ratón es el efecto de “aceleración” cuando el usuario pretende realizar un movimiento rápido para cubrir una larga distancia, la disminución del ratio C-D con el incremento de la velocidad del ratón permite aumentar la distancia recorrida en la pantalla con movimientos cortos del ratón.

Ciertos experimentos, como los realizados por [Accot & Zhai 2001], muestran el efecto del escalado entre el espacio de control y visual, siendo este segundo constante y modificando el tamaño del primero, Figura

4.1. Ayuda a la Interacción Persona-Ordenador

4.13. El resultado a partir de un experimento de seguimiento de un túnel recto y circular, que muestran un comportamiento en forma de “U” del tiempo de la tarea con la escala, Figura 4.14a. Esto es debido a que en función del tamaño del espacio de control o espacio motor, intervienen diferentes grupos de músculos y miembros, los dedos, los dedos y la muñeca, además el antebrazo, o además el brazo, considerando de mayor a menor escalado (escala 16 la más pequeña a escala unitaria la más grande, cuando se mueve todo el brazo). Por otro lado el error de selección aumenta con el escalado, Figura 4.14b.

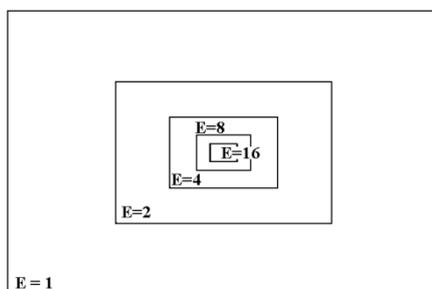


Figura 4.13. Escalado del espacio motor.

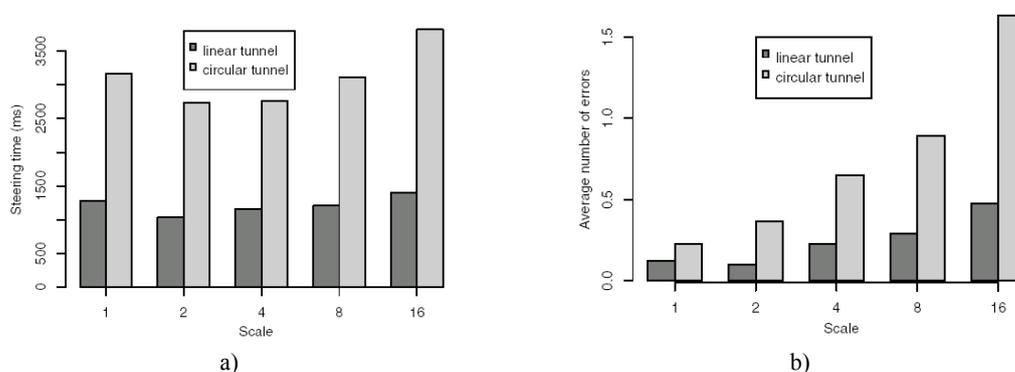


Figura 4.14. a) Tiempo en función de la escala. b) Error en función de la escala.

En [Worden et al. 1997] se emplea una modificación local del ratio C-D en lo que llaman *sticky targets*, se modifica el ratio C-D en las inmediaciones de los objetos de interés de tal forma que se facilita su selección al producirse un efecto de ralentizado del cursor, orientado para el uso con personas mayores, la técnica también empleada en [Cockburn & Firth 2003] muestra su utilidad especialmente en objetos pequeños.

Una técnica similar es el *semantic pointing* [Blanch et al. 2004] donde el ratio C-D se ajusta con la distancia a los objetos cercanos (Figura 4.15) dando la sensación al usuario de que dichos objetos parecen más grandes, desde el punto de vista del espacio motor. Emplean una función gaussiana entorno a los objetos de interés. Los autores aplican el método a aplicaciones de selección de objetos y los resultados mostrados muestran una diferencia significativa sobre el tiempo de ejecución y número de errores respecto al procedimiento estándar, mejora incrementada con el aumento del índice de dificultad. Los autores observan que la Ley de Fitts sigue siendo válida cuando se contemplan las distancias y amplitudes de los objetos no en el espacio visual, sino en el espacio motor.

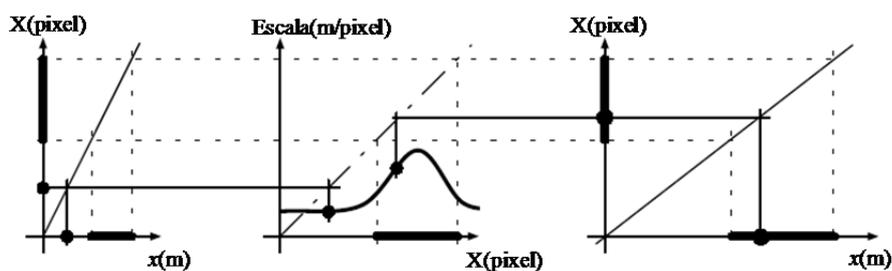


Figura 4.15. "Semantic Pointing". Se ajusta el ratio CD en torno a los objetos.

Otros métodos, como el mostrado en [Wobbrock et al. 2009] dirigido a usuarios con discapacidad motora se basan en el cambio en la dirección del movimiento del cursor para modificar el ratio C-D (Figura 4.16), para así facilitar las operaciones de selección. El factor de aceleración/deceleración del ratio C-D tiene influencia en el tiempo necesario de las tareas de selección [Radix et al. 1999]. La modificación del ratio C-D combinada con otras técnicas, como la realimentación táctil [Keyson 1997], también ha mostrado influencia positiva en la eficacia de la interfaz con el ordenador.

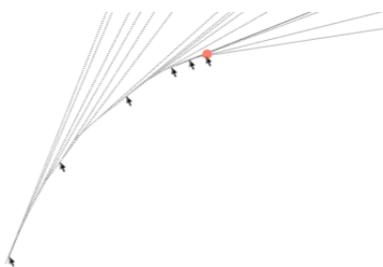


Figura 4.16. Método "Angle-Mouse" donde se modifica el ratio CD en función del cambio en la dirección de movimiento del cursor.

4.2. Ayuda a la Teleoperación

En este apartado se citan las distintas técnicas que se han empleado para la mejora de las tareas de teleoperación. En primer lugar se describen algunos de los estudios realizados en el campo del control semiautónomo, describiendo algunos de los métodos que se emplean para distribuir las tareas de operador y sistema autónomo. Posteriormente se hace un apunte sobre algunas técnicas empleadas en los robots autónomos, como son los campos potenciales, para ayuda a la teleoperación. Se hace alguna observación sobre la aportación de la realidad aumentada y otras técnicas como las superficies virtuales y su efecto sobre la teleoperación. Finalmente se describe como algunos métodos, propios de la interacción con ordenadores, son aplicados a sistemas teleoperados.

4.2.1. Control semiautónomo

El control semiautónomo tiene como objetivo distribuir con diferentes técnicas las tareas que el operador realiza de forma teleoperada y las tareas que realiza el dispositivo teleoperado de forma autónoma. El grado en el que el sistema autónomo interviene depende del grado de complejidad de la tarea y de la eficacia del sistema de teleoperación. A continuación se describen algunas de las técnicas clasificadas según el modo como se realiza el control basándose en eventos discretos, funciones, tareas y niveles.

4.2. Ayuda a la Teleoperación

Control semiautónomo basado en eventos discretos

Con la idea de introducir la acción del operador en un sistema automático se recurre a clasificar los posibles eventos que pueden ocurrir en una tarea robotizada, como estados de peligro, alteración de tareas o restricción del movimiento del operador en caso de fallo. De esta manera, la intervención del operador y la acción del sistema automático se gestionarán siguiendo un procedimiento mediante el cambio de una serie de estados.

El departamento de ingeniería de la Australian Nacional University y de la University of Southern Queensland, trabajan en técnicas de control compartido mediante eventos discretos. Su trabajo se basa en el iniciado anteriormente en [Göllü & Varaiya 1989] y en [Stiver & Antsaklis 1992] sobre el control Híbrido. Estos sistemas de control híbrido contienen componentes en tiempo continuo y en tiempo discreto. La planta es un sistema en tiempo continuo que se modela mediante sistemas de ecuaciones diferenciales y el controlador es un sistema de eventos discretos que se modela por un autómata de estados. El trabajo sobre control compartido lo propusieron por primera vez en [McCarragher & Asada 1992] para el control de un brazo robot en tareas de ensamblado y en [Aigner & McCarragher 1996] para una tarea de teleoperación. La idea general de integrar el operador supervisor en el sistema autónomo, parte de combinar dos modelos de eventos discretos: las interacciones del operador humano y del sistema robot autónomo. El sistema combinado se compone de cuatro subsistemas: el sistema de eventos discretos humano (HDES), el sistema de eventos discretos autónomo (ADES), un interfaz y el sistema en tiempo continuo (CTS), Figura 4.17.

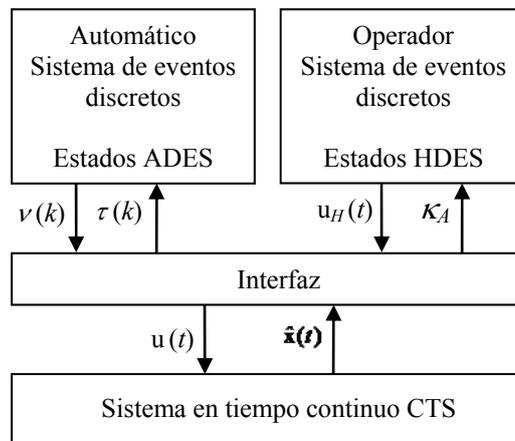


Figura 4.17. Sistema de eventos discreto con integración de operador humano.

Las acciones del operador interactuando con el sistema robot serían: no interacción, entrada continua, entrada discreta o solicitud de información. El sistema autónomo se encarga de realizar la tarea sin la intervención de la persona generando los comandos oportunos sobre el sistema continuo basándose en eventos pasados y eventos deseados. El operador humano podrá intervenir en el sistema como supervisor para evitar colisiones con los obstáculos decidiendo cuál será la mejor dirección a tomar. Dado que el operador humano puede cometer errores, se generarán un conjunto de restricciones por el interfaz según el estado actual y el estado deseado. Las restricciones dependerán del hecho de que se desee reducir o aumentar la distancia entre el elemento terminal del manipulador y las superficies de la planta. En [Aigner & McCarragher 2000] se presentó un experimento sobre un robot que realizaba una trayectoria en un entorno con obstáculos fijos y móviles como se ilustra en la Figura 4.18.

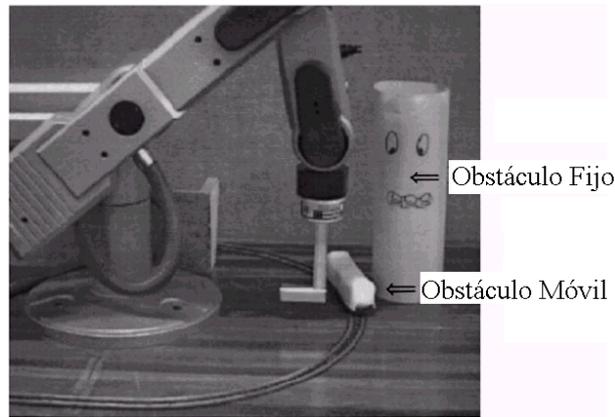


Figura 4.18. Experimento para una tarea de evitar obstáculos con robot Scorbot.

Otro trabajo en la misma línea lo desarrollaron en [Akesson, Jain & Ferreira 2002]. En este caso se muestra un método para acomodar la intervención del operador humano en un sistema de eventos discretos supervisado por ordenador basándose en una conmutación de prioridades entre los eventos controlados por cada parte según un procedimiento determinado. El método introduce un parámetro ajustable para proporcionar diferentes niveles de cooperación entre el operador humano y el ordenador.

En el campo de las redes de Petri, [Cho et al. 1995] proponen un método de “replanificación” y control de secuencia para solventar incertidumbres geométricas del entorno del esclavo teleoperado, mediante un conocimiento a priori basado en un modelo de “tele-tarea” de eventos discretos. Una clase de red de Petri Controlada (CPN) se utiliza como herramienta de modelizado de un proceso de telemanipulación. Cuando un estado inesperado ocurre debido a una incertidumbre en el entorno del esclavo, las trayectorias y sus respectivos costes se extraen de un conocimiento “a priori” y uno de ellos, para minimizar el coste resultante, se escoge como la secuencia replanificada para que el esclavo pueda “escapar” del estado inesperado y finalizar el plan general.

En esta misma línea, se utilizan las redes de Petri en robots móviles orientada a aplicaciones para asistencia en hospitales o atención de enfermos en general, las aplicaciones presentadas en [Hwang et al. 2000] describen la aplicación de las redes de Petri para evitar obstáculos, tomar el control on-line o con interacción con personas. En este último caso es posible un control supervisado como muestra la Figura 4.19. Un modelo de red de Petri para una tarea que incorpora intervención de prevención de tarea. El vehículo viaja de forma autónoma de A a B, el tiempo y trabajos a realizar en la estación de la enfermera son desconocidos y el control es transferido al operador. Cuando los procedimientos en la estación se finalizan y se completa la intervención, se devuelve el control al vehículo que continúa hacia C autónomamente.

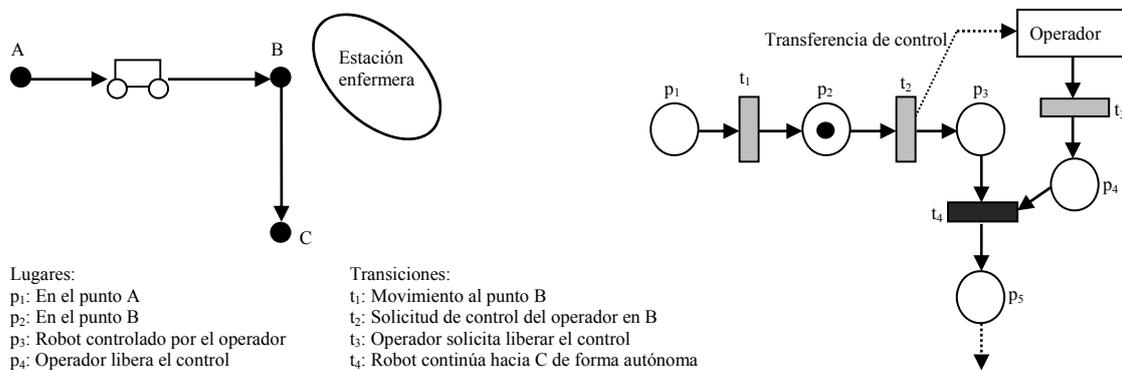


Figura 4.19. Red de Petri ilustrando la interacción robot-persona.

4.2. Ayuda a la Teleoperación

Control Semiautónomo basado en funciones

Un sistema de teleoperación maestro-esclavo ideal es aquel en el que el operador puede controlar la tarea como si estuviese realizándola en el mismo lugar, lo que se conoce como acoplamiento cinestésico ideal o metáfora de replicación del operador. El operador podría realizar una determinada tarea con este acoplamiento ideal de forma efectiva, no obstante podría ser una carga para el operador realizar determinadas tareas monótonas y repetitivas. Para ello existe la cooperación entre la operación manual del operador y algunas funciones autónomas, es decir, el control semiautónomo. Un método para clasificar y añadir funciones autónomas en diferentes modos en sistemas de teleoperación semiautónomo fue propuesto en [Yokokohji et al. 1992]. Utilizando el concepto de “embrague”, que ya se utilizó por primera vez en [Conway, Volz & Walker 1990], pueden activarse o desactivarse los diferentes modos de trabajo, ver Figura 4.20.

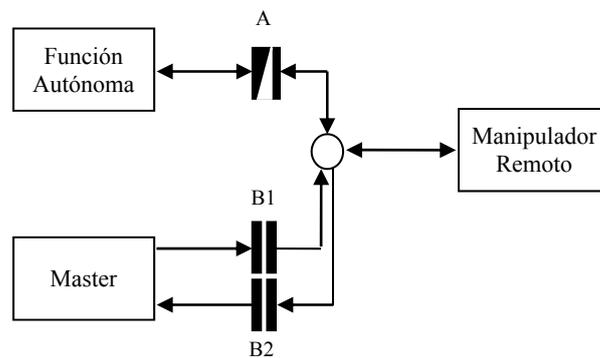
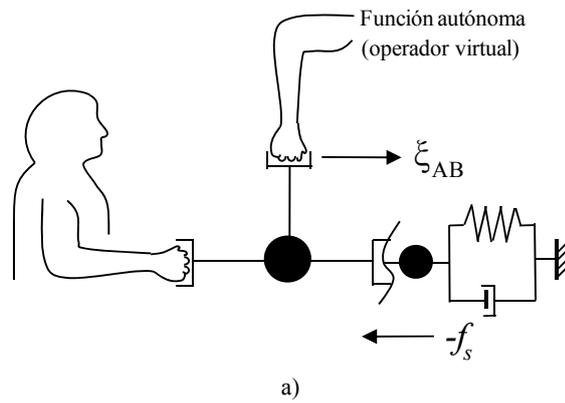


Figura 4.20. Conmutación de distintos modos de trabajo mediante “embragues”.

El embrague A conectará la función autónoma que se sumará a la señal del maestro para gobernar el manipulador remoto. Su valor es continuo, sumando en mayor o menor medida la señal autónoma. Los embragues B1 y B2, todo/nada, conectan o desconectan las señales entre maestro y esclavo. Existirían seis modos básicos de operación:

1. Modo Bilateral (B). B1 y B2 conectados, A desconectado. Es el modo maestro-esclavo bilateral sin ayuda de señal autónoma alguna.
2. Modo libre (F). A, B1 y B2 desconectados. Cuando se desea cambiar la posición relativa entre el maestro y el esclavo.
3. Modo Unilateral (U). Solo B1 conectado. El maestro actúa como un joystick.
4. Modo Bilateral con señal autónoma de ayuda (AB). Todos los embragues conectados. Las consignas generadas por la función autónoma se sumarán a las generadas por operador a través del maestro, pero el operador recibe información de la tarea. La Figura 4.21a muestra un modelo equivalente de este modo.
5. Modo autónomo (A). Solo A conectado. El dispositivo telemanipulador actúa como un robot autónomo.
6. Modo Unilateral con señal autónoma de ayuda (AU). B2 desconectado. El operador interviene en la tarea con ayuda de la función autónoma pero sin realimentación de información.



b)

clutch A		clutch B1	clutch B2
OFF	ON		
(B) ← → (AB)	ON	ON	
(F) ← → (A)	OFF	OFF	
(U) ← → (AU)	ON	OFF	

Figura 4.21. Modelo equivalente del Modo Bilateral con señal autónoma de ayuda. a) Modelo b) Diagrama de conexión entre modos.

En la Figura 4.21b se muestra la secuencia de cambio entre los seis modos de operación. Cuando A está desconectado puede conmutarse secuencialmente entre los modos (B) ↔ (F) ↔ (U), y entre los modos (AB) ↔ (AF) ↔ (AU) cuando está totalmente conectado. Si A se conecta de forma progresiva el cambio será también progresivo entre modos (B) y (AB) y entre (U) y (AU). Problemas de sincronización no permitirán el cambio de cualquier modo a cualquier modo, con lo que solo serán posibles un número limitado de secuencias. Los autores exponen dos ejemplos de funciones autónomas, una basada en control de fuerza, donde se parte de un valor de fuerza especificado a priori o tomado del valor del maestro en modo bilateral. El otro ejemplo es basado en control de posición, a partir de una trayectoria deseada. Mediante resultados experimentales muestran la eficacia del método sobre un manipulador maestro-esclavo de 1 GDL. No obstante el método se vuelve altamente complejo en un caso de 6 GDL por el número de embragues y combinaciones de cambios de modo que surgen.

Los métodos de control compartido basados en funciones parten de la idea de que los sistemas existentes de teleoperación están basados en una referencia de tiempo, Figura 4.22a, donde el control autónomo y el control manual están separados en dos modos que se van conmutando en instantes de tiempo determinados, y en cada instante solo está activo uno de los modos. No obstante las acciones del operador normalmente se basan en la percepción humana. En [Tarn et al. 1994] proponen un método de planificación y control basado en eventos basado a su vez en un parámetro de referencia de acción, Figura 4.22b. Concepto que iniciaron anteriormente en coordinación utilizando sistemas multirobot, [Xi, Tarn & Bejczy 1993].

4.2. Ayuda a la Teleoperación

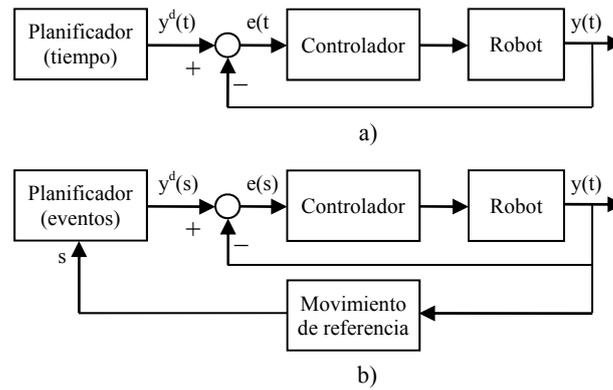
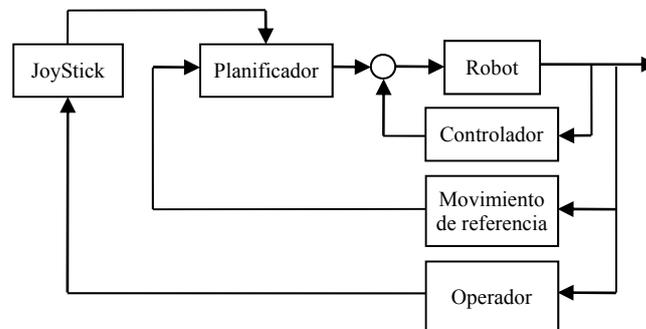


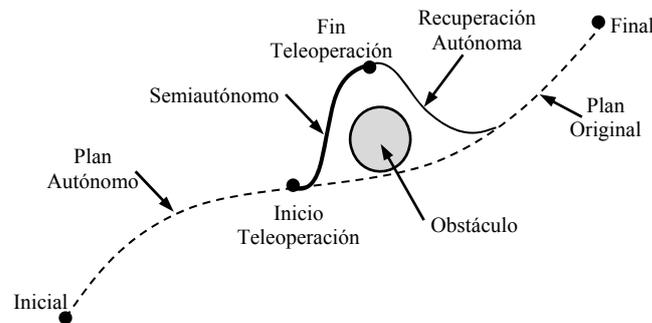
Figura 4.22. Métodos de control y planificación. a) Método tradicional, b) Método basado en eventos

La función del bloque de movimiento de referencia es calcular el parámetro de referencia s on-line basándose en la salida del sistema. El planificador proporcionará la entrada deseada al sistema según el parámetro s . En el control teleoperado se integrará el control proveniente del operador humano con el parámetro de referencia de acción, Figura 4.23. Si el robot se mueve autónomamente según una trayectoria preprogramada y un obstáculo se interpone en el camino, Figura 4.23b, el operador puede intervenir deteniendo el robot o superponer al movimiento de la trayectoria un movimiento que permita evitar el obstáculo.

Posteriormente [Tarn & Xi 1998] los autores introducen formalmente el concepto de cooperación heterogénea persona/robot. Concepto que refleja la fusión de la percepción humana basada en los elementos geométricos de fuerza y espacio, con los componentes de información sensorial del robot, fusión que permite combinar el control y razonamiento humano con el control y planificación de un robot autónomo. Su trabajo se ve mejorado en [Li, Tarn & Xi 1999] con la introducción del álgebra Max-Plus para modelizar la tarea planificada off-line y la teleoperación del operador humano.



a) Integración del operador



b) Evitar obstáculo

Figura 4.23. Ejemplo de control semiautónomo.

Control semiautónomo basado en tareas y niveles

Otro método que permite introducir las órdenes del operador en el sistema de telemanipulación consiste en dividir la tarea en un conjunto de niveles con diferentes grados de jerarquía en donde el operador puede intervenir.

En [Hayati & Venkataraman 1989] se propone un método de control compartido basado en niveles de tarea. Se trata de una estructura de control compartido que combina un nivel de ejecución de tarea autónomo y un nivel de control de tarea compartida. El nivel de tarea compartida recibe información del sistema autónomo y del operador, y proporciona la salida correspondiente al nivel de ejecución de tarea, verificando la consistencia entre las órdenes procedentes del operador y las del sistema autónomo. La Figura 4.24 muestra un diagrama en bloques de esta arquitectura.

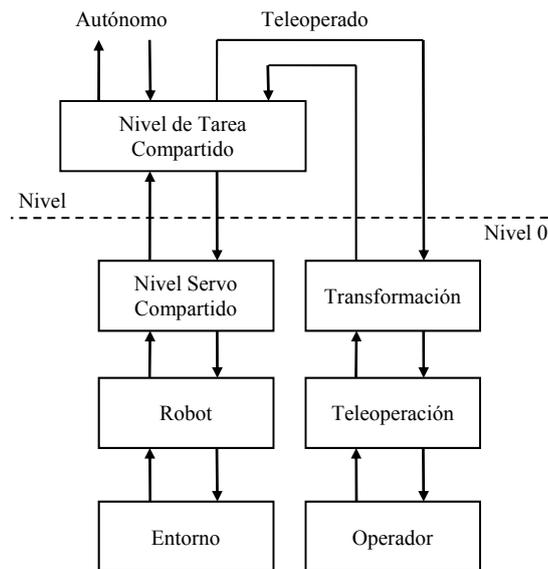


Figura 4.24. Control compartido por niveles de tarea.

En el trabajo iniciado en [Albus, McCain & Lumia 1987] se describe una arquitectura de teleoperación que contempla varios niveles. La arquitectura consiste en cuatro niveles de control distribuidos jerárquicamente, nivel de tarea, nivel de movimiento elemental, nivel primitivo y nivel de servo. El nivel de servo estaría en la parte inferior de la jerarquía responsable del control de los actuadores. La arquitectura jerárquica pretende distribuir las tareas de telemanipulación facilitando así el control compartido. En [Albus, Lumia & McCain 1988] aplica la arquitectura de control jerárquico en telerobótica espacial. En dicha arquitectura se tiene un interfaz operador para cada nivel de jerarquía, en donde el operador humano puede asumir el control. Dicho interfaz proporciona un medio por el cual los operadores humanos, en la estación espacial o en la tierra, pueden observar y supervisar el robot. Mediante diferentes tipos de entradas de control, como joystick, mouse, etc, el operador puede introducir la jerarquía en cualquier nivel, en cualquier instante, para monitorizar, introducir información, interrumpir el modo automático y tomar el control de la tarea, aplicar su inteligencia para el procesamiento de la información o para modelización. La Figura 4.25 muestra las posibles intervenciones del operador en cada nivel y la arquitectura de sistema de control jerárquico. En [Lumia, Fiala & Waveling 1988] continua el trabajo a nivel de servo.

En [Inagaki 1993] se analiza el reparto de responsabilidad entre persona y ordenador, o grados de automatización, en el control supervisado de sistemas muy complejos. Se analiza como compartir la

4.2. Ayuda a la Teleoperación

responsabilidad en caso de emergencias y el método utilizado es probabilístico. Posteriormente, en [Inagaki & Itoh 1997], se plantea el método aplicado en el despegue de aviones.

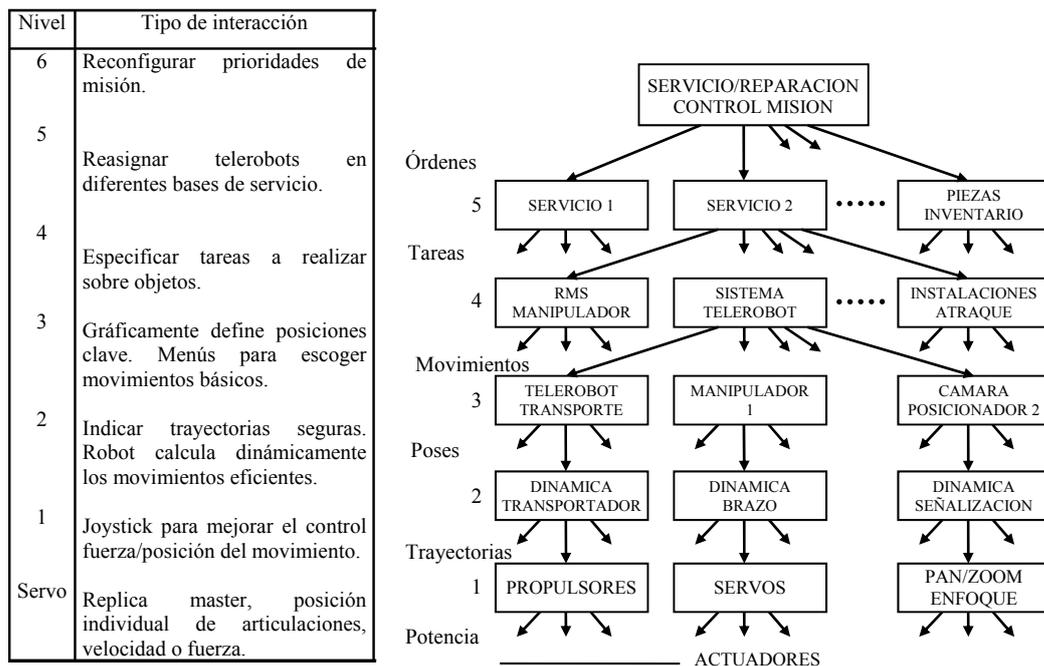


Figura 4.25. Arquitectura de control jerárquico para múltiples robots.

En [Galt et al. 1997] se trabaja en un robot escalador de 8 patas para aplicaciones nucleares, con una arquitectura de control jerárquica para controlar las articulaciones convirtiendo una serie de tareas de alto nivel definidas por el operador como caminar hacia la pared, cambiar del suelo a la pared, subir por la pared, en una secuencia de señales para sincronizar las articulaciones de las patas.

En [Chikura et al. 1999] se muestra un trabajo sobre ayuda a la teleoperación en varios niveles basado en restricciones, utilizando una fuerza de realimentación virtual. Es un concepto de ayuda basado en restricciones para proporcionar fuerza aumentada al controlador para evitar colisión con los obstáculos y guiar al operador hacia las direcciones apropiadas. Se distribuyen cuatro niveles:

Nivel 0. No soporte, sin realimentación de fuerza, máximo riesgo y libertad al operador.

Nivel 1. Evitar colisión, se genera una fuerza de repulsión en función de la distancia.

Nivel 2. Seguimiento de trayectoria. Fuerza aumentada es generada para guiar al operador.

Nivel 3. Evitar colisión y seguimiento de trayectoria. Niveles 1 y 2 simultáneamente.

4.2.2. Teleoperación y campos potenciales

La idea de introducir funciones que modifiquen el movimiento del robot en función de la posición ha sido utilizada ampliamente en robótica. Los métodos basados en funciones potenciales tales como los campos electrostáticos o Newtonianos han sido estudiados extensamente en la planificación de caminos, para la búsqueda de la posición final y evitar la colisión con los obstáculos.

En [Hwang & Ahuja 1988] los autores presentan un método de búsqueda de caminos en 2D y 3D mediante dos pasos. En el primer paso, se busca un camino aproximado a partir de una información topológica. Para esto, se asigna a cada obstáculo un potencial artificial similar a un potencial

electrostático, para prevenir el movimiento del objeto, de colisiones con los obstáculos, y entonces localizar los valles de mínimo potencial. En el segundo paso, los caminos definidos por los valles de mínimo potencial se modifican para obtener un camino libre de colisión óptimo y las orientaciones del movimiento del objeto a lo largo del camino.

En [Chuang & Ahuja 1991] utilizan un método de planificación de caminos utilizando una representación del potencial Newtoniano. El procedimiento trata de descomponer en primer lugar el espacio libre en regiones estrechas correspondientes a cuellos de botella. Después, mover el objeto a través de cada región estrecha utilizando una estrategia local que haga que el esqueleto del objeto atraviese las uniones de mínima distancia mientras se minimiza un potencial Newtoniano basado en una medida del riesgo de colisión. Después se conectan los planes locales mediante una estrategia global.

En [Hwang & Ahuja 1992] se presenta otro algoritmo de planificación de caminos para el movimiento en 3D utilizando una representación de los obstáculos mediante un campo potencial. Asignan también una función de potencial similar a la de un potencial electrostático a cada obstáculo, y la estructura topológica del espacio libre se deriva a partir de valles de potencial mínimo.

En [Barraquand, Langlois & Latombe 1991,1992] se describen diversas técnicas de campo potencial numéricas para la planificación del movimiento. Estas técnicas se basan en el uso de pirámides multiescala de arrays de mapas de bit para representar el espacio de trabajo del robot y el espacio de configuraciones. Esta representación distribuida hace posible construir campos de potencial de forma numérica en vez de forma analítica.

Algunas técnicas [Vadakkepat, Tan & Liang 2000] combinan un método de potencial artificial con algoritmos genéticos para encontrar las funciones óptimas de potencial, otras basan el método de potencial artificial en la transferencia de calor con conductividad térmica variable para describir los obstáculos y el espacio libre [Wang & Chirikjian 2000].

En [Ge & Cui 2000] analizan el problema GNRON (meta no alcanzable con objetos cercanos) para la planificación de caminos con robots móviles. Para resolver el problema diseñan nuevas funciones de potencial repulsivo tomando la distancia relativa entre el robot y la meta, asegurando que la posición final o meta es el mínimo global del potencial total. Escogiendo cuidadosamente los parámetros de las funciones de potencial, eliminan los mínimos locales de caminos libres, y al mismo tiempo, aseguran que el robot pueda alcanzar la meta evitando colisión con los obstáculos.

El trabajo comentado en el punto 4.2.1 de Aigner & McCarragher sobre control compartido y eventos discretos se extiende con el uso de campos potenciales para restringir la señal del operador y minimizar así el error humano, [Aigner & McCarragher 1997]. Utilizan campos potenciales repulsivos para repeler el manipulador de los obstáculos o del límite de la tarea y de atracción para alcanzar la consigna deseada. Ambos campos desviarán o guiarán al operador en la teleoperación restringiendo la velocidad del comando de éste con el obtenido por los campos potenciales. En la Figura 4.26 puede verse el experimento realizado en donde en (a) se observa cómo actúa el campo potencial en el movimiento resultante del robot cuando el operador intenta ir hacia el límite de la tarea y en (b) cuando intenta ir hacia el obstáculo.

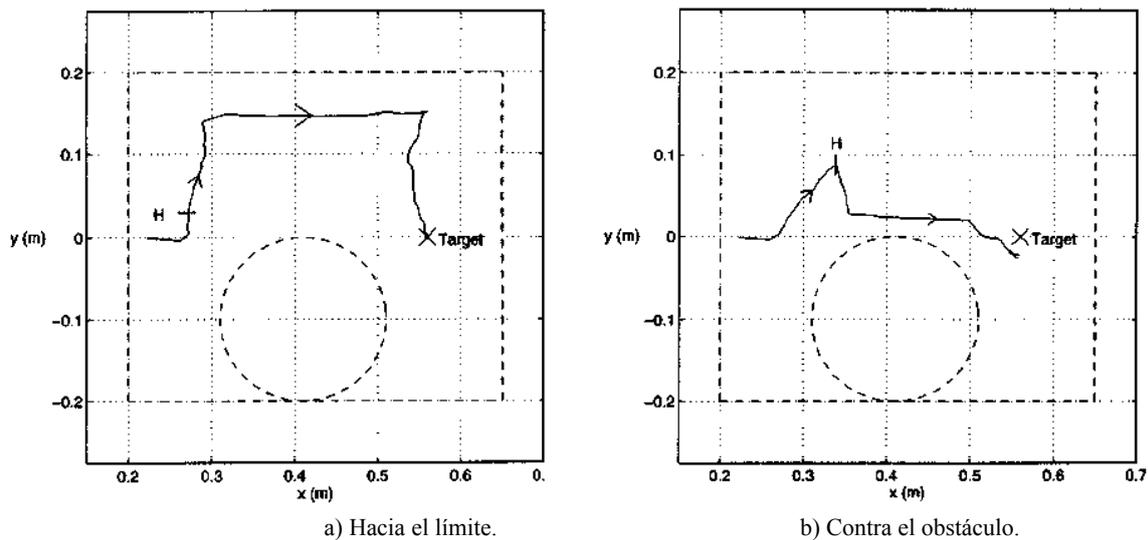


Figura 4.26. Corrección de la trayectoria del operador.

En [Caby & Crosnier 2001] muestran una solución para el problema de la manipulación libre de colisión durante la simulación y ejecución de una tarea de ensamblado teleoperada. Se trata de un método de control compartido serie y paralelo para conseguir una planificación del movimiento asistida. El operador especifica la estrategia de la tarea y el sistema de control utiliza un método de campos potenciales para evitar las colisiones.

4.2.3. Realidad aumentada como ayuda a la teleoperación

En control manual, la información de realimentación de la tarea se transmite al operador a través de cámaras, de esta manera el operador puede estar “vinculado” al robot. No obstante esta realimentación visual requiere un elevado ancho de banda en la comunicación con lo que surge el retardo, empobreciendo la eficacia de la teleoperación. Para solucionar este problema existe el llamado “display predictivo”.

Los primeros trabajos en este sentido se iniciaron en [Noyes & Sheridan 1984], donde se utiliza un visualizador gráfico predictivo del manipulador que se superpone a la imagen de video del lugar remoto de la tarea. Es decir se crea una imagen sintética de la posición del manipulador resultante del movimiento del maestro, para que de esta manera el operador pueda observar las consecuencias de sus acciones cuando estas se produzcan en la tarea remota tras el retardo. Este método permite lo que se llama teleoperación con simulación, como se muestra en [Rastogi, Milgram & Drascic 1996], en el sistema ARGOS (Augmented Reality through Graphic Overlays on Stereovideo), un modelo 3D del robot telemanipulador puede ser movido libremente por el operador de tal manera que puede determinarse por qué puntos pasará el robot respecto a los objetos del entorno para evitar obstáculos y escoger el mejor camino. La Figura 4.27 muestra una imagen del esqueleto del robot virtual desplazado respecto al robot real en el entorno aumentado para una tarea de pick-and-place.

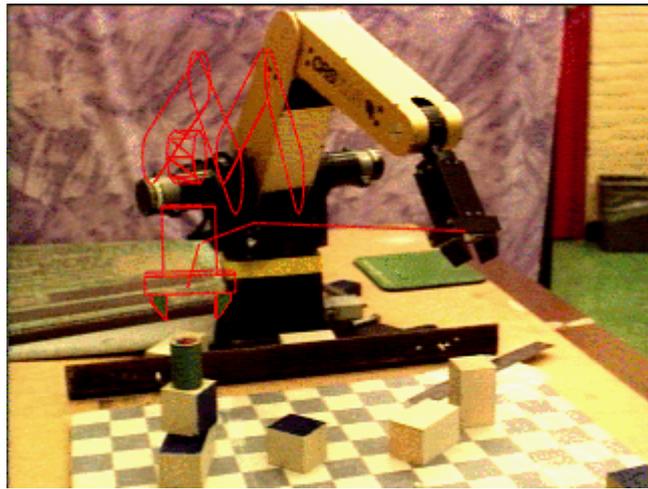


Figura 4.27. Robot virtual en entorno aumentado.

Con el objetivo de reducir la carga del operador en el control manual convencional P. Milgran desarrolla el concepto de modo de control Director/Agente, en donde el robot basado en sensores no trata de simplemente replicar los movimientos del operador, sino que en vez de proyectarse el mismo activamente en el espacio de trabajo, el operador actúa como un “director”, mientras que el dispositivo telemanipulado actúa como un “agente” (o delegado) proporcionando al sistema las ventajas de los robots, cálculo, precisión y sensado. De esta manera, el operador director puede considerarse “adyacente a”, en vez de “coincidente con”, el robot en el lugar remoto.

En [Zhai & Milgran 1991] y [Milgran, Zhai & Drascic 1993] aplican el método Director/Agente en lo que denominan un “control virtual”, donde el operador comunica comandos por medio de un puntero virtual de tal modo que el manipulador esclavo ejecuta una acción específica. En su sistema ARGOS, comentado más arriba, implementan una comunicación espacial persona-robot. Para ello, en una imagen de video estereoscópica se superpone el puntero virtual que proporciona ayuda geométrica sobre la distancia y facilita la tarea al servir de guía en realizar una tarea como la de ensamblar una clavija en un agujero, mejorando la repetibilidad respecto a un puntero real. Posteriormente se añaden otras “ayudas virtuales” como balizas virtuales, que son objetos gráficos de tamaño conocido que se superimponen a la imagen para tener una referencia de escalas y distancias, planos virtuales y objetos virtuales como referencia de orientación y posicionamiento, encapsuladores virtuales, que definen unos márgenes de trabajo en el espacio, y trayectorias virtuales, como indicaciones gráficas de movimientos del robot.

Otro sistema que desarrolla este grupo es el ARTEMIS (Augmented Reality TeleManipulation Interface System) como mejora del ARGOS, en donde se añade un modelo 3D del manipulador, es decir, un manipulador virtual. Y una mejora adicional es el sistema VERO (Virtual Environments for Remote Operations) añadiéndole un modelo virtual más detallado mediante un refresco de imágenes del mundo real. La Figura 4.28 muestra un esquema de la idea de estos sistemas de cómo el operador supervisor con ayuda del entorno virtual creado a partir de imágenes reales y virtuales, planifica, monitoriza, ejecuta y aprende para transferir los comandos oportunos para realizar la tarea remota.

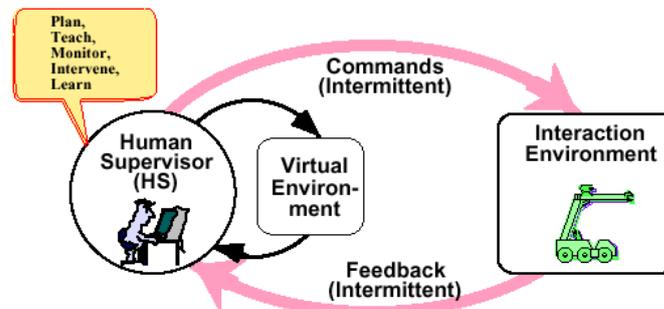


Figura 4.28. Entorno virtual para operaciones remotas.

Algunos métodos tratan de modificar la realimentación en función del punto de vista del operador. En un método convencional de operación con punto de vista fijo, las direcciones de operación y fuerza de reacción son fijadas a las coordenadas iniciales, si el punto de vista cambia, el operador puede entrar en confusión. En [Hideaki et al. 2000] se propone un método de operación de “punto de vista directo”. En este caso, la dirección de operación y la fuerza de reacción corresponden a la dirección del movimiento y fuerza de reacción basados en un punto de vista del espacio de realidad virtual. De esta manera, el operador está inmerso en el espacio de realidad virtual independientemente de que cambie el punto de vista en cualquier instante. Esta operación permite realizarse cuando el punto de vista se aproxima al punto de interés y/o el punto de vista se aleja al punto de interés, de tal manera que el operador no entra en confusión al operar la herramienta virtual cambiando el punto de vista.

4.2.4. Realimentación háptica en teleoperación

El empleo de la realimentación háptica en la interfaz con ordenador ha mostrado mejora en el tiempo de ejecución de tareas de selección de objetos en pantalla, arrastre y selección. En [Dennerlein, Martin & Hasser 2000] emplean un ratón con realimentación de fuerza para facilitar este tipo de tareas mejorando en un 52% el tiempo de tarea respecto al procedimiento solo con realimentación visual. Para ello introducen una función de potencial sobre la fuerza de realimentación hacia el ratón según la posición del puntero. Los sistemas multimodales, que combinan realimentación visual, auditiva y/o táctil, proporcionan mejor eficacia en tareas de selección que con solo la realimentación visual, como muestran los autores en [Akamatsu, Sato & MacKenzie 1994]. Mediante el test NASA TLX sobre la carga mental de trabajo se muestra la preferencia de la realimentación táctil en interfaces persona-máquina respecto a una realimentación visual, en donde la información táctil adicional permite reducir la atención visual, [Brewster, Chohan & Brown 2007].

En [Dennerlein, Shahion & Howe 2000], los autores utilizan un sistema de realimentación vibro-táctil sobre un brazo articulado maestro hacia un brazo esclavo sobre un robot submarino orientado en una tarea de inserción, si bien no mejoraron el tiempo de tarea respecto a la no realimentación, si facilitaba la identificación de los materiales con los que trabajaban. En [Diolaiti & Melchiorri 2002] el empleo de realimentación háptica mediante un dispositivo PHANTOM con la inclusión de campos potenciales para la navegación de robots móviles permite la realización de trayectoria más suaves entre paredes minimizando el riesgo de colisión.

La realimentación háptica facilita la manipulación de pequeños objetos en entornos de micromanipulación, como el trabajo realizado por [Ando, Ohta & Hashimoto 2000] para la manipulación e inspección de componentes electrónicos.

4.2.5. Superficies Virtuales

Otro grupo de metodología de ayuda a la teleoperación son aquellos basados en las denominadas *superficies virtuales* también conocidas como *Virtual Fixtures*. Se trata de un método de ayuda al guiado en teleoperación dependiente de la geometría de la tarea, se condiciona el movimiento del operador en unas determinadas direcciones, limitando en unas y facilitando en otras. Como una ligadura geométrica en el espacio de configuraciones del robot, la superficie virtual impone restricciones en el movimiento del robot para evitar que colisione, o bien añade movimiento para facilitar por ejemplo el agarre de un objeto, mostrando su eficacia en términos de tiempo de ejecución, precisión y carga mental de trabajo para el operador, [Kuang et al. 2004].

Dadas sus características, sus principales aplicaciones están dirigidas a aplicaciones de cirugía en donde el movimiento del cirujano queda restringido por las superficies virtuales, protegiendo así tejidos y vasos sanguíneos, [Taylor & Ming 2004]; por otro lado también está dirigido a la manipulación de cargas pesadas, en donde estas superficies actúan para compensar el peso y las inercias, acelerando la tarea y limitando los esfuerzos sobre el operador, [Peshkin et al. 2001]. También está dirigido en tareas de entrenamiento para teleoperación creando regiones virtuales prohibidas, las ligaduras generadas pueden inducirse hacia el robot, o también hacia el interfaz háptico, [Payandeh & Stanisic 2002].

La Figura 4.34a y b muestra la idea de funcionamiento de dos tipos de superficies virtuales, de prohibición y de guiado. La Figura 4.34c muestra la forma de las superficies virtuales que permiten restringir los grados de libertad del manipulador en una tarea de extracción e inserción en las inmediaciones de la posición de agarre del objeto, de esta manera se evita la colisión y se acelera el proceso de extracción o inserción de la pieza.

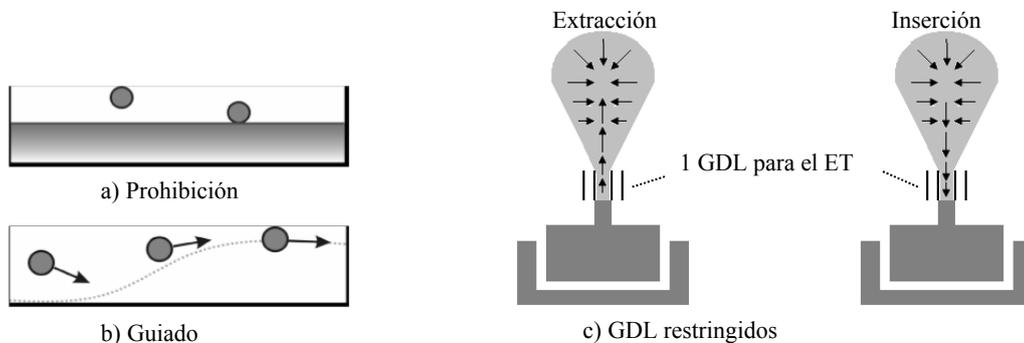


Figura 4.34. Formas de las ligaduras creadas por las *superficies virtuales*.

4.2.6. Escalas en la interfaz de teleoperación

En el campo de la cirugía robotizada existen sistemas que emplean técnicas mínimamente invasivas utilizando laparoscopios accionados a través de brazos robot. Algunos de los sistemas comerciales que actualmente se emplean con éxito son el *daVinci surgical system* de *Intuitive Surgical*, Figura 4.35, que fue el primero en ser implantado y el *Zeus* de *Medtronic*, Figura 4.36. El empleo de estos sistemas ha demostrado reducción en el número de errores con respecto a la laparoscopia convencional, ya que permiten aumentar la destreza al eliminar el temblor y aumentar el número de grados de libertad, reducir la carga de trabajo y mejorar la precisión gracias a la visión aumentada y el escalado de movimientos. En este último aspecto se ha mostrado [Ellis et al. 2004] que puede optimizarse el rendimiento de la tarea

4.2. Ayuda a la Teleoperación

reduciéndose el tiempo de operación actuando en la ganancia Control-Display (cantidad de movimiento del robot con respecto al movimiento del controlador) así como en el nivel de zoom óptico. Con distintas combinaciones de ambos parámetros puede verse como afecta el tiempo de tarea, Figura 4.37. Estos autores utilizaron el sistema Zeus, la modificación de la ganancia Control-Display se efectúa sobre los controles de *Micro-Wrist*, Figura 4.36.

En [Prasad et al. 2004] también emplean la plataforma Zeus para analizar el impacto del escalado de los movimientos sobre la eficacia de las tareas de microcirugía. Observan que el escalado motor tiene un gran efecto sobre la precisión comparado con el filtrado del temblor fisiológico. La laparoscopia robotizada con el escalado de movimiento se ve claramente mejorada en términos de precisión con respecto a la laparoscopia manual y con la laparoscopia robotizada con solo el filtrado del temblor.

La Tabla 4.1 muestra los valores de precisión (puntuación) y tiempo de ejecución para distintas configuraciones. El experimento comienza con un ensayo con laparoscopia manual, seguido por diferentes combinaciones de laparoscopia robótica y se finaliza repitiendo la laparoscopia manual. Se observa una gran mejora en la precisión a escalas altas, si bien el tiempo de ejecución es mucho mayor que en la laparoscopia manual, este es menor que en la laparoscopia robotizada a escala unitaria.



Figura 4.35. DaVinci Surgical System. 6GDL, 3-4 brazos robot, cámara 3D, instrumentos de 8mm.



Figura 4.36. Sistema Zeus. 5GDL, 3 brazos robot, cámara 3D, instrumentos de 4mm. A la derecha los efectores terminales y el sistema de controladores *Micro-Wrist*.

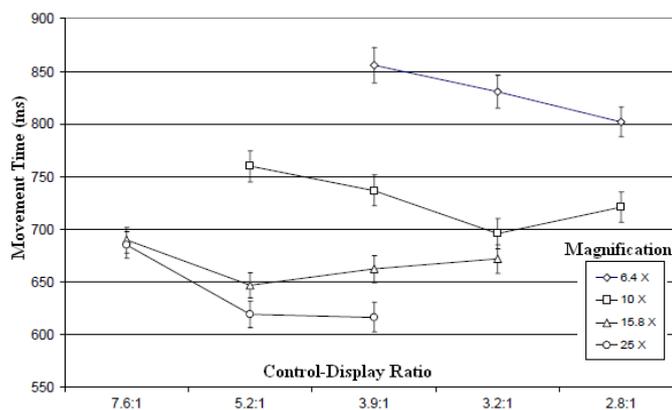


Figura 4.37. Variación del tiempo de ejecución con distintas combinaciones de escalado del sistema Zeus.

Plataforma	Precisión(μm)	Tiempo(s)
Laparoscopia manual inicial	72	406
Laparoscopia robótica, escala 1:1	77	724
Laparoscopia robótica + filtro temblor, escala 2.5:1	93	626
Laparoscopia robótica + filtro temblor, escala 7:1	96	646
Laparoscopia manual final	76	341

Tabla 4.1. Precisión y tiempo de ejecución para diferentes configuraciones en un experimento de microcirugía.

4.3. Resumen

Este apartado muestra a modo de resumen los métodos de ayuda a la teleoperación estudiados. En primer lugar resumir las limitaciones que presenta la teleoperación convencional que motiva la búsqueda de métodos de ayuda a la teleoperación, que son:

- Retardo de realimentación de la información
- Ancho de banda de la comunicación
- Tiempo de entrenamiento necesario para la teleoperación
- Necesidades de seguridad
- Errores humanos
- Monotonía de tareas repetitivas
- Fatiga
- Información confusa, cambios de punto de vista.

Estas limitaciones dificultan la tarea, minimizan su eficacia o ponen en peligro personas, sistemas y objetos. La ayuda de combinar las mejores propiedades de personas, como el conocimiento heurístico, la creatividad, la destreza y el sentido común, con las mejores propiedades de los robots, rápido cálculo, potencia mecánica, precisión y perseverancia, en lo que se ha definido como control semiautónomo, en donde una función autónoma, ya sea continua o discreta, se combina de algún modo con las decisiones y control del operador para realizar con éxito las tareas remotas propias a las que va dirigida la teleoperación.

En los sistemas basados en eventos discretos el operador trabaja en modo supervisor, interviniendo para evitar obstáculos o replanificar tareas. La parte autónoma libera al operador de tareas deterministas y repetitivas y restringe al operador a realizar acciones inadecuadas. Presenta el inconveniente que en

4.3. Resumen

entornos no estructurados o muy cambiantes, la mayor parte de la tarea la realizará el operador en modo manual y fuerza a un diseño de los eventos muy dependiente de cada tarea.

Los métodos de control semiautónomo basados en funciones permiten mejorar el control en tareas de bajo nivel para el control de fuerza y posición, de tal manera que puede obtenerse un mejor comportamiento en el control de fuerza gracias a la capacidad de sensado de los robots y el control de posición de alto nivel del operador para modificar las trayectorias en caso de obstáculos u otros. Sigue siendo muy dependiente del operador en entornos poco estructurados, no obstante la búsqueda de funciones inteligentes que utilicen información del entorno podría ser una importante ayuda en entornos no estructurados.

Distribuir la teleoperación en tareas y distintos niveles de operación aporta gran flexibilidad al operador al poder intervenir en diferentes estamentos de mayor o menor nivel, tanto de planificación de la tarea como de ejecución de movimientos de bajo nivel. Se hace necesaria la aportación de métodos que gestionen las prioridades entre las decisiones de operador y sistema automático en la interacción de múltiples niveles.

Los métodos basados en campos potenciales aportan una gran ayuda en la tarea autónoma en la búsqueda del mejor camino hacia el punto de interés. Los métodos aplicados a la teleoperación permiten ayudar al operador restringiendo o facilitando su camino en la tarea. Se precisa del uso de modelos relativamente complejos para aproximar las formas de los objetos del entorno a los correspondientes campos potenciales.

La realidad aumentada es una gran ayuda gráfica al operador reduciendo el problema del retardo de realimentación en la comunicación y ayudando en la planificación y el movimiento del robot. Abre un importante campo en la comunicación persona-robot facilitando la aplicación del concepto de Director/Agente.

Las superficies virtuales son una técnica de guiado que liga la realimentación háptica introduciendo funciones potenciales entorno a los objetos del espacio de trabajo conocido, facilita la teleoperación si bien los objetos, formas y su posición han de ser bien conocidas a priori.

La realimentación háptica es una herramienta fundamental en teleoperación que potencia la eficiencia de la tarea y reduce el tiempo de la misma en interfaces por computador y sistemas teleoperados, permitiendo su uso en sistemas multimodales, así como integrada junto con otras técnicas de ayuda a la teleoperación.

Interviniendo sobre los escalados de movimiento y visuales como los que se emplean en algunos sistemas de cirugía robotizada se observa cómo puede optimizarse el sistema. Lo que se requiere es un método sistemático para introducir esos valores de escala.

En este trabajo se propone explorar técnicas de escalado en la interfaz del operador como método de ayuda a la teleoperación interviniendo en el flujo de información entre el operador y la interfaz, que permite modificar la resolución espacial y/o motora, y consecuentemente la velocidad del movimiento del robot mejorando así la telemanipulación por parte del operador. Se trata de un control teleoperado asistido donde se combina la acción del operador y un sistema basado en funciones de escala que modifica la acción del operador modificando el movimiento del robot, produciendo un efecto de guiado hacia el

4. Métodos de ayuda a la Interacción Persona-Máquina

objetivo. El método deberá permitir reducir los errores, reducir la carga de trabajo y el tiempo de ejecución de los movimientos. Este método combina las ventajas de los sistemas descritos basados en funciones que permite mejorar la controlabilidad del movimiento, y las características de los sistemas basados en campos potenciales, por el efecto de atracción y repulsión que facilita el guiado. La posibilidad de introducir la modificación de la resolución espacial a los objetos y su aplicación en tiempo real realimentando la geometría del entorno, permitiría aumentar la autonomía de la tarea, dejando para el operador la ejecución de la tarea precisa entorno a los objetos de interés. La deformación continua del espacio y su aplicación en tiempo real permite su aplicación en entornos poco estructurados y evita los inconvenientes de los sistemas orientados a eventos discretos. Es un método que puede integrarse de forma compatible con otras técnicas de ayuda a la teleoperación como la realidad aumentada o la realimentación háptica.

Parte II Metodología

5. Transformación escalar entre Persona-Interfaz-Robot

Este capítulo describe una metodología orientada a la teleoperación asistida en la interacción con una interfaz de ordenador para facilitar la realización de una tarea en términos de dificultad y tiempo de ejecución. El trabajo descrito muestra la relación establecida en el triángulo persona-interfaz-robot, introduciendo una transformación de escala entre el espacio de trabajo del operador y la interfaz, y entre la interfaz y el espacio de trabajo del robot teleoperado.

Se pretende analizar la estrategia que permite incidir en los aspectos visuales y motores de la interfaz de teleoperación, de tal manera que al acomodar las escalas visuales y de movimiento del operador afecten favorablemente en la ejecución de la tarea a efectuar. Para ello, se pretende vincular el espacio de trabajo de la persona operador, con el espacio de trabajo del robot manipulador, a través de una interfaz que introduce diversos escalados; uno de ellos entre el movimiento proporcionado por el operador a través del dispositivo de mando y la posición virtual del extremo terminal del robot en la pantalla de visualización, y un escalado adicional en esta pantalla. Los escalados introducidos se adaptarán a los objetos de interés, obteniéndose como resultado una modificación de la resolución espacial acorde con la tarea a realizar, modificándose como consecuencia la velocidad del manipulador, permitiendo así poder realizar eficazmente tareas complejas y precisas.

5.1. Flujo de información en Teleoperación

Tal como se relató en la introducción, Fitts [Fitts 1954] modelizó a la persona como un canal de comunicación en el proceso de ejecución de un movimiento, en donde la información que fluye a través de ella depende del tamaño de los objetos y la distancia a la que se encuentran, tal como se mostró en (3.6). Esa información queda determinada por su índice de dificultad ID que por analogía al teorema de Shannon se le da dimensión de bits, pese a ser adimensional (al provenir de un cociente entre distancias), y por el *Throughput* TP medida en bits/s como el tiempo que la persona tarda en ejecutar una tarea con un índice de dificultad determinado. Partiendo de esta premisa se puede modelizar de forma macroscópica al operador interactuando en una tarea a través de un flujo de información.

Este flujo de información será de dos direcciones, una de entrada, proveniente de la tarea, esencialmente de tipo visual, y una de salida, hacia la tarea, de tipo motora. El Flujo de Información de Entrada del Operador (FIEO) viene determinado por la capacidad de la persona para procesar y reconocer la información visual que recibe, mientras que el Flujo de Información de Salida del Operador (FISO) queda condicionado por sus limitaciones motoras (Figura 5.1). El flujo de información máximo que el operador podrá manejar será su propio *Throughput*, TP , con lo que una determinada tarea de dificultad ID podrá ejecutarse en un tiempo que vendrá dado por ese TP , como se deduce de (3.10).

Al convertir una tarea manual en una tarea teleoperada, la interfaz del operador aparece entre el operador y el dispositivo teleoperado que entra ahora en contacto con la tarea (Figura 5.2). La dificultad de la tarea

5.2. Triángulo Persona-Interfaz-Robot

es en este caso transformada por la interfaz, por un lado la interfaz visual mostrando la información a través de un monitor, y por otro, la interfaz motora, traduciendo las órdenes del control manual procedentes del operador.

El Flujo de Información Visual de Entrada (FVE) procederá de la tarea, por ejemplo desde una cámara, y vendrá limitado por sus características (resolución, imágenes/s,...), y el Flujo Motor de Salida (FMS) conectará las órdenes manuales del operador con los movimientos del robot, y será limitado por sus características (GdL, resolución,...). El índice de dificultad ID resultante dependerá del tamaño aparente y del movimiento de los objetos mostrados por la interfaz visual, y junto con la interfaz de entrada puede ser controlado para estar acorde con el TP del operador. Dependiendo de las características de la interfaz y del robot teleoperado empleado, la tarea en modo teleoperado puede ser ejecutada de forma más precisa, o más rápida o más precisa y rápida que la misma tarea ejecutada en modo manual.

El retardo en la comunicación y el grado de acoplamiento entre la mano del operador y el dispositivo de interfaz de entrada pueden provocar empeoramiento en la eficacia de la tarea teleoperada con respecto a la operación manual, es por esto que una teleoperación asistida puede compensar algunos de estos inconvenientes.

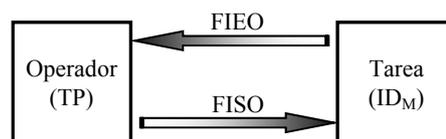


Figura 5.1. Flujo de información en una tarea manual.

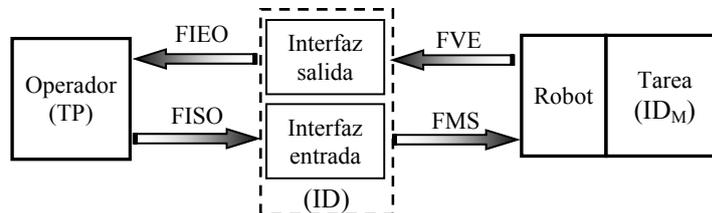


Figura 5.2. Flujo de información en una tarea teleoperada.

5.2. Triángulo Persona-Interfaz-Robot

El desplazamiento que debe realizar el operador con su elemento de control puede ser modificado en primera instancia por el C-D ratio, o también por la posición en la pantalla de visualización. Estas modificaciones actúan, según la Ley de Fitts (3.6) en el parámetro de distancia D . Por otro lado, el escalado realizado en la pantalla de visualización intervendrá en el tamaño aparente del objeto W en la ecuación (3.6). Tal como se ha comentado en los capítulos anteriores, el escalado visual influye en la precisión de la tarea, mayor escalado, menor error. Con todo esto, la modificación de dichas escalas influirá directamente en la precisión de la tarea, su dificultad, ya que se modifica el índice ID (3.7), y finalmente el tiempo de la tarea.

Para poder analizar y relacionar el efecto de las escalas sobre la interfaz de la teleoperación se describirá el concepto de espacios motor, visual y de trabajo dentro de lo que podríamos llamar el “triángulo persona-interfaz-robot”.

5.2.1. Los espacios del triángulo persona-interfaz-robot

La Figura 5.3 muestra una representación de los tres espacios en un entorno de teleoperación. En primer lugar se tiene el espacio de trabajo del operador, al que llamaremos *espacio motor* (MS) por el movimiento que realiza el operador a través del dispositivo de interfaz de entrada. Las dimensiones del espacio motor dependerán del tipo y características del dispositivo interfaz. En segundo lugar el *espacio visual* (VS), es la interfaz de salida y estará conformado por la pantalla de visualización. Por último el *espacio de trabajo* (WS) donde se halla el entorno de la tarea y el dispositivo teleoperado. Estos tres espacios conforman lo que denominaremos el *triángulo Persona-Interfaz-Robot* en donde se vinculan los movimientos del operador a través de la interfaz compuesta por el dispositivo de control y la pantalla de visualización.

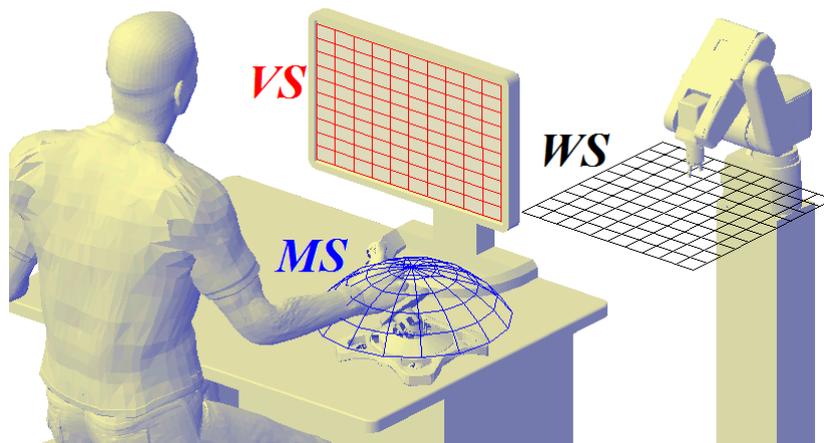


Figura 5.3. Los tres espacios del triángulo persona-interfaz-robot.

El espacio motor (MS) es el lugar donde se proyectan los puntos obtenidos del movimiento del operador a través del dispositivo de interfaz de entrada. Su rango, dimensión y forma dependerá de la naturaleza del dispositivo de interfaz (incremental, absoluto, angular, lineal,...). Recuerda al concepto de “volumen de trabajo” en un robot, pero aplicado al movimiento del operador. La Figura 5.4, muestra el espacio motor de cuatro dispositivos de interfaz comunes, la pantalla táctil, el ratón, la bola trazadora y el joystick. El espacio motor “físico” es el que se muestra en color azul, en donde tiene lugar el movimiento directo del operador. Bajo éste, se muestra el plano cartesiano en donde se manifiestan los puntos obtenidos en el espacio motor físico. A este plano cartesiano le llamaremos espacio motor “proyectado”.

En el caso de una pantalla táctil el espacio motor coincide directamente con el espacio físico de la propia pantalla, Figura 5.4a, dos dimensiones, plano, rectangular y de dimensión finita; dado que es absoluto poseerá un origen de referencia. En el caso de un ratón, también es de dos dimensiones, plano pero dada su naturaleza incremental su dimensión es infinita, y no posee un origen definido, si bien su rango de movimiento se confina a algunas decenas de centímetros dentro del alcance de la mano y el brazo, Figura 5.4b. Una bola trazadora, Figura 5.4c, tendrá un comportamiento similar al del ratón, pero la forma de su espacio motor será semiesférica. Para un joystick, puede poseer comportamiento absoluto, con lo que poseerá un origen definido, la forma del espacio de trabajo será semiesférica, de dimensión finita, Figura 5.4d, pero también puede poseer comportamiento incremental, con dimensión infinita y origen no definido. Como ejemplo de espacio motor tridimensional observamos al Dispositivo tipo-lápiz (PHANTOM), Figura 5.4e, con comportamiento absoluto, sistema de referencia definido y volumen finito, su forma es similar a la de un robot angular. En la Figura 5.4f se muestra el caso de un joystick 3D

5.2. Triángulo Persona-Interfaz-Robot

isométrico (o quasi-isométrico, apenas 2 o 3 mm de rango de movimiento en todas las direcciones), su volumen de trabajo es muy pequeño con lo que las ordenes de fuerza se traducirán en ordenes de incremento de movimiento en cualquier dirección y orientación, su comportamiento será incremental, con dimensión infinita y origen no definido.

El espacio visual (VS) es el lugar donde se proyecta la imagen real o/y virtual del espacio de trabajo, donde se lleva a cabo la tarea. En el espacio visual pueden llevarse a cabo distintas transformaciones, de orientación, posición, escala, proyección o perspectiva. El espacio visual puede ser representado mediante monitores planos convencionales, proyectores LCD, gafas activas u otros sistemas utilizados en realidad virtual. Las dimensiones del espacio visual dependerán del tamaño del dispositivo donde se proyectan las imágenes y a su vez de la porción de la ventana activa, Figura 5.5.

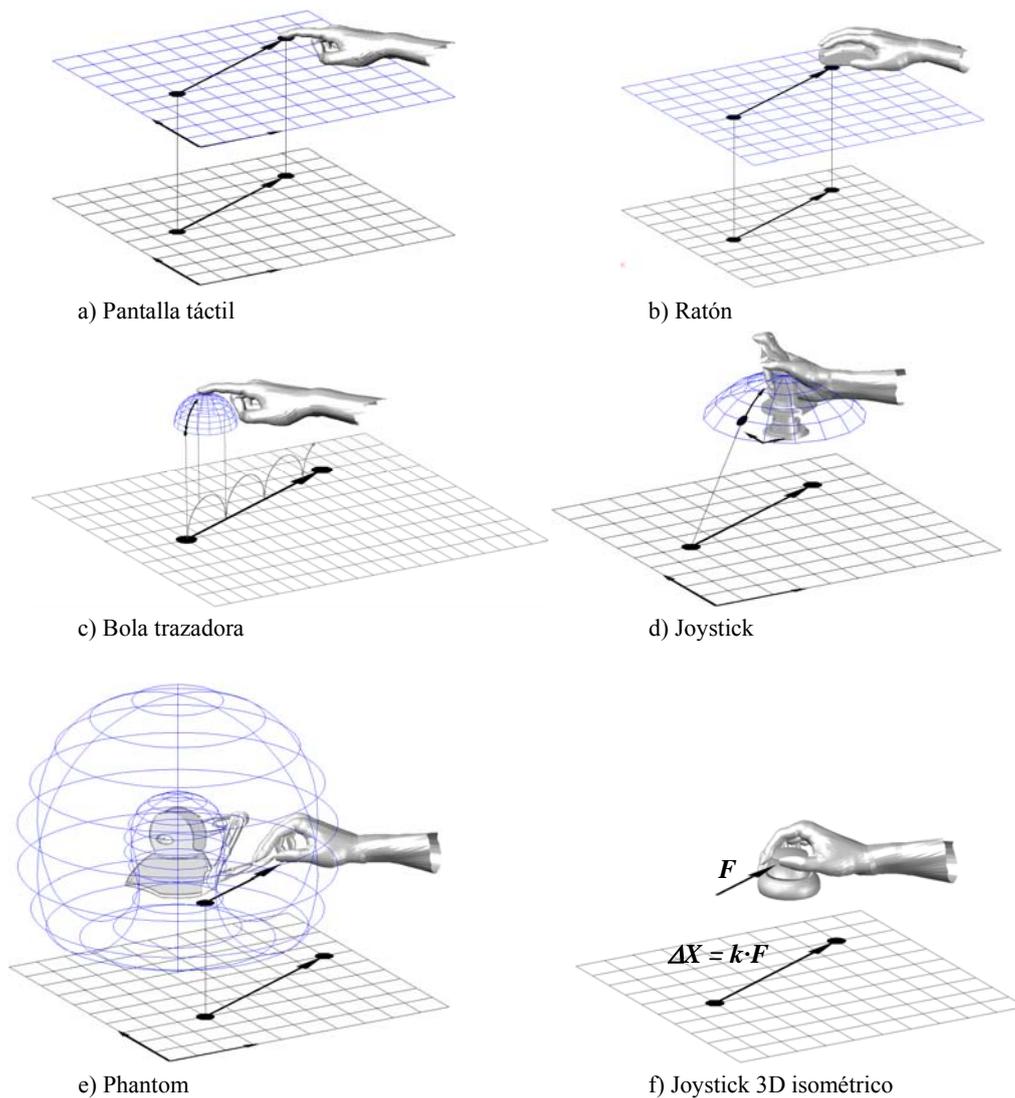


Figura 5.4. Representación del espacio motor físico (en azul) y espacio motor proyectado (en gris) para dispositivos de interfaz de entrada. El dispositivo Phantom, e) trabaja de forma absoluta, en la figura su movimiento se proyecta sobre un espacio 2D. El joystick 3D isométrico, f) presenta un volumen de trabajo muy pequeño, con lo que trabajará de forma relativa, las ordenes de fuerza se traducen en ordenes de velocidad.

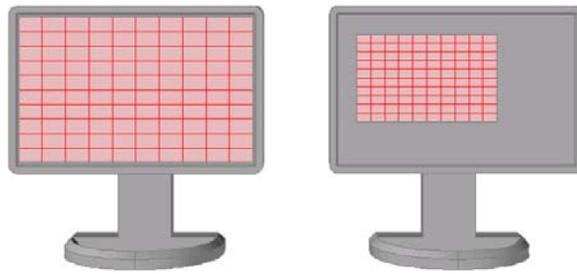


Figura 5.5. El espacio visual, a la izquierda coincide con el monitor, a la derecha es menor.

El espacio de trabajo (WS) es el lugar físico o entorno en donde se lleva a cabo la tarea de teleoperación a través del dispositivo teleoperado, Figura 5.6. Sus dimensiones dependerán de las propias de la tarea así como del rango de actuación del dispositivo teleoperado.

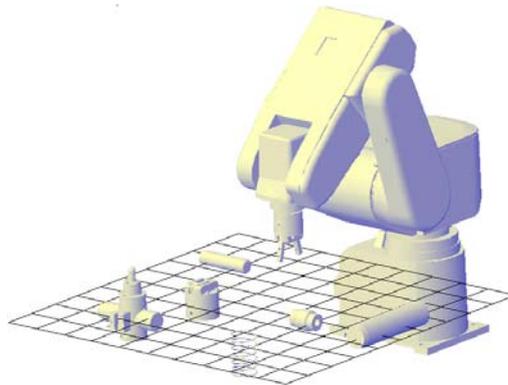


Figura 5.6. Espacio de trabajo.

5.2.2. Variables de escalado

Definiremos las variables de escalado o variables de escala, como aquellas que relacionan las dimensiones relativas entre cada uno de los tres espacios en un instante dado y para una configuración dada de todos los elementos que intervienen. Entre los tres espacios se sitúan dos *variables de escalado*, que denominaremos *escalado motor* s_1 , y *escalado visual* s_2 (Figura 5.7). Así, la variable de escalado motor s_1 , es la que relaciona el espacio motor con el espacio visual, y corresponde al valor inverso del ratio C-D; y la variable de escalado visual s_2 , es la que relaciona el espacio visual con el espacio de trabajo, se acercaría a lo que se conoce como “zoom”. Entonces, el movimiento de las acciones realizadas con la mano, en el espacio motor, mediante el dispositivo de control correspondiente, se relaciona con el movimiento del cursor en la pantalla de visualización, o espacio visual, VS , mediante la variable de escalado s_1 . La dimensión del espacio visual se relaciona con la dimensión del espacio de trabajo del robot mediante la variable de escalado s_2 .

Para representar las proporciones de los diferentes espacios entre sí se utilizará una representación de *espacio-escala*. En esta representación, una forma geométrica, en este caso un cono, proyecta un espacio sobre otro en donde la variable de escala relaciona las proporciones entre dichos espacios. En la Figura 5.8 se muestra el espacio escala que relaciona los espacios motor y visual en 2D.

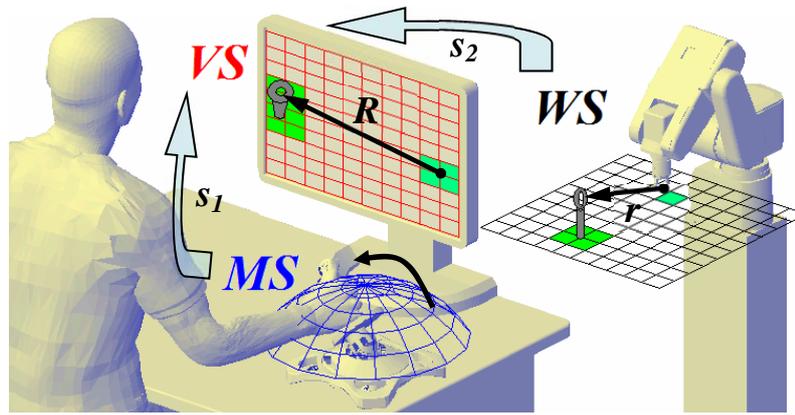


Figura 5.7. Triángulo persona-interfaz-robot e introducción de escalas.

El primer escalado que modifica el movimiento del operador corre a cargo de la variable s_1 relacionando el espacio motor con el desplazamiento virtual del extremo terminal del robot en la pantalla, donde reside el cursor. El espacio escala del movimiento del operador se proyecta sobre el espacio visual como muestra la Figura 5.8. El tamaño del espacio motor respecto al espacio visual se relaciona con la variable s_1 , el espacio motor MS puede hallarse a cualquier altura, encima o debajo del espacio visual VS , pero sin desviarse de su eje perpendicular. El plano representado del espacio motor es una proyección del espacio motor real, ya que éste dependerá del tipo de dispositivo interfaz empleado. En el caso de un ratón, la proyección será directa, en el caso de un joystick existirá una transformación de movimiento. En la Figura 5.8a, puede observarse un escalado mayor que la unidad, en donde el espacio motor es menor que el espacio visual, con lo que un movimiento en el MS supone un movimiento s_1 veces mayor en el VS . En la Figura 5.8b, un escalado menor que la unidad, con el espacio motor mayor que el visual, ciertamente con el escalado $s_1 = 1$ los espacios motores y visual serían coincidentes.

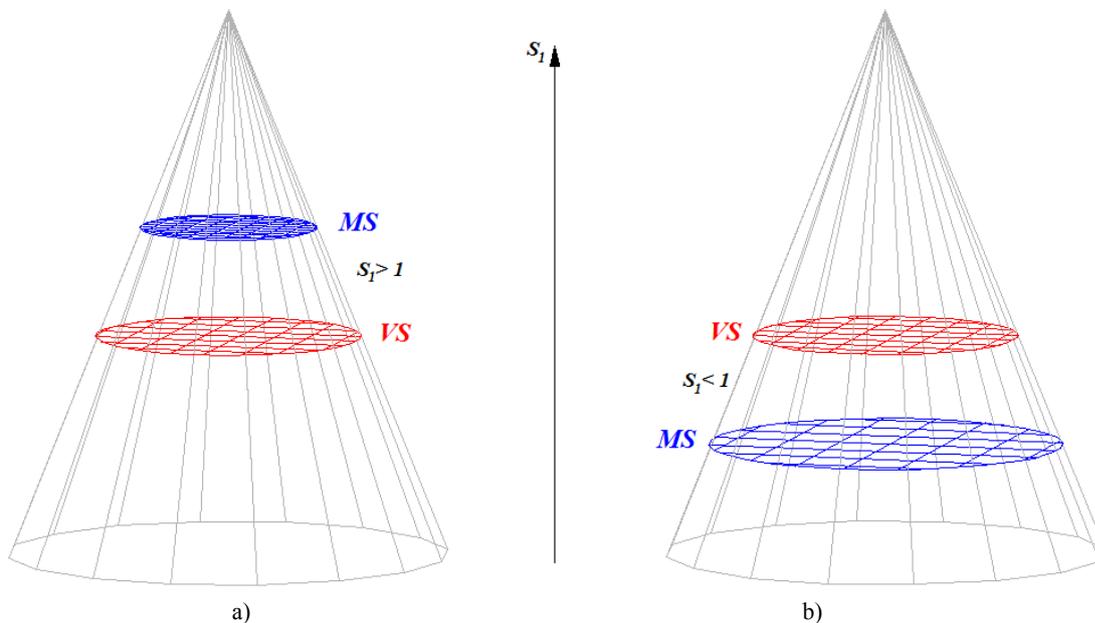


Figura 5.8. Relación entre el espacio visual VS y el espacio motor MS , a través del escalado s_1 a) MS menor que VS con $s_1 < 1$, b) MS mayor que VS con $s_1 > 1$.

El segundo escalado que modifica el movimiento del operador corre a cargo de la variable s_2 relacionando el espacio visual VS con el espacio de trabajo WS . El espacio escala del movimiento del robot se proyecta sobre el espacio visual como muestra la Figura 5.9. El tamaño del espacio de trabajo respecto al espacio

visual se relaciona con la variable s_2 , el espacio de trabajo WS puede hallarse a cualquier altura sobre o debajo del espacio visual VS , pero ahora también puede desviarse de su eje perpendicular. Esta desviación sobre el eje vertical corre a cargo de la variable p , que denominaremos variable de *pan* o de efecto *panning*³. La variable de *pan* será pues un vector correspondiente al desplazamiento aparente del espacio de trabajo sobre el espacio visual.

En la Figura 5.9a puede observarse un escalado menor que la unidad en donde el espacio de trabajo “visible” es mayor que el espacio visual, aquí no hay desviación relativa entre ambos espacios representándose con la variable de *pan* $p = 0$. En la Figura 5.9b el escalado s_2 es mayor que la unidad, con el espacio de trabajo “visible” menor que el visual, aquí se ha representado a la variable *pan* como un vector que indica el desplazamiento entre ambos espacios.

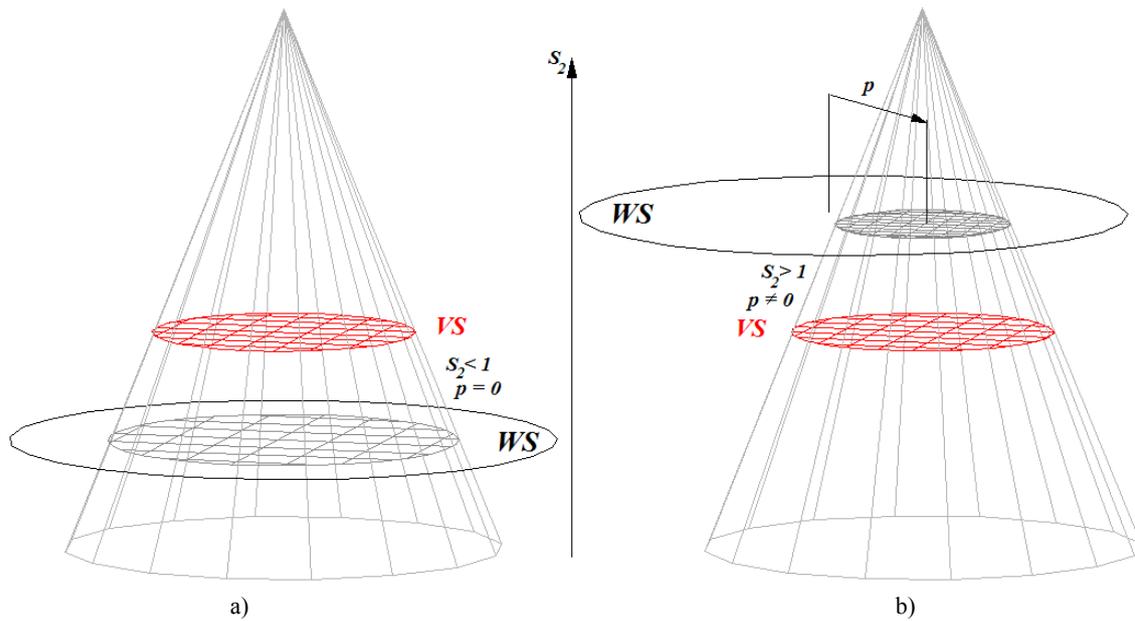


Figura 5.9. Relación entre el espacio visual VS y el espacio de trabajo WS , a través del escalado s_2 . a) VS menor que WS con $s_2 < 1$ y *pan* $p = 0$, b) VS mayor que WS con $s_2 > 1$ y *pan* $p \neq 0$.

En la Figura 5.10 se han representado los tres espacios con $s_1 < 1$, $s_2 > 1$ y $p \neq 0$. Dado que el espacio visual VS , estará estrechamente ligado a la pantalla o ventana de visualización disponible, su tamaño y posición relativa en el cono del espacio de escalas serán fijos. La posición del espacio motor MS se moverá sobre el eje del cono según la variable de escala s_1 . Si bien el espacio de trabajo “real” poseerá un tamaño fijo y conocido, el espacio de trabajo “visible”, es decir el que se muestra en el espacio visual, dependerá de sendas variables s_2 y p , moviéndose respectivamente sobre el eje del cono o sobre un plano normal a él con dichas variables.

La disposición de los espacios, debido a las variables de escalado y la variable *pan*, determinará la porción visible del espacio de trabajo y la velocidad del efector final del robot con respecto a la velocidad ordenada por el operador a través del dispositivo de interfaz. En el siguiente apartado se analizará en qué forma estas variables evolucionarán en función de los objetos de interés del espacio de trabajo.

³ El termino *pan* viene del efecto de *panning* que en fotografía consiste en seguir con la cámara el motivo en movimiento durante el disparo y el fondo queda movido. Si bien podría aceptarse como “barrido” la traducción al castellano, se ha preferido mantener el término en inglés tal y como se utiliza en la bibliografía.

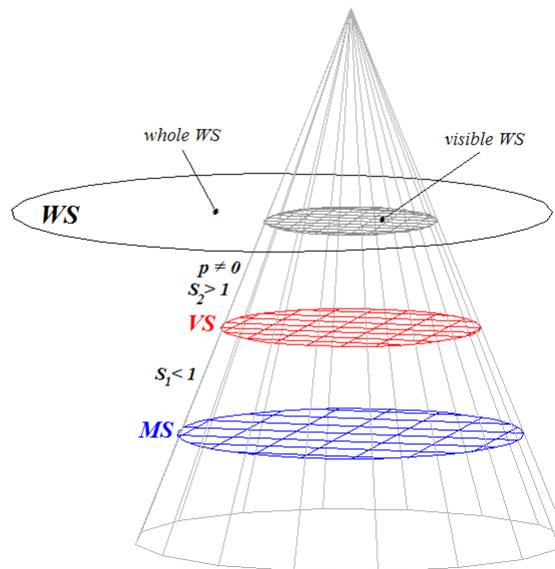


Figura 5.10. Configuración de los tres espacios.

5.3. Transformación multiescalar

El desplazamiento del cursor, el cual es un representante de la posición del ET del robot, se verá afectado por una parte, por la variable de escalado s_1 entre los espacios motor y visual, ralentizándose o acelerándose su movimiento, y por otro lado por la variable de escalado s_2 entre los espacios visual y de trabajo, y por último por la variable de pan p que permite desplazar la zona de acción del espacio de trabajo visible en el espacio visual. La transformación aparente del espacio de trabajo que permitirá modificar el movimiento del robot respecto el movimiento del operador está orientada en pos de una mejora de la eficacia de la tarea de teleoperación en términos de precisión, tiempo de realización y ergonomía. Como se mostró en la sección 3.2 el modelo de la Ley de Fitts mostraba como el tiempo de tarea era dependiente del desplazamiento a realizar por el operador hacia el objeto de interés y del tamaño de éste, también se ha mostrado que la precisión en el desplazamiento depende del tamaño visual de los objetos y del tamaño del espacio motor, aunque el aumento del tamaño de estos espacios influía también aumentando el tiempo de tarea. Se ha demostrado que puede reducirse el tiempo de ejecución de una tarea con un escalado en las inmediaciones del objeto de interés.

5.3.1. Variables de escalado como función de la distancia

Dado que la precisión y tiempo de selección en una tarea de Fitts es dependiente del tamaño final del objeto a seleccionar, y el desplazamiento total depende de la distancia, se establece que las variables de escalado son función de la distancia, tomándose como hipótesis de partida las siguientes:

- Interviniendo sobre el escalado motor puede reducirse la distancia total a recorrer por el operador en el espacio motor, con valores mayores de escalado a distancias grandes de los objetos de interés, considerando que lejos de estos objetos la precisión necesaria de movimiento es menor, y con valores menores de escalado cerca de estos para no alterar dicha precisión.

- El efecto del escalado motor influirá en la reducción del tiempo de la tarea, así como en su ergonomía, dado que se reduce la carga de trabajo al mantener las distancias en el espacio motor dentro de un rango confortable.
- Interviniendo sobre el escalado visual puede reducirse el tiempo de selección de un objeto, con valores mayores a distancias pequeñas de los objetos de interés, considerando que cerca de estos objetos la precisión necesaria de movimiento es mayor, reduciéndose así el número de iteraciones final. En cambio, los valores de escalado serán mayores lejos de los objetos para no aumentar la distancia a recorrer en el espacio motor.
- El efecto del escalado visual influirá en la reducción del tiempo de la tarea, así como en su ergonomía, dado que se reduce la carga de trabajo al reducir el número de correcciones por un lado, y mejorando la visibilidad de los objetos por otro.

Se definirán pues las funciones de escalado $s_1(r)$ y $s_2(r)$ como funciones de la distancia r , en el espacio de trabajo, a los objetos de interés. La forma de dichas funciones se establecerá posteriormente. La dependencia con la distancia será considerada en el apartado siguiente para establecer las relaciones de movimiento entre espacios.

5.3.2. Relaciones de movimiento

Seguidamente se describirán las relaciones de movimientos entre espacios y cómo influyen los efectos de escalado y *pan* en el movimiento final en el espacio de trabajo desde el espacio motor y a través del espacio visual.

El empleo de dispositivos de interfaz en un modo de funcionamiento absoluto tiene sentido en teleoperación cuando la relación de movimiento entre el operador y el dispositivo teleoperado es uniforme, con un escalado constante, o cuando es directa, con un escalado unitario, como en el caso de un exoesqueleto. El rango de funcionamiento finito de los dispositivos de interfaz absolutos condiciona la aplicación de las relaciones de movimiento entre operador y dispositivo teleoperado. Si se desea mayor precisión de movimiento en un lugar determinado del espacio de trabajo, la modificación del escalado motor mediante una determinada función que reduce la relación de movimiento en el espacio visual, supone un incremento en el desplazamiento necesario en el espacio motor; si este tiene un rango finito saturará el movimiento. Es por esto que en este estudio solo serán considerados los dispositivos de interfaz de entrada trabajando en modo relativo. A partir de aquí la transformación de movimiento entre el espacio motor y visual, a través del escalado motor, solo será contemplada en términos de velocidades. Con esto, el movimiento realizado sobre el espacio motor dará lugar a una lectura de velocidad, no siendo relevante la posición en cada instante de la posición de la mano, o conjunto brazo-mano-dedos del operador o/y del dispositivo interfaz.

Entonces, si consideramos $\dot{\mathbf{X}}_M$ el vector velocidad en el espacio motor del operador, el movimiento en el espacio visual viene afectado por la variable de escala s_1 , con lo que se tendrá:

$$\dot{\mathbf{X}}_V = \dot{\mathbf{X}}_M s_1 \quad (5.1)$$

5.3. Transformación multiescalar

siendo \dot{X}_V la velocidad del cursor, (representante del ET) en el espacio visual, y s_1 expresada como función de la distancia r del ET al punto de interés, en el espacio de trabajo.

La posición X_V de un punto en el espacio visual respecto al espacio de trabajo viene dado por:

$$X_V = s_2(X_W - X_C) + X_C - p \quad (5.2)$$

con X_W la posición de un punto en el espacio de trabajo y X_C la posición del centro de escalado visual o centro de zoom, siendo s_2 la función de escalado visual, que al igual que s_1 se expresa como función de la distancia r . En la Figura 5.11 se disponen sendos sistemas de referencia de los espacios visual $\{VS\}$ y de trabajo $\{WS\}$, el vector p es la variable de *pan*, como deslizamiento entre los sistemas de referencia de ambos espacios, en la Figura 5.12 los vectores velocidad.

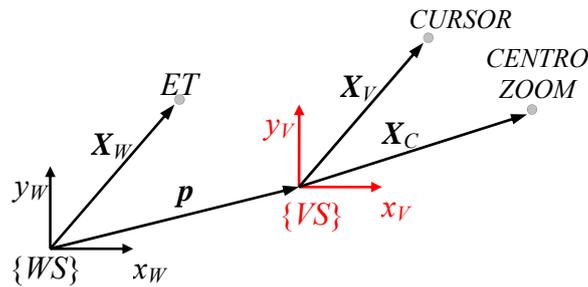


Figura 5.11. Disposición de los sistemas de referencia y vectores de posición de los espacios visual y de trabajo.

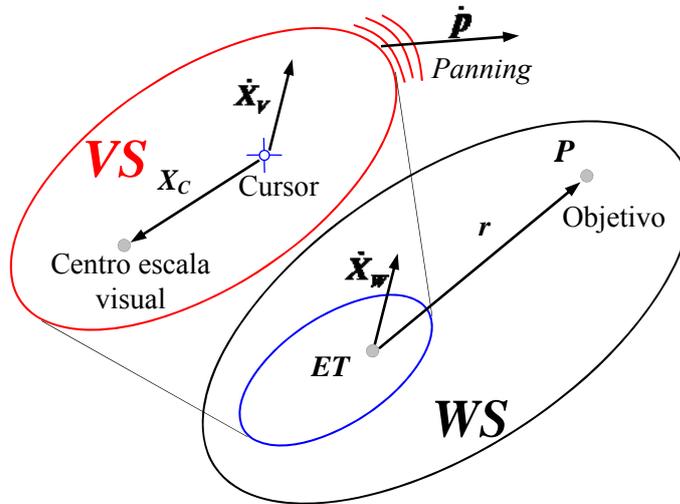


Figura 5.12. Disposición de los vectores de velocidad en el espacio visual y de trabajo.

Derivando la ecuación (5.2) con respecto al tiempo, la variable de escalado s_2 relacionará la velocidad del cursor en el espacio visual, con la velocidad del ET en el espacio de trabajo, teniéndose:

$$\dot{X}_V = \dot{X}_W s_2 + (X_W - X_C) \dot{s}_2 - \dot{p} \quad (5.3)$$

con \dot{p} la velocidad de *pan*. Dado que el escalado s_2 es función de la distancia r , (5.3) puede expresarse como:

$$\dot{X}_V = \dot{X}_W s_2 + (X_W - X_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} - \dot{p} \quad (5.4)$$

El término central de la ecuación (5.4) representa el efecto de acercamiento acelerado que se produce como consecuencia del escalado en el acercamiento al objeto de interés. Es el acercamiento de los objetos al cursor como consecuencia de la “expansión” de la imagen desde un punto central, ver Figura 5.13, debido a la dependencia del escalado s_2 con la distancia r al objeto.

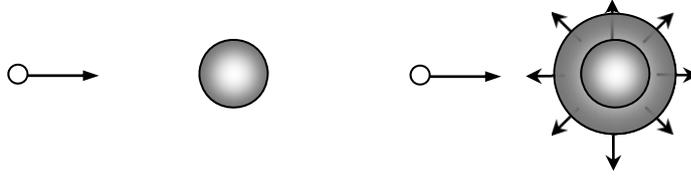


Figura 5.13. Acercamiento acelerado debido al efecto “Zoom”.

Reescribiendo la ecuación anterior para describir la velocidad del ET en el espacio de trabajo como función de la velocidad del cursor en el espacio visual se obtiene:

$$\dot{\mathbf{X}}_W = \left(\dot{\mathbf{X}}_V + \dot{\mathbf{p}} - (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \right) \frac{1}{s_2} \quad (5.5)$$

Para relacionar las velocidades desde el espacio motor del operador hacia el espacio de trabajo del elemento teleoperado, podemos considerar dos casos; en primer lugar el caso de cursor móvil y $\dot{\mathbf{p}}$ nulo, con (5.1) y (5.5) se tiene:

$$\dot{\mathbf{X}}_W = \left(s_1 \dot{\mathbf{X}}_M - (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \right) \frac{1}{s_2} \quad (5.6)$$

En el segundo caso, el cursor queda fijo en el espacio visual, $\dot{\mathbf{X}}_V = 0$, siendo la imagen la que se desplaza sobre el cursor; el operador desplaza la imagen actuando sobre la variable de pan , de esta manera:

$$\dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{X}}_M s_1 \quad (5.7)$$

Sustituyendo en (5.5) volvemos a la expresión (5.6). Podría haber un tercer caso con cursor móvil y pan representada por (5.5) en donde $\dot{\mathbf{X}}_V$ y $\dot{\mathbf{p}}$ serían función de s_1 , $\dot{\mathbf{X}}_M$, según (5.5).

El efecto de expansión del escalado visual en el acercamiento o alejamiento al punto de interés queda compensado automáticamente cuando el cursor en el espacio visual se desplaza en proporción al escalado. Para representar este efecto, el cursor en el espacio visual debe desplazarse a la velocidad de expansión/contracción que representa el término derivativo de la ecuación (5.4). Así el movimiento del cursor deberá ser afectado por este término en adición a la velocidad producida por la orden de movimiento proveniente del espacio motor. De esta manera, para el caso de pan nulo, el movimiento del cursor quedará relegado a:

$$\dot{\mathbf{X}}_V = s_1 \dot{\mathbf{X}}_M + (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \quad (5.8)$$

De igual manera, en el caso de cursor fijo, el pan resultante del espacio visual quedará:

$$\dot{p} = s_1 \dot{X}_M + (X_W - X_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \quad (5.9)$$

De esta manera, según (5.5), el movimiento del ET se comportará según:

$$\dot{X}_W = \dot{X}_M \frac{s_1}{s_2} \quad (5.10)$$

5.4. Caracterización de las funciones de escala

La modificación de las escalas, tanto la motora s_1 como la visual s_2 , contemplará fundamentalmente tres intervalos, situados según la distancia r al objeto de interés. En el intervalo más alejado, situado en $[r_b, \infty)$, la precisión del movimiento es menos crítica, con lo que se prima la velocidad y la visibilidad global del entorno lo que supondrá un escalado visual pequeño; por la forma de operación llamaremos a esta zona, “zona directa”.

Por debajo de la distancia definida r_b , se entra en lo que denominamos la “zona de acción”. En esta zona, la modificación de las escalas debe ser tal, que permita al operador alcanzar los objetos de interés en el mínimo tiempo, sin rebasamiento y con un desplazamiento en el espacio motor reducido.

Por último, el intervalo más cercano al objeto de interés localizado en $(0, r_a]$ será denominado la “zona precisa”. En este intervalo es donde se requiere la mayor precisión, en donde el escalado visual es mayor y menor el escalado motor.

Así, los requisitos que deben cumplir las funciones de escalado en cada intervalo pueden resumirse como muestra la Tabla 5.1. Ambos escalados se establecerán como constantes excepto en el intervalo central, en donde el escalado motor es decreciente y creciente el visual. El escalado motor es alto en la zona alejada, mayor velocidad, y bajo u óptimo, entendiendo óptimo el escalado que permita la mayor eficacia (forma en “U” de la característica tiempo versus escala) para mayor precisión. El escalado visual es mínimo, o unitario, en la zona alejada, para mayor velocidad, y alto para mayor precisión en la zona precisa, ver Figura 5.14.

Intervalo	Escalado motor s_1	Escalado visual s_2
$[r_b, \infty)$	Constante – Alto	Constante – Bajo (unitario)
(r_a, r_b)	Variable – Decreciente	Variable – Creciente
$(0, r_a]$	Constante – Bajo (óptimo)	Constante – Alto

Tabla 5.1. Comportamiento de los escalados en cada intervalo.

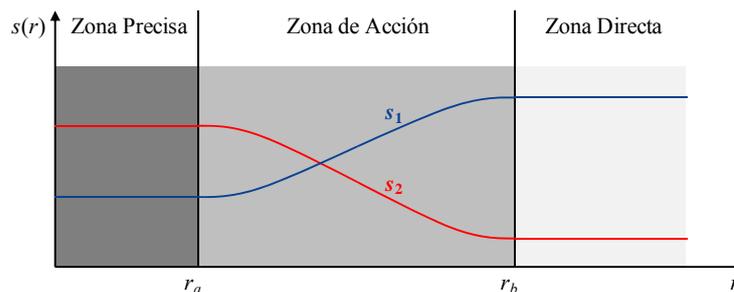


Figura 5.14. Funciones de escalado en las zonas definidas en el espacio de trabajo.

En el proceso de teleoperación a través de la interfaz gráfica y el dispositivo de gobierno, el operador selecciona las denominadas zonas u objetos de interés. A partir de aquí el sistema aplica la función de escalado, y según la posición del robot respecto a los puntos de interés en el espacio de trabajo resultará en una escala en el espacio visual.

Diversas estrategias pueden seguirse en la teleoperación con la interfaz para intervenir en la escala, el pan y el movimiento del cursor, que finalmente actuarán sobre la posición del ET del robot. Tal como se ha descrito en el apartado anterior, podría navegarse mediante *pan* con el cursor fijo en la pantalla o cualquier otra combinación que relacione el *pan* con el desplazamiento del cursor.

5.4.1. Límites del espacio visual

Debe tenerse en cuenta que el movimiento del robot ha de ser continuo, con lo que su velocidad resultante no deberá presentar discontinuidades. Es decir, el efecto del escalado y el pan junto con el movimiento del cursor no debe provocar cambios bruscos hacia el movimiento en el espacio de trabajo.

Los valores que tome la función de escalado visual han de ser tal que la posición del punto de interés respecto al cursor entre dentro del espacio visual, es decir, que el efecto del zoom no haga “escapar” ni cursor ni punto de interés del espacio visual en el peor de los casos. La Figura 5.15 muestra el caso de cursor central, la dimensión L_V indica la máxima distancia en el espacio visual para que un objeto de interés no escape, como muestra la Figura 5.16. Esta dimensión es la mínima distancia al centro visual, considerando el peor de los casos. Con esto, si se define R como la distancia r proyectada en el espacio visual, entonces para un escalado centrado en VS :

$$R = r s_2(r) < L_V \quad r < r_b \tag{5.11}$$

Esta desigualdad deberá cumplirse en el momento que se entre en la zona de interés, en donde interviene el efecto del escalado, lo que no obliga a que lejos de ésta, cursor y punto de interés estén visibles simultáneamente.

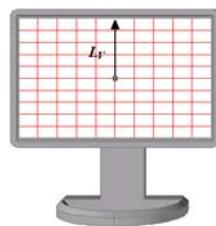


Figura 5.15. Dimensión restrictiva en el espacio visual

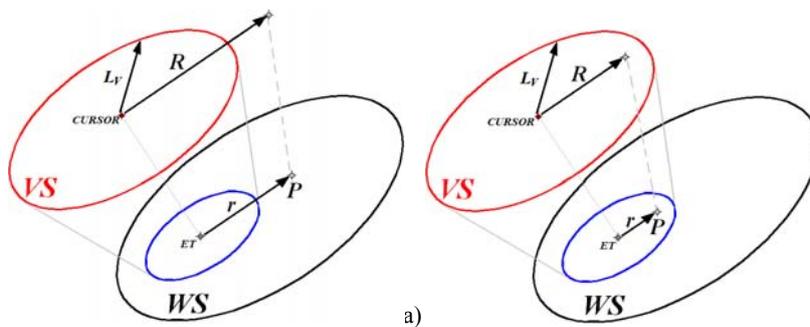


Figura 5.16. Proyección del punto de interés a) fuera del espacio visual b) dentro del espacio visual.

5.4. Caracterización de las funciones de escala

5.4.2. Posición del centro de escalado visual

El comportamiento de la interfaz durante el desarrollo de una tarea debe proporcionar coherencia con la disposición de los objetos que son afectados por el escalado visual con respecto a su posición en el espacio visual. Como se especificó en el apartado anterior, la dimensión del escalado visual restringe el escalado para permitir tener “visible” un determinado objeto. Esta restricción, recogida en la ecuación (5.11) para el caso particular de escalado centrado en VS , repercutirá en los valores de escalado visual en la zona precisa, en el rango de acción y en la zona directa. No obstante pueden darse disposiciones de cursor, centro visual y punto de interés que puedan encerrarse en el espacio visual aplicando un determinado desplazamiento de pan .

En este apartado se generaliza la restricción del VS y se analiza como los límites del escalado visual intervienen en función de la posición del centro del escalado visual respecto a cursor y punto de interés, y cómo introducir el pan necesario para permitir la visión simultánea de cursor y punto de interés en el espacio visual.

De nuevo, pueden contemplarse diversas circunstancias en función de la disposición de cursor, punto de interés y centro del escalado visual. Considerando por simplicidad un espacio unidimensional, respecto a la disposición de los puntos representativos sobre VS con origen en el centro y rango $\pm L_V$, ver Figura 5.17, deberá cumplirse que:

$$\max(Y_E, Y_G) - \min(Y_E, Y_G) < 2 \cdot L_V \quad (5.12)$$

siendo Y_E la posición del cursor sobre VS e Y_G la posición del punto de interés, ambos obtenidos a partir de (5.2) con $p = 0$:

$$Y_E = s_2 X_E + X_C (1 - s_2) \quad (5.13)$$

$$Y_G = s_2 X_G + X_C (1 - s_2) \quad (5.14)$$

Si se considera un rango en torno al punto de interés, simétrico de valor r_a (el correspondiente a la zona precisa), para tener visible cursor y objeto con un rango determinado, la desigualdad descrita en (5.12) quedará de la siguiente forma:

$$\max(Y_E, Y_G + R_a) - \min(Y_E, Y_G - R_a) < 2 \cdot L_V \quad (5.15)$$

con $R_a = r_a \cdot s_2$.

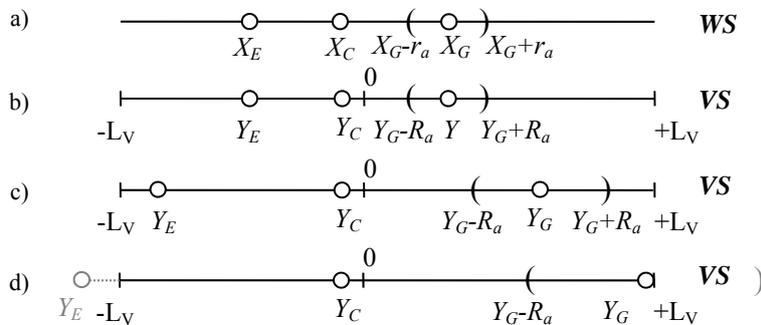


Figura 5.17. Disposición de los puntos representativos y el rango $X_C \pm r_a$ (indicado con paréntesis) en WS y VS según la escala a) disposición en WS b) disposición en VS a escala unitaria; cursor y rango entorno al punto de interés visibles c) disposición en VS a escala mayor que la unidad; cursor y rango entorno al punto de interés visibles d) disposición en VS a escala mayor que la unidad; cursor y rango entorno al punto de interés no visibles simultáneamente, el punto Y_E sale por la izquierda y parte del rango entorno a Y_G sale por la derecha de VS .

La condición establecida en (5.15) es necesaria pero no suficiente si los valores extremos exceden del rango $\pm L_V$, ver Figura 5.18a, con lo que deberá cumplirse adicionalmente que:

$$\max(Y_E, Y_G) < L_V \quad (5.16)$$

$$\min(Y_E, Y_G) > -L_V \quad (5.17)$$

En caso de no cumplirse las condiciones (5.16) y (5.17), y siempre que se cumpla (5.13), podrá introducirse un valor de pan, ver Figura 5.18b, que vendrá dado por:

$$p = L_V - \max(Y_E, Y_G) \quad \text{sii } \max(Y_E, Y_G) > L_V \quad (5.18)$$

$$p = L_V - \min(Y_E, Y_G) \quad \text{sii } \min(Y_E, Y_G) < -L_V \quad (5.19)$$

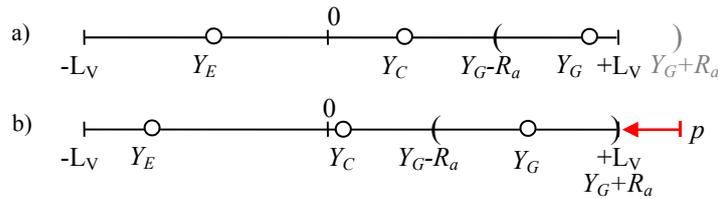


Figura 5.18. Disposición de los puntos representativos en VS a) cursor y rango entorno al punto de interés no visibles simultáneamente, aun cumpliendo (5.15) b) cursor y rango entorno al punto de interés, visibles simultáneamente por medio de pan.

5.4.3. Precisión requerida

En la zona precisa, donde la escala visual es máxima y constante se debe garantizar la precisión deseada de la tarea, a la que denominaremos e_p , con el mínimo de iteraciones. En este punto, no solo interviene el factor humano si no que se hacen más evidentes las no idealidades del sistema como lo es el retardo de la teleoperación y la resolución del dispositivo interfaz. En el caso de que el dispositivo interfaz sea un joystick vendrá dado por la resolución del mismo, de esta manera el escalado en la zona precisa deberá garantizar al menos:

$$\Gamma s_1(r_a) < e_p s_2(r_a) \quad (5.20)$$

donde Γ es la resolución del dispositivo interfaz. Esta desigualdad garantiza que las imprecisiones debidas a la resolución del dispositivo de interfaz quedan absorbidas por el factor de escala. No obstante el valor de escalado motor lejos de la zona precisa puede ser mayor. En general, conocida la imprecisión de movimiento del conjunto operador-interfaz-robot, se debe cumplir entonces:

$$e_T s_1(r_a) < e_p s_2(r_a) \quad (5.21)$$

en donde e_T es el error máximo de la teleoperación en el posicionamiento a un punto. En esta inecuación se debe obtener la mínima escala que compense dicho error garantizando la precisión de la tarea.

5.4.4. Forma de la función de escalado visual

Dado que la forma en la que la imagen se expande/contrae depende de la propia función de escalado $s_2(r)$, debe de procurarse que ésta sea tal, que no sucedan oscilaciones o cambios bruscos en la imagen, que puedan confundir al operador en vez de ayudarlo. Para esto, debe determinarse $s_2(r)$ de tal forma que la

5.4. Caracterización de las funciones de escala

distancia R en el espacio visual siempre sea decreciente al decrecer la distancia r en el espacio de trabajo, es decir en el acercamiento al objeto de interés. Al disminuir r la escala s_2 ha de aumentar de tal forma que R siempre disminuya, o permanezca constante. En la Figura 5.19 se muestra la evolución de la escala s_2 con r , figuras superiores, y la evolución de R , figuras inferiores. Si suponemos una función de escala lineal definida a tramos como la que muestra la Figura 5.19a-superior, la función resultante R , Figura 5.19b-inferior, es tal que la variación de la escala provoca que la distancia R del objeto al cursor en la imagen, es decir en el espacio visual, se aleje para luego acercarse de nuevo, lo que resulta indeseable. Debe buscarse entonces una función de escala que permita que $R(r)$ sea siempre creciente con r .

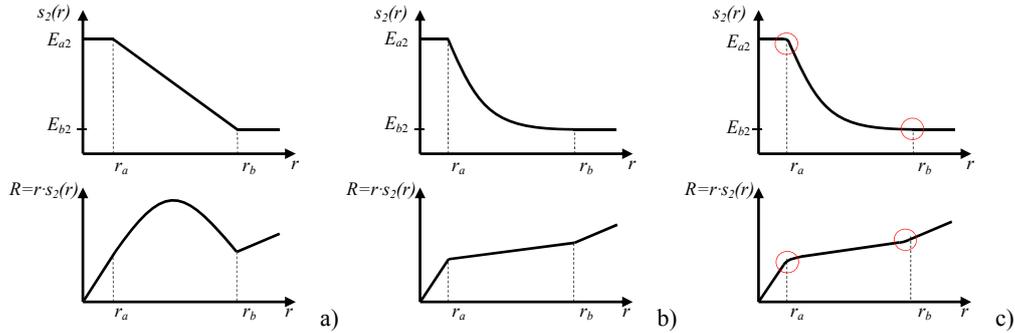


Figura 5.19. Variación de la distancia en el espacio visual a consecuencia de la variación del escalado s_2 . Las figuras superiores muestran la función de escala, las inferiores la distancia $R(r)$ en VS a) función de escala lineal en el intervalo (r_a, r_b) , la distancia R crece y decrece (oscila) cuando r disminuye b) una función de escala que permite que R siempre decrezca al decrecer r c) función de escala suavizada en los puntos r_a y r_b .

Consideremos el caso de $R(r)$ lineal en el intervalo (r_a, r_b) , Figura 5.19b-inferior, su ecuación vendrá dada por la recta:

$$R(r) = rs_2(r) = ar + b \quad (5.22)$$

con a y b constantes. La función de escalado visual, Figura 5.19b-superior, será entonces:

$$s_2(r) = \begin{cases} E_{a2} & r \leq r_a \\ a + \frac{b}{r} & r_b > r > r_a \\ E_{b2} & r \geq r_b \end{cases} \quad r \in (r_a, r_b) \quad (5.23)$$

Dado que en las distancias r_a y r_b se definen las escalas E_{a2} y E_{b2} , se tiene:

$$s_2(r_a) = a + \frac{b}{r_a} = E_{a2} \quad (5.24)$$

$$s_2(r_b) = a + \frac{b}{r_b} = E_{b2} \quad (5.25)$$

Resolviendo (5.24) y (5.25) se obtienen los coeficientes a y b :

$$a = \frac{E_{a2}r_a - E_{b2}r_b}{r_a - r_b} \quad (5.26)$$

$$b = \frac{(E_{b2} - E_{a2})r_a r_b}{r_a - r_b} \quad (5.27)$$

Si $R(r)$ ha de ser creciente con r esto implica que $\dot{R}(r) > 0$, de (5.22) se deduce que $a > 0$, con lo que de (5.26) y teniendo en cuenta que $r_b > r_a$, se deberá cumplir que:

$$E_{a2}r_a < E_{b2}r_b \quad (5.28)$$

Si bien la función definida por (5.23) no es diferenciable en r_a y r_b , lo que desde el punto de vista visual provocaría una sobreaceleración en dichos puntos, puede optarse por aproximar dicha función mediante polinomios o curvas del tipo *b-spline*, exponenciales o trigonométricas, Figura 19c, respetando la condición de monótona creciente y las condiciones impuestas por (5.15) y (5.20).

Para suavizar la función obtenida arriba consideremos el ejemplo de obtención de la función $R(r)$ mediante dos polinomios cúbicos po_1 y po_2 unidos por una recta R_2 y con sendas rectas R_1 y R_3 a los extremos, ver Figura 5.20, cuyas ecuaciones serán:

$$R(r) = \begin{cases} R_1(r) = E_{a2}r & r \leq r_a \\ po_1(r) = A_1r^3 + B_1r^2 + C_1r + D_1 & r_1 > r > r_a \\ R_2(r) = m_2r + h_2 & r_2 > r \geq r_1 \\ po_2(r) = A_2r^3 + B_2r^2 + C_2r + D_2 & r_b > r \geq r_2 \\ R_3(r) = E_{b2}r & r \geq r_b \end{cases} \quad (5.29)$$

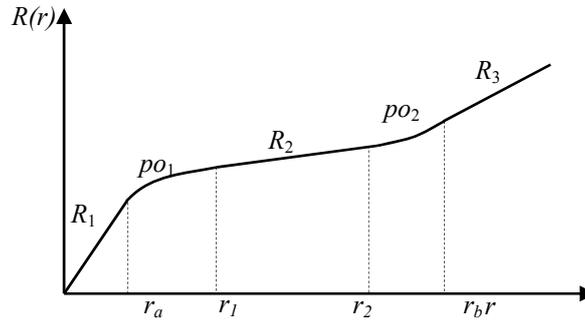


Figura 5.20. Función $R=r:s_2(r)$ definida por tramos y suavizada mediante cúbicas.

Para que ésta sea diferenciable, la pendiente del polinomio po_1 debe ser la misma que la de la recta R_1 en el punto r_a . Lo mismo para el polinomio po_2 , con la recta R_2 en el punto r_b . Y las pendientes de ambos polinomios deben ser las mismas en los puntos r_1 para po_1 y r_2 para po_2 . Así como la igualdad de las funciones de cada tramo en los puntos donde se unen. Con todo esto se tiene:

$$R_1(0) = 0 \quad (5.30)$$

$$po_1(r_a) = R_1(r_a) = E_{a2}r_a \quad (5.31)$$

$$po_1(r_1) = R_2(r_1) \quad (5.32)$$

$$po_2(r_2) = R_2(r_2) \quad (5.33)$$

$$po_2(r_b) = R_3(r_b) = E_{b2}r_b \quad (5.34)$$

$$\frac{dpo_1}{dr} \Big|_{r=r_a} = E_{a2} \quad (5.35)$$

5.4. Caracterización de las funciones de escala

$$\frac{dpo_2}{dr} \Big|_{r=r_b} = E_{b2} \quad (5.36)$$

$$\frac{dpo_1}{dr} \Big|_{r=r_1} = \frac{dpo_2}{dr} \Big|_{r=r_2} \quad (5.37)$$

Para simplificar el desarrollo se normalizarán los intervalos (r_a, r_1) y (r_2, r_b) , ver Figura 21. Entonces para el polinomio po_1 :

$$po_{1N}(\rho) = a_1\rho^3 + b_1\rho^2 + c_1\rho + d_1 \quad \rho \in [0,1] \quad (5.38)$$

$$\rho = \frac{r - r_a}{r_1 - r_a} \quad (5.39)$$

$$y_1 = \frac{po_1(r_1) - po_1(r_a)}{r_1 - r_a} \quad (5.40)$$

Siendo po_{1N} el polinomio po_1 normalizado, ρ la variable distancia normalizada e y_1 el valor máximo normalizado de po_1 . Se plantean las ecuaciones siguientes:

$$po_{1N}(0) = 0 \quad (5.41)$$

$$po_{1N}(1) = a_1 + b_1 + c_1 + d_1 = y_1 \quad (5.42)$$

$$\frac{dpo_{1N}}{d\rho} \Big|_{\rho=0} = c_1 = E_{a2} \quad (5.43)$$

$$\frac{dpo_{1N}}{d\rho} \Big|_{\rho=1} = 3a_1 + 2b_1 + c_1 = m_2 \quad (5.44)$$

Siendo m_2 el valor de la pendiente de la recta R_2 . Resolviendo este sistema se obtienen los parámetros:

$$a_1 = -2y_1 + E_{a2} + m_2 \quad (5.45)$$

$$b_1 = 3y_1 - 2E_{a2} - m_2 \quad (5.46)$$

$$c_1 = E_{a2} \quad (5.47)$$

$$d_1 = 0 \quad (5.48)$$

Recuperando el polinomio original en función de r según (5.29) y añadiendo el valor de R_1 en r_a según (5.31) se tiene:

$$po_1(r) = (r_1 - r_a)po_{1N}(\rho) + R_1(r_a) \quad \rho = \frac{r - r_a}{r_1 - r_a} \quad (5.49)$$

Repitiendo este proceso para el polinomio po_2 :

$$po_{2N}(\rho) = a_2\rho^3 + b_2\rho^2 + c_2\rho + d_2 \quad \rho \in [0,1] \quad (5.50)$$

$$\rho = \frac{r - r_2}{r_b - r_2} \quad (5.51)$$

$$y_2 = \frac{po_2(r_b) - po_2(r_2)}{r_b - r_2} \quad (5.52)$$

Siendo po_{2N} el polinomio po_2 normalizado, ρ la variable distancia normalizada e y_2 el valor máximo normalizado de po_2 , ver Figura 5.21. Se plantean las ecuaciones siguientes:

$$po_{2N}(0) = 0 \quad (5.53)$$

$$po_{2N}(1) = a_2 + b_2 + c_2 + d_2 = y_2 \quad (5.54)$$

$$\frac{dpo_{2N}}{d\rho} \Big|_{\rho=0} = c_2 = m_2 \quad (5.55)$$

$$\frac{dpo_{2N}}{d\rho} \Big|_{\rho=1} = 3a_2 + 2b_2 + c_2 = E_{b_2} \quad (5.56)$$

Resolviendo este sistema se obtienen los parámetros:

$$a_2 = -2y_2 + E_{b_2} + m_2 \quad (5.57)$$

$$b_2 = 3y_2 - 2m_2 - E_{b_2} \quad (5.58)$$

$$c_2 = m_2 \quad (5.59)$$

$$d_2 = 0 \quad (5.60)$$

Recuperando el polinomio original en función de r y añadiendo el valor que tendrá po_2 en r_2 según (5.33) se tiene:

$$po_2(r) = (r_b - r_2)po_{2N}(\rho) + po_1(r_1) + m_2(r_2 - r_1) \quad \rho = \frac{r - r_2}{r_b - r_2} \quad (5.61)$$

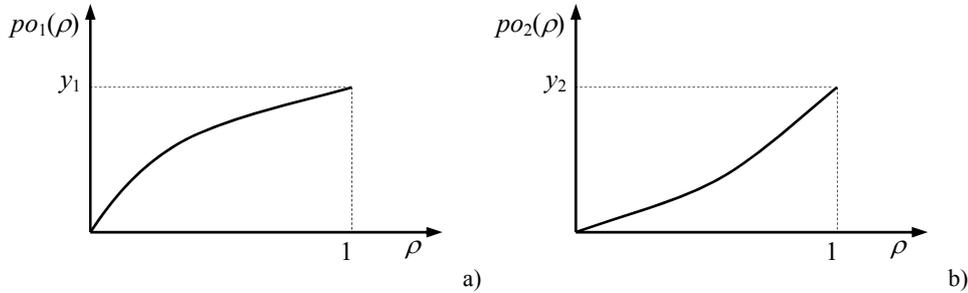


Figura 5.21. Polinomios cúbicos normalizados a) para el intervalo (r_a, r_1) , y b) para el intervalo (r_2, r_b) .

Para que una cúbica sea monótona creciente su discriminante debe de ser $\Delta_i \geq 0$ y el coeficiente de mayor orden debe ser $a_i > 0$, es decir:

$$\Delta_1 = 3a_1c_1 - b_1^2 \geq 0 \quad (5.62)$$

$$\Delta_2 = 3a_2c_2 - b_2^2 \geq 0 \quad (5.63)$$

$$a_1 > 0 \quad (5.64)$$

$$a_2 > 0 \quad (5.65)$$

Aplicando las condiciones anteriores (5.62-5.65) a (5.40, 5.45-5.49) y (5.52, 5.57-5.60) se obtienen:

$$9y_1^2 - 6(E_{a_2} + m_2)y_1 + E_{a_2}^2 + m_2^2 + E_{a_2}m_2 \geq 0 \quad (5.66)$$

5.4. Caracterización de las funciones de escala

$$9y_2^2 - 6(E_{b_2} + m_2)y_2 + E_{b_2}^2 + m_2^2 + E_{b_2}m_2 \geq 0 \quad (5.67)$$

Cuyas soluciones en el cero son:

$$y_1 = \frac{E_{a_2} + m_2 \pm \sqrt{E_{a_2}m_2}}{3} \quad (5.68)$$

$$y_2 = \frac{E_{b_2} + m_2 \pm \sqrt{E_{b_2}m_2}}{3} \quad (5.69)$$

Lo que querrá decir que se cumplen las condiciones (5.68) y (5.69) para:

$$y_1 \in \left[\frac{E_{a_2} + m_2 - \sqrt{E_{a_2}m_2}}{3}, \frac{E_{a_2} + m_2 + \sqrt{E_{a_2}m_2}}{3} \right] \quad (5.70)$$

$$y_2 \in \left[\frac{E_{b_2} + m_2 - \sqrt{E_{b_2}m_2}}{3}, \frac{E_{b_2} + m_2 + \sqrt{E_{b_2}m_2}}{3} \right] \quad (5.71)$$

Tomando como solución de compromiso el punto medio para ambos intervalos, se tendrá:

$$y_1 = \frac{E_{a_2} + m_2}{3} \quad (5.72)$$

$$y_2 = \frac{E_{b_2} + m_2}{3} \quad (5.73)$$

Dado que la pendiente de la recta R_2 puede obtenerse según sus puntos extremos:

$$m_2 = \frac{po_2(r_2) - po_1(r_1)}{r_2 - r_1} \quad (5.74)$$

Y dado que el valor E_{b_2} correspondiente a la escala cuando $r \geq r_b$ se considera unitaria, $E_{b_2} = 1$, entonces:

$$po_2(r_b) = E_{b_2}r_b = r_b \quad (5.75)$$

$$po_2(r_2) = po_2(r_b) - y_2(r_2 - r_b) \quad (5.76)$$

$$po_1(r_1) = E_{a_2}r_a + y_1(r_2 - r_1) \quad (5.77)$$

Que sustituyendo en (5.76) se tiene:

$$m_2 = \frac{r_b - y_2(r_2 - r_b) - E_{a_2}r_a - y_1(r_2 - r_1)}{r_2 - r_1} \quad (5.78)$$

Sustituyendo y_1 e y_2 de (5.72) y (5.73) en (5.78) y simplificando la expresión se obtiene el valor de la pendiente de la recta R_2 :

$$m_2 = \frac{2r_b + r_2 - E_{a_2}(2r_a + r_1)}{2r_2 - 2r_1 + r_b - r_a} \quad (5.79)$$

Cuya ordenada en el origen puede obtenerse con:

$$h_2 = p_{o_2}(r_1) - m_2 r_1 \quad (5.80)$$

Al dividir entre la variable distancia r la función $R(r)$ definida en (5.29), la función de escala visual quedará entonces como sigue:

$$s_2(r) = \begin{cases} E_{a_2} & r \leq r_a \\ \frac{p_{o_1}(r)}{r} & r_1 > r > r_a \\ m_2 + \frac{h_2}{r} & r_2 > r \geq r_1 \\ \frac{p_{o_2}(r)}{r} & r_b > r \geq r_2 \\ 1 & r \geq r_b \end{cases} \quad (5.81)$$

Los valores de r_a y r_b siempre deberán cumplir (5.28). Los valores de r_1 y r_2 que permiten introducir las curvas que suavizan la función $R(r)$ y por lo tanto $s_2(r)$ se calcula de tal modo que la pendiente m_2 de la recta R_2 sea positiva. Teniendo en cuenta que el denominador de (5.79) siempre es positivo, ya que $r_2 > r_1$ y $r_b > r_a$, deberá cumplirse que:

$$2r_b + r_2 - E_{a_2}(2r_a + r_1) \geq 0 \quad (5.82)$$

$$r_2 - E_{a_2} r_1 \geq 2(E_{a_2} r_a - r_b) \quad (5.83)$$

El caso particular en el que se omite el tramo entre r_1 y r_2 , desapareciendo la recta R_2 , los puntos r_1 y r_2 convergen en uno solo, llámese r_{12} , entonces de (5.83) se tiene:

$$r_{12} \leq \frac{2(E_{a_2} r_a - r_b)}{1 - E_{a_2}} \quad (5.84)$$

A continuación se muestran dos ejemplos de comportamiento de la función de escalado obtenida con el procedimiento arriba descrito. En la Figura 5.22 el caso que comprende todos los tramos, y en la Figura 5.23, el caso donde se suprime el tramo (r_1, r_2) que comprende la recta R_2 .

Como muestra la Figura 5.22c la velocidad en el espacio visual del cursor se detiene a lo largo de la zona de acción debido al efecto del escalado visual, si bien el movimiento relativo del cursor sobre la imagen continua, pues son los objetos al expandirse los que se mueven bajo el cursor. El valor mínimo de la velocidad del cursor depende de la pendiente en el intervalo (r_1, r_2) , siendo cero cuando esta pendiente es nula, como se muestra en el caso de la Figura 5.23c.

5.4. Caracterización de las funciones de escala

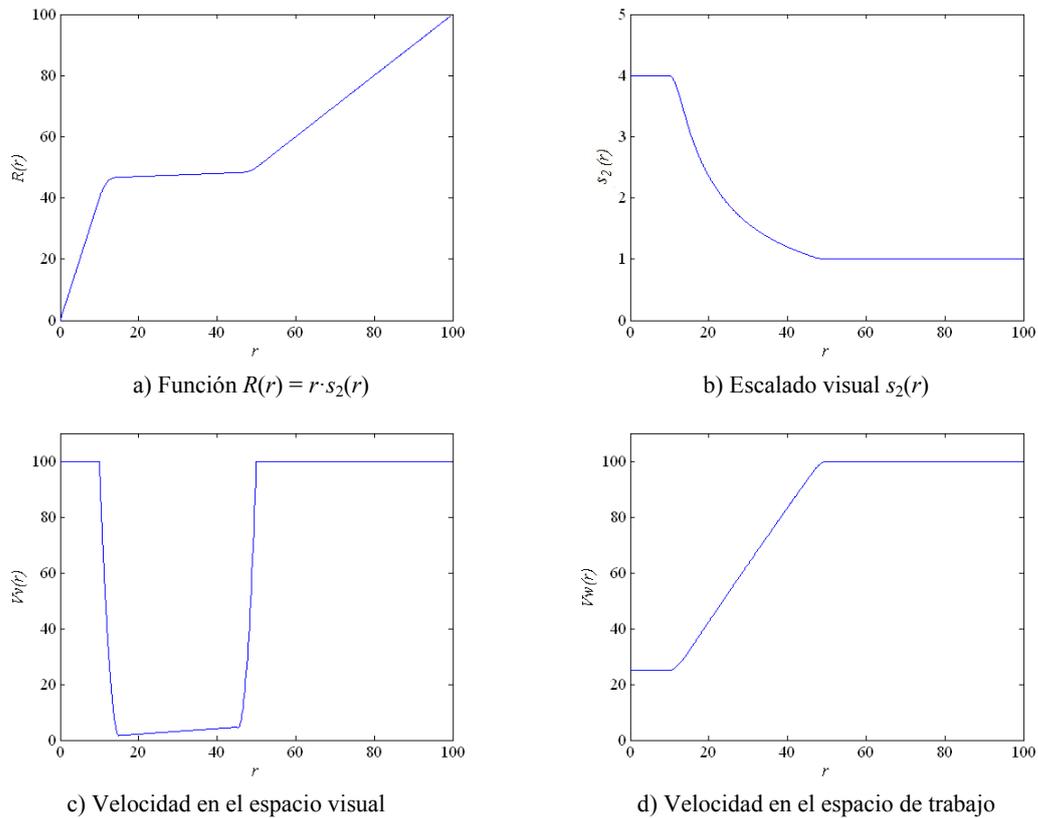


Figura 5.22. Ejemplo de función de escalado visual en función de la distancia r , a) y b) y del comportamiento de la velocidad en el espacio visual y espacio de trabajo para una velocidad en el espacio motor de 100 a escala motor constante e igual a 1 c) y d). Valores: $r_a = 10$; $r_1 = 15$; $r_2 = 45$; $r_b = 50$; $E_{a2} = 4$; $E_{b2} = 1$.

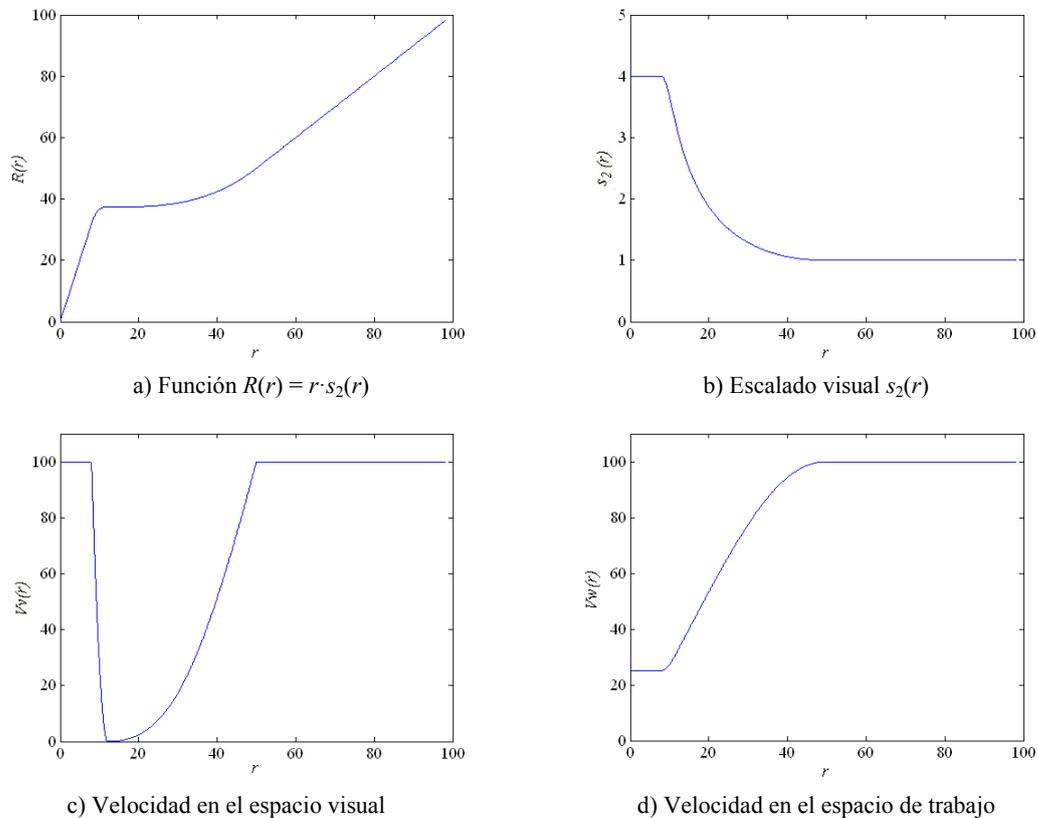


Figura 5.23. Ejemplo de función de escalado visual en función de la distancia r , a) y b) y el comportamiento de la velocidad en el espacio visual y espacio de trabajo para una velocidad en el espacio motor de 100 a escala motor constante e igual a 1 c) y d). Valores: $r_a = 8$; $r_1 = r_2 = 12$; $r_b = 50$; $E_{a2} = 4$; $E_{b2} = 1$.

5.4.5. Forma de la función de escalado motor

El escalado motor es el vínculo de movimiento entre el dispositivo de interfaz de entrada y cursor, debe procurarse que el efecto combinado de las dos funciones de escala supongan un movimiento continuo y suave, ya que afectará al movimiento final del robot, ecuación (5.10).

La función de escalado motor deberá ser monótona creciente en la zona de acción para proporcionar mayor precisión con menor escala en las proximidades del objetivo y mayor velocidad con mayor escala lejos del objetivo. Pueden emplearse funciones exponenciales, senoidales o polinómicas. Tal como se predefinió al inicio del apartado 5.3, sobre el intervalo $(0, r_a]$, la zona precisa, se establece la escala motora menor y constante, llámese E_{a1} , en el intervalo intermedio (r_a, r_b) , la zona de acción, una función de escala continua y monótona creciente, y en el resto del intervalo $[r_b, \infty)$, la zona directa, la escala constante y máxima, llámese E_{b1} .

La Figura 5.24a muestra un ejemplo de función de escalado motor más simple utilizando una función lineal, aunque debe tenerse en cuenta que no es suave en los puntos r_a y r_b . Esta función a tramos quedaría de la siguiente forma:

$$s_1(r) = \begin{cases} E_{a1} & r \leq r_a \\ A + Br & r_b > r > r_a \\ E_{b1} & r \geq r_b \end{cases} \quad (5.85)$$

$$A = \frac{E_{a1}r_b - E_{b1}r_a}{r_b - r_a} \quad (5.86)$$

$$B = \frac{E_{b1} - E_{a1}}{r_b - r_a} \quad (5.87)$$

La Figura 5.24b muestra un ejemplo de función de escalado motor utilizando una función coseno que se describe a continuación. La función coseno, con signo negativo es monótona creciente con pendientes cero en sus máximos, condición necesaria ya que en el intervalo inicial y final la pendiente es cero al ser constante la escala.

$$s_1(r) = \begin{cases} E_{a1} & r \leq r_a \\ A - B \cos(C(r - r_a)) & r_b > r > r_a \\ E_{b1} & r \geq r_b \end{cases} \quad (5.88)$$

$$A = \frac{E_{a1} + E_{b1}}{2} \quad (5.89)$$

$$B = \frac{E_{b1} - E_{a1}}{2} \quad (5.90)$$

$$C = \frac{\pi}{r_b - r_a} \quad (5.91)$$

O puede utilizarse una cúbica creciente con pendiente cero en los extremos, Figura 5.24c, como la siguiente:

5.4. Caracterización de las funciones de escala

$$s_1(r) = \begin{cases} E_{a1} & r \leq r_a \\ A \left(\frac{r-r_a}{r_b-r_a} \right)^3 + B \left(\frac{r-r_a}{r_b-r_a} \right)^2 + C & r_b > r > r_a \\ E_{b1} & r \geq r_b \end{cases} \quad (5.92)$$

$$A = -2(E_{b1} - E_{a1}) \quad (5.93)$$

$$B = 3(E_{b1} - E_{a1}) \quad (5.94)$$

$$C = E_{a1} \quad (5.95)$$

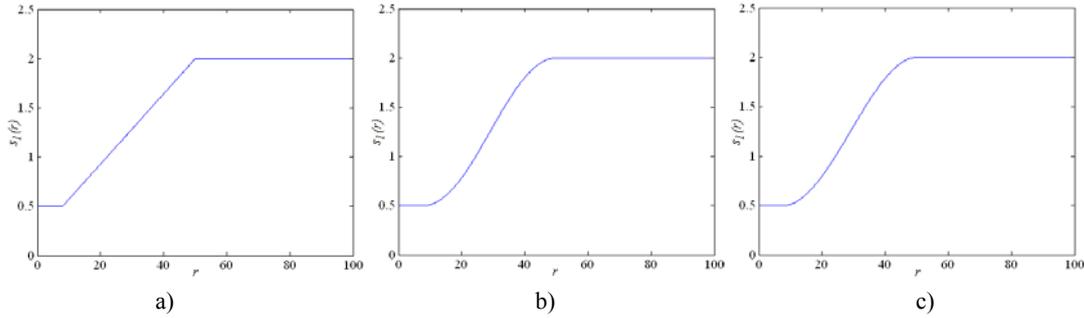


Figura 5.24. Función de escalado motor a) definida mediante una función lineal b) definida mediante una función coseno c) definida mediante una cúbica. Valores: $r_a = 10$; $r_b = 100$; $E_{a1} = 0.5$; $E_{b1} = 2$.

El desplazamiento total x_{MT} realizado por el operador en el espacio motor dependerá de las dos funciones de escalado $s_1(r)$ y $s_2(r)$, dado que a medida que varía la distancia r al punto de interés varían las escalas. El recorrido resultante dependerá de la integral de ambas funciones sobre la distancia total r_T . Es decir, según (5.10) un desplazamiento en el espacio de trabajo Δx_W requiere de un desplazamiento Δx_M en el espacio motor, tal que:

$$\Delta x_M = \frac{s_2(r)}{s_1(r)} \Delta x_W \quad (5.96)$$

Considerando Δx_W como la variación de la distancia r en el espacio de trabajo dr , e integrando para la distancia total r_T , se obtiene el desplazamiento total:

$$x_{MT} = \int_0^{r_T} \frac{s_2(r)}{s_1(r)} dr \quad (5.97)$$

Donde a mayor escalado en el espacio visual o a menores escalados en el espacio motor, mayores desplazamientos en el espacio motor, y viceversa. Este desplazamiento debe tenerse en cuenta a la hora de parametrizar la escala motora para mantenerlo en unos valores aceptables ya que al incrementarse afectaría a la ergonomía.

En el caso de escala visual constante y unitaria el desplazamiento total quedará según:

$$x_{MT} = \int_0^{r_T} \frac{1}{s_1(r)} dr \quad (5.98)$$

Y considerando la función lineal a tramos definida en (5.85) este desplazamiento vendrá dado por:

$$x_{MT} = \int_0^{r_a} \frac{1}{E_{a1}} dr + \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{A + Br} dr + \int_{r_b}^{r_T} \frac{1}{E_{b1}} dr \quad (5.99)$$

$$x_{MT} = \int_0^{r_a} \frac{1}{E_{a1}} dr + \int_{r_a}^{r_b} \frac{r_b - r_a}{E_{a1}r_b - E_{b1}r_a + (E_{b1} - E_{a1})r} dr + \int_{r_b}^{r_T} \frac{1}{E_{b1}} dr \quad (5.99)$$

$$x_{MT} = \frac{r_a}{E_{a1}} + \frac{r_b - r_a}{E_{b1} - E_{a1}} \ln\left(\frac{E_{b1}}{E_{a1}}\right) + \frac{r_T - r_b}{E_{b1}} \quad (5.100)$$

La Figura 5.25 muestra la variación del desplazamiento total en función de las escalas máxima E_{b1} y mínima E_{a1} dados r_a , r_b y r_T . Así, para una distancia $r_T = 100$, $r_a = 10$ y $r_b = 50$, se observan las combinaciones de escalas máxima y mínima que dan lugar a un desplazamiento total superior o inferior al desplazamiento r_T que se tendría a escala unitaria.

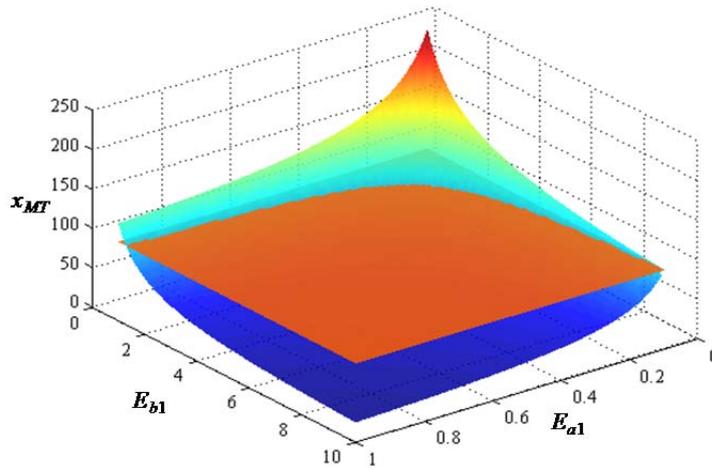


Figura 5.25. Desplazamiento total x_{MT} en función de E_{a1} y E_{b1} con escala motora variable y escala visual constante y unitaria. El plano a $r_T = 100$ separa las combinaciones de E_{a1} y E_{b1} en donde el desplazamiento total es superior o inferior al desplazamiento a escala unitaria r_T . Valores $r_T = 100$, $r_a = 10$ y $r_b = 50$.

En caso de contemplar ambas escalas el desplazamiento total considerando la escala visual definida en (5.23) y la escala motora definida en (5.85) y a partir de (5.97) se tiene:

$$x_{MT} = \int_0^{r_a} \frac{E_{a2}}{E_{a1}} dr + \int_{r_a}^{r_b} \frac{ar + b}{r(A + Br)} dr + \int_{r_b}^{r_T} \frac{E_{b2}}{E_{b1}} dr \quad (5.101)$$

Sustituyendo según (5.26) y (5.27) y con $E_{b2} = 1$:

$$x_{MT} = \int_0^{r_a} \frac{E_{a2}}{E_{a1}} dr + \int_{r_a}^{r_b} \frac{(r_b - E_{a2}r_a)r + (E_{a2} - 1)r_a r_b}{r(E_{a1}r_b - E_{b1}r_a + (E_{b1} - E_{a1})r)} dr + \int_{r_b}^{r_T} \frac{1}{E_{b1}} dr \quad (5.102)$$

$$x_{MT} = \frac{r_a E_{a2}}{E_{a1}} + \frac{r_b - E_{a2}r_a}{E_{b1} - E_{a1}} \ln\left(\frac{E_{b1}}{E_{a1}}\right) + \frac{(E_{a2} - 1)r_a r_b}{E_{a1}r_b - E_{b1}r_a} \ln\left(\frac{r_b E_{a1}}{r_a E_{b1}}\right) + \frac{r_T - r_b}{E_{b1}} \quad (5.103)$$

En la Figura 5.26 se muestra la variación del desplazamiento total en función de las escalas máxima E_{b1} y mínima E_{a1} para el mismo ejemplo que el de la figura anterior pero añadiendo la función de escalado visual con una escala máxima $E_{a2} = 4$. Se observa como el conjunto de puntos que elevan el

5.4. Caracterización de las funciones de escala

desplazamiento total por encima del valor r_T es mayor con respecto al ejemplo anterior debido a la amplificación del espacio visual. La Figura 5.27 muestra para el mismo ejemplo combinaciones de los valores de escalas motora máxima y mínima E_{a1} y E_{b1} para distintos valores de escala visual máxima E_{a2} que resultan en un desplazamiento total $x_{MT} = r_T$.

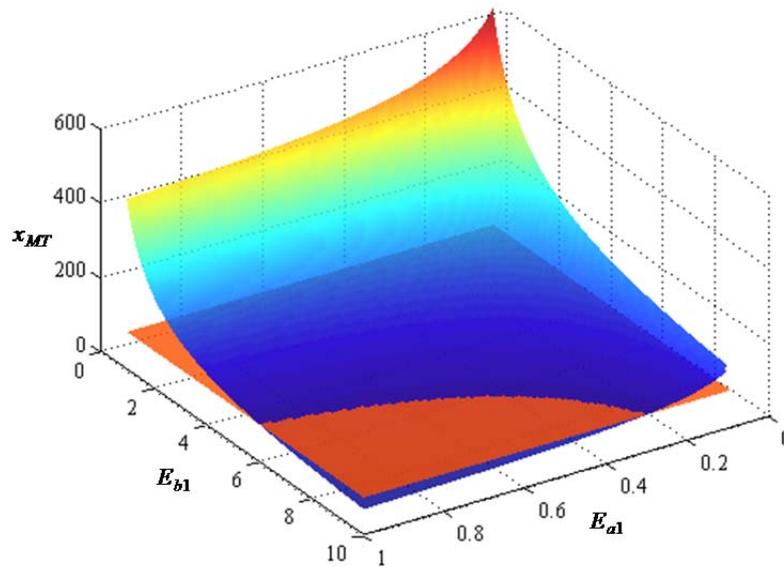


Figura 5.26. Desplazamiento total x_{MT} en función de E_{a1} y E_{b1} con escalas visual y motora variables. El plano a $r_T = 100$ separa las combinaciones de E_{a1} y E_{b1} en donde el desplazamiento total es superior o inferior al desplazamiento a escala unitaria r_T . Valores $r_T = 100$, $r_a = 10$, $r_b = 50$ y $E_{a2} = 4$.

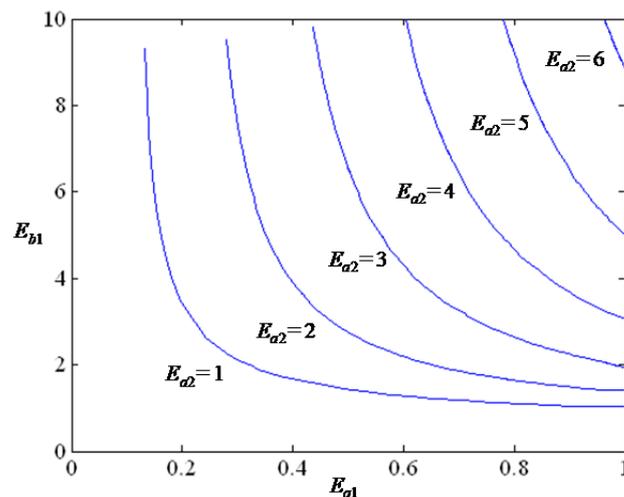
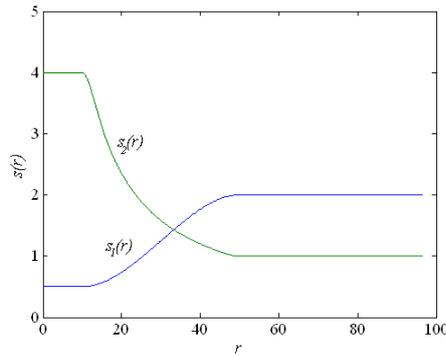
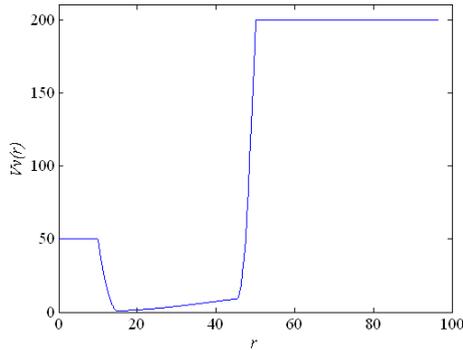


Figura 5.27. Combinaciones de los valores de escalas motora máxima y mínima E_{a1} y E_{b1} para distintos valores de escala visual máxima E_{a2} que resultan en un desplazamiento total $x_{MT} = r_T$. Con $r_a = 10$, $r_b = 50$ y $r_T = 100$. La curva inferior con $E_{a2} = 1$ representa el caso de escala visual constante y unitaria.

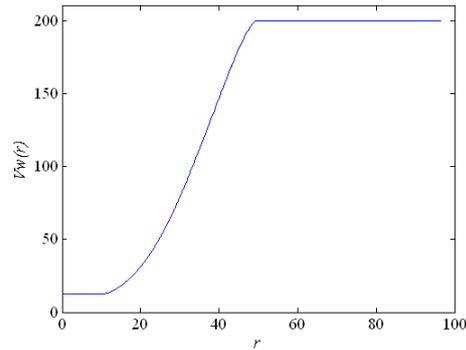
Combinando sendas escalas $s_1(r)$ y $s_2(r)$, Figura 5.28a, el efecto sobre la velocidad en el espacio visual queda representado en la Figura 5.28b, y la Figura 5.28c muestra la evolución de la velocidad en el espacio de trabajo para los datos del ejemplo descrito en el apartado anterior.



a) Funciones de escala



b) Velocidad en el espacio visual



c) Velocidad en el espacio de trabajo

Figura 5.28. Ejemplo de acción conjunta de las escalas motora y visual en función de la distancia r para una velocidad en el espacio motor de 100. Valores: $r_a = 10$; $r_1 = 15$; $r_2 = 45$; $r_b = 50$; $E_{a1} = 0.5$; $E_{b1} = 2$; $E_{a2} = 4$; $E_{b2} = 1$.

Tal y como sucedía en el ejemplo con solo el escalado visual, la velocidad del cursor en el espacio visual se acerca a cero durante el proceso de cambio progresivo de escala en el intervalo (r_a, r_b) en donde son los objetos los que se desplazan bajo el cursor por efecto del escalado, pero el efecto de la escala motora permite mantener una velocidad reducida en el estrecho rango de la zona precisa.

5.4.6. Efecto del escalado sobre la eficiencia

Cuando el escalado visual interviene, éste lo hace tanto para la distancia de los objetos como para el tamaño de los mismos, esto nos indica que el efecto sobre el índice de dificultad queda neutralizado. Esto es una de las propiedades de la ley de Fitts, la independencia con la escala. Esto es válido fundamentalmente a escala constante, pero no es cierto a escala variable [McGuffin & Balakrishnan 2005]. El motivo de la influencia de la escala sobre el índice de dificultad, y por ende sobre el tiempo de la tarea, es que el tiempo de adquisición en las inmediaciones del objetivo es fuertemente dependiente del tamaño de éste, que dependerá de la escala. Por otro lado el impulso inicial que determina la mayor parte del desplazamiento es más dependiente de la distancia hacia el objetivo que del tamaño del mismo. Esta influencia también puede apreciarse cuando se analiza el índice de dificultad sobre el movimiento en el espacio motor [Casiez et al. 2008], aunque en este caso es fuertemente dependiente del desplazamiento total realizado en dicho espacio motor y no solo del valor inicial.

5.4. Caracterización de las funciones de escala

Dado que la forma de la función de escala visual s_2 se determina para que la distancia visual al objetivo siempre decrezca cuando el cursor se acerca a ellos, el tiempo total de la tarea será en el límite tan bajo como el que se obtiene con la distancia aparente inicial y el tamaño final del objetivo:

$$MT \geq a + b ID_V \quad (5.104)$$

con ID_V el índice de dificultad visual, y a y b las constantes de regresión del experimento de Fitts.

Considerando r_i como la distancia inicial al objetivo, la distancia visual aplicando el escalado será $D_V = r_i \cdot s_2(r_i)$, el tamaño del objetivo, W , en el espacio visual en las inmediaciones del objetivo será $W_V = W \cdot E_{a2}$, a escala unitaria y E_{a2} la escala en las inmediaciones del objetivo. Se tiene que el índice de dificultad visual será:

$$ID_V = \log_2 \left(\frac{D_V}{W_V} + 1 \right) = \log_2 \left(\frac{r_i s_2(r_i)}{W E_{a2}} + 1 \right) \quad (5.105)$$

Si el índice de dificultad a escala unitaria es:

$$ID = \log_2 \left(\frac{r_i}{W} + 1 \right) \quad (5.106)$$

El índice de dificultad visual puede relacionarse con el índice a escala unitaria (Figura 5.29) de la siguiente forma a partir de (5.105-106):

$$ID_V = \log_2 \left(\frac{s_2(r_i)}{E_{a2}} (2^{ID} - 1) + 1 \right) \quad (5.107)$$

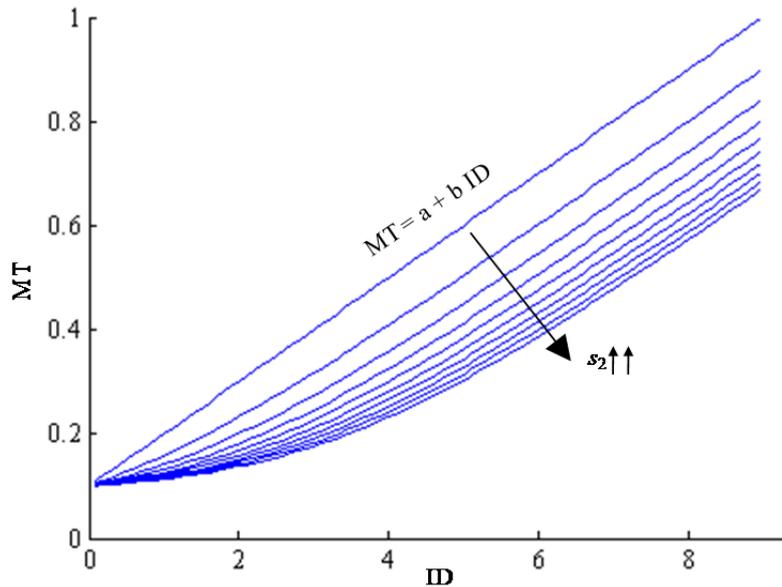


Figura 5.29. Variación del tiempo de ejecución por efecto del escalado sobre el índice de dificultad. La recta superior representa el comportamiento a escala unitaria.

A diferencia del efecto de la escala visual, la escala motora actúa incrementando o reduciendo la distancia recorrida en el espacio motor, con lo que el desplazamiento total depende del valor que va tomando la función de escala a lo largo del desplazamiento. Como ya se mostró en (5.98) el desplazamiento total depende de la integral de la función de escala a lo largo del movimiento:

$$D_M = \int_0^{r_i} \frac{1}{s_1(r)} dr \quad (5.108)$$

El tamaño final del objetivo depende de la escala motora en torno al mismo, $W_M = W/E_{a1}$, entonces:

$$ID_M = \log_2 \left(\frac{D_M}{W_M} + 1 \right) = \log_2 \left(\frac{D_M E_{a1}}{W} + 1 \right) \quad (5.109)$$

Considerando la relación entre la distancia a escala unitaria r_i la distancia a recorrer D_M :

$$k_m = \frac{D_M}{r_i} \quad (5.110)$$

A partir de (5.108-110) el índice de dificultad motor puede relacionarse con el índice de dificultad a escala unitaria:

$$ID_M = \log_2 \left(k_m E_{a1} (2^{ID} - 1) + 1 \right) \quad (5.111)$$

Finalmente, considerando el efecto combinado de ambas escalas, se tiene la distancia resultante $D_{MV} = k_m \cdot s_2(r_i) \cdot r_i$, y el tamaño final del objetivo $W_{MV} = W \cdot E_{a2} / E_{a1}$, resultando:

$$ID_{MV} = \log_2 \left(\frac{D_{MV}}{W_{MV}} + 1 \right) = \log_2 \left(\frac{r_i k_m s_2(r_i) E_{a1}}{W E_{a2}} + 1 \right) \quad (5.112)$$

A partir de (5.109) y (5.112) el índice de dificultad resultante puede relacionarse con el índice de dificultad a escala unitaria:

$$ID_{MV} = \log_2 \left(\frac{k_m s_2(r_i) E_{a1}}{E_{a2}} (2^{ID} - 1) + 1 \right) \quad (5.113)$$

5.5. Modelo de comportamiento motor

El modo en que las funciones de escala deben evolucionar deberá ser dependiente de la disposición de objetos y *ET*. La distancia r considerada en los apartados anteriores es la medida de referencia cuando existe un solo objeto puntual. Para objetos no puntuales o para más de un objeto presente en el espacio de trabajo la medida de la distancia mínima r ya no será suficiente. Si el *ET* se mueve en dirección a un objeto más lejano aún teniendo otro más cerca del cual se aleja la variación de escala deberá contemplar esta situación. Todo esto es fuertemente dependiente de la velocidad de ejecución de la orden de movimiento del operador en el espacio motor.

5.5. Modelo de comportamiento motor

5.5.1. Estados de movimiento

Como ya se describió en el capítulo 3, puede observarse que la ejecución de movimientos rápidos de la mano en tareas de aproximación a objetos, el perfil de velocidad sigue una ley similar a una “campana simétrica”, con cierta asimetría cuando el valor máximo o de pico de la velocidad disminuye, dependiendo de la precisión requerida de la tarea [MacKenzie et al. 1987], ver Figura 5.30. Este comportamiento tiene la condición de movimiento balístico. Esto quiere decir que la persona no tiene control preciso de la posición durante la ejecución del movimiento, y es solo su experiencia la que determina la eficacia del control motor. Por otro lado, cuando la velocidad se mantiene por debajo de un determinado umbral la persona puede controlar la posición con una determinada precisión de forma continua durante la duración del movimiento.

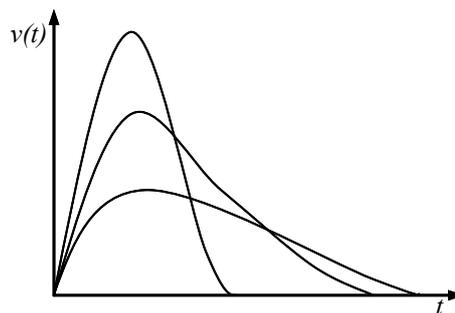


Figura 5.30. Perfil de velocidad de un movimiento de aproximación rápido para diferentes valores de pico.

De aquí, dos modos fundamentales de comportamiento pueden discernirse en función de la velocidad de movimiento: balístico para movimientos rápidos, y navegación para movimientos controlados. Dado que durante la ejecución de los movimientos suceden situaciones de reposo así como otras situaciones de velocidad que requieren de un tratamiento particular, se consideraran las siguientes seis diferentes situaciones o “estados” de movimiento que serán definidos de la siguiente manera:

Reposo: Estado de reposo al inicio, final o entre movimientos.

Aceleración: Movimiento transitorio previo antes de alcanzar la velocidad máxima.

Navegación: Movimiento controlado en todo momento por el operador, realizado de forma precisa y continua.

Balístico: Movimiento rápido entre puntos, el operador solo controla la acción al inicio y final del movimiento.

Correctivo: Movimientos cortos realizados tras un movimiento *balístico* o al corregir las desviaciones de trayectoria en un movimiento de *navegación*.

Harmónico: Movimiento oscilante caracterizado por una trayectoria continua cuyo movimiento sigue algún patrón repetitivo.

Distinguidos estos estados puede modelizarse el comportamiento del operador mediante una máquina de estados finitos en donde las condiciones de transición son dependientes de la velocidad de ejecución.

La Figura 5.31 muestra un gráfico de la velocidad de movimiento en MS para un movimiento balístico compuesto de un impulso inicial seguido de una serie de impulsos correctivos. Se observan las etapas de aceleración comprendidas entre las etapas de reposo y los instantes donde se alcanza la velocidad máxima

de cada impulso de movimiento. El impulso inicial tiene comportamiento balístico cuando supera un determinado umbral de velocidad al que llamaremos V_U , por debajo de este valor de velocidad el operador puede controlar el movimiento en todo momento, los sucesivos impulsos son considerados “correctivos”, si bien tienen cierto comportamiento balístico, su velocidad máxima es inferior al valor umbral V_U . Este comportamiento es el típico de las tareas de indicación o selección. En la Figura 5.32 se muestra un perfil de velocidad correspondiente a un movimiento de navegación. En ella tras el estado de reposo evoluciona el estado de aceleración hasta alcanzar la velocidad máxima, momento donde comienza el estado de navegación en donde la velocidad permanece bajo el umbral V_U . El proceso de navegación ocurre en tareas de arrastre o desplazamiento preciso entre objetos.

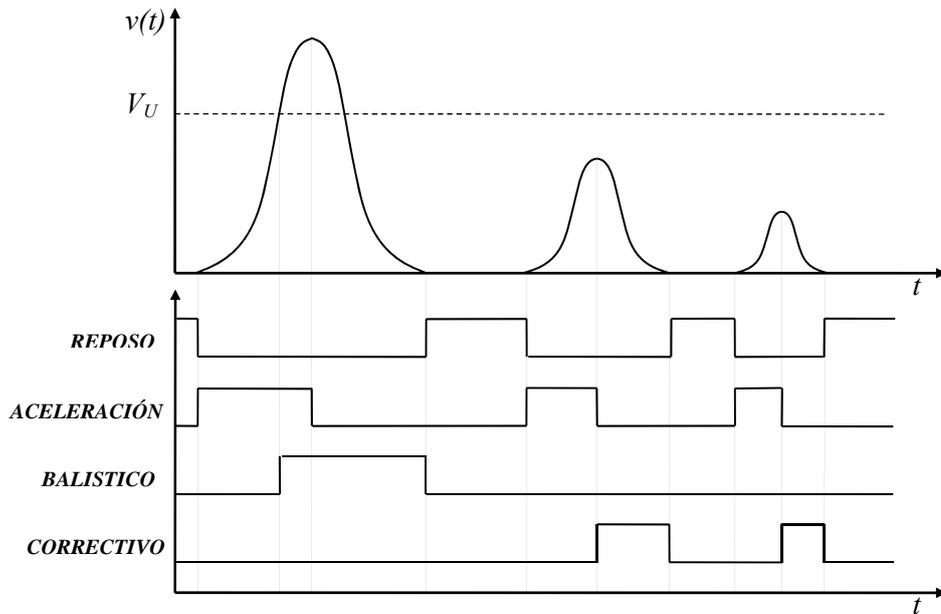


Figura 5.31. Perfil de velocidad de un movimiento *balístico* seguido de impulsos correctivos (típico de un desplazamiento rápido a un punto mediante un ratón). El cronograma inferior muestra los estados que se identifican en cada momento (reposo, aceleración, balístico y correctivo).

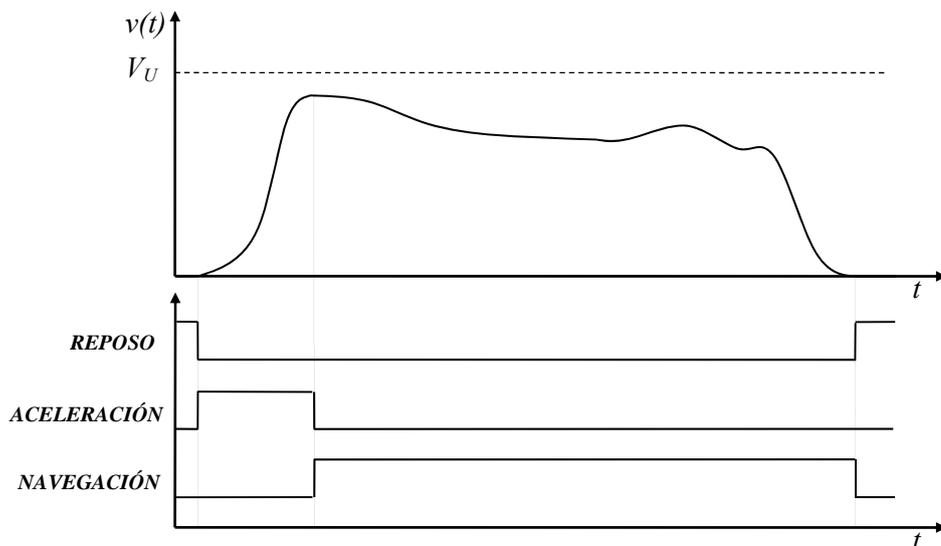


Figura 5.32. Perfil de velocidad de un movimiento de *navegación*. El cronograma inferior muestra los estados que se identifican en cada momento (reposo, aceleración y navegación).

5.5. Modelo de comportamiento motor

Las condiciones que deberán darse para la activación de cada uno de los correspondientes estados dependerá del valor de la velocidad respecto al umbral V_U y del estado anterior tal y como se observa en los cronogramas de las Figuras 5.31 y 5.32. La Tabla 5.2 muestra las condiciones de activación para cada uno de los estados. En la primera columna se indica si se ha alcanzado o no el valor máximo de velocidad. En las columnas 2, 3 y 4 se indica si el valor de velocidad instantáneo es cero, mayor o menor que el valor de velocidad umbral V_U . En las últimas columnas se indica el estado que deberá activarse (*Estado n+1*) según el estado actual (*Estado n*) y las condiciones de velocidad. En la Figura 5.33 se muestra el gráfico que representa la máquina de estados finitos del comportamiento del operador en función de la velocidad de ejecución.

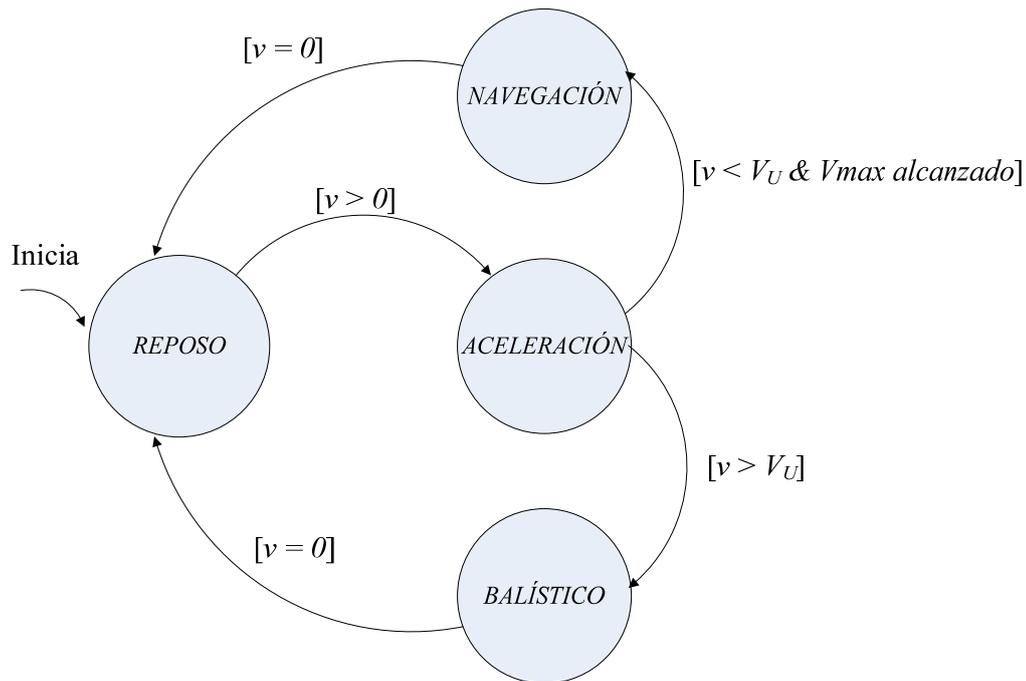


Figura 5.33. Máquina de estados del comportamiento del operador según la velocidad del movimiento.

vel. max. alcanzada	Valor de velocidad			Estado n				Estado n+1
	$v < V_U$	$v > V_U$	$v = 0$	REPOSO	ACELERA	BALISTICO	NAVEGA	
0	1	0	1	REPOSO	REPOSO	REPOSO	REPOSO	
0	0	1	0	ACELERA	ACELERA	ACELERA	ACELERA	
0	1	0	0	ACELERA	ACELERA	ACELERA	ACELERA	
1	1	0	1	REPOSO	REPOSO	REPOSO	REPOSO	
1	0	1	0	BALISTICO	BALISTICO	BALISTICO	BALISTICO	
1	1	0	0	NAVEGA	NAVEGA	BALISTICO	NAVEGA	

Tabla 5.2. Tabla lógica de activación de los estados.

5.5.2. Activación de objetos

Durante el estado de navegación el operador tiene control del movimiento en todo momento, esto quiere decir que la velocidad de ejecución es inferior a la velocidad de transmisión (Throughput) V_i para un error de precisión de movimiento dado.

Superado el valor umbral de velocidad V_U el operador no tiene control del movimiento para una precisión requerida dada, a partir de este instante el movimiento lo consideraremos de tipo balístico y esto sucede cuando en el estado de aceleración se supera dicho umbral V_U . En el estado de movimiento balístico se está interpretando que el operador desea realizar un rápido desplazamiento hacia un lugar del espacio de trabajo próximo o sobre algún objeto.

Como se comentó en el apartado anterior un movimiento de aproximación rápido hacia un objeto está compuesto por una secuencia de impulsos; un impulso inicial de mayor velocidad y uno o más impulsos secundarios. La duración del impulso inicial respecto a la duración total del movimiento es pequeña con lo que la fase de impulsos secundarios correctivos es la que consume la mayor parte del tiempo. Así, si durante la fase del impulso inicial se alcanza el objeto se reducirá considerablemente la duración total del movimiento.

Como se mostró en [Meyer et al. 1988] la desviación estándar del desplazamiento tras el impulso inicial es proporcional a la velocidad media V_1 obtenida según el desplazamiento promedio D_1 y el tiempo promedio T_1 :

$$\sigma_1 = K_1 V_1 = K_1 \frac{D_1}{T_1} \quad (5.114)$$

donde K_1 es una constante dependiente de cada persona obtenida en un experimento de Fitts y considerando una distribución normal del desplazamiento, ver Figura 5.34.

Considerando ε_1 el error de desplazamiento al centro del objeto tras el impulso inicial (un valor negativo indica error por exceso y un valor positivo error por defecto), puede calcularse la probabilidad de alcanzar un objeto de amplitud W tras dicho impulso, considerando norma cero y desviación estándar σ_1 :

$$P = \Pr\left(-\frac{W}{2} \leq \varepsilon_1 \leq \frac{W}{2}\right) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} e^{-\frac{\varepsilon_1^2}{2\sigma_1^2}} d\varepsilon_1 \quad (5.115)$$

Como se muestra en la Figura 5.35, como ejemplo para una desviación $\sigma_1 = 1\text{mm}$, existe un 95% de probabilidad de alcanzar un objeto de amplitud $W = 4\text{mm}$ en el impulso inicial.

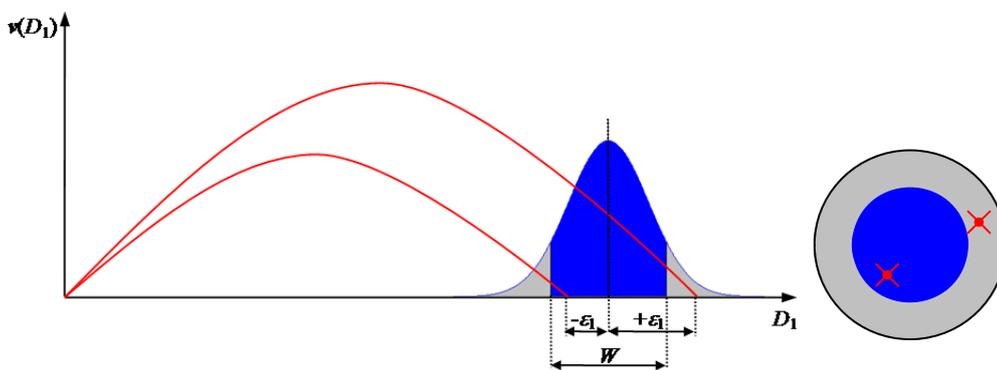


Figura 5.34. Distribución normal en torno al objeto tras el impulso inicial.

5.5. Modelo de comportamiento motor

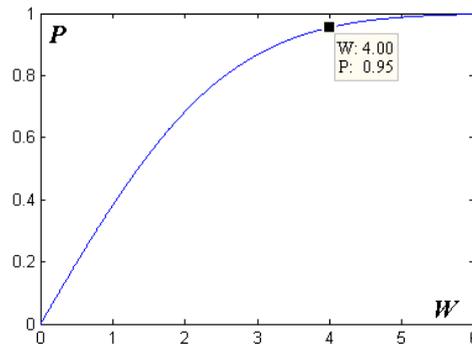


Figura 5.35. Probabilidad de alcanzar un objeto de amplitud W en el impulso inicial con $\sigma_1 = 1\text{mm}$.

5.5.3. Objetos múltiples

Puede decirse que un objeto presente en el espacio de trabajo es “relevante” cuando el operador desea dirigirse hacia él para realizar una determinada operación. Así, en cada momento la presencia de los objetos es relevante en función de la dirección de movimiento del cursor. A partir de aquí se añadirá una segunda máquina de estados que modelizará la intención del operador de actuar sobre un objeto en particular. Si el operador mueve el ET-cursor hacia un objeto diremos que el objeto está “activo”. La Figura 5.36 muestra la idea de activación de objetos múltiples para distintas trayectorias del cursor. En esta figura, la dirección de la trayectoria tr_1 no converge a ningún objeto, pues ningún objeto estará activo entonces. La trayectoria tr_2 convergerá en el objeto 2 activándolo. La trayectoria tr_3 converge en una zona cercana al objeto 3 activándolo.

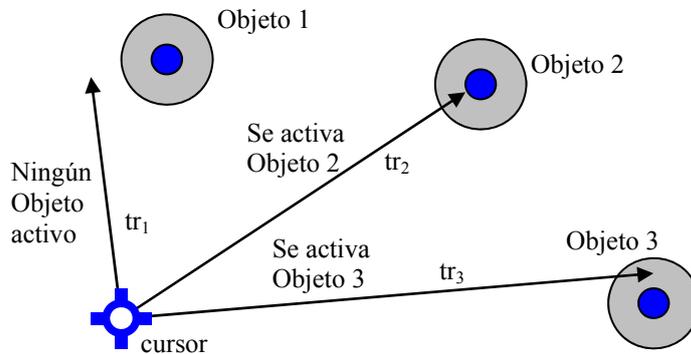


Figura 5.36. Posibles trayectorias del cursor en un espacio visual con objetos múltiples. Los objetos están representados como círculos en color oscuro cuyo diámetro representa la amplitud del objeto, la zona circular en gris claro representa una zona cercana en donde un movimiento balístico puede llegar con una determinada dispersión.

Para determinar la condición de activación de cada objeto consideraremos un sistema de referencia en el espacio visual, ver Figura 5.37a. Si φ_V es el ángulo que forma el vector velocidad con el eje x_V y φ_i es el ángulo del vector de dirección del objeto i -ésimo con respecto al cursor, el objeto se considerará activo si:

$$\varphi_V \in \varphi_i \pm \frac{\gamma_i}{2} \quad (5.116)$$

siendo γ_i el ángulo de dispersión del objeto de amplitud $W_i + 2\varepsilon_i$ situado a una distancia R_i , que resulta en:

$$\gamma_i = 2 \tan^{-1} \left(\frac{W_i + 2\varepsilon_i}{2R_i} \right) \quad (5.117)$$

siendo ε_i el rango entorno al objeto para alcanzarlo con una determinada probabilidad según (5.115).

Para generalizar, si llamamos r_A a la distancia de activación, esta será la distancia de los objetos a la trayectoria que viene determinada por la dirección de movimiento del cursor, ver Figura 5.37b. Cuando esta distancia es menor que ε_i el objeto estará activo.

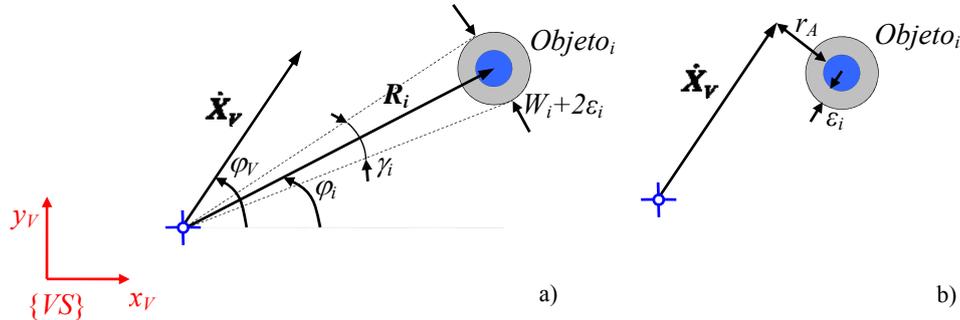


Figura 5.37. Relación entre la dirección de movimiento del vector velocidad en el espacio visual y la posición del objeto con respecto al cursor a) si el ángulo que forma la trayectoria del cursor con respecto al vector de posición del objeto es menor que el ángulo de dispersión, el objeto estará activo b) disposición de la distancia de activación.

5.6. Escalado dinámico

Una distribución de las escalas que siga una ley como la descrita en el apartado 5.3 otorga a cada instante las relaciones de movimiento en cada posición para una disposición de los objetos dada y con independencia de la velocidad o dirección de movimiento (Figura 5.38). Consideramos a este comportamiento como estático ya que las funciones de escala permanecen constantes para una disposición de los objetos determinada, entonces decimos que aplicamos un *escalado estático*. Si consideramos la velocidad relativa entre ET-cursor y objetos, las funciones de escala ya no son solo función de la posición sino de la velocidad y dirección de movimiento, en este caso decimos que aplicamos un *escalado dinámico*. En este apartado se estudiará como aplicar las funciones de escala utilizando el modelo de estados introducido en el apartado anterior a partir de los valores de velocidad y dirección de movimiento que se establezcan. Para ello la escala motora se compondrá de una escala estática, que podrá tener el comportamiento descrito en los apartados 5.4 y 5.5, que será llamada s_{1S} , y por otro lado una escala dinámica, que será responsable de mantener los requerimientos de precisión y velocidad en los estados de movimiento balístico y de navegación, a esta componente de escala dinámica se denotará por s_{1D} , entonces se tendrá que:

$$s_1 = s_{1D} + s_{1S} \tag{5.118}$$

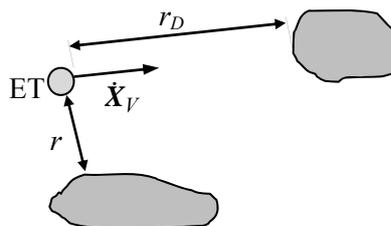


Figura 5.38. Dependencia de la escala con la distancia mínima r , la distancia de colisión r_D y la velocidad.

5.6.1. Distancia mínima y distancia de colisión

Al realizar una navegación o trazado en las inmediaciones de objetos separados una determinada distancia, tal como la navegación entre líneas paralelas, se está observando la distancia hacia esos objetos, la cual proporciona el margen de movimiento que permite establecer la velocidad de traslación. Consideremos el caso de navegación en las inmediaciones de un objeto separado una distancia r del cursor y una distancia r_D en la dirección de movimiento (Figura 5.39), se considera que la forma entre el punto de colisión a r_D y el punto de distancia mínima a r es suficientemente suave para considerarla lineal.

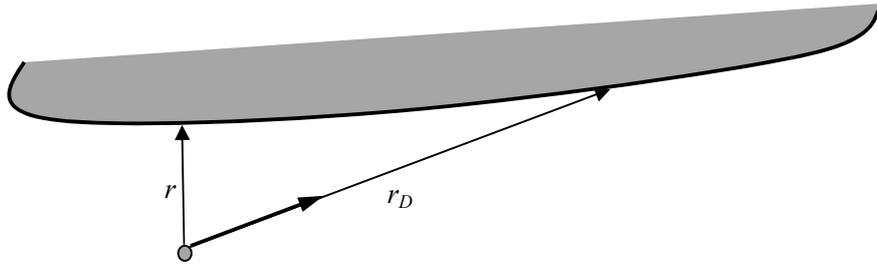


Figura 5.39. Distancia mínima y distancia en la dirección de movimiento entorno a un objeto.

Aunque el movimiento es continuo durante la navegación, la persona requiere de un tiempo de observación y reacción, durante el cual la persona puede cambiar la dirección de movimiento o/y velocidad. Durante la navegación, en cada instante el desplazamiento realizado ΔD será una cantidad que dependerá del tiempo de reacción⁴ Δt y de la velocidad de movimiento v :

$$\Delta D = \Delta t v \tag{5.119}$$

Obviamente existe una componente de dispersión en el desplazamiento, que ya se comentó en el apartado anterior, ecuación (5.110), donde la desviación estándar del impulso inicial dependía de la velocidad durante el mismo. Si bien, la naturaleza del movimiento balístico difiere del movimiento de navegación controlado, cabe esperar que la constante observada en (5.110) sea diferente en modo navegación. Si llamamos a σ_N la desviación estándar durante el proceso de navegación se tendrá:

$$\sigma_N = K_N v \tag{5.120}$$

donde K_N es una constante de proporcionalidad propia de cada persona al realizar un movimiento de navegación⁵. Dado que σ_N tiene unidad de distancia y v unidad de velocidad K_N tiene unidad de tiempo, así que puede considerarse una constante de tiempo. La ley de navegación propuesta por [Accot 2001] descrita en el capítulo 3 mostraba como se obtenía la probabilidad de colisión con las paredes de un túnel recto de ancho W . Aquí se extenderá este concepto describiendo como obtener la probabilidad de colisión al navegar cerca de un objeto situado a una distancia mínima r con una distancia de colisión r_D (Figura 5.40).

⁴ La constante de tiempo de reacción Δt se describió en el capítulo 3, suele tomar valores entorno a los 200 ms.

⁵ En [Accot 2001] los autores relacionan la varianza con el tiempo de reacción Δt , la velocidad v y el ángulo de desviación σ . En este caso $K_N = \Delta t \cdot \sigma$ mostraría un resultado equivalente.

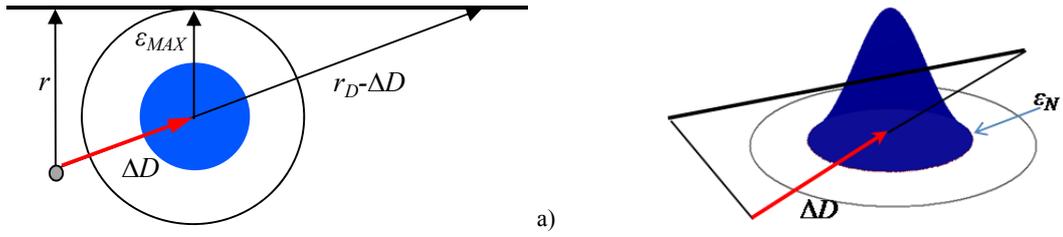


Figura 5.40. Distribución del error de desviación después del desplazamiento ΔD a) la zona oscura marca un error de desviación para una probabilidad dada, el círculo mayor representa la máxima desviación hasta la colisión b) Distribución de probabilidad después de ΔD .

Por semejanza de triángulos, tal como se muestra en la Figura 5.40a, el margen de movimiento entorno al punto después de ΔD :

$$\frac{r}{r_D} = \frac{\varepsilon_{MAX}}{r_D - \Delta D} \quad (5.121)$$

$$\varepsilon_{MAX} = r \left(1 - \frac{\Delta D}{r_D} \right) \quad r_D \neq 0 \quad (5.122)$$

$$\varepsilon_N < \varepsilon_{MAX} \quad (5.123)$$

El valor de error ε_N con una probabilidad P se obtiene considerando la desviación estándar σ_N de (5.120):

$$P = \Pr(\varepsilon_N \leq \varepsilon_{MAX}) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \int_{-\varepsilon_{MAX}}^{\varepsilon_{MAX}} e^{-\frac{\varepsilon_N^2}{2\sigma_N^2}} d\varepsilon_N \quad (5.124)$$

Para obtener una función de probabilidad integral se realiza el siguiente cambio de variable:

$$u = \frac{\varepsilon_N}{\sigma_N} \quad (5.125)$$

$$\Pr(\varepsilon_N < \varepsilon_{MAX}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\varepsilon_{MAX}}{\sigma_N}}^{\frac{\varepsilon_{MAX}}{\sigma_N}} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \varphi \left(\frac{\varepsilon_{MAX}}{\sigma_N} \right) \quad (5.126)$$

Con φ la función de probabilidad integral:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (5.127)$$

A partir de (5.120) y (5.126-127) se tiene:

$$\Pr(\varepsilon_N < \varepsilon_{MAX}) = \varphi \left(\frac{\varepsilon_{MAX}}{K_N v} \right) \quad (5.128)$$

Para obtener el valor de velocidad máxima que permite navegar sin colisión se debe obtener la función recíproca de φ :

$$\frac{\varepsilon_{MAX}}{K_N v} = \varphi^{-1} \left[\Pr(\varepsilon_N < \varepsilon_{MAX}) \right] \quad (5.129)$$

5.6. Escalado dinámico

Entonces, dada una determinada probabilidad P , a partir de (5.122) y (5.129) puede obtenerse el valor de la velocidad máxima para navegar sin colisión con dicha probabilidad:

$$v = \frac{\varepsilon_{MAX}}{K_N \varphi^{-1}(P)} \quad (5.130)$$

$$v = \frac{r r_D}{K_N \varphi^{-1}(P) r_D + r \Delta t} = V_U \quad (5.131)$$

donde V_U es la velocidad máxima de navegación o umbral de velocidad.

Cuando r_D se hace grande ε_{MAX} tiende a r , que correspondería a la distancia mínima al túnel, quedando (5.131) de la siguiente forma:

$$v = \frac{r}{K_N \varphi^{-1}(P)} \quad (5.132)$$

Para $r \approx r_D$, ε_{MAX} tiende a $r_D - \Delta D$, la distancia de colisión, entonces (5.131) resulta en:

$$v = \frac{r}{K_N \varphi^{-1}(P) + \Delta t} \quad (5.133)$$

Considerando el caso particular de navegación a lo largo de un túnel recto de anchura W , y situado el cursor en el centro del túnel, con lo que $r = W/2$ y considerando la dirección de movimiento paralela al túnel, se tiene que $r_D \rightarrow \infty$ y la ecuación (5.132) resulta en:

$$v = \frac{W}{2K_N \varphi^{-1}(P)} \quad (5.134)$$

Para $P = 0.96 \Rightarrow \varphi^{-1} = 2.066$ que sustituyendo en (5.134):

$$v = \frac{W}{4.133K_N} = \frac{W_e}{K_N} \quad (5.135)$$

Dado que K_N es una constante de tiempo, la ecuación (5.135) es equivalente a la velocidad de transmisión o TP en una navegación a lo largo de un túnel recto.

5.6.2. Escalado motor en modo navegación

En un movimiento continuo a velocidad controlada el operador debe poder realizar una navegación garantizando la precisión requerida en cada momento y en cada posición del espacio de trabajo. Esto se cumplirá mientras la velocidad de desplazamiento sea inferior a la máxima para una determinada precisión. Con esta premisa deberá corregirse la trayectoria cuando se excede el ratio de velocidad V_U según (5.131), es decir:

$$\text{si } |\dot{X}_v| > V_U \text{ corrige} \quad (5.136)$$

La corrección consiste en saturar la velocidad del cursor actuando para ello sobre la función de escala. Entonces:

$$\dot{\mathbf{X}}_V = \dot{\mathbf{X}}_M s_1$$

$$si \left| \dot{\mathbf{X}}_V \right| = s_1 \left| \dot{\mathbf{X}}_M \right| \leq V_U \text{ no corrige} \Rightarrow s_{1D} = 0 ; s_1 = s_{1S} \quad (5.137)$$

$$si \left| \dot{\mathbf{X}}_V \right| = s_1 \left| \dot{\mathbf{X}}_M \right| > V_U \text{ corrige} \Rightarrow s_1 = s_{1S} + s_{1D} = \frac{V_U}{\left| \dot{\mathbf{X}}_M \right|} \quad (5.138)$$

$$s_{1D} = \frac{V_U}{\left| \dot{\mathbf{X}}_M \right|} - s_{1S} \quad (5.139)$$

En el caso de no corrección, indicado en (5.137) la escala que prevalece es la escala estática. En caso de corrección, indicado en (5.138-139) interviene la escala dinámica permitiendo mantener la velocidad de cursor bajo control durante la navegación.

5.6.3. Escalado motor en modo balístico

Cuando el operador pretende emprender movimientos rápidos entre objetos se debe procurar que sus acciones permitan mantener bajo control la posición de ET-cursor en todo momento. Tras identificar el movimiento como balístico debe determinarse si la posición final del cursor tras el movimiento va a detenerse cerca de un determinado objeto. En este apartado se distinguirán dos casos particulares, el desplazamiento hacia los objetos, y el desplazamiento evitando obstáculos o anticolidión.

5.6.3.1. Desplazamiento hacia un objetivo

Si lo medimos en términos probabilísticos podría decirse que, tras el impulso inicial del operador, el cursor se detendrá en las inmediaciones de un objeto con una probabilidad P determinada según la ecuación (5.115). Si es así podemos decir que el operador desea alcanzar dicho objeto, en caso contrario el operador solo pretende realizar un movimiento rápido, a modo de aproximación o recolocación en otra posición del espacio de trabajo. Si identificamos como cierta (según una probabilidad determinada, por ejemplo $P > 0.95$) la intención del operador de alcanzar un objeto, la escala motora s_1 deberá variar de tal forma que se alcance el objeto durante el primer impulso, concretamente durante el tiempo de deceleración del impulso inicial, como muestra la Figura 5.41. En el instante donde se alcanza el máximo y considerando una trayectoria simétrica se prevé el valor de desplazamiento x que se tendrá al final del movimiento y se determina su probabilidad, es decir:

$$x_f = 2 x_p \quad (5.140)$$

$$si \ x_f \in D \pm \varepsilon_{95} \text{ corrige trayectoria} \quad (5.141)$$

donde D es la distancia del objeto al inicio del impulso, x_f es el desplazamiento total estimado, x_p es el desplazamiento en el instante donde se alcanza el valor máximo de velocidad y ε_{95} es el error máximo de desplazamiento entorno al objeto para alcanzarlo con una probabilidad del 95%, (este error de desplazamiento será menor cuanto mayor sea la probabilidad considerada).

5.6. Escalado dinámico

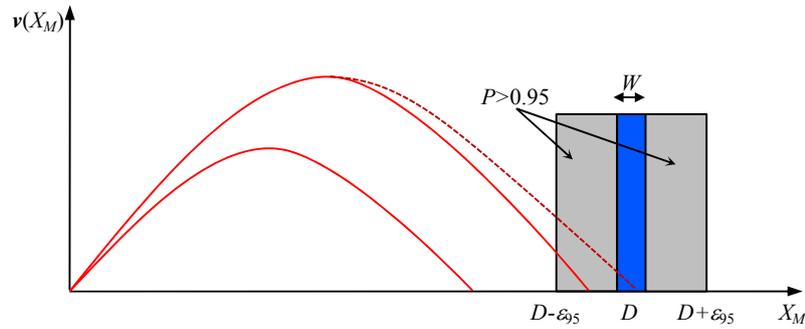


Figura 5.41. Diagrama de fases del impulso inicial. En el impulso de mayor amplitud se acerca al objeto con una probabilidad estimada superior al 95%, entonces es corregido para alcanzar el objeto como se observa en la trayectoria discontinua (en el espacio visual). El impulso de menor amplitud no se acerca al objeto con la probabilidad suficiente, con lo que no se corrige su movimiento. La franja vertical de amplitud W indica la amplitud del objeto, la franja en gris claro a ambos lados indica la distancia entorno al objeto para alcanzarlo con la probabilidad indicada.

Para corregir la trayectoria se observará la evolución del impulso inicial, para ello se considerará como origen de tiempos el instante en donde se alcanza la velocidad máxima, ver Figura 5.42, hasta ese instante se ha alcanzado una posición que se denominará X_{M0} , y al tiempo hasta alcanzar dicha posición t_0 . El instante en donde la velocidad es cero es t_f .

Se trata de estimar el desplazamiento total X_{MF} que se realizará en MS para prever que el cursor en VS se detenga en el mismo instante, el instante t_f , en que lo hace el movimiento en MS .

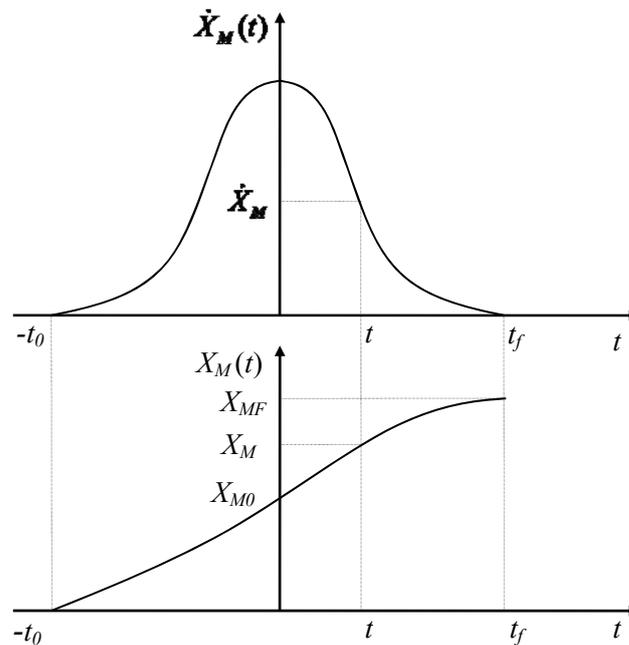


Figura 5.42. Perfiles de velocidad y posición del impulso inicial considerando $t = 0$ a la velocidad máxima.

Para poder estimar el instante de finalización de la trayectoria en cada instante se aproxima el perfil de velocidad mediante una función. En este caso se describe el procedimiento aproximando el perfil de velocidad en cada instante a una recta, ver Figura 5.43. La ecuación de la recta que describe la velocidad en cada instante vendrá dada por:

$$\dot{X}_M(t) = c_2 \cdot t + c_1 \quad (5.142)$$

$$c_2 = \ddot{X}_M \quad (5.143)$$

5. Transformación escalar entre Persona-Interfaz-Robot

donde c_2 es la pendiente de la velocidad en el espacio motor, es decir la aceleración \ddot{X}_M , c_1 es la correspondiente ordenada en el origen que para un instante t y una velocidad \dot{X}_M dados:

$$c_1 = \dot{X}_M - c_2 \cdot t \quad (5.144)$$

El instante estimado t_e en donde la velocidad es cero se determinará con $\dot{X}_M = 0$ en (5.142), entonces:

$$t_e = -\frac{c_1}{c_2} \quad \text{para } c_2 \neq 0 \quad (5.145)$$

Y para obtener el valor del desplazamiento total estimado X_{Me} en el espacio motor, obtenemos la ecuación del desplazamiento integrando (5.142):

$$X_M(t) = \frac{1}{2}c_2t^2 + c_1t + c_0 \quad (5.146)$$

para cada t y X_M conocidos el valor de c_0 será:

$$c_0 = X_M - \frac{1}{2}c_2t^2 - c_1t \quad (5.147)$$

Así para $t = t_e$ en (5.146) se tiene que:

$$X_{Me} = \frac{1}{2}c_2t_e^2 + c_1t_e + c_0 \quad (5.148)$$

Que a partir de (5.144), (5.147) y (5.148) puede reducirse a:

$$X_{Me} = X_M + \frac{(t_e - t) \cdot \dot{X}_M}{2} \quad (5.149)$$

En el espacio visual el valor final de la posición es X_{VF} , que para un t y \dot{X}_V dados la ecuación (5.149) se reescribe según:

$$X_{VF} = X_V + \frac{(t_e - t) \cdot \dot{X}_V}{2} \quad (5.150)$$

Combinando (5.149) y (5.150) se tiene que:

$$\frac{\dot{X}_V}{\dot{X}_M} = \frac{X_{VF} - X_V}{X_{Me} - X_M} \quad (5.151)$$

Dado que la relación de movimiento entre las velocidades en los espacios motor y visual es la escala motora, se tiene que:

$$s_1 = \frac{X_{VF} - X_V}{X_{Me} - X_M} \quad \text{para } X_{Me} \neq X_M \quad (5.152)$$

El numerador de (5.152) corresponde a la distancia mínima al objetivo en el espacio visual.

5.6. Escalado dinámico

Debe observarse que la pendiente inicial, en el máximo de velocidad, es nula, no puede estimarse el tiempo final de trayectoria en ese instante t_0 , del mismo modo la aceleración alrededor del máximo, en torno al 10%, es muy pequeña para considerarla. Para ello se toma como tiempo estimado el obtenido durante la fase de aceleración, es decir t_0 , dada la característica de simetría del impulso inicial, valor que se mantendrá durante el 10% del valor máximo de velocidad. Este es un modelo básico para estimar la respuesta, el cual puede mejorarse aumentando el orden de la función de aproximación.

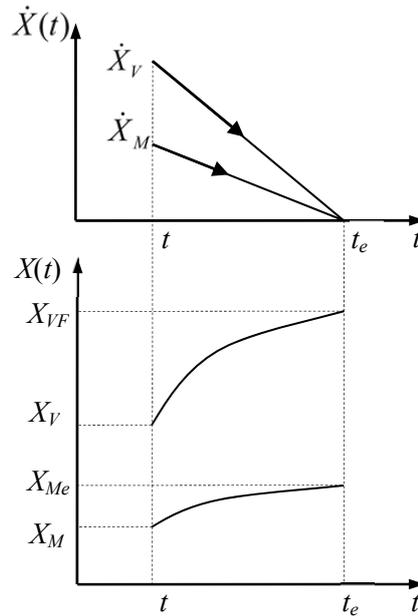


Figura 5.43. Perfiles de velocidad y desplazamiento motor y visual esperados.

La Figura 5.44 muestra el resultado del movimiento para un usuario tras realizar un desplazamiento de 200 mm hacia un objeto de 2 mm de ancho a escala unitaria constante. Tras el impulso inicial, el operador realiza tres submovimientos adicionales en donde consume la mayor parte del tiempo.

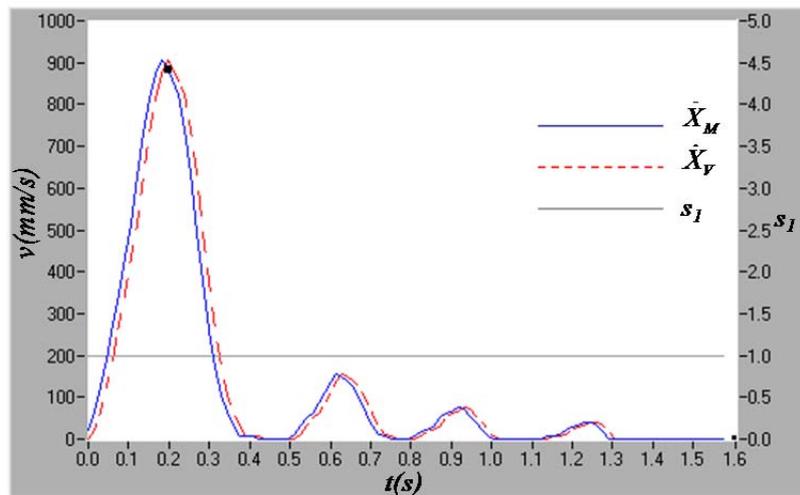


Figura 5.44. Respuesta del operador ante un desplazamiento de 200 mm hacia un objeto de 2 mm de ancho. En trazo grueso continuo se muestra la velocidad en el espacio motor, coincidente con la velocidad en el espacio visual en trazo discontinuo, dado que el escalado, en trazo fino en gris, es unitario y constante. Tras el impulso inicial se muestran tres submovimientos correspondientes a las correcciones en torno al objetivo.

La Figura 5.45 muestra el mismo experimento tras aplicar un escalado estático utilizando una función lineal definida a tramos (con $E_{a1} = 0.5$, $E_{b1} = 4$, $r_a = 10$ y $r_b = 100$). El mayor valor de escala al inicio del movimiento se traduce en un movimiento más rápido del cursor, con lo que en el espacio motor, el usuario aplicará un valor menor de velocidad, observándose un pico menos acusado que el obtenido a escala constante. Al reducirse la escala progresivamente se produce un efecto de deceleración que permite al usuario alcanzar el objetivo con un número de correcciones menor que el obtenido en el escalado constante.

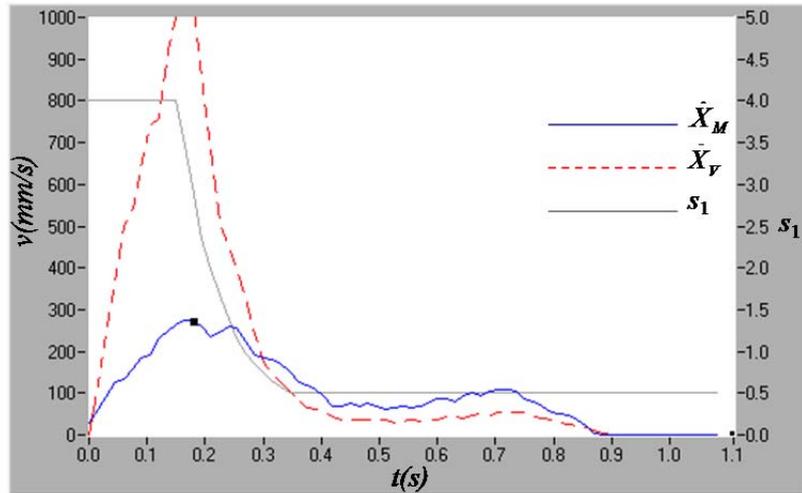


Figura 5.45. La misma respuesta con escalado estático. El mayor valor de escala al inicio del movimiento resulta en un menor pico de velocidad en el espacio motor comparado con el obtenido a escala constante. La escala decrece progresivamente a medida que el objetivo se encuentra más cerca, este efecto permite reducir el número de impulsos correctivos finales.

En la Figura 5.46 se muestra una captura de la respuesta en velocidad para el mismo experimento aplicando ahora un escalado dinámico, después de alcanzar el máximo del impulso inicial la escala es modificada para que el movimiento en el espacio visual (trazo discontinuo) alcance el objetivo al final del impulso inicial. Al no haber correcciones el tiempo total se reduce considerablemente.

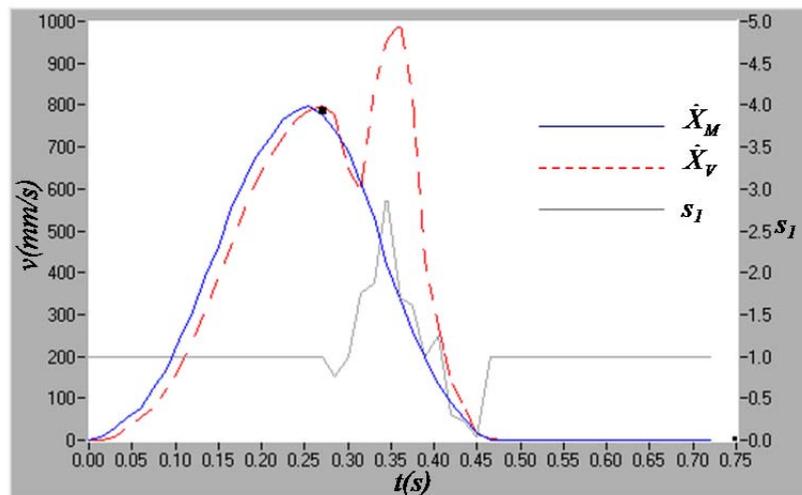


Figura 5.46. La misma respuesta con escalado dinámico. Durante la deceleración del impulso inicial se introduce el valor de escala necesario para que la velocidad en el espacio visual tienda a cero sobre el objetivo.

5.6. Escalado dinámico

5.6.3.2. Desplazamiento anticolidión

En un desplazamiento entre obstáculos lo habitual será que este se realice en modo de navegación, no obstante si se activa un modo balístico y el movimiento se dirige hacia un obstáculo, la trayectoria creada por el impulso inicial debe de finalizar de tal forma que no suceda la colisión. En este caso se distinguirán dos fases, la de aceleración hasta t_0 y la deceleración desde t_0 hasta t_f . Durante la fase de aceleración se deberá limitar el valor máximo de velocidad que daría lugar a la colisión actuando debidamente sobre la escala motora.

Tal como se mostró en el capítulo 3 sobre el modelo optimizado del impulso inicial, la duración del impulso inicial depende de la distancia media D_1 recorrida durante dicho impulso y la desviación estándar σ_1 :

$$T_1 = K_1 \frac{D_1}{\sigma_1} \quad (5.153)$$

Si r_D es la distancia al obstáculo en cada momento y r_{Di} es la distancia inicial al obstáculo al inicio del movimiento, consideremos ε_{95} el error correspondiente a una probabilidad del 95% dada la desviación σ_1 . El desplazamiento durante la fase de aceleración del impulso inicial ha de cumplir:

$$r_{Di} - r_D < x_p < \frac{r_{Di} - \varepsilon_{95}}{2} \quad (5.154)$$

$$r_D < \frac{r_{Di} + \varepsilon_{95}}{2} \quad (5.155)$$

Al igual que en el apartado anterior, se aproxima el perfil de velocidad a una función para estimar, en este caso el valor máximo que deberá tener la velocidad durante la fase de aceleración. De nuevo, aproximamos la evolución de la velocidad en cada instante a una recta con término independiente nulo ya que se parte del reposo, entonces:

$$\dot{X}_M(t) = \ddot{X}_M t \quad (5.156)$$

$$X_M(t) = \frac{1}{2} \ddot{X}_M t^2 + x_0 \quad (5.157)$$

Poniendo la velocidad como función del desplazamiento, de (5.156-157) se tiene en cada instante t :

$$\dot{X}_M = \sqrt{2\ddot{X}_M(X_M - x_0)} \quad (5.158)$$

Relacionando el desplazamiento X_M con la distancia r_D al obstáculo, considerando $x_0 = 0$ y sustituyendo en (5.158):

$$X_M = -r_D + r_{Di} \quad (5.159)$$

$$\dot{X}_M = \sqrt{2\ddot{X}_M(r_{Di} - r_D)} \quad (5.160)$$

El valor máximo de la velocidad deberá cumplir la desigualdad (5.155), entonces:

$$\dot{X}_M(t) < Vp_{MAX} = \sqrt{\ddot{X}_M(r_{Di} - \varepsilon_{95})} \quad (5.161)$$

Si se excede el valor de Vp_{MAX} mostrado por (5.161) deberá corregirse en el espacio visual actuado sobre la escala motora:

$$\text{si } \dot{X}_M < Vp_{MAX} \text{ no corrige} \quad (5.162)$$

$$si \dot{X}_M \geq Vp_{MAX} \Rightarrow s_1 = \frac{Vp_{MAX}}{\dot{X}_M} \quad (5.163)$$

En la fase de deceleración, tras alcanzar el máximo de velocidad en el espacio motor, debe garantizarse que al detenerse el movimiento en el espacio motor, el movimiento en el espacio visual se detenga a una distancia del obstáculo distinta de cero, ver Figura 5.47. Consideramos que al menos esta distancia corresponderá a la precisión ω_p requerida por la tarea en el espacio visual y como máximo el valor de dispersión estimado, es decir ε_{95} . Llamemos a este valor R_p :

$$\omega_p < R_p < \varepsilon_{95} \quad (5.164)$$

En caso de corrección el valor de la escala se obtiene con el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior (5.121-131). Dado que el cursor deberá detenerse una distancia R_p antes de la distancia al obstáculo la ecuación (5.131) vendrá sustituida por:

$$s_1 = \frac{X_{VF} - X_V - R_p}{X_{Me} - X_M} \quad \text{para } X_{Me} \neq X_M \quad (5.165)$$

Con r_D la distancia al obstáculo en la dirección de movimiento (5.165) quedará:

$$s_1 = \frac{r_D - R_p}{X_{Me} - X_M} \quad \text{para } X_{Me} \neq X_M \quad (5.166)$$

La condición de corrección se dará si el valor final estimado del desplazamiento en el espacio visual se encuentra una distancia más cercana a R_p del obstáculo, es decir:

$$si X_{VF} \leq X_V - R_p \quad \text{no corrige} \quad (5.167)$$

$$si X_{VF} > X_V - R_p \Rightarrow s_1 = \frac{r_D - R_p}{X_{Me} - X_M} \quad (5.168)$$

Los valores de X_{VF} y X_{Me} se obtienen de (5.149) y (5.150).

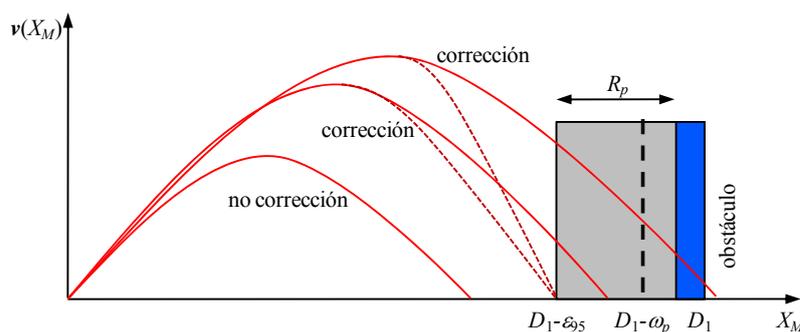


Figura 5.47. Corrección de la trayectoria a través de la escala motora para evitar colisión.

5.6.3.3. Efecto del escalado sobre la eficiencia

Dada la naturaleza de la corrección automática sobre el impulso inicial que evita el proceso correctivo por parte de la persona entorno al objetivo, no puede hablarse de un índice de dificultad particular para este tipo de tarea en comparación con el obtenido en una tarea de Fitts convencional. No obstante se analizará

5.6. Escalado dinámico

el efecto sobre el tiempo total de tarea y sobre el Throughput. En [Meyer et al. 1988] los autores proponen un modelo válido de la duración del impulso inicial T_1 y del tiempo total de una tarea de Fitts T , este modelo se describe como sigue:

$$T_1 = \frac{2K \sqrt{\frac{D}{W}}}{\sqrt{\theta - \frac{W}{D}}} \quad (5.169)$$

$$T = \frac{2K \left(2\theta \sqrt{\frac{D}{W}} - \sqrt{\frac{W}{D}} \right)}{\theta \sqrt{\theta - \frac{W}{D}}} \quad (5.170)$$

donde T_1 es la duración media del impulso inicial, T la duración media total, K es una constante de proporcionalidad y θ es un parámetro obtenido a partir de la distribución normal⁶. Dividiendo ambas ecuaciones obtendremos la relación de duración del impulso inicial respecto al total:

$$\frac{T_1}{T} = \frac{\theta \sqrt{\frac{D}{W}}}{2\theta \sqrt{\frac{D}{W}} - \sqrt{\frac{W}{D}}} \quad (5.171)$$

$$D \gg W \Rightarrow \frac{T_1}{T} = \frac{1}{2} \quad (5.172)$$

Como se aprecia en (5.171), para D grande respecto a W , la duración del impulso inicial representa un 50% de la duración total. Esto indica que a igual índice de dificultad, la tarea se ejecutaría con el doble de Throughput.

5.6.4. Dinámica del escalado visual

En los apartados anteriores se ha descrito el efecto de la velocidad del movimiento del cursor y como observando su evolución en el tiempo puede modificarse a través de la escala motora para controlar la posición del cursor según una distribución de objetos en el espacio visual dada y a escala visual constante. Pero ¿qué sucederá si la escala visual es variable? La persona tiene una limitación en cuanto al flujo de información visual que puede procesar, es decir el número de píxeles por unidad de tiempo. Como se describió en el apartado 3.1.3 existe una velocidad máxima de seguimiento de una imagen que se desplaza y que el movimiento ocular puede seguir, que está en torno a los 100°/s. Dependiendo de la distancia del operador a la pantalla se traducirá en una velocidad de traslación máxima de la imagen, o lo que es lo mismo la velocidad de *pan* máxima. Puede calcularse que para un operador situado a 400 mm de la pantalla, esta velocidad resulta en unos 700 mm/s.

Por otro lado, para que el operador pueda reconocer una imagen en movimiento, el sistema de seguimiento ocular requiere de unos 100 ms para iniciarse, la imagen debe permanecer al menos unos 450 ms para poder ser procesada, y unos 200 ms para ser reconocida (en total unos 750 ms, aunque algunos

⁶ θ converge a $\sqrt{2\pi}/z_{c2}$ cuando crece D/W . La constante z_{c2} es la desviación normal unitaria tal que una proporción c_2 del área bajo una distribución normal con media cero y varianza uno cae dentro del intervalo $(-z_{c2}, z_{c2})$.

procesos se realizan en paralelo, y este tiempo puede ser menor). Si llamamos a este tiempo T_H y conocidas las dimensiones del espacio visual, puede calcularse la velocidad de desplazamiento máximo teórico de la imagen sobre dicho espacio visual:

$$\dot{p}_{MAX} = \frac{L_V}{T_H} \quad (5.173)$$

siendo L_V la dimensión del espacio visual en la dirección de movimiento. Para un monitor de 17" ($L_V \approx 270\text{mm}$) esta velocidad resulta en unos 360 mm/s. Algunos autores emplean estas relaciones para calibrar sistemas de zoom automático dependiente de la velocidad [Cockburn et al. 2005]. En cualquier caso existirá un valor máximo de la celeridad, llamémosla \dot{p}_{MAX} , con lo que los objetos en el espacio visual podrán desplazarse, parámetro dependiente de cada persona y de las dimensiones del espacio visual y el monitor y la disposición de este con respecto a la persona, cuyo valor podrá obtenerse experimentalmente o bien tomar como referencia los arriba indicados.

La cuestión siguiente trata sobre la velocidad de variación del escalado visual. Los objetos presentes en la imagen se desplazan no solo como consecuencia del *pan* sino como consecuencia del escalado, tal y como se describió en la sección 5.3.2., ver ecuaciones (5.8) y (5.9). Recuperando la ecuación (5.9) que representaba el vector velocidad de pan:

$$\dot{\mathbf{p}} = s_1 \dot{\mathbf{X}}_M + (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \quad (5.174)$$

La celeridad con la que se desplazan los objetos en la imagen no deberá superar un cierto valor \dot{p}_{MAX} , así que se tiene:

$$\dot{p}_{MAX} > \left| s_1 \dot{\mathbf{X}}_M + (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \right| \quad (5.175)$$

Con lo que para una función de escalado visual dada $s_2(r)$, el valor de $s_1(r)$ deberá limitarse para cumplir (5.175), entonces:

$$s_1(r) < \left| \frac{1}{\dot{\mathbf{X}}_M} \left[\dot{p}_{MAX} - (\mathbf{X}_W - \mathbf{X}_C) \frac{ds_2}{dr} \dot{r} \right] \right| = s_{1MAX} \quad \dot{\mathbf{X}}_M \neq 0 \quad (5.176)$$

6. **Ámbito de aplicación**

Este capítulo describe el modo en que la metodología de escalado puede introducirse en ciertos ámbitos de la interacción persona-máquina, especialmente en la interacción con ordenadores y particularmente en la interfaz de teleoperación. Se trata de establecer ciertos criterios que guiarán al desarrollador a implementar la metodología en aplicaciones potenciales. Para ello se caracterizarán los parámetros que se describieron en el capítulo anterior analizando su efecto a través de una serie de pruebas experimentales.

6.1. **Interacción persona-ordenador**

El ámbito de aplicación de una metodología de escalado para ayuda a la interacción persona ordenador cubre un amplio espectro de aplicaciones donde está presente la interacción a través de cualquier dispositivo de interfaz tipo ratón, joystick o similar. Aplicaciones ofimáticas, de diseño asistido por ordenador, navegadores de internet o exploradores de documentos entre otras. En general aplicaciones en donde están presentes tareas de señalización, selección, arrastre o trazado.

6.1.1. **Menús, botones e iconos**

La gran mayoría de aplicaciones dispone de alguna distribución de botones dispuestos en menús o iconos. Su distribución en pantalla atiende a una serie de recomendaciones, muchas de ellas estandarizadas, para que su uso favorezca la ergonomía. No es el objetivo de este capítulo tratar los aspectos ergonómicos de la disposición de los botones o iconos, sino que para una distribución dada de ellos se estudia cómo aplicar las técnicas de escalado. En este tipo de aplicaciones estaremos hablando de actuar sobre la escala motora.

Los iconos que están distribuidos en un escritorio clásico de Windows poseen un tamaño fijo y su disposición es conocida en un momento dado. Los botones suelen estar agrupados, ya sea en una barra de menús horizontal o vertical, o también formando una cuadrícula rectangular. Por lo tanto, el tiempo de selección de iconos y botones está bien caracterizado por la Ley de Fitts a través del tamaño de los mismos y su distancia al cursor en cada momento.

Al aplicar un escalado estático para reducir el tiempo de selección de los objetos debe configurarse debidamente la función de escala en torno a los objetos, contemplando el comportamiento de dicha función tal como se relató en el capítulo 5. En primera instancia, se trataría de buscar la función de escala que haga mínimo el índice de dificultad para todos los valores de distancia a los objetos. El índice de dificultad que se definió en (5.109):

$$ID_M = \log_2 \left(\frac{D_M E_{a1}}{W} + 1 \right)$$

6.1. Interacción persona-ordenador

$$D_M = \int_0^{r_i} \frac{1}{s_1(r)} dr \quad 0 < r_i < r_{MAX}$$

ID_M debe de ser mínimo para todo r_i , donde r_{MAX} es la distancia máxima entre objetos. Para el caso trivial de un solo objeto situado en el centro del espacio visual, $r_{MAX} = L_V/2$, con L_V la anchura máxima del espacio visual, considerando un espacio unidimensional. Para una función lineal definida a tramos, ver (5.85), el índice de dificultad queda:

$$ID_M = \begin{cases} \log_2 \left(\frac{E_{a1}}{W} \left(\frac{r_{a1}}{E_{a1}} + \frac{r_{b1} - r_{a1}}{E_{b1} - E_{a1}} \ln \left(\frac{E_{b1}}{E_{a1}} \right) + \frac{r - r_{b1}}{E_{b1}} \right) + 1 \right) & r_{b1} < r < r_{MAX} \\ \log_2 \left(\frac{E_{a1}}{W} \left(\frac{r_{a1}}{E_{a1}} + \frac{r - r_{a1}}{E_{b1} - E_{a1}} \ln \left(\frac{E_{b1}}{E_{a1}} \right) \right) + 1 \right) & r_{a1} < r \leq r_{b1} \\ \log_2 \left(\frac{r}{W} + 1 \right) & r \leq r_{a1} \end{cases} \quad (6.1)$$

Si E_{a1} y E_{b1} , las escalas mínima y máximas son conocidas, se deben buscar los valores de r_{a1} y r_{b1} que hagan mínimo ID_M para todo r menor que r_{MAX} . La solución trivial en este caso sucede haciendo $r_{b1} = r_{a1}$, obviamente es así debido a que el desplazamiento total se reduce en un factor correspondiente a E_{b1} y el tamaño del objetivo aumenta en un factor correspondiente a E_{a1} . El índice de dificultad resultante sería:

$$ID_M = \begin{cases} \log_2 \left(\frac{1}{W} \left(r_{a1} + \frac{r - r_{a1}}{E_{b1}} E_{a1} \right) + 1 \right) & r_{a1} < r < r_{MAX} \\ \log_2 \left(\frac{r}{W} + 1 \right) & r \leq r_{a1} \end{cases} \quad (6.2)$$

Que para valores de $r \gg r_{a1}$ (6.2) tiende a:

$$ID_M = \log_2 \left(\frac{r}{W} \frac{E_{a1}}{E_{b1}} + 1 \right) \quad (6.3)$$

No obstante, esta función presenta los inconvenientes de ser discontinua y de no contemplar el beneficio del efecto desacelerador que se obtiene cuando decrece la escala al decrecer la distancia al objetivo. Por otro lado, cuando la distancia al objetivo es pequeña el beneficio del escalado es despreciable debido a que el usuario no alcanza un valor alto de velocidad, es decir si los objetos están cerca del cursor, el usuario navega sobre ellos en vez de moverse rápidamente hacia ellos. Esto puede observarse en el comportamiento del índice de dificultad respecto a la distancia.

Como se muestra en la Figura 6.1, el índice de dificultad de una tarea de navegación crece linealmente con la distancia y logarítmicamente en el caso de una tarea Fitts o movimiento balístico. El lugar donde se cruzan es cuando la distancia es igual al ancho del objetivo, por debajo de este valor el índice de dificultad de la tarea de navegación es teóricamente menor.

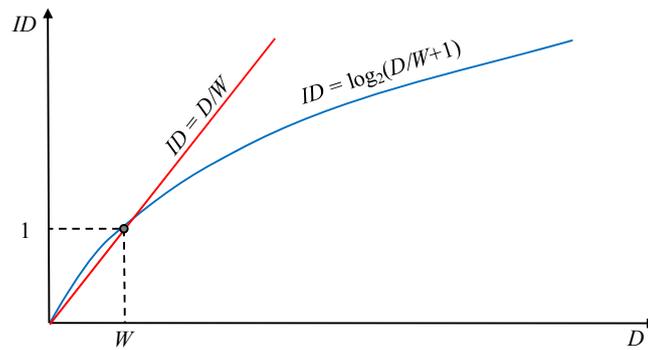


Figura 6.1. Relación entre los índices de dificultad de navegación (rojo), y balístico (azul).

Debe encontrarse un valor de distancia r_{b1} , donde comienza la reducción progresiva de la escala motora, el cual permita un índice de dificultad cercano al mínimo, así como el valor adecuado de r_{a1} en torno al objetivo. En el siguiente apartado se llevará a cabo un experimento que permitirá determinar la influencia de la zona variable de la escala y el valor de las escalas en un experimento de Fitts.

6.1.2. Escalado motor estático

Para evaluar el efecto del escalado estático, el rango de acción de una función variable definida a tramos y los valores de escalas, se ha llevado a cabo un experimento de Fitts sobre 8 voluntarios diestros entre 20 y 39 años procedentes del entorno universitario.

Dado que el objetivo es evaluar el efecto de la función de escalado estática sobre iconos y botones el tamaño del objetivo elegido será de 10mm, que correspondería al ancho de un icono, y de 5mm, que es aproximadamente el ancho de un botón de menú o barra de herramientas. Estos son los tamaños que adquieren dichos objetos sobre un monitor de 15" con una resolución de 1280x800 pixeles. El dispositivo señalizador empleado es un ratón Logitech G9 Laser Mouse.

En primer lugar se ensayará el comportamiento a escalas constantes, de valores 0.25, 0.5, 1, 2, 4 y 8. Los valores de las distancias D al objetivo serán de 25, 50, 100 y 200mm, que son representativas de las distancias que pueden darse en un monitor medio de 14" o 15". Se realizarán 7 repeticiones por cada combinación de escala, distancia y para los dos tamaños de objetivo W arriba indicados (5 y 10mm). Esto da un total de $6 \text{ escalas} \times 4 \text{ D} \times 2 \text{ W} \times 7 \text{ reps} \times 8 \text{ sujetos} = 2688$ muestras.

Seguidamente se realizará el experimento con la función de escala variable. Aquí se busca la función de escala variable que ofrece el mejor comportamiento para cada combinación D - W . Se ensayarán 3 combinaciones de escala en torno al objetivo E_{a1} (0.25, 0.5 y 1); 3 de escalas lejos del objetivo E_{b1} (2, 4 y 8); 3 valores de distancia en torno al objetivo r_{a1} (al 0%, 10% y 20% de la distancia total D); 3 valores de distancia lejos del objetivo, donde comienza la zona progresiva, r_{b1} (al 25%, 50% y 75% de la distancia total D). Esto da un total de $3 E_{a1} \times 3 E_{b1} \times 3 r_{a1} \times 3 r_{b1} \times 4 D \times 2 W \times 7 \text{ reps} \times 8 \text{ sujetos} = 36288$ muestras.

Posteriormente se repetirá el experimento para un conjunto de 7 diferentes ID combinando anchos de objetivos entre 1 y 8mm y distancias entre 25 y 200mm. En este caso se busca la función de escala variable que muestra el mejor resultado para todas las combinaciones de ID . Se ensayan 16

6.1. Interacción persona-ordenador

combinaciones de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$ más la combinación a escalas constantes. El número de muestras en este caso es $17 E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1} \times 7 ID \times 7 \text{ reps} \times 8 \text{ sujetos} = 6664$ muestras.

El sistema se calibra inicialmente para que el movimiento del ratón en el espacio motor coincida con el movimiento del cursor en el espacio visual, para así aplicar los escalados. Se anula la función de aceleración del cursor. Se insta a los usuarios a realizar un movimiento con el ratón empleando únicamente la articulación de la muñeca y los dedos, moviendo la mano en todo su rango de movimiento y sin forzar, de izquierda a derecha, y adelante y atrás (Figura 6.2). Esto permite tener una referencia de cuando intervienen únicamente los dedos, la mano o el brazo. El promedio obtenido es de 108.7 mm (SD = 15.4mm) de desplazamiento en el espacio motor para el movimiento lateral (articulación de la muñeca), y de 45.6 mm (SD = 6.6mm) para el desplazamiento adelante-atrás (articulaciones de los dedos).

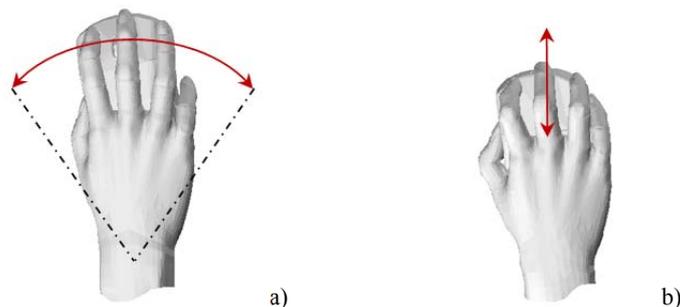


Figura 6.2. Rango de movimiento del desplazamiento del ratón utilizando solo el conjunto mano-dedos a) El movimiento lateral utilizando la articulación de la muñeca b) Movimiento adelante-atrás utilizando los dedos.

6.1.2.1. Escala constante

La Figura 6.3 muestra los resultados obtenidos tras el experimento a escalas constantes. A izquierda y derecha se observan los resultados del tiempo de ejecución para los anchos de objetivo de 5 y 10 mm respectivamente, y de arriba a abajo para los cuatro valores de distancia. En las gráficas se observan los valores promedios del tiempo obtenido para las diferentes escalas. Los segmentos sobre los círculos del tiempo promedio indican los intervalos de confianza para las diferencias de las medias tras el análisis de la varianza. Se ha resaltado el valor medio mínimo, los valores medios que no son significativamente diferentes se muestran en gris claro, el resto son significativamente diferentes con valor de significación del 95%.

La forma de “C” que toman los valores promedio en todos los casos, indica que las escalas que lanzan los menores tiempos son las centrales, que en general resultan ser las escalas de 1 a 4. Se observa cierto sesgo hacia las escalas 4 y 8 en los casos de distancia grande $D = 100$ y 200mm y ancho de objetivo $W = 10\text{mm}$. Para todos los casos el valor de escala que muestra los tiempos de ejecución promedio menores sería la escala 2.

El desplazamiento en el espacio motor crece en proporción inversa a la escala (Figura 6.4), para escalas mayores que 2 el desplazamiento motor se encuentra por encima del desplazamiento promedio máximo (10,87mm) obtenido en el movimiento de la mano de los usuarios. Esto indica que intervendrá el movimiento del brazo para escalas mayores que 2.

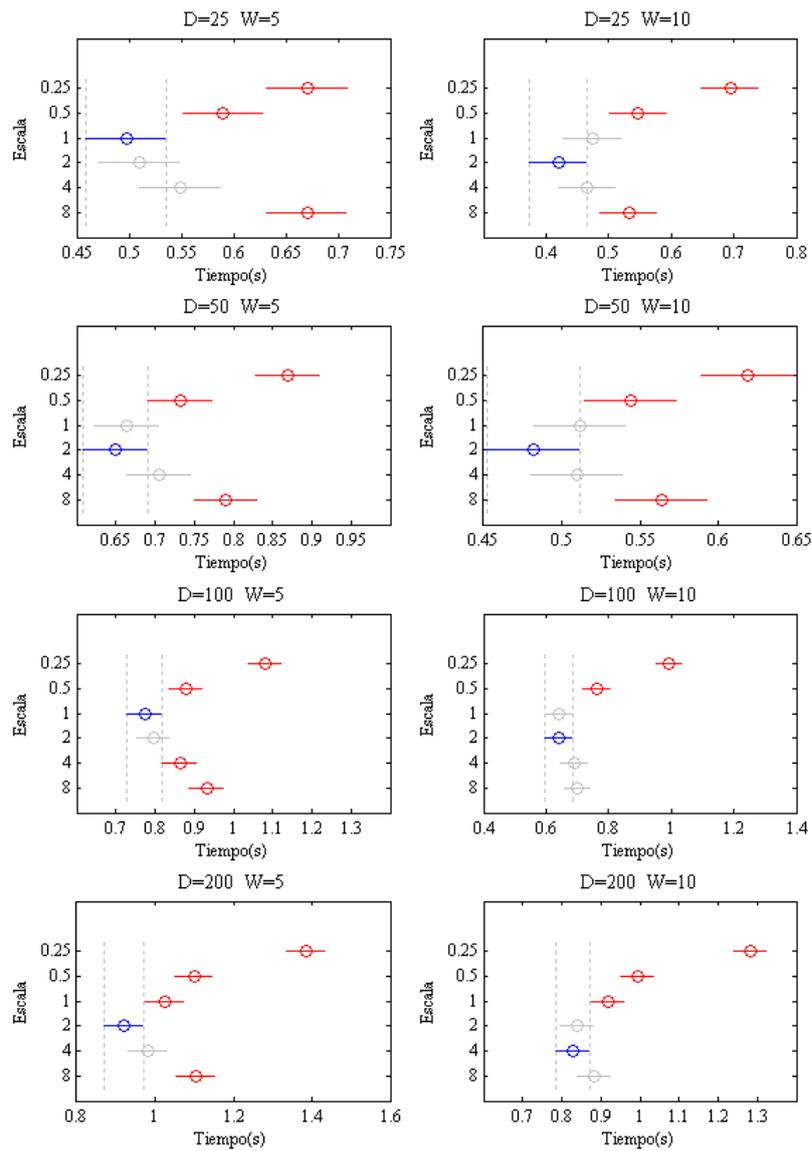


Figura 6.3. Tiempo medio de ejecución para las diferentes escalas, distancias y anchuras de objetivo en el experimento a escalas constantes.

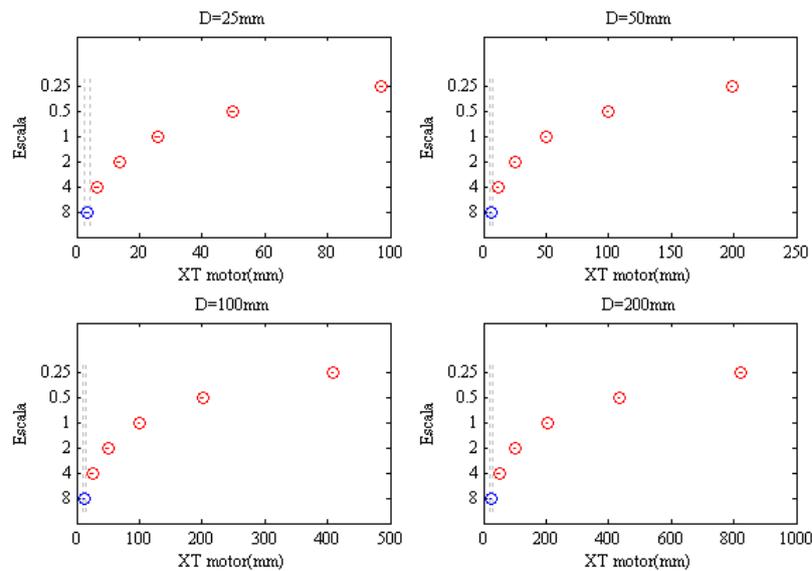


Figura 6.4. Desplazamiento promedio en el espacio motor para las diferentes escalas y distancias en el experimento a escalas constantes.

6.1. Interacción persona-ordenador

6.1.2.2. Escala variable

Los resultados de los tiempos de ejecución promedio para el experimento a escala variable se muestran en las Figuras 6.5 a 6.8. En este ensayo los datos se han analizado empleando un análisis de la varianza para n términos, para así poder analizar el efecto sobre las diferencias entre los tiempos promedio para las diferentes combinaciones de escala mínima E_{a1} y escala máxima E_{b1} , y las combinaciones de rango de la zona variable dados por las distancias r_{a1} y r_{b1} para la función de escala definida a tramos. Los gráficos representados en las figuras se han obtenido tras el análisis de la varianza mediante un a test de comparación múltiple.

De la observación de los resultados pueden extraerse ciertas conclusiones. En primer lugar se aprecian diferencias significativas tanto en las combinaciones de escalas como en las combinaciones del rango de la zona variable. En segundo lugar los valores de los tiempos de ejecución son significativamente menores que los obtenidos a escala constante.

En cuanto al valor mínimo de la escala, E_{a1} , el valor que está presente en todos los casos que lanzan los tiempos mínimos es de 0.5. En cuanto al valor máximo de la escala E_{b1} , los valores que presentan los menores tiempos son las escalas 4 y 8.

Respecto a los resultados observando los rangos de la zona variable, en los gráficos se muestran los valores de las distancias mínima r_{a1} y máxima r_{b1} en tanto por ciento respecto a la distancia D ensayada en cada caso. El valor de r_{a1} al 0%, es el que muestra peores resultados, siendo los valores de distancia al 10% y 20% los que lanzan los tiempos mínimos. En cuanto a los valores de las distancias máximas r_{b1} se observan los mejores resultados para valores del 50% al 75% de la distancia total D . El valor de r_{b1} al 25% lanza los peores tiempos, principalmente en las distancias largas, ya que representa una zona variable pequeña para la reducción de la velocidad del movimiento.

No se aprecia gran diferencia en el efecto causado de las combinaciones de escala y rangos distinguiendo entre distintos valores del ancho de objetivo $W = 5$ y 10mm. Obviamente los tiempos obtenidos en el objetivo de 10 mm son menores, pero las combinaciones de escalas y rangos dan similares beneficios sobre los tiempos de ejecución en los dos anchos de objetivo.

El gráfico mostrado en la Figura 6.4 muestra los valores promedio mínimos de los tiempos obtenidos en el ensayo a escala constante y escala variable. Se observa una reducción del tiempo de ejecución promedio en torno al 40% en todas las distancias, más acusado con el ancho de $W = 5$ mm el cual presenta mayor índice de dificultad y es donde el beneficio de la escala variable es mayor.

La Tabla 6.1 muestra para todas las combinaciones de E_{a1} - E_{b1} - r_{a1} - r_{b1} y para la distancia $D = 200$ mm el desplazamiento motor obtenido con (5.100). Las zonas sombreadas en gris claro indican las combinaciones en donde el desplazamiento motor se encuentra por debajo de del desplazamiento promedio lateral máximo (108.7mm) obtenido en el movimiento de la mano de los usuarios. Las zonas sombreadas en gris oscuro son las que están dentro del rango de movimiento adelante-atrás de los dedos.

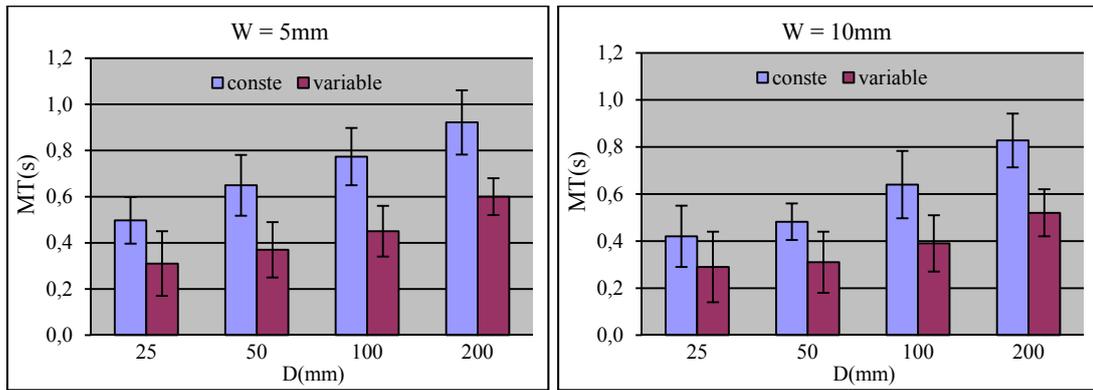


Figura 6.4. Comparación de los tiempos promedios de movimiento MT de los ensayos a escala constante y variable para las diferentes distancias y ancho de objetivo.

r_a	E_a	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	1	1	1
	r_b/E_b	2	4	8	2	4	8	2	4	8
0	25	134,4	74,5	41,1	121,2	67,2	37,2	109,7	60,6	33,6
0	50	168,8	98,9	57,2	142,4	84,4	49,5	119,3	71,2	42,2
0	75	203,2	123,4	73,3	163,6	101,6	61,7	129,0	81,8	50,8
10	25	190,6	139,7	112,2	142,7	95,3	69,8	115,8	71,4	47,7
10	50	225,1	164,1	128,3	163,9	112,5	82,1	125,5	82,0	56,3
10	75	259,5	188,6	144,4	185,1	129,7	94,3	135,1	92,6	64,9
20	25	246,9	204,9	183,2	164,2	123,4	102,4	121,9	82,1	61,7
20	50	281,3	229,4	199,3	185,5	140,6	114,7	131,6	92,7	70,3
20	75	315,7	253,8	215,4	206,7	157,9	126,9	141,2	103,3	78,9

Tabla 6.1. Desplazamiento motor para la distancia $D = 200$ mm.

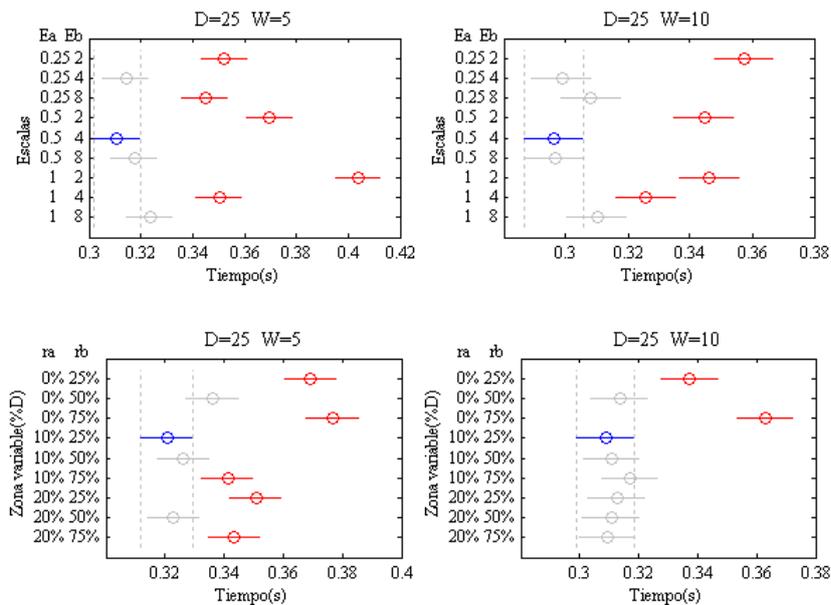


Figura 6.5. Tiempo medio de ejecución para las diferentes combinaciones de escalas, rangos de la zona variable y anchuras de objetivo, en el experimento a escala variable para $D = 25$ mm.

6.1. Interacción persona-ordenador

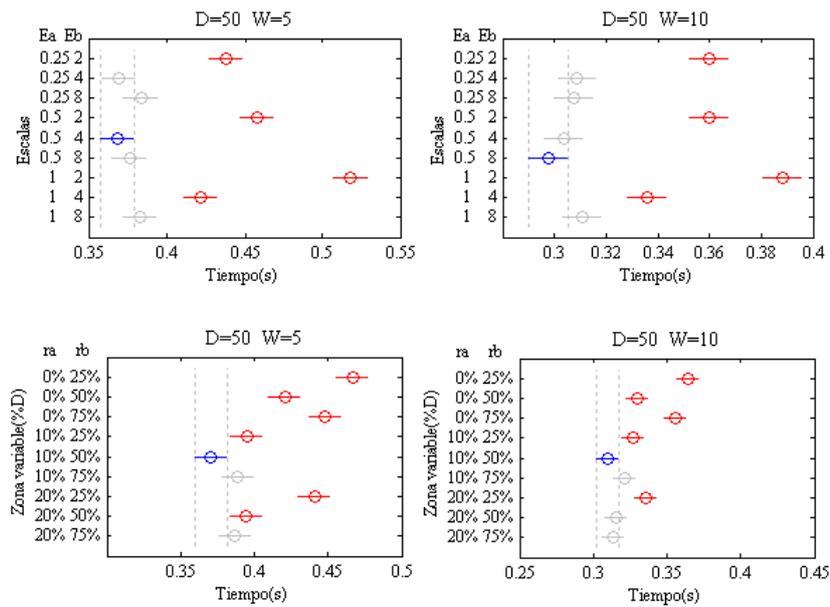


Figura 6.6. Tiempo medio de ejecución para las diferentes combinaciones de escalas, rangos de la zona variable y anchuras de objetivo, en el experimento a escala variable para $D = 50$ mm.

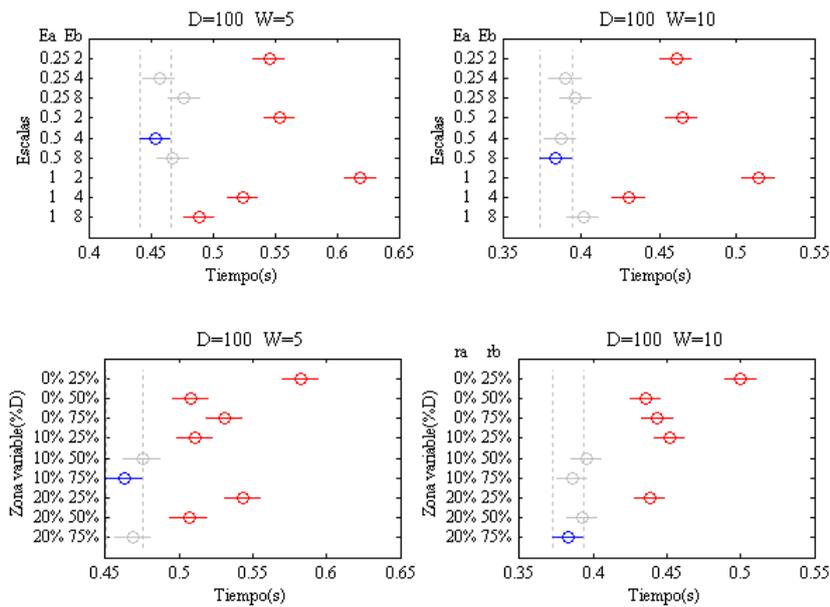


Figura 6.7. Tiempo medio de ejecución para las diferentes combinaciones de escalas, rangos de la zona variable y anchuras de objetivo, en el experimento a escala variable para $D = 100$ mm.

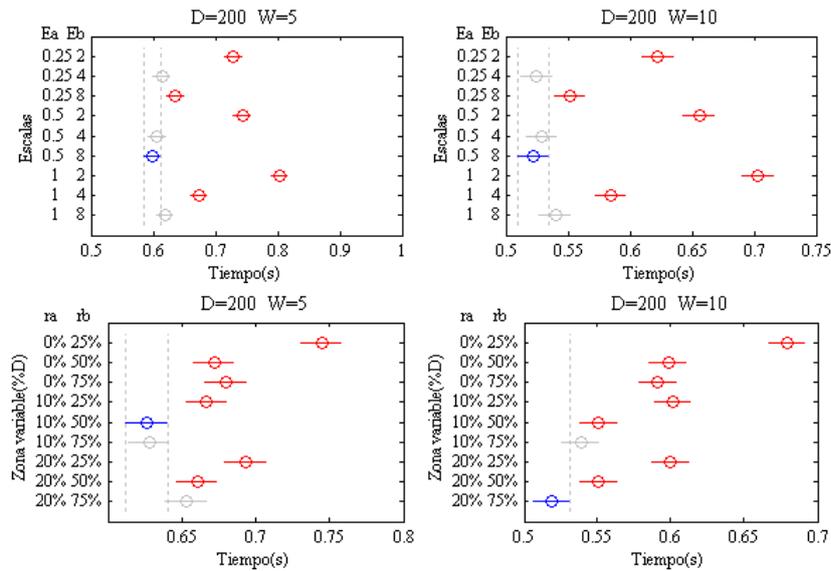


Figura 6.8. Tiempo medio de ejecución para las diferentes combinaciones de escalas, rangos de la zona variable y anchuras de objetivo, en el experimento a escala variable para $D = 200\text{mm}$.

La Figura 6.9 muestra las zonas sobre las cuales el rango de escala variable lanza los valores mínimos para cada una de las distancias y considerando indistintamente ambas amplitudes de $W = 5$ y 10mm .

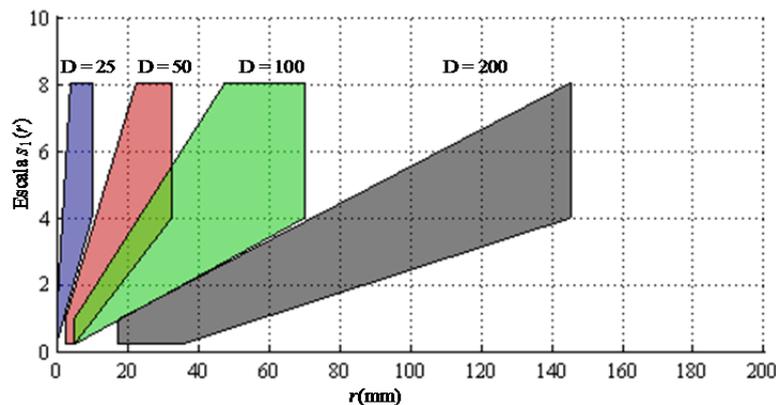


Figura 6.9. Las zonas sombreadas indican los rangos de zona variable para cada una de las distancias de objetivo D .

En la última parte del experimento se reproducen 7 combinaciones de $W-D$ que proporcionan combinaciones del índice de dificultad entre 2.04 y 7.65. Las 16 combinaciones de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$ se efectúan tomando para E_{a1} los valores 0.5 y 1, para E_{b1} 4 y 8, para r_{a1} 0 y 5, y para r_{b1} los valores 50 y 100. La Figura 6.10 muestra los resultados del test para el tiempo de ejecución, el desplazamiento motor, la velocidad máxima y el error tras el impulso inicial. El promedio del tiempo de ejecución en la prueba a escalas variables se reduce en un 24% con respecto al escalado constante ($F_{16,6647} = 4$, $p < 10^{-4}$). Existen combinaciones de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$ que ofrecen menor tiempo que otras ($F_{15,6256} = 4$, $p < 10^{-4}$), así como la velocidad máxima ($F_{15,6256} = 91$, $p < 10^{-4}$), el error tras el pulso ($F_{15,6256} = 4.9$, $p < 10^{-4}$) y el desplazamiento motor ($F_{15,6256} = 112$, $p < 10^{-4}$). En la Figura 6.11 se muestran los tiempos de ejecución para los diferentes ID y para las combinaciones de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$. En la tabla 6.2 se recoge marcando con una “x” que combinaciones de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$ ofrecen el menor tiempo de ejecución, de menor error tras el pulso, de menor velocidad máxima y menor desplazamiento motor, así como el menor tiempo para los distintos ID . Se observa que la combinación de $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1} = 1-8-5-50$ es la que resulta favorable en todos los aspectos. La función resultante según (5.85-87) quedaría como sigue:

6.1. Interacción persona-ordenador

$$s_1(r) = \begin{cases} 1 & r \leq 5 \\ \frac{1}{45}(10 + 7r) & 50 > r > 5 \\ 8 & r \geq 50 \end{cases} \quad (6.4)$$

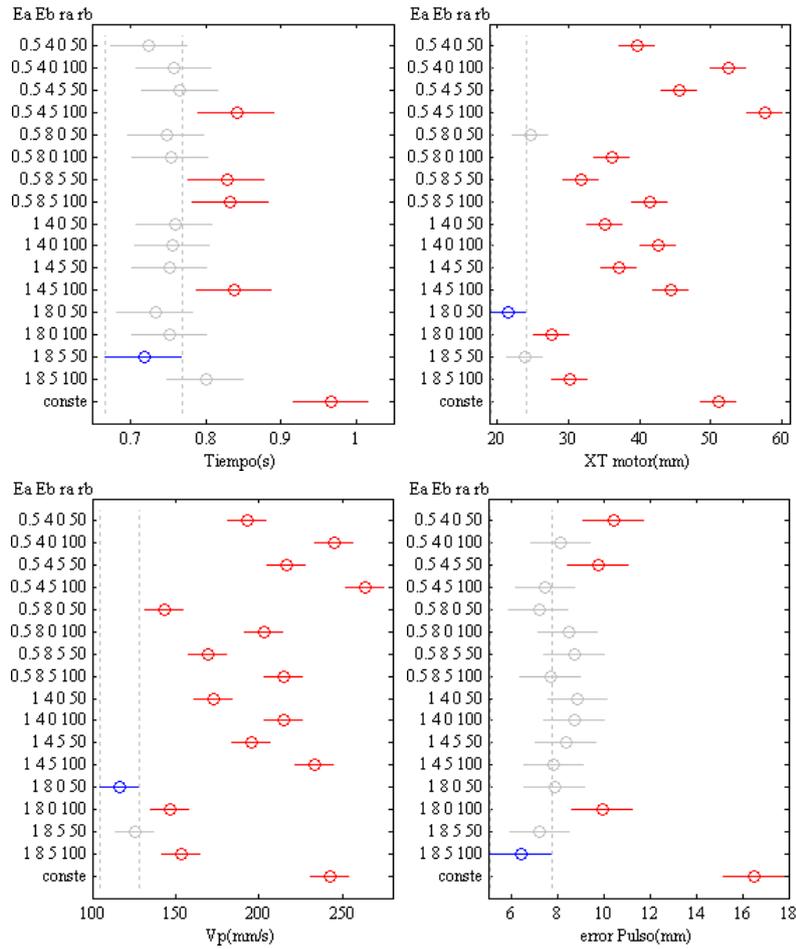


Figura 6.10. Resultados para todas las combinaciones de $W-D$ y $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1}$ para el tiempo promedio de ejecución el desplazamiento en el espacio motor, la velocidad máxima y el error tras el impulso inicial.

E_{a1}	E_{b1}	r_{a1}	r_{b1}	tiempo	error Pls	Vp	XT	ID=2.04	ID=2.85	ID=3.75	ID=4.70	ID=5.67	ID=6.65	ID=7.65
0.5	4	0	50	x				x			x	x	x	x
0.5	4	0	100	x	x			x		x	x	x	x	
0.5	4	5	50	x				x	x		x		x	x
0.5	4	5	100		x			x			x			
0.5	8	0	50	x	x		x		x	x		x	x	x
0.5	8	0	100	x	x			x			x		x	x
0.5	8	5	50		x			x						x
0.5	8	5	100		x								x	x
1	4	0	50	x	x			x	x	x			x	x
1	4	0	100	x	x			x			x		x	x
1	4	5	50	x	x			x			x	x	x	x
1	4	5	100		x			x						
1	8	0	50	x	x	x	x	x	x	x			x	x
1	8	0	100	x				x		x	x	x		x
1	8	5	50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1	8	5	100	x	x					x			x	

Tabla 6.2. La combinación de escala más favorable en términos de tiempo, velocidad, error y desplazamiento es $E_{a1}-E_{b1}-r_{a1}-r_{b1} = 1-8-5-50$.

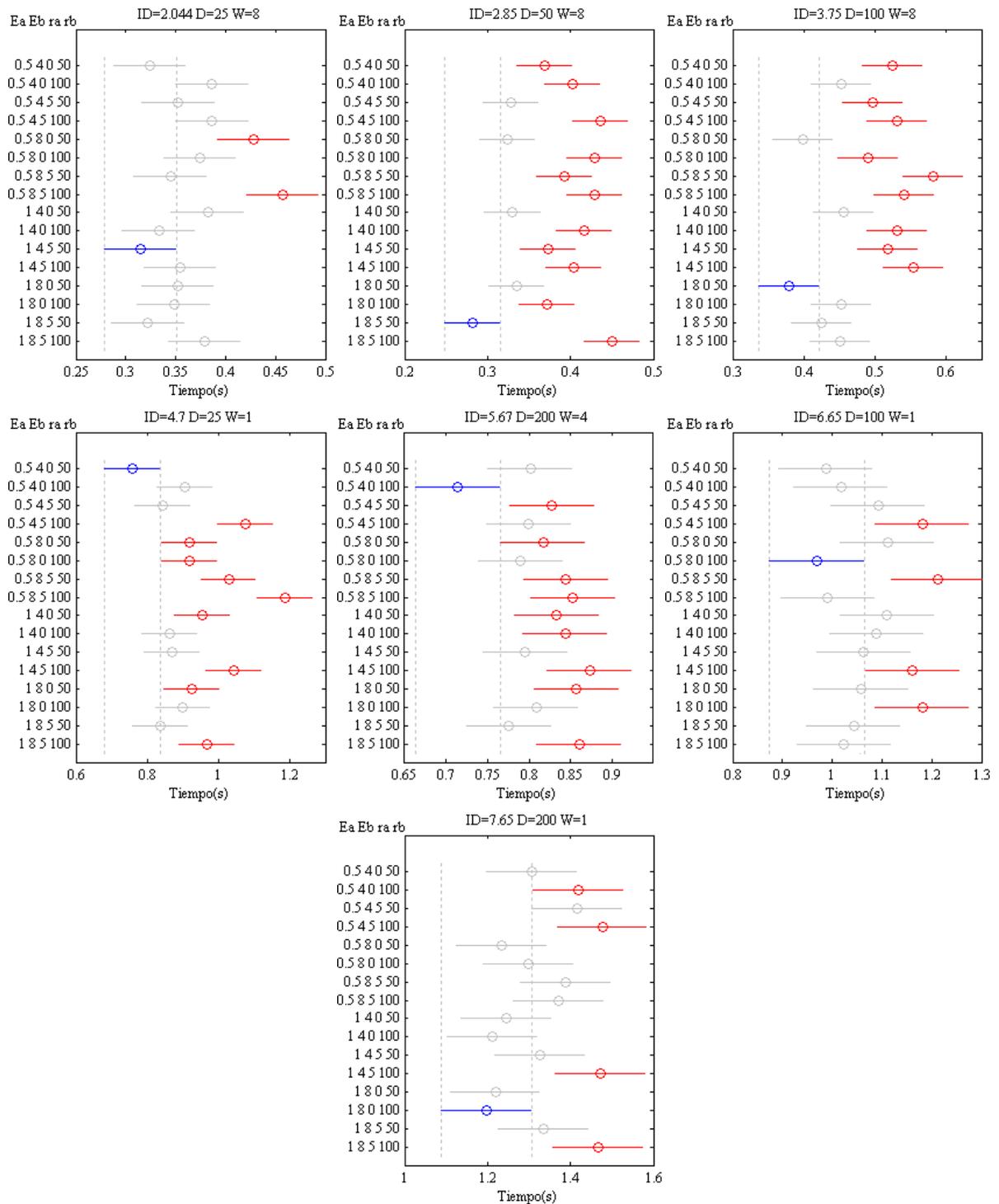


Figura 6.11. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas y rangos de zona variable, para las combinaciones de ID entre 2.04 y 7.65 obtenidos con las distancias D de 25, 50, 100 y 200mm, y anchos de objetivo W de 1, 2 y 4mm.

6.1. Interacción persona-ordenador

Se ha observado un buen ajuste entre el tiempo de ejecución y el índice de dificultad ID_M en el espacio motor descrito en (5.109). La tabla 6.3 muestra para cada sujeto el valor de las constantes a y b del modelo de Fitts teniendo en cuenta el índice de dificultad en el espacio motor ID_M comparándolo con los valores obtenidos en el ensayo a escala constante con el índice de dificultad original ID . Puede observarse un mejor ajuste al modelo propuesto con el índice de dificultad en el espacio motor ID_M a escala variable comparado con el índice de dificultad ID obtenido en el experimento a escalas constantes. Esto confirma la validez del modelo propuesto en (5.109).

Sujeto	Escala constante $s_1=2$ con ID			Escala variable (6.4) con ID_M		
	a	b	r^2	a	b	r^2
1	-0.012	0.193	0.78	-0.026	0.248	0.84
2	0.075	0.199	0.74	-0.072	0.297	0.86
3	-0.016	0.207	0.84	-0.054	0.176	0.92
4	0.094	0.189	0.81	0.042	0.212	0.84
5	-0.116	0.218	0.88	-0.006	0.162	0.90
6	0.075	0.199	0.74	-0.051	0.293	0.91
7	-0.039	0.215	0.79	0.001	0.233	0.82
8	-0.012	0.193	0.78	-0.056	0.281	0.90

Tabla 6.3. Parámetros de ajuste lineal del modelo de Fitts para cada sujeto en el experimento a escalas constantes con ID y a escalas variables con ID_M .

6.1.3. Escalado motor dinámico

Tal como se relató en el capítulo anterior la eficacia del escalado dinámico reside en reducir el tiempo de movimiento hasta el tiempo correspondiente al impulso inicial, en movimientos de ejecución rápida o movimientos balísticos. Esto beneficia principalmente a los desplazamientos más largos que es donde el error de posicionamiento respecto al objetivo tras el impulso inicial es mayor.

El modelo de escalado dinámico requiere de los valores de la velocidad máxima del impulso inicial así como de la variación del error del desplazamiento tras dicho impulso, ver Figura 6.11. En este apartado se analizan estos parámetros tanto para el escalado constante como para el escalado variable para la función de escala definida por (6.4).

La Figura 6.12 muestra los valores obtenidos en el experimento del apartado anterior para los valores de pico o velocidad máxima del impulso inicial y del error de posición tras dicho impulso. Los gráficos representados en las figuras se han obtenido tras el análisis de la varianza, mediante un test de comparación múltiple.

En primer lugar se observa que no existe diferencia significativa para los valores obtenidos del error ($F = 1.14$, $p = 0.2856$) y velocidad máxima ($F = 1.63$, $p = 0.2016$) respecto al ancho del objetivo W . Obviamente, la escala afecta fuertemente a la velocidad ($F = 1062$, $p < 10^{-4}$), a mayor escala, mayor y más rápido debe realizarse el movimiento para completarlo en tiempo mínimo. La escala también influye en cierta medida en el error ($F = 13.48$, $p < 10^{-4}$), aumentando éste con la escala. Tanto el error ($F = 287$, $p < 10^{-4}$), como la velocidad máxima ($F = 976$, $p < 10^{-4}$), crecen con el valor de la distancia a recorrer.

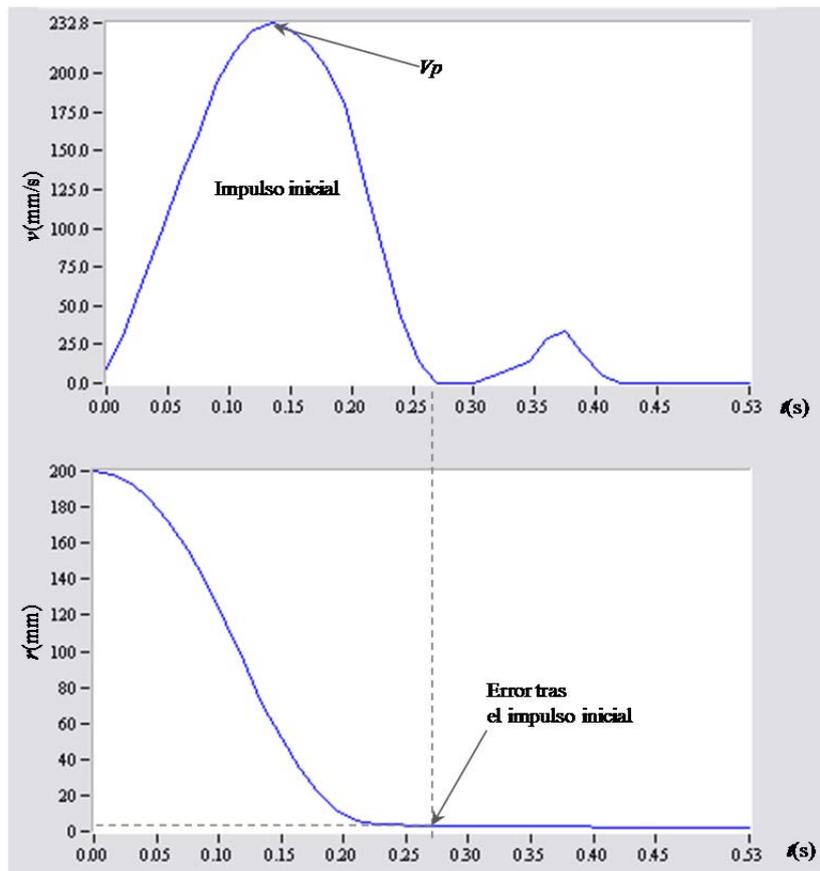


Figura 6.11. La figura superior muestra el perfil de velocidad en el espacio motor para un movimiento realizado sobre un objetivo de 200 mm. La figura inferior recoge la evolución de la distancia al objetivo con el tiempo. El error tras el impulso inicial es el valor de la distancia al objetivo cuando la velocidad se acerca a cero tras el impulso inicial.

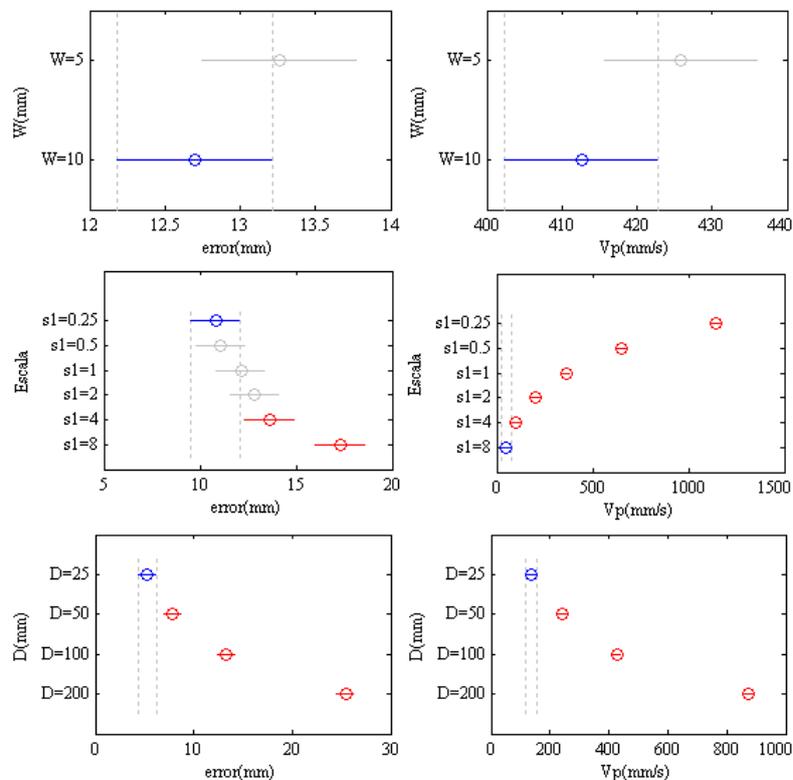


Figura 6.12. Valores promedio del error tras el impulso inicial y velocidad máxima V_p respecto a la escala motora s_1 , la distancia inicial a recorrer D y el ancho del objetivo W . Los valores son obtenidos del experimento a escalas constantes del apartado 6.1.2.1.

6.1. Interacción persona-ordenador

Los valores obtenidos en el experimento a escala variable con la función definida por (6.4) se recogen en la Figura 6.13. No existe diferencia significativa para los valores obtenidos de la velocidad máxima ($F_{1,440} = 0.24$, $p = 0.622$) respecto al ancho del objetivo W , pero esta diferencia si existe para el error ($F_{1,440} = 6.18$, $p = 0.0133$), debido a que este valor se ha reducido considerablemente con respecto al obtenido a escalas constantes. La presencia de la zona variable de escala descendente en torno al objetivo es lo que permite reducir la dispersión en torno al mismo. Tanto el error ($F_{3,440} = 3.45$, $p = 0.0167$), como la velocidad máxima ($F_{3,440} = 467.7$, $p < 10^{-4}$), crecen con el valor de la distancia a recorrer.

Tomando los valores promedio de las velocidades máximas (Figura 6.14), se observa una relación lineal con la distancia ($r^2 = 0.998$ para los datos a escala $s_1 = 2$), no obstante dada la dispersión de los valores de todos los sujetos la regresión de todos los datos se reduce ($r^2 = 0.631$). Los valores de V_p obtenidos mediante la función de escala variable definida por (6.4) son menores que los obtenidos a escala $s_1 = 2$ debido al mayor factor de escala lejos del objetivo, y existe menos diferencia entre los valores obtenidos para las diferentes distancias. Se observa menor dispersión en los valores a escala variable, con $r^2=0.75$ ($r^2 = 0.9887$ para los valores promedio).

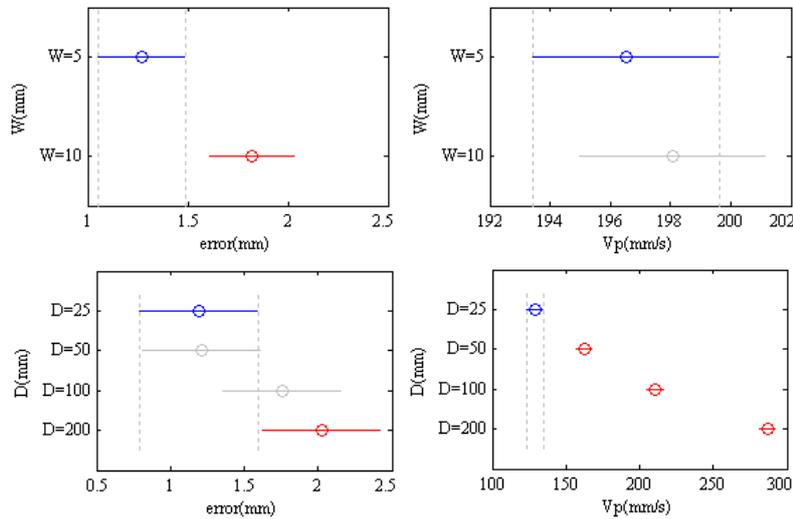


Figura 6.13. Valores promedio del error tras el impulso inicial y velocidad máxima V_p respecto a la distancia inicial a recorrer D y el ancho del objetivo W . Los valores son obtenidos del experimento con la función de escala variable motora definida por la ecuación (6.4) del apartado 6.1.2.2.

Si consideramos los valores de velocidad máxima a escala variable que se encuentra por encima del promedio con una probabilidad del 99%, estos ya no siguen una ley lineal pero se ajustan bien a una función logarítmica de la forma:

$$V_{p99\%} = 50.455 \ln(D) - 101 \quad (6.5)$$

Los valores de la desviación típica del impulso inicial σ_1 con respecto a la distancia D y la velocidad se muestran en la Figura 6.15. Estos valores corresponden a las desviaciones del error tras el impulso inicial. La dispersión crece con la distancia y los valores que se esperan a escala variable son significativamente menores. Puede observarse un comportamiento de la desviación lineal con la distancia a escala constante ($r^2 = 0.9719$), pero a escala variable el error crece más lentamente para valores altos de D , en este caso se obtiene un mejor ajuste a una función logarítmica ($r^2 = 0.9891$).

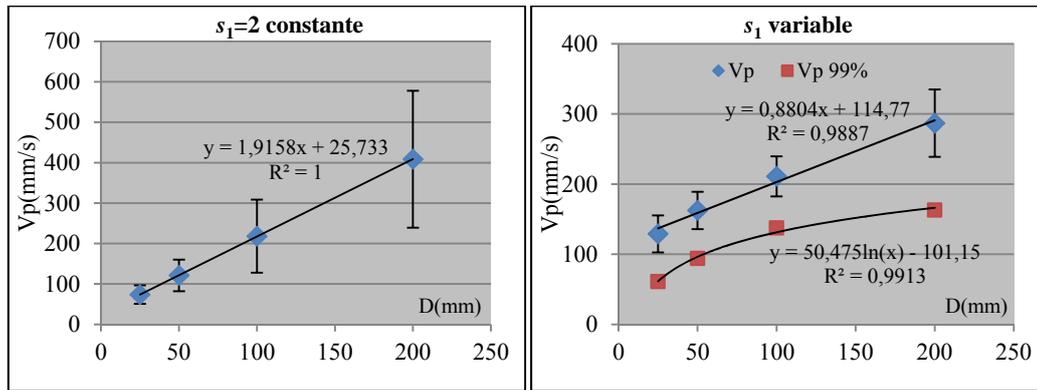


Figura 6.14. Valores promedio de la velocidad máxima V_p del impulso inicial en función de la distancia inicial D para escala constante $s_1=2$ y para escala variable.

En la Figura 6.16 se muestra el comportamiento de la desviación con la velocidad media del impulso inicial V_1 , y con la velocidad máxima V_p . La variación lineal de la desviación con respecto a V_1 confirma el modelo propuesto por [Meyer et al. 1988] descrito en el apartado 5.5.2. No obstante podemos observar un comportamiento lineal con la velocidad máxima V_p , lo que lo hace útil para el modelo de escalado dinámico ya que proporciona una estimación de la dispersión en el momento del valor máximo que es donde se inicia la corrección de la escala dinámica. Entonces puede obtenerse la desviación en función de la velocidad máxima para la función de escala variable con:

$$\sigma_1 = 0.0353V_p - 5.858 \quad (6.6)$$

El error de distancia con una probabilidad del 95% ε_{95} , es ajustado ($r^2 = 0.971$) mediante:

$$\varepsilon_{95} = 22.377 \ln(V_p) - 110.9 \quad (6.7)$$

El experimento se repite para los 8 sujetos utilizando en este caso el procedimiento de escalado dinámico. Los valores umbrales de velocidad empleados para la activación de la corrección de velocidad a través de la escala motora son los obtenidos mediante (6.5) y el error máximo de desplazamiento en torno al objeto para alcanzarlo con una probabilidad del 95% con (6.7). Los resultados comparativos de los tiempos de ejecución de las pruebas realizadas a escala constante, variable estática y dinámica se muestran en la Figura 6.17. El análisis de la varianza muestra diferencia significativa entre las medias de los tres procedimientos para las cuatro distancias ($D = 25 \Rightarrow F_{2,333} = 174, p < 10^{-4}$; $D = 50 \Rightarrow F_{2,333} = 335, p < 10^{-4}$; $D = 100 \Rightarrow F_{2,333} = 631, p < 10^{-4}$; $D = 200 \Rightarrow F_{2,333} = 617, p < 10^{-4}$).

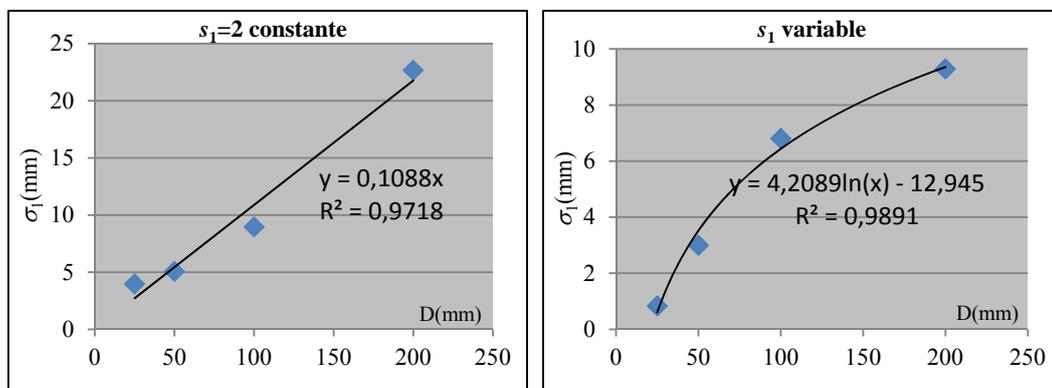


Figura 6.15. Valores de la desviación estándar tras el impulso inicial en función de la distancia inicial D para escala constante $s_1=2$ y para escala variable.

6.1. Interacción persona-ordenador

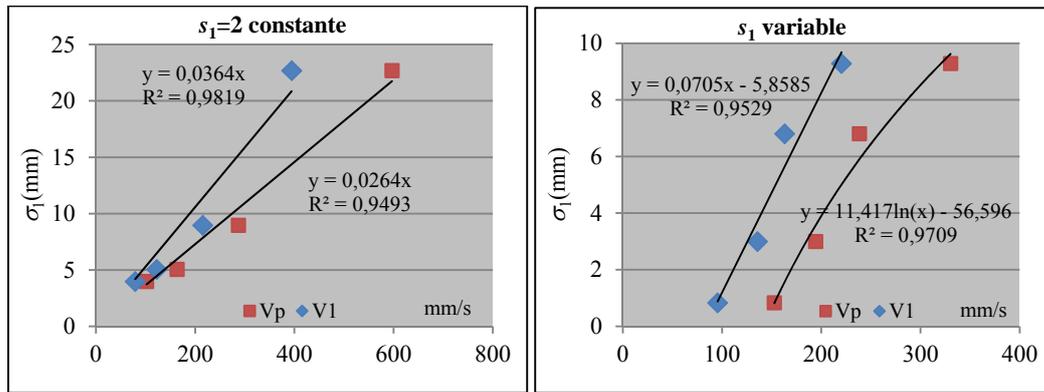


Figura 6.16. Valores de la desviación estándar tras el impulso inicial en función de la velocidad media del impulso inicial V_1 y de la velocidad máxima V_p , para escala constante $s_1 = 2$ y para escala variable.

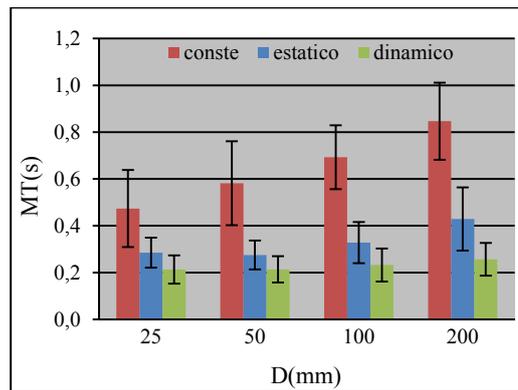


Figura 6.17. Comparación del tiempo de ejecución para las distintas distancias iniciales en los métodos de escala constante ($s_1 = 2$), escala variable estática (ecuación 6.4) y escala dinámica.

En este apartado se ha mostrado el efecto sobre los distintos parámetros que intervienen en la respuesta de los movimientos rápidos con las funciones de escala. El modelo de escalado dinámico puede beneficiarse de la escala variable que es la que proporciona una desviación menor del movimiento con respecto a la escala constante. Si bien se ha obtenido una relación de la desviación con la velocidad máxima (6.6), esta relación siempre puede caracterizarse para un usuario en particular.

6.1.4. Navegación entre menús

En el apartado 5.6.1 del capítulo anterior se describió como se relacionaba la velocidad de navegación entre objetos de una determinada amplitud y como se veía afectada la dispersión del movimiento. Esta dispersión dependía directamente de la velocidad (5.120). Las barras de menús y desplegables poseen una amplitud variable en función del texto que contienen, pero su amplitud mínima suele estar en torno a 5 mm, que suele ser el ancho de un botón o de una opción de menú (Figura 6.18).

Con el fin de cuantificar la dispersión del movimiento de navegación con la velocidad se lleva a cabo un experimento sobre 12 sujetos varones, 11 diestros y 1 zurdo de edades comprendidas entre 21 y 27 años procedentes del entorno universitario.

La prueba trata de seguir un camino cuadrado compuesto de dos cuadrados concéntricos separados una distancia de 5 mm. Un cuadrado con una cruz en su interior se emplea como guía de velocidad. El usuario debe seguir el cuadrado guía mediante el arrastre del cursor, tratando de que el cursor coincida con la cruz

del cuadrado guía (Figura 6.19). A lo largo de la trayectoria se va tomando el error de posición con la trayectoria cuadrada. El experimento se repite para velocidades comprendidas entre 10mm/s y 400mm/s. Para cada velocidad se toma la desviación estándar del error de posición.

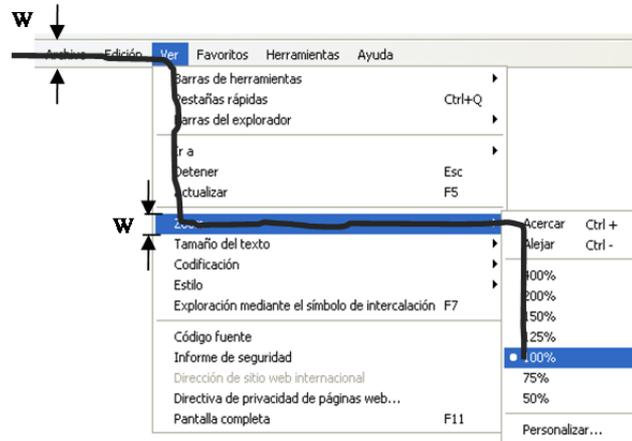


Figura 6.18. Ancho de paso W en la navegación sobre menús.

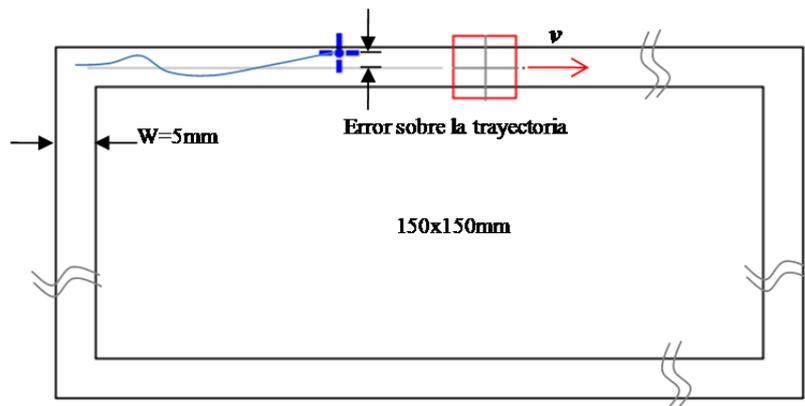


Figura 6.19. Experimento de navegación a velocidad constante.

Los resultados del promedio de la desviación estándar para todos los sujetos en función de la velocidad se muestran en la Figura 6.20. El comportamiento del error de navegación sigue una ley lineal con la velocidad ($r^2 = 0.939$) tal como preveía el modelo descrito en el apartado 5.6.1 (5.120):

$$\sigma_N = K_N v = 0.0059v \quad (6.8)$$

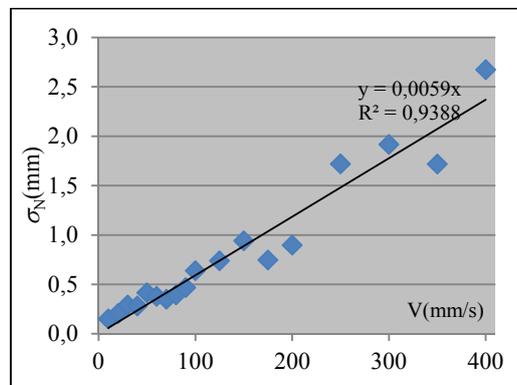


Figura 6.20. Promedio de la desviación estándar σ_N en función de la velocidad de navegación.

6.1. Interacción persona-ordenador

Los doce participantes fueron sometidos de nuevo a un ensayo de seguimiento del camino cuadrado ahora sin guía. Se trata completar el camino, sin tocar las paredes, en el mínimo tiempo posible. El experimento se realiza, repitiendo 5 veces, a escala constante y a escala variable utilizando el método de escalado dinámico para navegación descrito en el apartado 5.6.2, donde la velocidad umbral V_U descrita en (5.131) se obtiene con el valor de K_N determinado por (6.8). Cada repetición es válida si no se toca el contorno del circuito, en caso de tocar debe repetirse computando un fallo. El orden de las pruebas es mezclado entre los participantes para anular el efecto de aprendizaje sobre el resultado. Los resultados del ensayo dan un promedio del tiempo de ejecución a escala constante de 8.63s (SD = 2.23s) y a escala dinámica de 6.93s (SD = 1.15s), un *t-test* da diferencia significativa entre las dos medias ($p < 10^{-4}$, $ic = [1.40, 2.41]$). El promedio de fallos a escala constante es de 2 (SD = 1.5) ya que se detectaron un total de 24 fallos, y a escala dinámica 0.08 (SD = 0.29), tan solo se detectó un fallo en los 12 participantes.

La aplicación del escalado motor a la interfaz de usuario puede hacerse de forma sistemática con los algoritmos propuestos en esta sección. Los resultados del tiempo de ejecución para movimientos de selección y arrastre muestran una mejora al aplicar el escalado variable y dinámico con respecto a una escala constante. Los experimentos aquí presentados pueden reproducirse para un número de sujetos mayor, particularizarse por niveles de destreza o para un usuario concreto.

6.1.5. Escalado Visual

El escalado visual (asociado normalmente al zoom) es utilizado habitualmente en la interfaz de ordenador, en navegadores o procesadores de texto para visualizar textos o imágenes reducidas, en aplicaciones de CAD para trabajar sobre detalles de un dibujo, o en ciertas utilidades de accesibilidad como la “lupa” de Windows. Como se describió en el capítulo anterior, la aplicación de un escalado visual variable sobre objetivos de tamaño reducido puede tener utilidad al reducir las correcciones en torno al objetivo sin aumentar significativamente el desplazamiento total.

En este apartado se realizará un análisis experimental del impacto del factor de escala E_{a2} en torno al objetivo, así como el rango de la zona de escala variable determinado por r_{a2} y r_{b2} , para distintos valores de distancia inicial D y ancho de objetivo W en un experimento de Fitts. El test se realiza sobre 8 voluntarios diestros entre 20 y 26 años, 2 mujeres y 6 hombres, procedentes del entorno universitario sobre un monitor de 15” y un ratón G9 de Logitech. Dado que la aplicación del escalado visual es interesante sobre objetivos de anchura reducida se seleccionan los anchos W de 1, 2 y 4mm. Las distancias D serán 50, 100 y 200mm. Los factores de escalas E_{a2} serán 2, 4 y 8 (esto emula un zoom acumulativo $\times 2$). Los rangos se tomarán 0, 5, 10 y 20mm para r_{a2} , y 25 y 50mm para r_{b2} . La función de escalado utilizada es la que se mostró en (5.81).

No todas las combinaciones de E_{a2} - r_{a2} - r_{b2} son válidas, solo aquellas que cumplen las condiciones impuestas por (5.82-84), las válidas son 15 combinaciones, considerando una 16^a que corresponde a escala constante con $s_2=2$. Cada usuario repetirá cada combinación de E_{a2} - r_{a2} - r_{b2} 7 veces para cada combinación D - W lo que proporciona un total de $16 E_{a2}$ - r_{a2} - $r_{b2} \times 3 D \times 3 W \times 7 \text{ reps} \times 8 \text{ sujetos} = 8064$ muestras. Se analizará el efecto sobre el tiempo de ejecución, la velocidad máxima, el error de posición tras el impulso inicial y el desplazamiento en el espacio motor.

La Figura 6.21 muestra el resultado de los tiempos de ejecución después del análisis de ANOVA y el test de comparación múltiple para los distintos valores de distancias y anchos de objetivo. En el eje vertical se muestran las combinaciones de los valores de escala E_{a2} y rango de la zona variable r_{a2} y r_{b2} , siendo la combinación inferior el valor correspondiente a escala constante. En general se observa que el tiempo de ejecución se reduce significativamente al introducir el escalado visual, fundamentalmente para los anchos de objetivo W de 1 y 2mm, para el ancho de 4mm el escalado visual tiene menor efecto sobre el tiempo de ejecución. Puede notarse como las escalas E_{a2} grandes 4 y 8 tienen mayor efecto en la reducción del tiempo de movimiento para los targets pequeños de 1 y 2mm. Inversamente, para el target grande de 4mm, la escala $E_{a2} = 2$ tiene mejor comportamiento.

Considerando todas las combinaciones $D-W$ (Figura 6.22) y observando el efecto sobre el tiempo de ejecución de las distintas combinaciones $E_{a2}-r_{a2}-r_{b2}$ puede observarse diferencias en algunas combinaciones del rango $r_{a2}-r_{b2}$ y de las escalas E_{a2} ($F_{14,7545} = 17.16$, $p < 10^{-4}$). Es interesante observar el efecto sobre el desplazamiento en el espacio motor ($F_{14,7545} = 46.84$, $p < 10^{-4}$) el cual aumenta con el valor de la escala E_{a2} y ciertas combinaciones de los rangos $r_{a2}-r_{b2}$, un mayor desplazamiento en el espacio motor puede tener efecto sobre la ergonomía. De igual modo ciertas combinaciones muestran influencia ($F_{14,7545} = 9.5$, $p < 10^{-4}$) sobre la velocidad máxima de ejecución Vp , así como el error de posición tras el impulso inicial ($F_{14,7545} = 4.46$, $p < 10^{-4}$). En este último caso un menor error de posición del cursor respecto al objetivo tras el impulso inicial dará lugar a un menor número de correcciones en torno al objetivo.

El recorrido promedio máximo de la mano X_T , obtenido al inicio de la prueba, para el movimiento del ratón utilizando solo el movimiento de la mano, se situó en 117.5 mm (SD = 15.9 mm) para el movimiento lateral y 48.3 mm (SD = 7.1 mm). Puede observarse (Figura 6.23) que ciertas combinaciones de las escalas $E_{a2} = 4$ y $E_{a2} = 8$ lo sobrepasa para la distancia $D = 200$ mm, lo que indica movimiento del brazo.

Atendiendo al menor tiempo de ejecución, el menor valor de Vp , el menor error tras el pulso inicial y un valor X_T que permita solo movimiento lateral de la mano en todos los casos, resulta la combinación más favorable de $E_{a2}-r_{a2}-r_{b2}$: 8-0-25, ver Tabla 6.4. De (5.81) la función de escala corresponde a la siguiente:

$$s_2(r) = \begin{cases} 8 & r = 0 \\ 0.05377r^2 - 1.12r + 8 & 7.14 > r > 0 \\ 0.2308 + 17.9487\frac{1}{r} & 17.86 > r \geq 7.14 \\ 0.008r^2 - 0.463r - 38.14\frac{1}{r} + 9.077 & 25 > r \geq 17.86 \\ 1 & r \geq 25 \end{cases} \quad (6.9)$$

Nótese que aquí se ha tomado constante la escala motora en $s_1 = 2$, con lo que el desplazamiento motor obtenido actuando sobre la escala visual siempre estará por encima del obtenido a escala constante. Dado que el experimento solo contempla el movimiento horizontal, en el caso de desear mantener el rango de movimiento vertical dentro del alcance de los dedos la escala motora debería de ajustarse en torno a un valor de $s_1 = 5$.

6.1. Interacción persona-ordenador

E_{a2}	r_{a2}	r_{b2}	tiempo	error	Pls	Vp	XT	50@1	50@2	50@4	100@1	100@2	100@4	200@1	200@2	200@4
2	0	25				x	x						x		x	x
2	0	50				x	x			x			x		x	x
2	5	25				x	x			x			x			x
2	5	50		x			x			x			x		x	x
2	10	25		x			x			x			x			x
2	10	50		x			x			x			x	x	x	x
2	20	50		x			x			x			x			x
4	0	25	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x
4	0	50	x	x			x	x	x	x	X	x	x	x	x	x
4	5	25		x	x	x	x			x				x	x	x
4	5	50		x				x	x	x	X	x	x	x	x	x
4	10	50		x						x			x	x	x	x
8	0	25	x													
8	0	50	x	x	x		x	x	x	x	X		x	x	x	x
8	5	50		x				x	x	x	x	X		x	x	

Tabla 6.4. La combinación de escala más favorable en términos de tiempo, velocidad, error y desplazamiento total es $E_{a2-r_{a2}-r_{b2}} = 8-0-25$.

Se ha observado un buen ajuste entre el tiempo de ejecución y el índice de dificultad ID_V en el espacio visual descrito en (5.105). En la tabla 6.5 se recoge para cada sujeto el valor de las constantes a y b del modelo de Fitts teniendo en cuenta el índice de dificultad en el espacio visual ID_V así como los correspondientes al índice de dificultad contemplando espacios motor y visual (ID_{MV}), ya que el escalado visual modifica el desplazamiento motor. Se observa un ajuste similar en ambos casos a un modelo lineal del tiempo con el índice de dificultad, ligeramente mejor para el vaso de ID_{MV} , lo que resulta interesante ya que este último es más generalista al ser aplicable a cualquier combinación de las escalas motora o/y visual.

Sujeto	Escala variable (6.4) con ID_V			Escala variable (6.4) con ID_{MV}		
	a	b	r^2	a	b	r^2
1	0.176	0.127	0.86	0.104	0.163	0.87
2	0.252	0.110	0.88	0.204	0.138	0.90
3	0.107	0.157	0.84	0.047	0.194	0.84
4	0.212	0.140	0.83	0.140	0.170	0.84
5	0.220	0.153	0.85	0.128	0.196	0.87
6	0.270	0.196	0.91	0.165	0.247	0.92
7	0.344	0.089	0.82	0.310	0.110	0.82
8	0.331	0.184	0.87	0.257	0.223	0.93

Tabla 6.5. Parámetros de ajuste lineal del modelo de Fitts para cada sujeto en el experimento a escalas variables con ID_V e ID_{MV} .

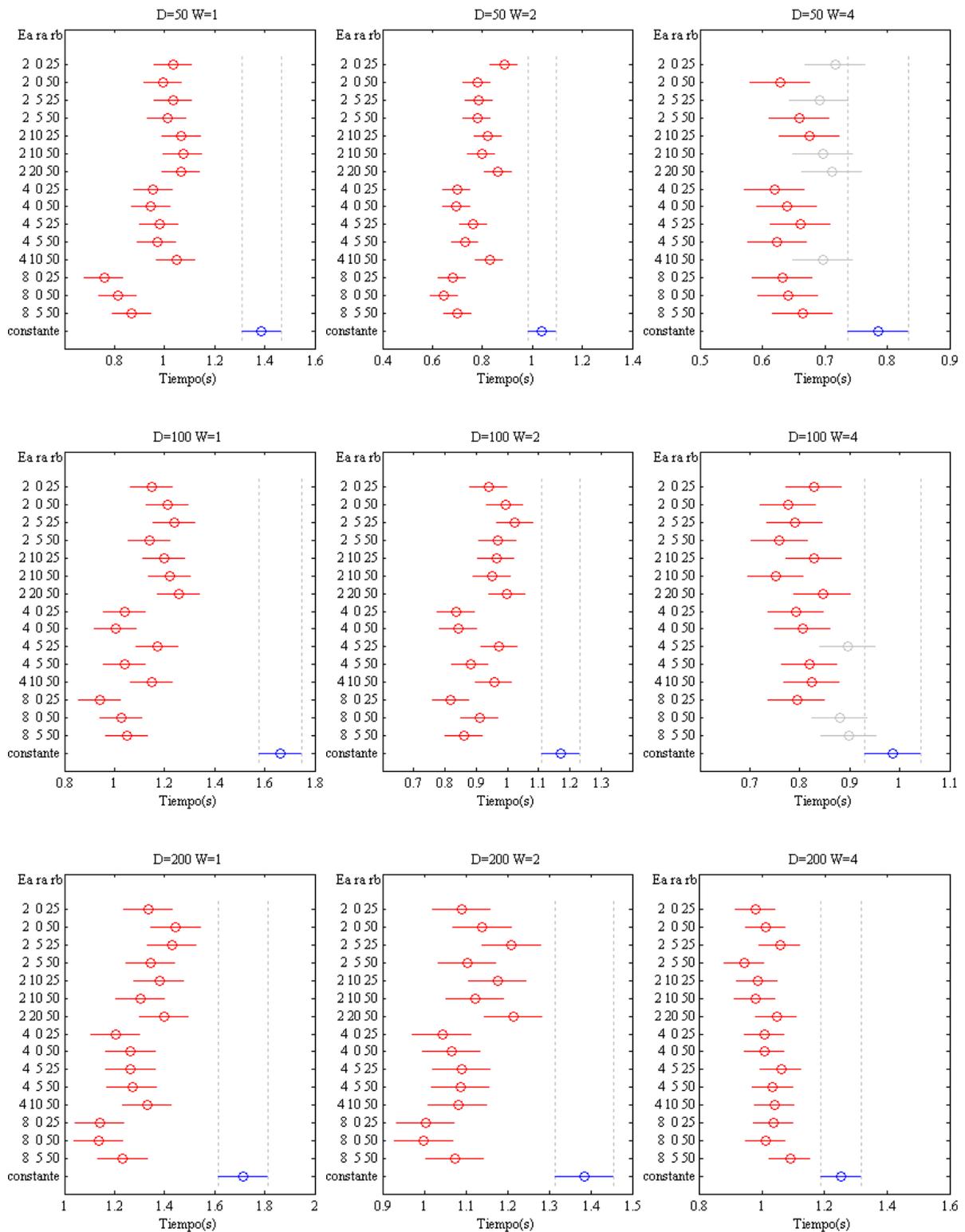


Figura 6.21. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas y rangos de zona variable, para las distancias D de 50,100 y 200mm, y anchos de objetivo W de 1, 2 y 4mm.

6.1. Interacción persona-ordenador

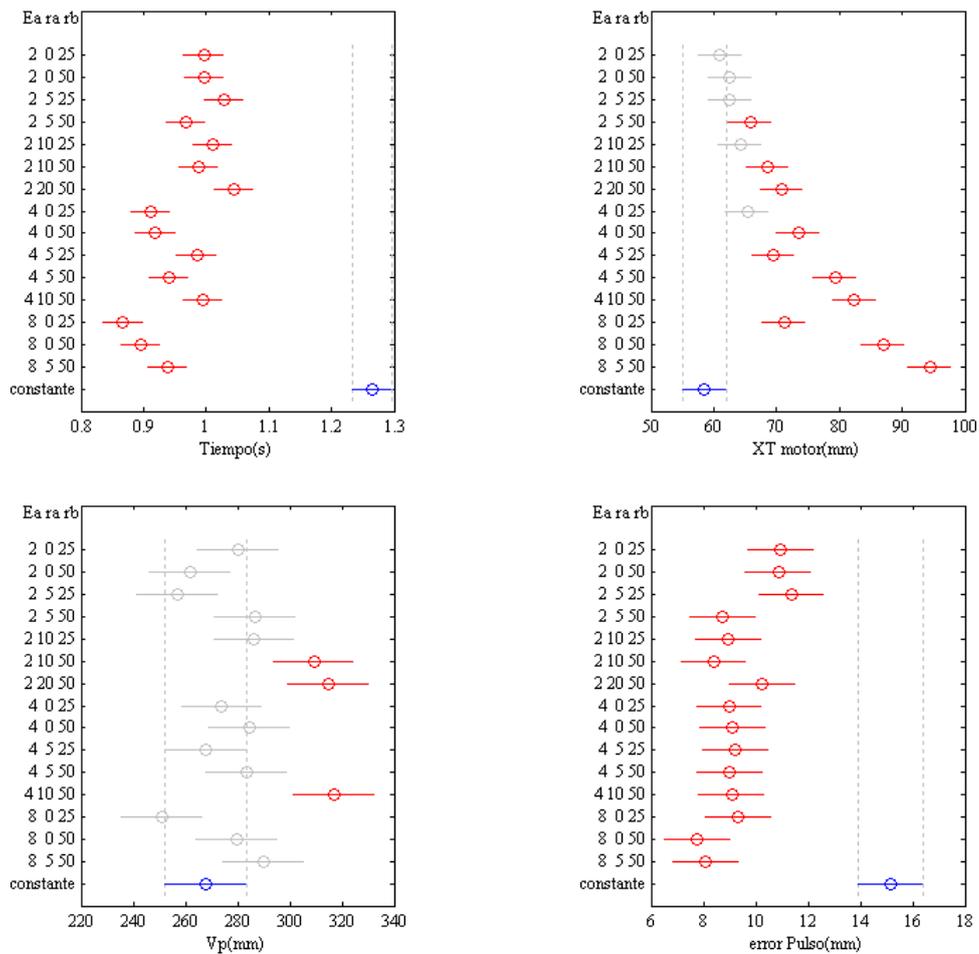


Figura 6.22. Resultados para todas las combinaciones de $W-D$ y $E_{a_2-r_{a_2}-r_{b_2}}$ para el tiempo promedio de ejecución el desplazamiento en el espacio motor, la velocidad máxima y el error tras el impulso inicial.

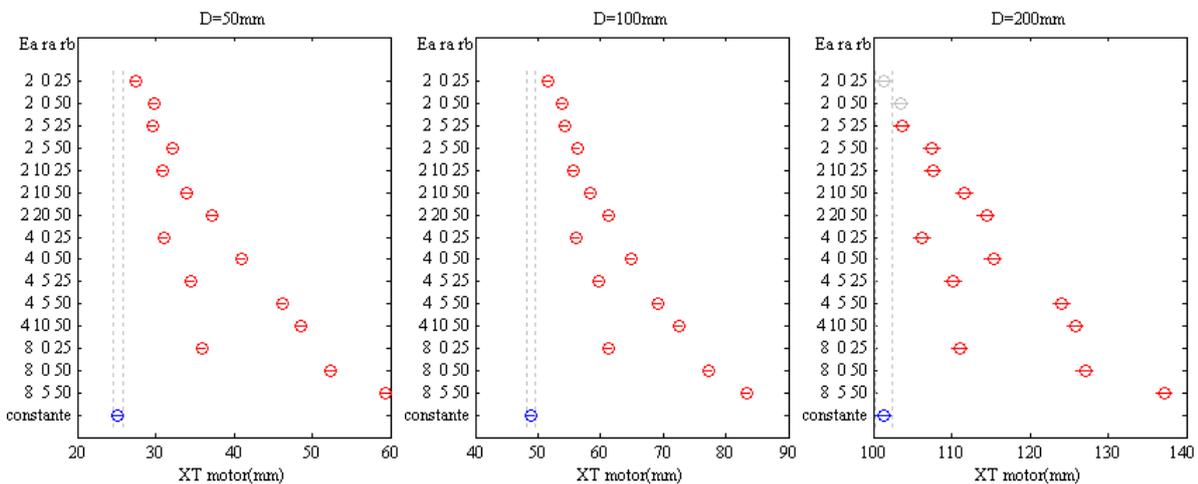


Figura 6.23. Resultados para todas las combinaciones de W y $E_{a_2-r_{a_2}-r_{b_2}}$ para el tiempo promedio de ejecución el desplazamiento en el espacio motor para cada distancia D .

6.1.6. Escalado combinado visual y motor

En el apartado anterior se observó cómo ciertas combinaciones de la escala E_{a2} en torno al objetivo y el rango de escalado variable r_{a2} - r_{b2} producen mejores resultados en cuanto al tiempo de ejecución y los desplazamientos en el espacio motor. En este apartado se pretende mostrar que pueden existir combinaciones de las escalas motora y visual que proporcionen mejor comportamiento trabajando de forma sinérgica que el obtenido de cada una de ellas por separado.

En el estudio experimental de las funciones de escala visual y motoras se ha observado que la zona variable debe situarse a una fracción del recorrido máximo, lo que permite reducir el tiempo de desplazamiento durante el impulso inicial. Por otro lado, debe preverse que el desplazamiento en el espacio motor quede confinado al rango de movimiento de la mano. Dado que en torno al objetivo interactúan ambas escalas, puede encontrarse una combinación de los factores E_{a1} y E_{a2} que proporcione un ancho de objetivo “aparente” que dé el mejor resultado en la ejecución de la tarea.

Para analizar el efecto combinado de ambas escalas se lleva a cabo un experimento sobre 10 sujetos, 9 hombres y 1 mujer, diestros de entre 21 y 30 años de edad, procedentes del entorno universitario. Sobre un monitor de 15” y un ratón G9 de Logitech se ejecuta el experimento de Fitts. Se ensayan las combinaciones de escalas visual y motora que se muestran en la Tabla 6.6. Para reducir el número de combinaciones el rango de la zona precisa en torno al objetivo se mantiene constante a $r_{a1} = r_{a2} = r_a = 0$ mm, así como el rango de la zona variable en $r_{b1} = r_{b2} = r_b = 50$ mm, valores que dieron buenos resultados en los experimentos anteriores. En la Tabla 6.6 puede verse como se combinan todos los parámetros. En la columna donde aparece X_T se indican los valores del desplazamiento resultante en el espacio motor para una distancia al objetivo de 200 mm. La combinación correspondiente a “ s_1 variable y s_2 constante” corresponde a la función obtenida mediante (6.4). La combinación correspondiente a “ s_1 constante y s_2 variable” corresponde a la función obtenida mediante (6.9).

Escala motora s_1				Escala visual s_2				X_T (mm) $D=200$ mm	Tipo de escalado
E_{a1}	E_{b1}	r_{a1} (mm)	r_{b1} (mm)	E_{a2}	E_{b2}	r_{a2} (mm)	r_{b2} (mm)		
2	2	X	X	1	1	X	X	100	s_1 y s_2 constantes
2	2	X	X	8	1	0	25	118	s_1 constante y s_2 variable
0.5	8	5	50	1	1	X	X	35	s_1 variable y s_2 constante
0.25	8	0	50	2	1	0	50	53	s_1 y s_2 variables
0.25	8	0	50	4	1	0	50	80	s_1 y s_2 variables
0.25	8	0	50	8	1	0	50	120	s_1 y s_2 variables
0.5	8	0	50	2	1	0	50	46	s_1 y s_2 variables
0.5	8	0	50	4	1	0	50	66	s_1 y s_2 variables
0.5	8	0	50	8	1	0	50	94	s_1 y s_2 variables
1	8	0	50	2	1	0	50	40	s_1 y s_2 variables
1	8	0	50	4	1	0	50	54	s_1 y s_2 variables
1	8	0	50	8	1	0	50	73	s_1 y s_2 variables

Tabla 6.6. Combinaciones de las escalas motora y visual con los respectivos valores de los rangos de la zona variable y el desplazamiento motor mínimo para la distancia $D=200$ mm.

Cada usuario repite cada una de las 12 combinaciones de E_{a1} - E_{b1} - E_{a2} 7 veces para cada combinación D - W (7 ID desde 2.04 hasta 7.65) lo que proporciona un total de $12 E_{a1}$ - E_{b1} - $E_{a2} \times 7 ID \times 7 \text{ reps} \times 10$ sujetos

6.1. Interacción persona-ordenador

= 5880 muestras. Se analiza el efecto sobre el tiempo de ejecución, la velocidad máxima, el desplazamiento en el espacio motor y el error de posición tras el impulso inicial.

El resultado del tiempo de ejecución, Vp , error tras el pulso y desplazamiento motor después del análisis de ANOVA y el test de comparación múltiple para todas las muestras se muestra en la Figura 6.24. Los tiempos promedio para los distintos valores de distancias y anchos de objetivo en la Figura 6.25. En el eje vertical se muestran las combinaciones de escalas mostrándose los valores que toman E_{a1} , E_{b1} y E_{a2} .

Del gráfico de los tiempos promedio de la Figura 6.24 se observa diferencia significativa entre las combinaciones de escala visual y motora variables con respecto a solo escala motora o visual variable ($F_{11,5868} = 256$, $p < 10^{-4}$), siendo menor en todos los casos y reduciéndose en torno a un 40%. Esto también ocurre con el error de posición tras el impulso inicial ($F_{11,5868} = 141$, $p < 10^{-4}$), así como el hecho que algunas combinaciones ofrecen un menor valor de la velocidad máxima de ejecución ($F_{11,5868} = 439$, $p < 10^{-4}$). Existe diferencia entre los tiempos de ejecución según las combinaciones de escalas motora y visual $E_{a1}-E_{b1}-E_{a2}$ ($F_{8,4401} = 5.8$, $p < 10^{-4}$).

La tabla 6.7 recoge las combinaciones más favorables marcadas con “x”. Puede observarse que la escala visual $E_{a2} = 2$ favorece a los tiempo obtenidos para los índices de dificultad bajos, y las escalas visuales $E_{a2} = 4$ y $E_{a2} = 8$ a los altos. No destaca significativamente una combinación en lo que al error tras el pulso se trata. Por otro lado hay un gran efecto sobre la velocidad máxima Vp , la cual decrece con el valor de E_{a1} y crece con el valor de E_{a2} , cinco combinaciones ofrecen valores de Vp por debajo del promedio (315 mm/s) que son las que se han señalado en la tabla. Existen tres combinaciones que ofrecen un desplazamiento motor para $D = 200$ mm por debajo del rango de movimiento de los dedos, y el resto está dentro del movimiento lateral de la mano (a excepción del escalado más extremo $E_{a1}-E_{b1}-E_{a2} = 0.25-8-8$), en la tabla se han marcado cinco combinaciones que en promedio se encuentran dentro del rango mano-dedos. Varias combinaciones ofrecen buen comportamiento atendiendo a los parámetros citados, y dependerá del valor de los ID que se consideren. Destaca sensiblemente la combinación $E_{a1}-E_{b1}-E_{a2} = 0.25-8-2$, cuyas ecuaciones se muestran en (6.10-11). Para esta combinación se muestra en la tabla 6.8 los parámetros del modelo de Fitts considerando el índice de dificultad que contempla el espacio motor y visual ID_{MV} .

Se ha observado que cuando el índice de dificultad ID_{MV} resultante se encuentra por debajo de 1 o 2 bits, según la combinación de escalas, los valores del tiempo de ejecución son similares y por lo tanto no siguen una ley lineal con ID_{MV} . Los valores de tiempo en los que ocurre este efecto se hayan por debajo de 300 ms. Este fenómeno puede justificarse con el tiempo que toman las fases de iniciación (30ms) y de verificación (157-227 ms) [Meyer et al. 1990]. En estas dos fases, además de los tiempos de reacción del usuario, intervienen los tiempos de accionamiento (clic y desclik) del usuario sobre el botón del ratón, los cuales se sincronizan con el inicio y el final del movimiento pero con un desfase de adelanto o de atraso del mismo. Este desfase del clic/desclik con el inicio/final del movimiento es de naturaleza aleatoria e influye fuertemente en tareas de índice de dificultad bajo y de ejecución rápida.

$$s_1(r) = \begin{cases} 0.25 & r \leq r_a \\ 0.155r + 0.25 & r_b > r > r_a \\ 8 & r \geq r_b \end{cases} \quad (6.10)$$

$$s_2(r) = \begin{cases} 2 & r = 0 \\ 0.0019r^2 - 0.08r + 2 & 7.14 > r > 0 \\ 1.5 - 8.333\frac{1}{r} & 17.86 > r \geq 7.14 \\ 0.0013r^2 - 0.16r - 66.67\frac{1}{r} + 7 & 25 > r \geq 17.86 \\ 1 & r \geq 25 \end{cases} \quad (6.11)$$

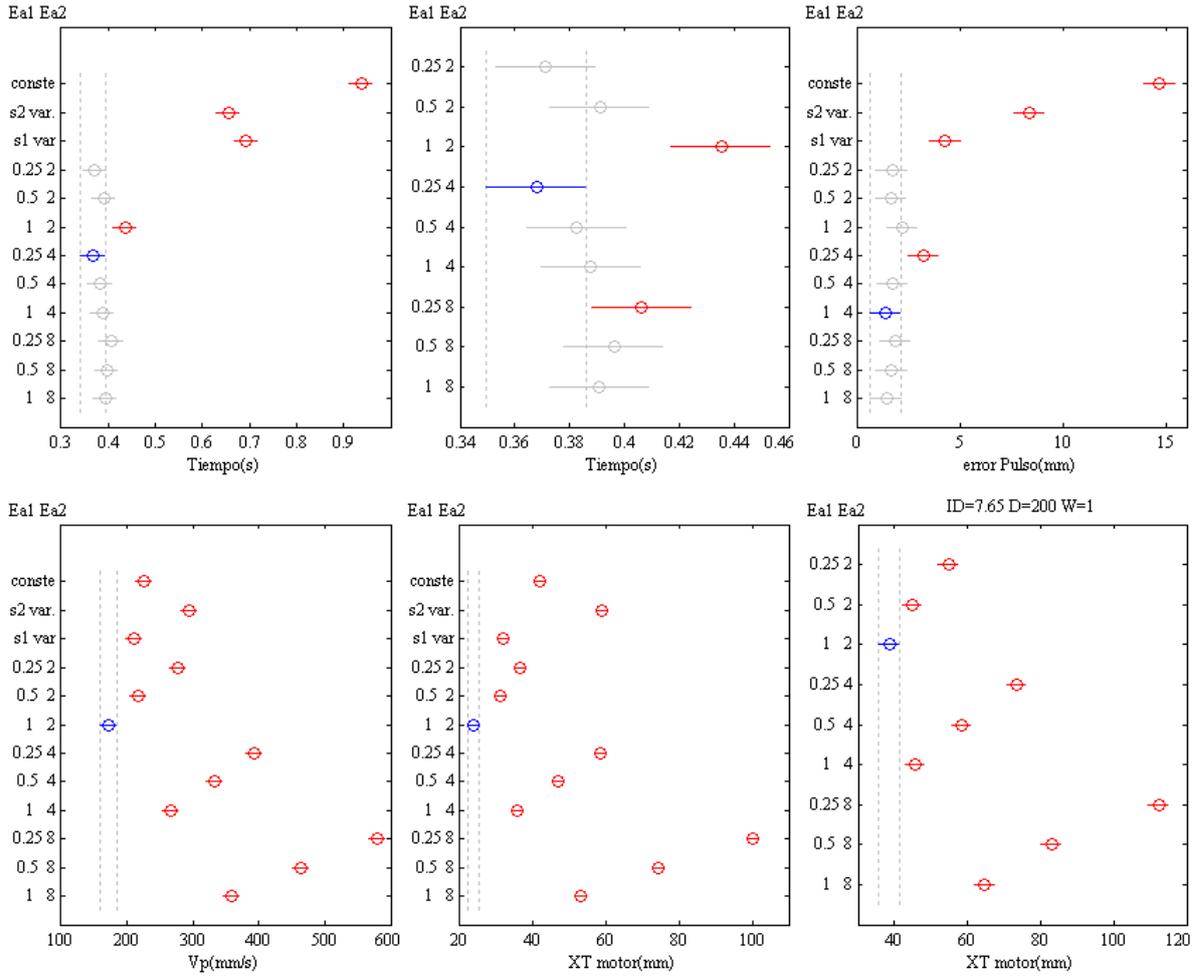


Figura 6.24. Resultados para todas las combinaciones de $W-D$ y $E_{a2-r_{a2}-r_{b2}}$ para el tiempo promedio de ejecución, el error tras el impulso inicial, la velocidad máxima y desplazamiento en el espacio motor.

6.1. Interacción persona-ordenador

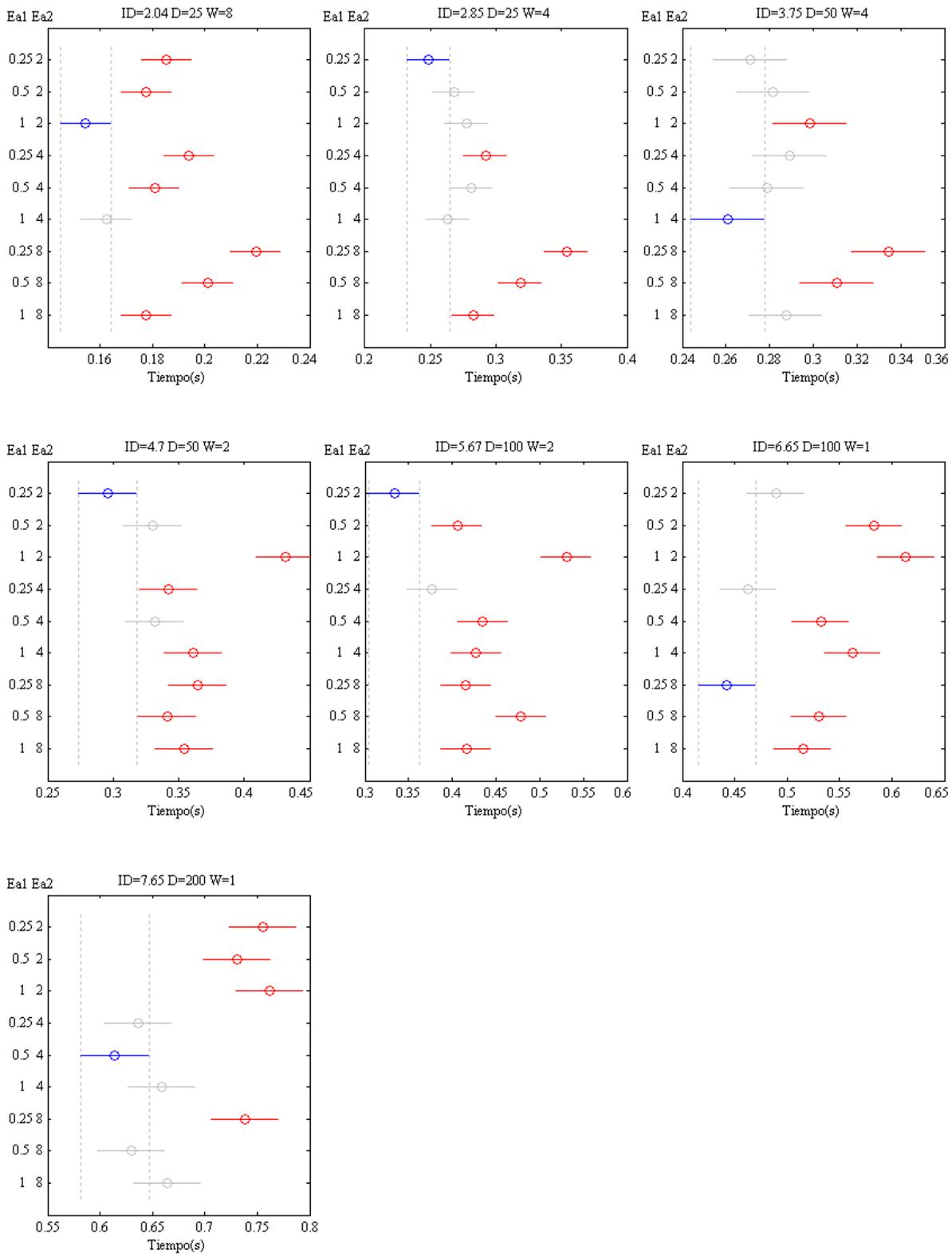


Figura 6.25. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para las distancias D de 50, 100 y 200mm, y anchos de objetivo W de 1, 2 y 4mm.

E_{a1}	E_{a2}	tiempo	error Pls	Vp	XT	ID=2.04	ID=2.85	ID=3.75	ID=4.70	ID=5.67	ID=6.65	ID=7.65
0,25	2	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
0,5	2	x	x	x	x		x	x	x			
1	2		x	x	x	x	x					
0,25	4	x						x		x	x	x
0,5	4	x	x	x	x		x	x	x			x
1	4	x	x	x	x	x	x	x				x
0,25	8		x								x	
0,5	8	x	x									x
1	8	x	x					x				x

Tabla 6.7. Combinaciones de escala motora y visual que ofrecen los parámetros más favorables en términos de tiempo, velocidad, error de posición y desplazamiento total.

Sujeto	a	b	r^2
1	0.058	0.145	0.88
2	-0.04	0.203	0.98
3	0.03	0.194	0.90
4	0.027	0.179	0.90
5	0.085	0.176	0.91
6	0.11	0.211	0.95
7	0.079	0.182	0.88
8	-0.05	0.25	0.75
9	0.04	0.201	0.84
10	0.093	0.232	0.92

Tabla 6.8. Parámetros de ajuste lineal del modelo de Fitts para cada sujeto en el experimento a escalas variables con ID_{MV} .

6.2. Teleoperación

La aplicación de las funciones de escala para la interacción persona-ordenador es un caso particular de la metodología de escalado. Actuando únicamente sobre la escala motora puede reducirse el tiempo de ejecución en la selección de objetos, como iconos o botones, y en la navegación sobre caminos estrechos, como los formados por menús desplegables. En un caso general de interacción persona-máquina estará presente cualquier combinación de formas y tamaños de los objetos de interés. En caso de manipulación precisa se requerirá actuar sobre el escalado visual, así como cuando haya una disposición de los objetos de interés muy dispersa, o la proporción del tamaño relativo entre ellos sea grande. El caso general deberá contemplar la actuación combinada del escalado motor, el escalado visual y el *panning*.

6.2.1. Relación entre espacios

La implementación de la metodología de escalado debe contemplar como adecuar los espacios motor, visual y de trabajo. La disposición de los ejes de coordenadas y rangos de funcionamiento de cada uno de los espacios que intervienen deben relacionarse mediante transformaciones de coordenadas (Figura 6.20).

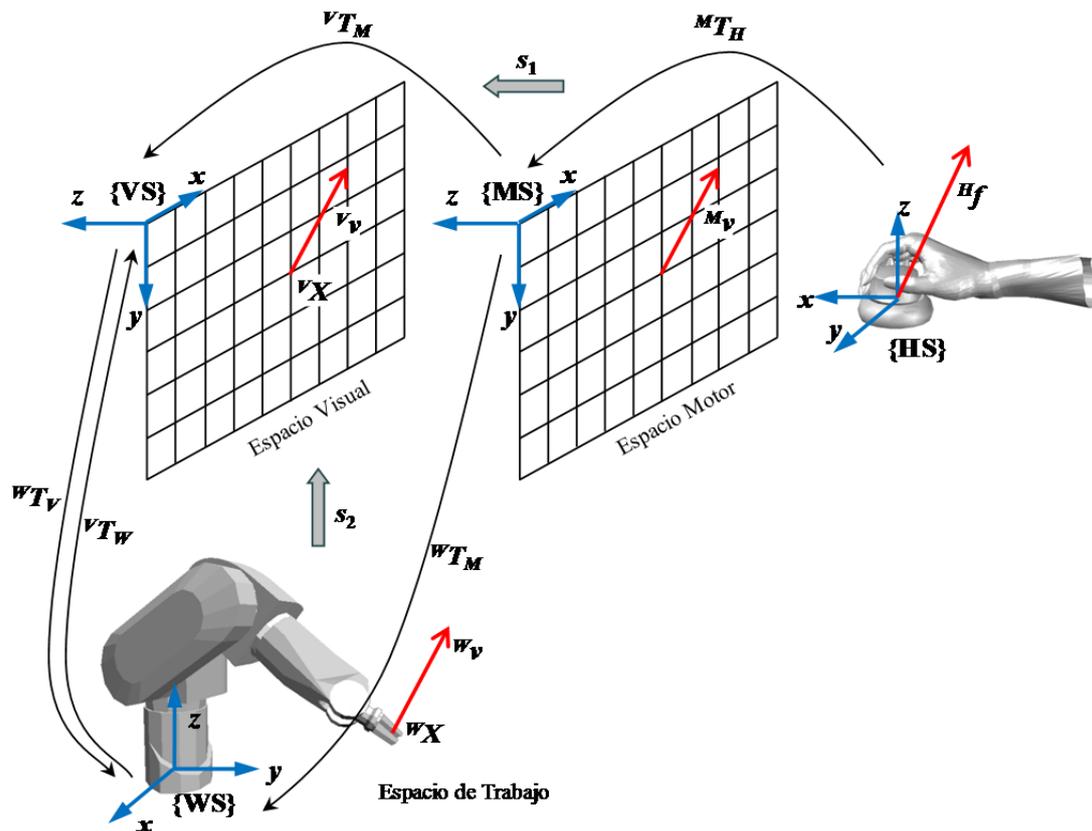


Figura 6.20. Relación entre los distintos sistemas de referencia que intervienen, de los espacios motor, visual y de trabajo, así como las transformaciones entre los sistemas de referencia de cada uno de los espacios.

Se observan cuatro sistemas de referencia para conformar los tres espacios (motor {MS}, visual {VS} y de trabajo {WS}). El cuarto sistema que se ha añadido aquí, {HS}, es el que correspondería al dispositivo de interfaz de entrada y es el encargado de captar los movimientos o esfuerzos de la mano. Estos movimientos o esfuerzos deben adecuarse a movimientos cartesianos. Dependiendo de la naturaleza del dispositivo de interfaz de entrada deberá realizarse la conversión oportuna, ya que dicho dispositivo puede captar órdenes de fuerza, propio de los joysticks estáticos; órdenes de ángulo, propio de ciertos joysticks de palanca o mandos de giro; u órdenes de desplazamiento.

La transformación homogénea representada por M_{TH} transforma el movimiento o esfuerzo de la mano medido con el dispositivo de interfaz de entrada en movimiento en el espacio motor, o espacio motor proyectado. Dicha transformación debe contener el factor de escala adecuado que convierta el esfuerzo de la mano H_f en un vector de desplazamiento M_v , así como una transformación de orientación para adecuar las direcciones de los ejes con los del espacio visual. De esta manera una acción de movimiento de la mano hacia la derecha provocará un movimiento en la dirección del eje x , hacia abajo del eje y , y hacia delante, del eje z .

La transformación homogénea representada por V_{TM} es la que corresponde al escalado motor y fundamentalmente contiene la transformación de escala s_1 :

$${}^V T_M = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

Las transformaciones entre el espacio visual y de trabajo y viceversa son ${}^W T_V$ y ${}^V T_W$ respectivamente. Dado que el espacio visual puede contener el escalado visual s_2 y el *panning*, se definen las transformaciones ${}^W T_{V1}$ y ${}^{V1} T_W$ que relacionan espacio de trabajo con el espacio visual a escala visual unitaria y *panning* nulo. Estas transformaciones son las que se obtienen mediante la calibración del sistema, en donde los puntos del espacio visual se ponen en correspondencia con los puntos del espacio de trabajo obtenidos de las coordenadas del robot.

La matriz que relaciona el espacio visual a escala unitaria con el espacio visual escalado será ${}^V T_{V1}$ la cual contiene el escalado visual y el *panning* y tendrá la forma:

$${}^V T_{V1} = \begin{pmatrix} s_2 & 0 & 0 & x_C(1-s_2) + x_P \\ 0 & s_2 & 0 & y_C(1-s_2) + y_P \\ 0 & 0 & s_2 & z_C(1-s_2) + z_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.10)$$

donde $\mathbf{X}_C = (x_C, y_C, z_C)$ es el centro del escalado visual y $\mathbf{p} = (x_P, y_P, z_P)$ es el vector de *panning*. Entonces, las relaciones siguientes serán válidas:

$${}^V T_W = {}^V T_{V1} {}^{V1} T_W \quad (6.11)$$

$${}^W T_V = ({}^V T_W)^{-1} \quad (6.12)$$

$${}^W T_M = {}^W T_V {}^V T_M \quad (6.13)$$

El algoritmo que resolvería el proceso de determinación del movimiento en el espacio de trabajo dado un movimiento en el espacio de motor sería el siguiente:

1. Para cada periodo de muestreo T_m se determinan las acciones de movimiento del dispositivo de interfaz de entrada ${}^H f$.
2. Se obtiene el vector de velocidad en el espacio motor proyectado:

$${}^M \mathbf{v} = {}^M T_H {}^H \mathbf{v} \quad (6.14)$$

3. Dadas la posición ${}^V X_n$ y velocidad ${}^V \mathbf{v}_n$ actuales en el espacio visual y la disposición de los objetos de interés se obtienen las funciones de escalado motor y visual, así como el vector de *panning*.
4. Se obtiene el vector de velocidad en el espacio visual:

$${}^V \mathbf{v} = {}^V T_M {}^M \mathbf{v} \quad (6.15)$$

5. Se obtiene la nueva posición en el espacio visual:

$${}^V X_{n+1} = {}^V X_n + {}^V \mathbf{v} \cdot T_m \quad (6.16)$$

6.2. Teleoperación

6. Se obtiene la nueva posición en el espacio de trabajo:

$${}^W X_{n+1} = {}^W T_V {}^V X_{n+1} \quad (6.17)$$

6.2.2. Disposición de los objetos de interés

En la interacción persona ordenador, en aplicaciones clásicas de Windows u otros sistemas operativos, la disposición de los objetos de interés, botones, iconos o menús, es conocida en todo momento. En aplicaciones de teleoperación, donde los objetos de interés son captados del espacio de trabajo mediante cámaras y proyectados en el espacio visual, debe de determinarse cuáles son dichos objetos de interés. Esta identificación puede hacerse manualmente por el operador, marcándolos u ordenándolos sobre el espacio visual; o puede hacerse de forma automática mediante algún método de visión por computador.

Una vez identificados los objetos de interés, el cálculo de las funciones de escala está basado en la posición relativa del cursor en el espacio visual con respecto a dichos objetos, así como la velocidad, con la cual se determinará la dirección de movimiento con respecto a los objetos que dará lugar a la distancia de colisión (Figura 6.21). Así, en cada instante, el cursor se encuentra a una distancia mínima de los objetos r y a una distancia de colisión r_D .

Tal como se relató en el apartado 5.5.3, donde se hablaba de la activación de los objetos relevantes en presencia de múltiples objetos, puede contemplarse una tercera distancia, la distancia de activación r_A . La distancia de activación r_A es la distancia de los objetos a la trayectoria que viene determinada por la dirección de movimiento del cursor. Así un objeto estará activo cuando la distancia de activación sea inferior a un determinado error. La distancia de colisión r_D se determina hacia el objeto que se encuentra activo, mientras que la distancia mínima r se determina hacia el objeto más cercano, Figura 6.21d.

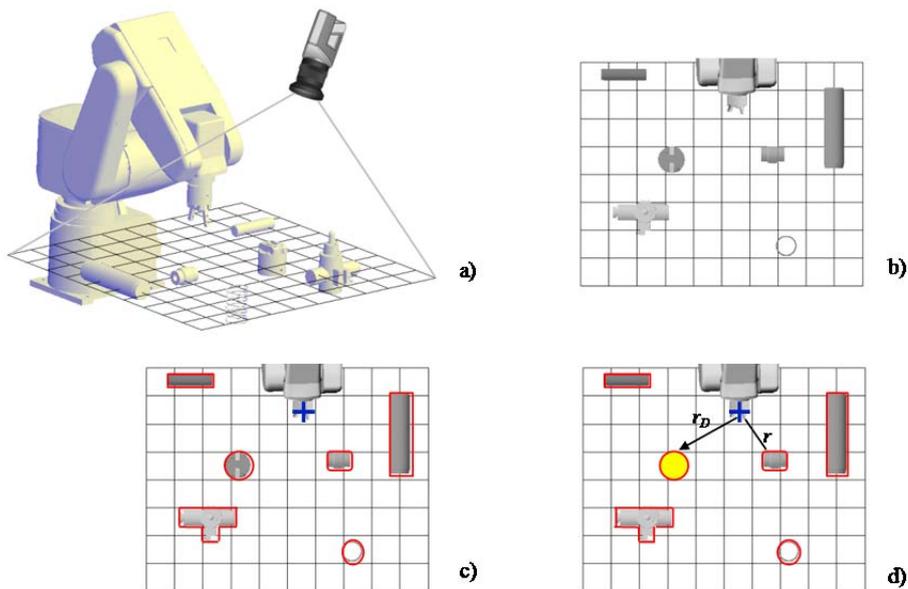


Figura 6.21. Disposición de los objetos de interés a) Distribución en el espacio de trabajo b) Distribución en el espacio visual c) Una vez calibrado el sistema los objetos de interés son identificados en el espacio visual, así como la posición del cursor correspondiente a la posición del ET del robot d) La posición del cursor y su velocidad determinan que objeto estará activo, cuál será la distancia de colisión r_D y la distancia mínima r .

La herramienta del ET que interactúa con los objetos de interés tendrá una forma y tamaño distinta de cero, con lo que generalmente no se computará la distancia de un punto a los objetos si no la distancia entre la forma que corresponde al ET y el resto de los objetos. Así la distancia r en el espacio visual es el mínimo de las distancias entre el objeto cursor K_{ET} que representa el ET y el resto de los objetos de interés K_i , ver Anexo C:

$$r_i = \min\{|X - Y| : X \in K_{ET}, Y \in K_i\} \quad (6.18)$$

$$r = \min(r_i) \quad (6.19)$$

La distancia de colisión es la correspondiente al objeto activo más cercano. Si K_A es el objeto activo más cercano a K_{ET} y ${}^V v$ es el vector de dirección del cursor-ET, se tiene:

$$r_D = \min\{|X - Y| : X \in K_{ET}, Y \in K_A; \forall \overline{X - Y} \in {}^V v\} \quad (6.20)$$

La distancia de activación de un objeto K_i es la distancia mínima de ese objeto a la trayectoria de K_{ET} :

$$r_A = \min\{|h_{ET} - Y| : h_{ET} \in {}^V v, Y \in K_i; h_{ET} : K_{ET} \subset \text{recta } h_{ET}\} \quad (6.21)$$

6.2.3. Consideraciones en la aplicación del escalado y el *panning*

La aplicación combinada de las funciones de escala motora y visual es fuertemente dependiente de la aplicación o tarea que se realiza. La precisión requerida, el número de objetos de interés, el tamaño relativo entre ellos y la extensión del espacio de trabajo son algunas de las variables que intervendrán para determinar el comportamiento de las funciones de escala y el *panning*.

En la sección 6.1.3 se mostró la eficiencia del escalado motor dinámico en una tarea de Fitts. En general, en una aplicación teleoperada, el escalado dinámico para ser aplicable se deberá tener en cuenta ciertas restricciones. Esto es debido a que durante la corrección de la trayectoria del impulso inicial la velocidad del cursor puede variar fuertemente lo que es un efecto no deseado para el movimiento del ET, ya que sufrirá sobreaceleraciones. Para evitar esto se deberá filtrar la variación del escalado para mantener las aceleraciones del cursor-ET dentro de valores aceptables. Esto es especialmente importante cuando se introduce el escalado visual y el *panning*, ya que el flujo de información visual aumenta con las variaciones de escala, y para ello debe limitarse tal como se mostró en el apartado 5.6.4.

La teleoperación se caracteriza por presentar retardo (comunicación, transmisión y tratamiento de la imagen, respuesta del robot, etc.), con lo que para tareas teleoperadas precisas será más adecuado el funcionamiento en modo navegación que en modo balístico. Así, la aplicación del escalado dinámico de navegación puede ser satisfactorio para la realización de tareas teleoperadas precisas, y así reducir el número de fallos, el tiempo de actuación y la carga de trabajo del operador. Si los requisitos de precisión se satisfacen a escala visual constante con el espacio de trabajo visible al completo sobre el espacio visual, no serán necesarios el escalado visual y el *panning*, en caso contrario se introducirá el escalado visual y por lo tanto el *panning*.

Los parámetros obtenidos en la anterior sección 6.1 también son aplicables en la interfaz de teleoperación, pero dada la mayor variabilidad y complejidad de los sistemas de teleoperación se requieren de ensayos y evaluaciones adicionales las cuales serán tratadas en el próximo capítulo.

Parte III Evaluación

7. Evaluación

En este capítulo se describe el proceso de evaluación de la metodología de escalado de forma experimental sobre distintos grupos de usuarios en diversas pruebas. El objetivo es evaluar de forma comparativa los distintos métodos de escalado y poder determinar la eficiencia y eficacia de cada uno de ellos en distintas condiciones. Adicionalmente al análisis de los tiempos de ejecución, velocidad de transmisión (TP) y errores de ejecución, se realizan test de tipo subjetivo para evaluar la percepción de los usuarios ante los distintos métodos así como la aceptación de cada uno de ellos. Una primera sección tratará los experimentos realizados exclusivamente con la interfaz persona-ordenador y posteriormente se trasladan algunas de las técnicas de escalado sobre tareas de teleoperación.

7.1. Interacción persona-ordenador

En esta sección la experimentación se lleva a cabo en la evaluación de la metodología de ayuda al operador en un entorno común como es en la interacción con un ordenador personal, en el uso exclusivo de un dispositivo de entrada de tipo señalizador, como es el ratón y el dispositivo de salida correspondiente al monitor. Los ensayos se llevaron a cabo en un entorno universitario controlado. De cada participante se registra, su nombre, género y edad, así como las características de la interfaz, como el tipo de monitor y su tamaño en pulgadas.

El conjunto de experimentos elegidos están registrados por la norma ISO 9241-9:2000 para el ensayo de la eficiencia y la eficacia de los dispositivos de entrada. En esta norma se sugiere un conjunto de procedimientos para evaluar tareas elementales de tipo indicación, selección, arrastre, trazado y entrada a manos libres. En este caso los ensayos elegidos hacen referencia a cuatro tipos de experimentos que son el ensayo de conexión unidireccional, el ensayo de conexión multidireccional, el ensayo de seguimiento de una trayectoria recta y el de seguimiento de una trayectoria circular.

En cada uno de estos experimentos los sujetos reciben toda la información necesaria para su realización, si bien la aplicación empleada para ello va introduciendo las instrucciones de ejecución oportunas para realizar el ensayo correctamente. Todos los experimentos se realizan en base a un conjunto de movimientos que deben de repetirse, y cuyas medidas se van registrando. El efecto de la posible fatiga que pueda causar la realización del ensayo se mitiga introduciendo pausas entre experimentos que permitan recuperar al participante. El reposo en la ejecución del ensayo no altera los resultados de los tiempos medidos, y solo se toman las muestras de los ensayos durante la ejecución. Por otro lado, también se introducen repeticiones de prueba en cada experimento que permiten adaptarse a la ejecución del ensayo.

En esta sección de la experimentación se emplearán tres grupos de ensayo para tres experimentos diferentes. El primer grupo, compuesto por 25 participantes, realiza las cuatro pruebas descritas más arriba (ensayo de conexión unidireccional, el ensayo de conexión multidireccional, el ensayo de

7.1. Interacción persona-ordenador

seguimiento de una trayectoria recta y el de seguimiento de una trayectoria circular) comparando el escalado constante con el escalado motor estático, el escalado visual y el escalado combinado de estos dos últimos. En las pruebas de trazado se compara el escalado constante con el escalado dinámico en modo navegación, el escalado visual constante con *panning*, y el escalado combinado de estos dos últimos.

El segundo grupo, compuesto por 18 participantes, interviene para evaluar el escalado motor en modo balístico, con respecto al escalado motor estático y el constante. Este ensayo solo utiliza las pruebas de conexión unidireccional y multidireccional.

El tercer grupo, compuesto por 10 participantes, interviene para evaluar los métodos de escalado sobre cuatro dispositivos de interfaz, comparando el escalado constante, el escalado motor estático y el escalado motor dinámico sobre las cuatro pruebas de conexión y trazado.

7.1.1. Procedimiento de los ensayos

Para poder garantizar la homogeneidad de la experimentación, la aplicación visualiza en la pantalla una superficie donde los objetos presentados siempre presentan el mismo tamaño aparente. Para ello, en función del tamaño de monitor introducido por el participante, así como el tipo de pantalla (TFT o CRT) y la resolución de la misma, se ajusta la imagen para obtener el resultado deseado. Una vez realizado este ajuste, un escalado visual $s_2 = 1$ supondrá que el tamaño aparente de los objetos que aparecen en pantalla corresponde al tamaño real, así independientemente del tipo y tamaño de monitor todos los objetos se representarán del mismo tamaño a la misma escala.

Se procede en el inicio de los experimentos a la calibración del ratón con la pantalla para así conocer el ratio de movimiento de ratón y cursor en pantalla y ajustarlo según convenga durante el desarrollo de los ensayos, Figura 7.1. Una vez realizada la calibración un escalado motor $s_1 = 1$ supondrá igual desplazamiento de ratón y cursor en pantalla.

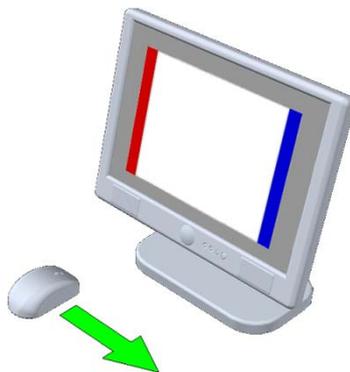


Figura 7.1. Procedimiento de calibración del ratio de movimiento ratón-cursor en pantalla. El sujeto es guiado en este proceso, en donde en primer lugar se coloca el ratón delante de una franja en el extremo izquierdo de la pantalla, se hace desplazar hacia otra franja situada en el otro extremo y de nuevo volver hacia el extremo izquierdo obteniéndose así la relación de movimiento.

A lo largo de los ensayos se irán registrando los resultados de ejecución de todos ellos para posteriormente almacenarse en un archivo de texto cuyos datos se evalúan a posteriori. Otro de los valores que se toma es la evaluación subjetiva del sujeto. El sujeto evalúa el experimento mediante 5

criterios subjetivos según como le haya resultado la ejecución del experimento. Este experimento es similar al NASA-TLX (Task Load Index) [Hart, S. 1988] para la evaluación subjetiva de la carga de trabajo, con la diferencia de que en aquel se evalúa la carga física y la carga mental, mientras que en este experimento se ha unificado en un solo criterio, dadas las características del experimento.

Los criterios se han extraído de la norma ISO 92-41-9 para las evaluaciones de la comodidad independientes y comparativas. Para esta evaluación aparece un panel con 5 barras horizontales, cada barra permite variar cada criterio en 5 posiciones, la posición izquierda corresponde a valor *bajo*, la posición central a valor *medio* y la posición derecha a valor *alto*. Las otras dos posiciones son valores *medio-bajo* y *medio-alto*, ver Figura 7.2a.

Los criterios son:

Fatiga física: se evalúa como afecta al cansancio tanto físico como visual, la ejecución del experimento en cuestión.

Precisión: se evalúa cuán preciso resulta la ejecución del movimiento, en el sentido de la facilidad con la que el sujeto coloca el cursor allá donde desea.

Velocidad de empleo: se evalúa cuán rápido resulta la ejecución de cada ensayo.

Frustración: el grado de frustración está asociado a los fallos a la hora de alcanzar los objetivos, o la consecuencia de repetirlo tras el fallo.

Atención requerida: se trata de evaluar el grado de atención visual que se requiere para realizar el ensayo con éxito.

Tras la evaluación de alguno de los experimentos se realiza otro experimento que presenta algún cambio, básicamente la introducción de las funciones de escalado y/o panning, y este nuevo ensayo se compara con el anterior a criterio del sujeto, con las mismas variables de evaluación descritas anteriormente, solo que ahora las escalas son, de derecha a izquierda, *menor*, *menor-igual*, *igual*, *igual-mayor*, *mayor*, Figura 7.2b.

EVALUACION

Cuestionario de evaluación del ensayo

Evalue el ensayo que acaba de realizar, situando la marca en el lugar que se ajuste mejor a su experiencia en el ensayo.

Fatiga física

Baja Alta

Precisión

Baja Alta

Velocidad de empleo

Baja Alta

Frustración

Baja Alta

Atención requerida

Baja Alta

ACEPTAR

a)

EVALUACION

Cuestionario de evaluación del ensayo

COMPARE este ensayo con el anterior situando la marca en el lugar que se adapte mejor a su experiencia en el ensayo.

Fatiga física

MENOR IGUAL MAYOR

Precisión

MENOR IGUAL MAYOR

Velocidad de empleo

MENOR IGUAL MAYOR

Frustración

MENOR IGUAL MAYOR

Atención requerida

MENOR IGUAL MAYOR

ACEPTAR

b)

Figura 7.2. Paneles de a) Evaluación independiente b) Evaluación comparativa

7.1. Interacción persona-ordenador

7.1.2. Escalado motor versus escalado visual

En este apartado se analizará como intervienen los efectos del escalado visual y el escalado motor sobre los distintos ensayos. Aquí se introduce el escalado estático, en donde la escala motora depende solo de la posición del cursor respecto a los objetos, pero no depende de la velocidad para los ensayos de conexión. Para los ensayos de trazado se compara el escalado motor dinámico en modo navegación con el escalado visual con *panning*. El grupo de participantes voluntarios está formado por 25 personas habituadas al uso de ordenador, con edades comprendidas entre 20 y 55 años, 20 hombres y 5 mujeres, pertenecientes al entorno universitario.

7.1.2.1. Ensayo de conexión unidireccional

El ensayo de conexión unidireccional se emplea para evaluar un movimiento de indicación a lo largo de un eje, viene a representar al conocido experimento de Fitts. El procedimiento del ensayo es el siguiente: al usuario se le van presentando de forma consecutiva rectángulos verticales de anchura W a una distancia D del cursor. La tarea consiste en arrastrar el cursor horizontalmente hacia el rectángulo en el mínimo tiempo posible, Figura 7.3.

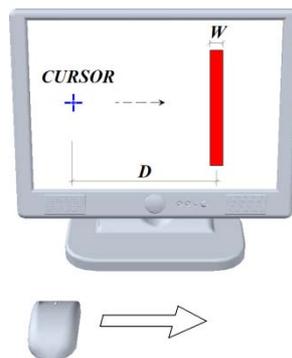


Figura 7.3. Ensayo de conexión unidireccional.

El ensayo debe comportar una cierta gama de dificultades, para ello se va variando la anchura W y la distancia D de manera proporcional para que el índice de dificultad ID esté comprendido en un rango entre 1bit y 8 bits⁷. Tras una serie de movimientos de prueba la tarea se repite 7 veces con cada combinación de anchuras-distancias, desechándose las dos primeras muestras ya que en cada cambio de combinación el usuario, en general requiere al menos de 3 muestras para que los resultados sucesivos sean uniformes. Cada repetición comienza cuando el sujeto clicca con el botón izquierdo sobre el fondo y acaba cuando el usuario desclica el ratón. Cuando se alcanza el objetivo se indica con un pitido agudo. Si el cursor está dentro del rectángulo al soltar el ratón la muestra se toma como válida, en caso contrario se rechaza indicándolo con un pitido grave y se contabiliza como fallo.

La realización de este experimento trata de comparar el tiempo de ejecución y número de fallos entre cuatro formas de escalado: con el escalado motor y visual constantes, escalado motor variable y visual constantes, escalado visual variable y motor constante, y ambos escalados variables. Para eliminar el efecto de la práctica sobre los resultados, el orden con el que cada combinación de escalas se realiza varía

⁷ La norma sugiere que se ensaye un rango entre 1 y 6 bits aproximadamente.

entre participantes. Tras la ejecución de la primera combinación de escalas cada participante debe completar el test de evaluación subjetiva, y tras las otras tres combinaciones el test de comparación con el test anterior. En total, esta prueba se compone de: 4 combinaciones de escala \times 8 ID \times 5 reps \times 25 sujetos = 4000 muestras.

La Figura 7.4 muestra el resultado del tiempo promedio de ejecución con respecto al índice de dificultad para las cuatro combinaciones de escala. La Figura 7.5 el del tiempo promedio y número promedio de fallos para todos los sujetos e ID. En la Figura 7.6 se muestra el tiempo de ejecución para cada ID tras el análisis de ANOVA y el test de comparación múltiple.

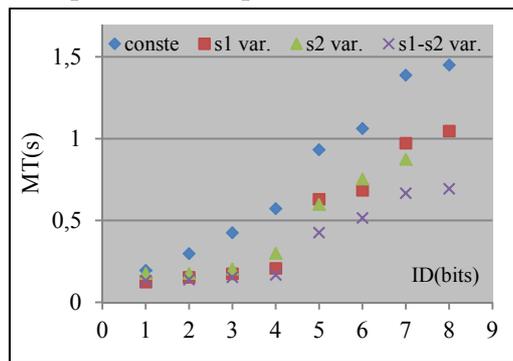


Figura 7.4. Tiempo promedio de ejecución en función del índice de dificultad para las cuatro combinaciones de las escalas visual y motora.

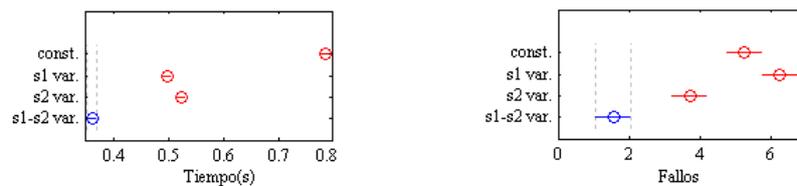


Figura 7.5. Tiempo promedio de ejecución y número promedio de fallos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para las combinaciones de distancias D y W con ID entre 1 y 8 bits.

El análisis ANOVA2 nos indica diferencia significativa entre los cuatro métodos ensayados ($F_{3,3968} = 1954$, $p < 10^{-4}$) y para las distintas combinaciones de ID ($F_{7,3968} = 4074$, $p < 10^{-4}$). La combinación de escalas motora y visual variables es la que muestra los menores tiempos con una reducción de un 55% respecto las escalas constantes. Con una sola escala variable visual o motora, se obtiene un resultado intermedio y similar en ambos casos, aunque ligeramente inferior para la escala motora variable. Para los índices de dificultad bajos, entre 1 y 3, (Figura 7.6) no existe diferencia significativa entre la combinación de escala motora variable y la combinación de ambas escalas variables.

En cuanto al número de fallos de selección no existe diferencia significativa entre la combinación de escalas constantes y la escala motora variable, en donde se observa el mayor número de fallos entre 5.3 (SD = 1.31) y 6.3 (SD = 1.93) de promedio. La escala visual variable reduce significativamente los fallos a 3.7 (SD = 0.94). La combinación de ambas escalas variables es la que permite la ejecución con el menor número de fallos ($F_{3,96} = 57$, $p < 10^{-4}$), reduciéndose estos hasta un promedio de 1.56 (SD = 1.04).

7.1. Interacción persona-ordenador

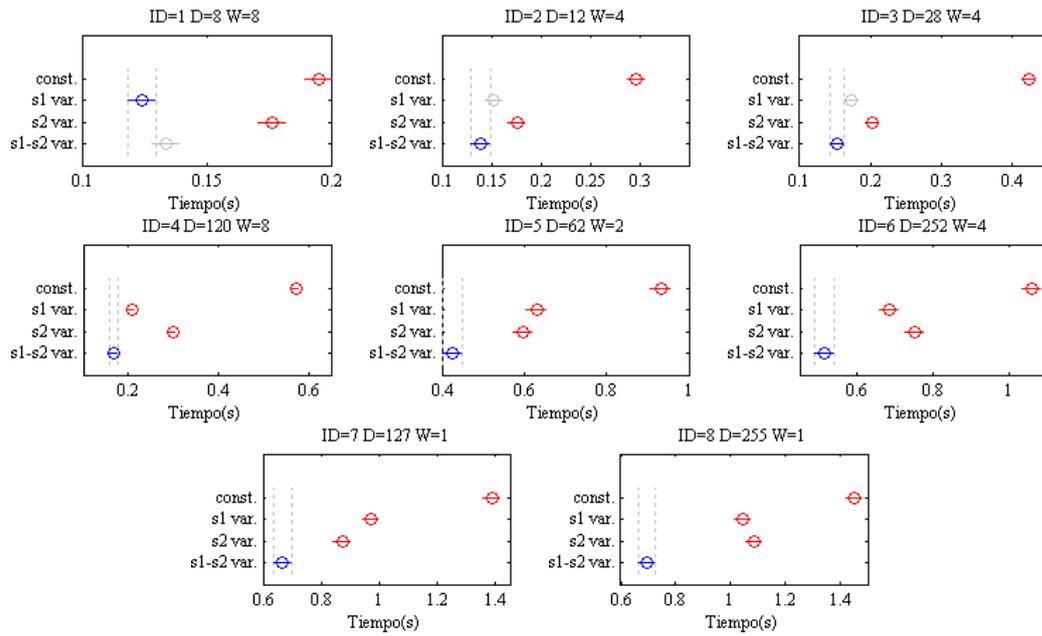


Figura 7.6. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para las combinaciones de distancias D y W con ID entre 1 y 8 bits.

En la Tabla 7.1 se muestra la velocidad de transmisión, o *Throughput TP*, calculado como sugiere la norma, empleando el índice de dificultad equivalente⁸ IDe , donde el ancho del objetivo se sustituye por el ancho equivalente $We = 4.133 s_x$, con s_x la desviación típica de la distribución de las coordenadas de selección en la dirección del movimiento. Al igual que sucede con los tiempos de ejecución, la combinación de mayor TP se obtiene con ambas escalas variables, a excepción del menor ID . Adicionalmente se observa que el ancho equivalente We es menor cuando está presente la escala visual, siendo la combinación de ambas escalas variables la que permite menor We , esto indica mayor agrupamiento de los puntos de selección entorno al objetivo.

ID	Tiempo(s)				We (mm)				TP (bits/s)			
	conste	s_1	s_2	$s_1 - s_2$	conste	s_1	s_2	$s_1 - s_2$	conste	s_1	s_2	$s_1 - s_2$
1	0,195	0,124	0,176	0,133	4,029	3,327	3,129	3,876	8,090	14,290	10,392	12,107
2	0,297	0,153	0,176	0,140	2,474	2,914	3,252	3,041	8,578	15,416	12,668	16,531
3	0,425	0,174	0,203	0,153	3,880	6,426	3,814	3,647	7,155	13,936	15,049	20,380
4	0,572	0,208	0,299	0,168	3,569	4,303	3,861	3,921	8,938	23,365	16,732	29,683
5	0,932	0,630	0,598	0,426	8,596	6,521	5,887	3,731	3,259	5,388	5,900	9,722
6	1,062	0,684	0,753	0,515	14,089	6,418	5,837	3,860	3,993	7,791	7,261	11,744
7	1,387	0,972	0,874	0,667	11,816	6,768	6,728	3,332	2,562	4,430	4,937	7,930
8	1,450	1,046	1,084	0,694	11,776	4,281	6,366	5,532	3,106	5,659	4,944	8,009

Tabla 7.1. Promedio del tiempo de movimiento, ancho equivalente y velocidad de transmisión para cada ID y cada combinación de escalas. La columna “conste” indica escalas constantes con $s_1 = 2$ y $s_2 = 1$. La columna “ s_1 ” indica presencia de escala motora variable. La columna “ s_2 ” indica escalado visual variable. La columna “ $s_1 - s_2$ ” las dos anteriores combinadas.

El análisis del test de evaluación subjetiva se recoge en la Figura 7.7, en donde la puntuación promedio sobre los 25 sujetos se ha normalizado para valores entre 1 y 10. La comparación de las muestras para cada combinación de escalas y variable se lleva a cabo mediante el test de Kruskal-Wallis. La evaluación

⁸ El índice de dificultad equivalente se calcula según $IDe = \log_2(1 + D/We)$. Aquí se ha tomado el D inicial sin tener en cuenta el efecto de las escalas, para así poder comparar los métodos de escalado entre sí.

de la fatiga física muestra que se produce mayor valor para la escala constante y menor para ambas escalas variables en los casos en que la escala motora o visual variable toman valores intermedios y no significativamente diferentes ($\chi^2_{3,96} = 7.6, p=0.055$). La precisión percibida toma los valores mayores en presencia de escala visual variable, siendo mayor para ambas escalas variables, la escala constante muestra el menor valor ($\chi^2_{3,96} = 32, p < 10^{-4}$). En cuanto a la velocidad de ejecución, de nuevo la combinación de ambas escalas variables lanza el mayor valor, seguida de la escala motora variable, después la escala visual, y por último las escalas constantes, valores que siguen el comportamiento del tiempo de ejecución medido en los ensayos ($\chi^2_{3,96} = 33.9, p < 10^{-4}$). La medida de frustración está estrechamente ligada con el número de fallos de selección del objetivo, de ahí que el escalado constante presente el valor mayor de frustración, seguido del escalado motor, el escalado visual y por último el escalado combinado que es el que registra el menor valor ($\chi^2_{3,96} = 31.2, p < 10^{-4}$). El mismo comportamiento se observa en la medida de la atención requerida en la ejecución ($\chi^2_{3,96} = 26.7, p < 10^{-4}$), la cual depende fuertemente del tamaño final del objetivo y de la forma en que las escalas cambian para ayudar a alcanzarlo.

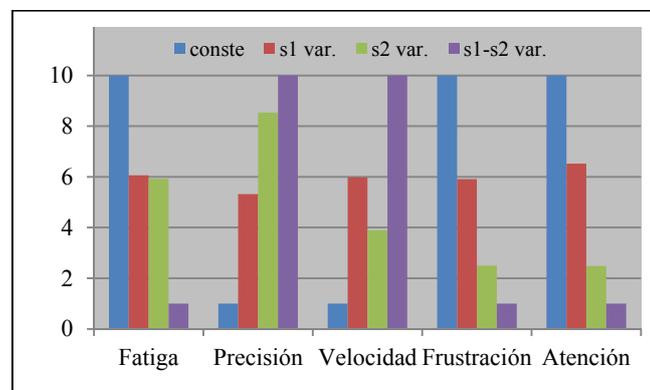


Figura 7.7. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de Fitts.

7.1.2.2. Ensayo de conexión multidireccional

El objetivo de este ensayo es evaluar los movimientos de indicación en direcciones diferentes. El procedimiento del ensayo es el siguiente: se define un conjunto de círculos de diámetro C distribuidos equidistantes en torno a una circunferencia de diámetro D y dispuestos de tal manera que los desplazamientos entre ellos sean prácticamente iguales al diámetro de la circunferencia. El cursor se muestra inicialmente en el círculo situado en la parte superior (número 0), y se irán marcando en color los círculos situados en el extremo opuesto a la circunferencia de forma sucesiva, del 0 al 1, del 1 al 2, etc, tal como muestra la Figura 7.8. Para que el experimento comporte diferente dificultad se variará el diámetro de la circunferencia donde se distribuyen los círculos. El ensayo comienza cuando el sujeto clicca con el ratón sobre el fondo, y sin soltarlo irá arrastrando el cursor hacia los sucesivos círculos. Se indica con un pitido cuando se alcanza cada uno de ellos, no se muestra el siguiente círculo hasta no haber alcanzado el anterior. El ensayo acaba cuando se han alcanzado todos los círculos. Si el sujeto tiene algún problema durante el desarrollo del ensayo puede soltar el ratón y el tiempo que se registra se detiene para reanudarse de nuevo tras clicar otra vez.

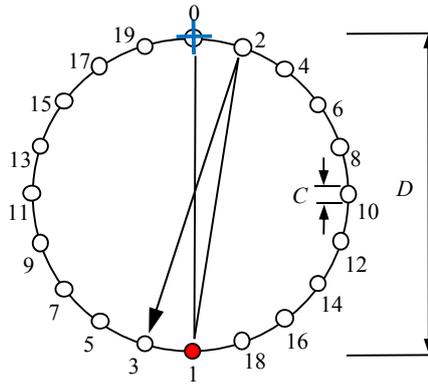


Figura 7.8. Ensayo de conexión multidireccional.

Se realiza el experimento para dos diámetros de la circunferencia diferentes ($D = 30\text{mm}$ y 150mm) y dos diámetros de círculos ($C = 1\text{ mm}$ y 4mm). Se procede del mismo modo que en el experimento anterior, ensayando las cuatro combinaciones de escalas alterando el orden de ellas entre los sujetos. Entre ensayos los participantes evalúan subjetivamente cada ensayo en relación al anterior. En total, esta prueba se compone de: 4 combinaciones de escala $\times 2 C \times 2 D \times 25$ sujetos = 400 muestras.

En este ensayo además del tiempo de ejecución de la suma de todos los desplazamientos sobre los 20 pequeños objetivos que se sitúan en torno a la circunferencia de diámetro D , se toman unas medidas adicionales para evaluar el ensayo [MacKenzie et al. 2001]. En concreto se mide la “reentrada al objetivo” TRE (*Target Re-entry*), que es el número de veces que se vuelve a entrar al objetivo cuando ya se ha entrado antes y todavía no ha sido seleccionado por el usuario. Otra medida que se realiza es la “variabilidad del movimiento” MV (*Movement Variability*), que es una medida del grado en que los puntos de la trayectoria residen en una línea recta a lo largo de un eje paralelo al eje de la tarea. Esta medida se obtiene a través de la raíz cuadrada del error medio al cuadrado de los puntos respecto a una recta de ajuste.

La Figura 7.9 muestra el resultado de los tiempos promedio y el valor promedio de TRE para las cuatro combinaciones de escala considerando todas las muestras. La Figura 7.10 muestra los tiempos promedio para cada combinación $D-C$. La combinación de ambas escalas variables muestra el menor tiempo promedio ($F_{3,396} = 19.2$, $p < 10^{-4}$), siendo las escalas constantes las que dan lugar a los tiempos mayores, y las combinaciones de una sola escala variable muestran un valor intermedio, no diferentes significativamente entre sí. Resultado en concordancia al obtenido en el ensayo de conexión unidireccional.

En cuanto al número de reentradas TRE existe diferencia significativa al emplear ambas escalas ($F_{3,396} = 21.7$, $p < 10^{-4}$), obteniéndose con dicho método el menor valor, en torno a 2 reentradas por las 20 trayectorias, pero no existe diferencia significativa al emplear una sola escala y la escala constante, en torno a 4 reentradas.

No se ha observado diferencia significativa en la variabilidad del movimiento ($F_{3,396} = 0.27$, $p = 0.84$). El escalado no ha intervenido en hacer la trayectoria más rectilínea hacia el objetivo al no afectar la dirección de movimiento.

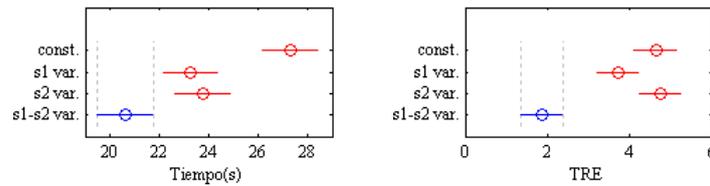


Figura 7.9. Tiempo promedio de ejecución y número promedio de reentradas para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para todas las combinaciones de diámetros D y C .

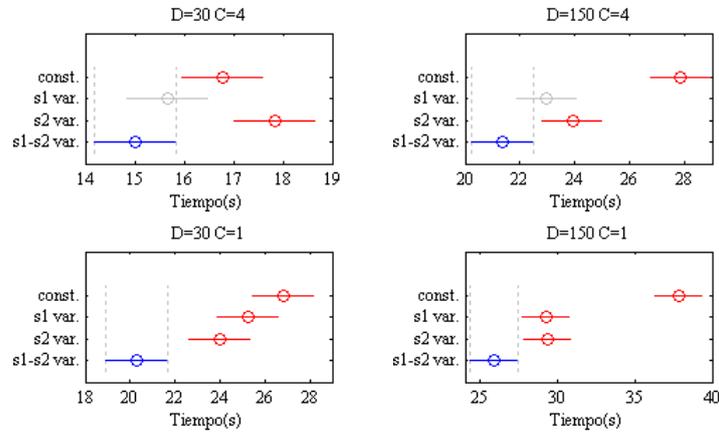


Figura 7.10. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de diámetros D y C .

En la Tabla 7.2 se muestran los promedios del tiempo de proceso, el ancho efectivo y la velocidad de transmisión TP . La Figura 7.11 muestra el promedio del TP para cada método de escalado, el test ANOVA muestra diferencia significativa entre los promedios ($F_{3,396} = 55.7$, $p < 10^{-4}$), si bien el análisis de comparación múltiple nos indica que no hay diferencia entre el TP obtenido con una sola escala variable.

Al igual que sucede con los tiempos de ejecución, la combinación de mayor TP se obtiene con ambas escalas variables, a excepción de la combinación con menor ID ($D = 30\text{mm}$, $C = 4\text{mm}$). De nuevo se observa que el ancho equivalente We es menor cuando está presente la escala visual, siendo la combinación de ambas escalas variables la que permite menor We .

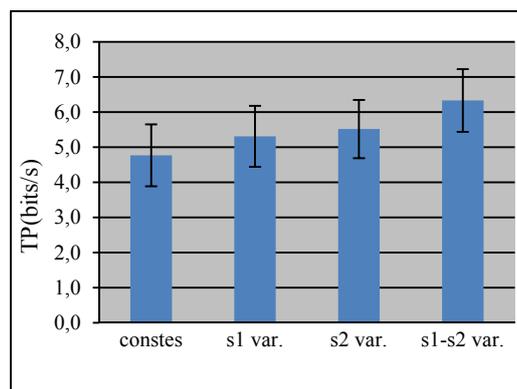


Figura 7.11. Promedio de la velocidad de transmisión para cada combinación de escalado.

En la Figura 7.12 se recoge el resultado del test de evaluación subjetiva del ensayo de conexión multidireccional realizado sobre los 25 sujetos y normalizado entre 1 y 10. El resultado del test de Kruskal-Wallis no proporciona diferencia significativa sobre la fatiga física ($\chi^2_{3,96} = 5.3$, $p = 0.15$), si bien

7.1. Interacción persona-ordenador

la introducción de las variables de escalado reduce el desplazamiento motor, el efecto del escalado visual variable produce cierta sobrecarga visual, lo que da lugar a una gran dispersión sobre los valores de fatiga percibida entre los diferentes métodos de escala.

La variable de precisión se ve mejorada con las combinaciones de escala en presencia de escalado visual ($\chi^2_{3,96} = 37$, $p < 10^{-4}$), si bien el escalado motor da valores de precisión subjetiva superiores respecto al escalado constante. Algo similar ocurre con la frustración aunque a la inversa ($\chi^2_{3,96} = 39.4$, $p < 10^{-4}$), las funciones de escala reducen el número de correcciones en torno al objetivo, este resultado es similar al que se obtuvo en el experimento de Fitts. La velocidad percibida está en concordancia con los datos de tiempo de ejecución, la combinación con ambas escalas variables proporciona los valores mayores, valores intermedios con una sola escala, y el menor valor para escala constante ($\chi^2_{3,96} = 37.4$, $p < 10^{-4}$). Los valores de atención disminuyen en presencia de la escala visual, al igual que sucedía en el experimento anterior, aunque no se observa diferencia significativa entre los tres métodos con escala variable, si la hay con respecto a las escalas constantes ($\chi^2_{3,96} = 18$, $p < 10^{-4}$).

<i>D-W</i>	Tiempo(s)				<i>We</i> (mm)				<i>TP</i> (bits/s)			
	const	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>s</i> ₁ - <i>s</i> ₂	conste	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>s</i> ₁ - <i>s</i> ₂	conste	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₂	<i>s</i> ₁ - <i>s</i> ₂
30-4	16,786	15,661	17,853	15,026	1,720	2,031	1,345	1,361	5,247	5,210	5,293	6,201
30-1	26,829	25,273	23,984	20,307	0,528	0,498	0,413	0,371	4,525	4,834	5,280	6,498
150-4	27,860	22,966	23,921	21,365	2,118	2,332	1,522	1,660	4,668	5,380	5,730	6,216
150-1	37,831	29,232	29,337	25,904	0,392	0,502	0,505	0,540	4,635	5,813	5,767	6,413

Tabla 7.2. Promedio del tiempo de movimiento, ancho equivalente y velocidad de transmisión para cada *ID* y cada combinación de escalas. La columna “const” indica escalas constantes con *s*₁ = 2 y *s*₂ = 1. La columna “*s*₁” indica presencia de escala motora variable. La columna “*s*₂” indica escalado visual variable. La columna “*s*₁-*s*₂” las dos anteriores combinadas.

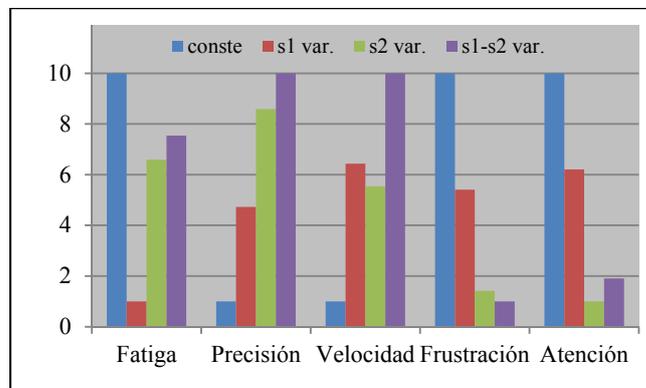


Figura 7.12. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de conexión multidireccional.

7.1.2.3. Ensayo de trazado unidireccional

El objetivo de este ensayo es evaluar el seguimiento de una trayectoria rectilínea determinada entre dos puntos. El procedimiento del ensayo es el siguiente: dos líneas paralelas de una longitud *D* se disponen separadas una distancia *K*, entre ellas se halla un objeto, un cuadrado, de lado *B*, ver Figura 7.13. La tarea consiste en desplazar el cuadrado de un extremo a otro de las líneas paralelas, entre ellas y sin tocarlas. El ensayo comienza cuando el sujeto clicca con el ratón sobre el fondo, y sin soltarlo irá arrastrando el cuadrado hasta alcanzar el otro extremo, donde deberá soltarlo, indicándose con un pitido agudo la correcta realización. Si toca las líneas paralelas se señala con un pitido grave y se le indica al sujeto que

debe comenzar de nuevo. Se registrará el tiempo que tarda el sujeto en mover, con éxito, el cuadrado de un extremo a otro del trayecto, así como el número de intentos fallidos cometidos y la desviación media S_{AV} de la trayectoria a partir de una línea central. Para que el ensayo comporte diferentes niveles de dificultad se variará la anchura del objeto B respecto la del trayecto K . El índice de dificultad de este ensayo viene dado por:

$$ID = \frac{D}{K - B} \quad (7.1)$$

En cuanto al índice efectivo de dificultad se determina según:

$$ID_e = \frac{D}{S_{AV}} \quad (7.2)$$

Resultado la velocidad de transmisión TP :

$$TP = \frac{ID_e}{MT_{AV}} \quad (7.3)$$

siendo MT_{AV} el tiempo promedio de ejecución.

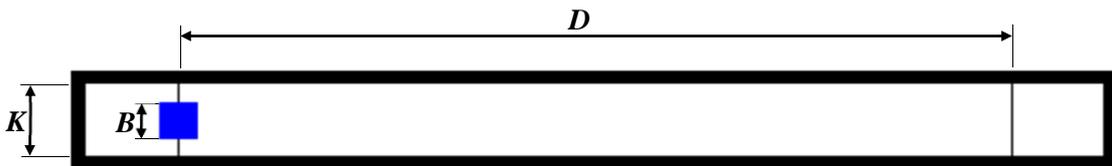


Figura 7.13. Ensayo de trazado, seguimiento de una trayectoria unidireccional.

Este experimento se ensayará comparando el modo directo a escalas constantes ($s_1 = 2$); el escalado variable motor dinámico en modo navegación, ecuaciones (5.136-139) y (6.8); el modo directo con escala motora constante ($s_1 = 2$) y escala visual ($s_2 = 2$) con *panning*; y el escalado variable motor dinámico en modo navegación y escala visual ($s_2 = 2$) con *panning*.

La longitud total del trayecto será de $D = 225\text{mm}$, se tomarán dos separaciones entre líneas de $K = 5$ y 10mm , y cuatro anchuras del objeto a desplazar $B = 2, 4, 6$ y 8mm , de tal manera que se obtendrán cuatro márgenes $K-B$ entre 1 y 4mm dando a lugar a 4 ID . Entre ensayos los participantes evalúan subjetivamente cada ensayo en relación al anterior. En total, esta prueba se compone de: 4 combinaciones de escala $\times 4$ $ID \times 5$ reps $\times 25$ sujetos = 2000 muestras.

La Figura 7.14 registra tras el análisis de la varianza y el test de comparación múltiple los valores promedio de los tiempos de ejecución y número de fallos para los 25 sujetos. La Figura 7.15 muestra los tiempos promedio para cada ID . El tiempo promedio mínimo lo proporciona el escalado motor dinámico ($F_{3,1996} = 238, p < 10^{-4}$) que es ligeramente menor al obtenido combinando este escalado con el escalado visual con *panning* debido a que en este último, el espacio motor, se ve incrementado por el escalado visual. El escalado visual con *panning* da valores menores del tiempo de ejecución que el escalado constante, especialmente con el cuadrado más pequeño e ID mayor.

La Figura 7.16 muestra los promedios de los intentos fallidos para cada ID tras el análisis de ANOVA y el test de comparación múltiple. La presencia del escalado motor dinámico permite el menor número de

7.1. Interacción persona-ordenador

fallos ($F_{3,1996} = 81.2, p < 10^{-4}$), el escalado visual con *panning* permite reducir el número de fallos respecto al escalado constante, y trabajando junto con el escalado motor dinámico lo reduce significativamente con el *ID* mayor (225 bits) donde el tamaño del cuadro es el más pequeño así como el margen de movilidad $K-B = 1\text{mm}$.

En la Tabla 7.3 se muestran los promedios del tiempo de proceso, la desviación media a partir de la línea central y la velocidad de transmisión *TP*. La Figura 7.17 muestra el promedio del *TP* para cada método de escalado, el test ANOVA muestra una diferencia significativa entre los promedios ($F_{3,1996} = 18.4, p < 10^{-4}$), si bien el análisis de comparación múltiple nos indica que no hay diferencia entre el *TP* obtenido en los dos métodos que está presente el escalado motor dinámico. El menor *TP* lo lanza el escalado constante, seguido del método con escalado visual y *panning*. Este último es el que presenta menor desviación promedio debido a la presencia del escalado visual.

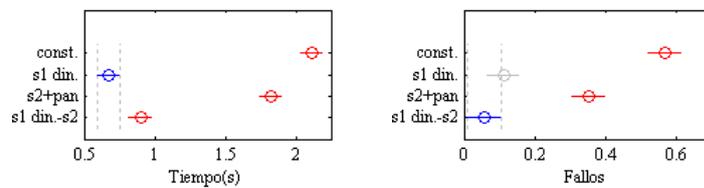


Figura 7.14. Tiempo promedio de ejecución y número promedio de fallos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para todas las combinaciones de *ID* en el ensayo de trazado unidireccional.

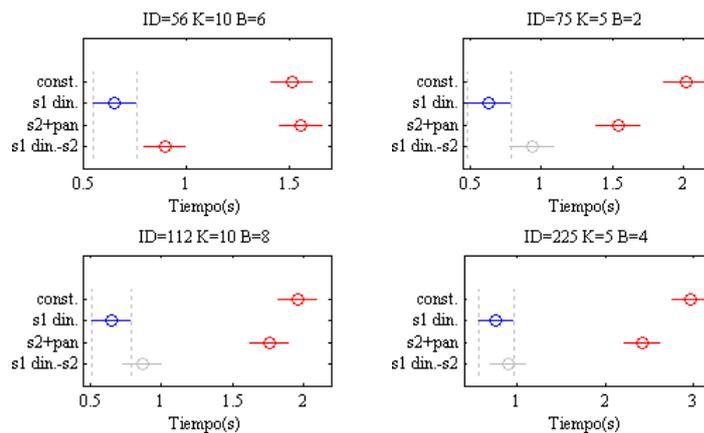


Figura 7.15. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de *ID* en el ensayo de trazado unidireccional.

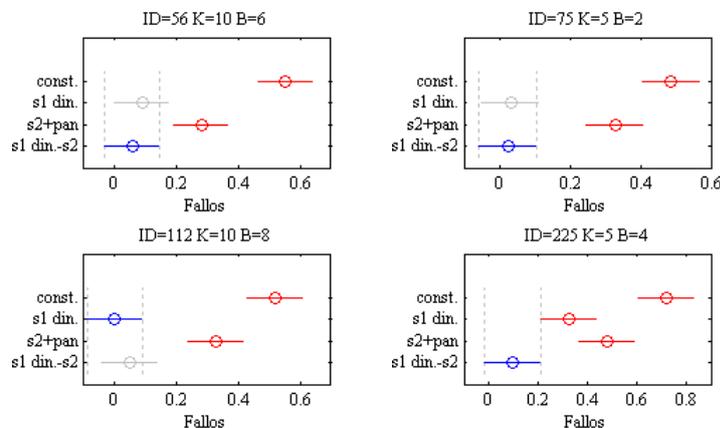


Figura 7.16. Número promedio de intentos fallidos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de *ID* en el ensayo de trazado unidireccional.

$K-B$	ID	Tiempo(s)				S_{AV} (mm)				TP (bits/s)			
		const	s_1	s_2	s_1-s_2	const	s_1	s_2	s_1-s_2	const	s_1	s_2	s_1-s_2
10-6	56	1,51	0,65	1,56	0,89	0,73	0,36	0,73	0,60	205	968	199	421
5-2	75	2,02	0,63	1,55	0,93	0,71	0,26	0,56	0,51	157	1371	258	477
10-8	113	2,02	0,64	1,81	0,86	0,39	0,19	0,42	0,29	288	1854	294	887
5-4	225	2,96	0,77	2,43	0,91	0,37	0,16	0,25	0,16	208	1846	366	1505

Tabla 7.3. Promedio del tiempo de movimiento, desviación media y velocidad de transmisión para cada ID y cada combinación de escalas. La columna “const” indica escalas constantes con $s_1 = 2$ y $s_2 = 1$. La columna “ s_1 ” indica presencia de escala motora dinámica en modo navegación. La columna “ s_2 ” indica escalado visual constante con $s_2 = 2$ y panning. La columna “ s_1-s_2 ” las dos anteriores combinadas. K y B dados en mm e ID dado en bits obtenido según (7.1). El cálculo del TP se obtiene según (7.3).

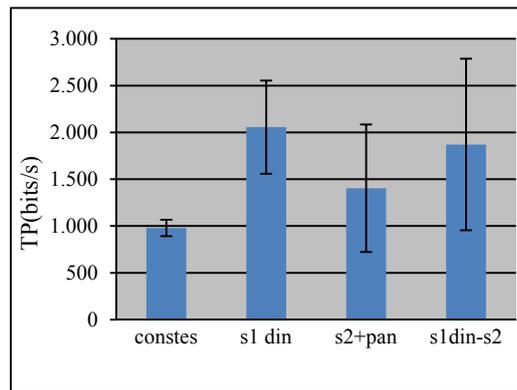


Figura 7.17. Promedio de la velocidad de transmisión para cada combinación de escalado en el ensayo de trazado unidireccional.

El resultado del test de evaluación subjetiva del ensayo de trazado unidireccional realizado sobre los 25 sujetos y normalizado entre 1 y 10 se muestra en la Figura 7.18. El resultado del test de Kruskal-Wallis indica una diferencia significativa sobre la fatiga física ($\chi^2_{3,96} = 31.2$, $p < 10^{-4}$), siendo el método de escalado visual con panning el que muestra el mayor valor debido al aumento del desplazamiento motor, los otros tres métodos no muestran valores significativamente diferentes entre sí. La variable de precisión se ve mejorada con cualquier combinación de escalados con respecto al escalado constante ($\chi^2_{3,96} = 38.9$, $p < 10^{-4}$), si bien el escalado motor da valores de precisión subjetiva superiores respecto al escalado constante.

El escalado motor dinámico y este mismo junto al escalado visual con *panning* muestran los valores mayores de velocidad percibida respecto al escalado constante o visual con *panning* por separado ($\chi^2_{3,96} = 41.5$, $p < 10^{-4}$). La frustración está estrechamente ligada a la facilidad con la que se tocan las paredes del recorrido ya que este ha de iniciarse de nuevo, el escalado constante es el que muestra el valor mayor ($\chi^2_{3,96} = 39.4$, $p < 10^{-4}$), pero los otros métodos no muestran diferencias significativas entre sí. La atención requerida también es mayor con el escalado constante ($\chi^2_{3,96} = 32.5$, $p < 10^{-4}$) siendo el escalado combinado motor dinámico y visual con *panning* el que proporciona menor valor promedio.

7.1. Interacción persona-ordenador

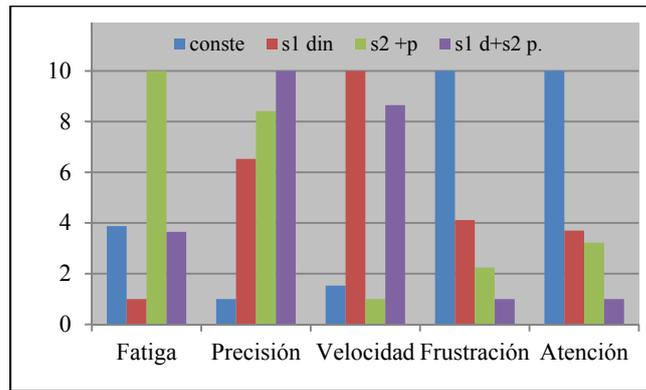


Figura 7.18. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de trazado unidireccional.

7.1.2.4. Ensayo de trazado multidireccional

Según la norma el objetivo de este ensayo es evaluar la capacidad de marcar los objetos y arrastrarlos hasta un lugar específico o duplicar sus formas, como el trazado de una imagen (tipo circuito impreso), la duplicación de líneas o el relleno de objetos. El procedimiento del ensayo es el siguiente: se presentan dos circunferencias concéntricas de radios R y $(R+K)$, entre ellas se halla un objeto, un círculo de diámetro B , ver Figura 7.19.

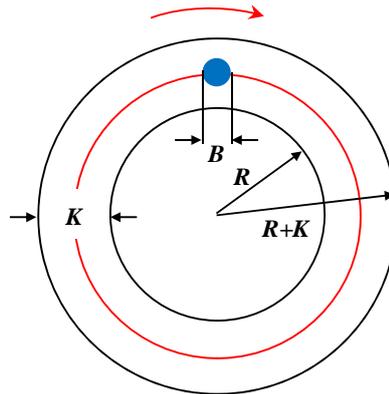


Figura 7.19. Ensayo de trazado multidireccional.

La tarea consiste en desplazar el círculo a lo largo del camino compuesto por las dos circunferencias y sin tocarlas. El ensayo comienza cuando el sujeto clicca con el ratón sobre el fondo, y sin soltarlo irá arrastrando el círculo hasta completar el camino, indicándose con un pitido agudo la correcta realización. Si toca las líneas de las circunferencias se señala con un pitido grave y se le indica al sujeto que debe comenzar de nuevo. Se registrará el tiempo que tarda el sujeto en mover, con éxito, el círculo de un extremo a otro del trayecto, así como el número de intentos fallidos cometidos. Para que el ensayo comporte diferentes niveles de dificultad se variará la anchura del objeto B respecto la del trayecto K y el radio R de circunferencia. El índice de dificultad y el índice efectivo de dificultad se determinan de igual forma con las ecuaciones (7.1) y (7.2).

Este experimento se realizará de forma similar al realizado en el anterior apartado. Se ensayará comparando el modo directo a escalas constantes ($s_1 = 2$); el escalado variable motor dinámico en modo navegación, ecuaciones (5.136-139) y (6.8); el modo directo con escala motora constante ($s_1 = 2$) y escala

visual ($s_2 = 2$) con *panning*; y el escalado variable motor dinámico en modo navegación y escala visual ($s_2 = 2$) con *panning*. Los valores empleados para este ensayo son:

$R = 20\text{mm}$	$K = 5\text{mm}$	$B = 2\text{mm}$	$ID = 42$ bits
$R = 20\text{mm}$	$K = 10\text{mm}$	$B = 8\text{mm}$	$ID = 63$ bits
$R = 60\text{mm}$	$K = 10\text{mm}$	$B = 6\text{mm}$	$ID = 94$ bits
$R = 60\text{mm}$	$K = 5\text{mm}$	$B = 2\text{mm}$	$ID = 126$ bits

En total, esta prueba se compone de: 4 combinaciones de escala \times 4 ID \times 25 sujetos = 400 muestras.

En la Figura 7.20 se muestra tras el análisis de la varianza y el test de comparación múltiple los valores promedio de los tiempos de ejecución y número de fallos para los 25 sujetos. La Figura 7.21 muestra los tiempos promedio para cada ID . Los resultados son comparativamente similares a los obtenidos en el trazado unidireccional, aunque los tiempos son mucho mayores debido a la dificultad de la tarea a causa del continuo cambio de dirección. El tiempo promedio mínimo lo proporcionan las dos combinaciones que contienen el escalado motor dinámico ($F_{3,396} = 255$, $p < 10^{-4}$), valores muy próximos entre ellos ($F_{1,198} = 4.5$, $p = 0.0362$) pero ligeramente menor para el escalado motor dinámico. Este último reduce el tiempo de ejecución para el ID más alto de 113 bits, de un promedio de 38 segundos a escalas constantes hasta un promedio de 7.6 segundos con escalado motor dinámico. El escalado visual con *panning* da valores menores del tiempo de ejecución (27%) que el escalado constante.

La Figura 7.22 muestra los promedios de los intentos fallidos para cada ID tras el análisis de ANOVA y el test de comparación múltiple. Al igual que en el trazado unidireccional, la presencia del escalado motor dinámico permite el menor número de fallos ($F_{3,396} = 53.7$, $p < 10^{-4}$). Por otro lado el escalado visual con *panning* permite reducir el número de fallos respecto al escalado constante en todos los casos excepto en el menor ID , y trabajando junto con el escalado motor dinámico lo reduce significativamente con el ID mayor (126 bits).

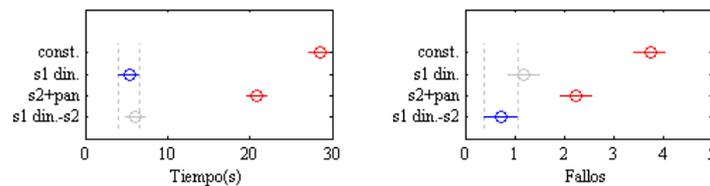


Figura 7.20. Tiempo promedio de ejecución y número promedio de fallos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para todas las combinaciones de ID en el ensayo de trazado multidireccional.

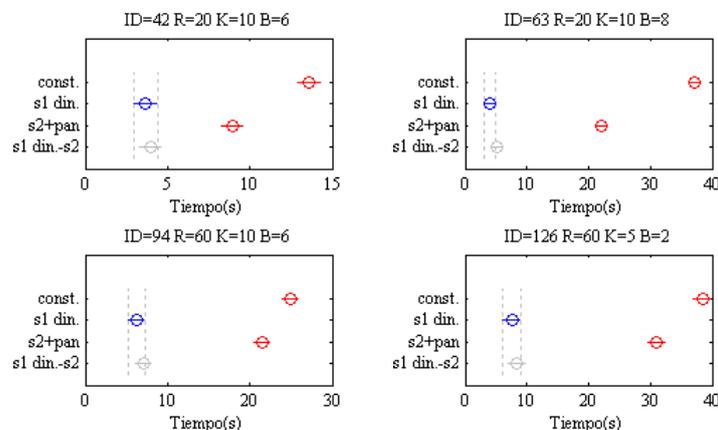


Figura 7.21. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de ID en el ensayo de trazado multidireccional.

7.1. Interacción persona-ordenador

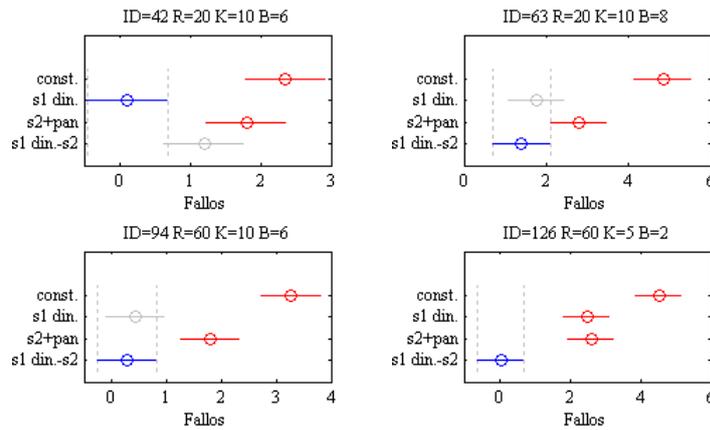


Figura 7.22. Número promedio de intentos fallidos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de ID en el ensayo de trazado multidireccional.

En la Tabla 7.4 se muestran los promedios del tiempo de proceso, la desviación media a partir de la línea central y la velocidad de transmisión TP . La Figura 7.23 muestra el promedio del TP para cada método de escalado, el test ANOVA muestra diferencia significativa entre los promedios ($F_{3,396} = 14.9, p < 10^{-4}$), siendo mayor el obtenido con el escalado motor dinámico (56 bits/s de promedio). El análisis de comparación múltiple nos indica que no hay diferencia entre el TP obtenido con el escalado constante o visual con panning. A pesar de lanzar tiempos significativamente iguales los dos métodos con el escalado motor dinámico, la combinación que añade a este escalado el escalado visual con *panning* lanza menor TP debido a presentar una mayor desviación S_{AV} como se aprecia en la Tabla 7.4. Esto nos indica que la inclusión del escalado visual proporciona más “tolerancia” en el movimiento para ejecutarlo rápidamente y cometiendo menor número de fallos.

$K-B$	ID	Tiempo(s)				S_{AV} (mm)				TP (bits/s)			
		const	s_1	s_2	s_1-s_2	const	s_1	s_2	s_1-s_2	const	s_1	s_2	s_1-s_2
10-6	56	1,51	0,65	1,56	0,89	0,73	0,36	0,73	0,60	205	968	199	421
5-2	75	2,02	0,63	1,55	0,93	0,71	0,26	0,56	0,51	157	1371	258	477
10-8	113	2,02	0,64	1,81	0,86	0,39	0,19	0,42	0,29	288	1854	294	887
5-4	225	2,96	0,77	2,43	0,91	0,37	0,16	0,25	0,16	208	1846	366	1505

Tabla 7.4. Promedio del tiempo de movimiento, desviación media y velocidad de transmisión para cada ID y cada combinación de escalas. La columna “const” indica escalas constantes con $s_1 = 2$ y $s_2 = 1$. La columna “ s_1 ” indica presencia de escala motora dinámica en modo navegación. La columna “ s_2 ” indica escalado visual constante con $s_2 = 2$ y *panning*. La columna “ s_1-s_2 ” las dos anteriores combinadas. K y B dados en mm e ID dado en bits obtenido según (7.1). El cálculo del TP se obtiene según (7.3) donde el desplazamiento total $D = 2\pi R$.

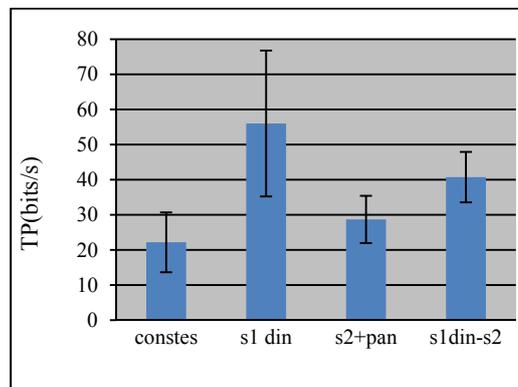


Figura 7.23. Promedio de la velocidad de transmisión para cada combinación de escalado en el ensayo de trazado multidireccional.

El resultado del test de evaluación subjetiva se muestra en la Figura 7.24. El resultado del test de Kruskal-Wallis aplicado a los 25 sujetos indica diferencia significativa sobre los cuatro parámetros (Fatiga $\Rightarrow \chi^2_{3,96} = 42.6$, $p < 10^{-4}$; Precisión $\Rightarrow \chi^2_{3,96} = 42$, $p < 10^{-4}$; Velocidad $\Rightarrow \chi^2_{3,96} = 39.9$, $p < 10^{-4}$; Frustración $\Rightarrow \chi^2_{3,96} = 43.9$, $p < 10^{-4}$; Atención $\Rightarrow \chi^2_{3,96} = 45.1$, $p < 10^{-4}$), aunque no existe diferencia significativa entre los dos métodos con escalado dinámico y tampoco entre los dos métodos con escalado constante, lo que indica que los usuarios perciben el comportamiento de ambos de la misma manera. La menor fatiga física, frustración y atención requerida, y la mayor precisión y velocidad requerida lo muestran de forma clara los dos métodos con el escalado motor dinámico de navegación.

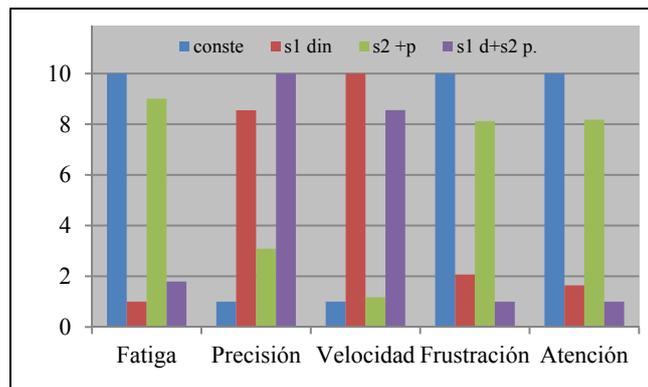


Figura 7.24. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de trazado multidireccional.

7.1.3. Escalado estático versus escalado dinámico

A continuación se repetirán los experimentos anteriores poniendo atención únicamente en el escalado motor y como afecta la introducción del escalado dinámico. Se comparará en cada uno de los ensayos de conexión unidireccional y multidireccional el resultado obtenido a escala constante, a escala variable estática y a escala variable dinámica. En este experimento un total de 18 sujetos (15 hombres y 3 mujeres) intervendrán en los ensayos con las mismas condiciones de ejecución expresadas en los apartados 7.221 y 7.222 a excepción del dispositivo interfaz empleado que es el mismo para todos los sujetos⁹.

7.1.3.1. Ensayo de conexión unidireccional

Aquí se analizan de forma comparativa los resultados del experimento de Fitts obtenidos de escala s_1 constante, escala s_1 variable estática y escala s_1 variable dinámica. En total, esta prueba se compone de: 3 combinaciones de escala \times 8 ID \times 5 repeticiones \times 18 sujetos = 2160 muestras.

La Figura 7.25 recoge los tiempos de ejecución para cada uno de los ID de las tres combinaciones de escala, constante estática y dinámica. La Figura 7.26 recoge los tiempos promedio y número de fallos de selección tras el análisis de la varianza y el test de comparación múltiple para todas las muestras y en la Figura 7.27 para cada ID los tiempos de ejecución.

Se observa diferencia significativa del tiempo de ejecución ($F_{2,2157} = 274$, $p < 10^{-4}$) y número de fallos ($F_{2,51} = 69.4$, $p < 10^{-4}$) entre los tres métodos. El escalado dinámico muestra los menores tiempos de

⁹ Aquí es necesario el empleo de un ratón cuya resolución y velocidad de respuesta sean suficientes para medir con precisión la curva de velocidad del operador. (Concretamente se ha elegido un ratón de Logitech modelo G9 con 3200 dpi y 1000 señales/s).

7.1. Interacción persona-ordenador

ejecución (0.32s, SD = 0.19s), seguido del escalado estático (0.48s, SD = 0.36s) y el constante (0.76s, SD = 0.46s). La diferencia del tiempo crece con el ID . Para valores del ID entre 1 y 3 bits no existe diferencia significativa entre el tiempo obtenido con el escalado estático y el dinámico.

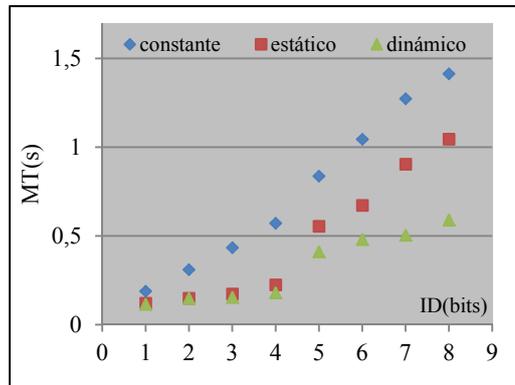


Figura 7.25. Tiempo promedio de ejecución en función del índice de dificultad para las cuatro combinaciones de las escalas visual y motora.

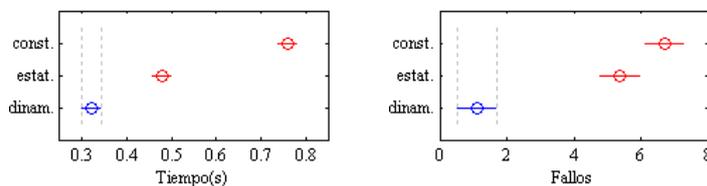


Figura 7.26. Tiempo promedio de ejecución y número promedio de fallos para diferentes combinaciones de escalas visual y motora.

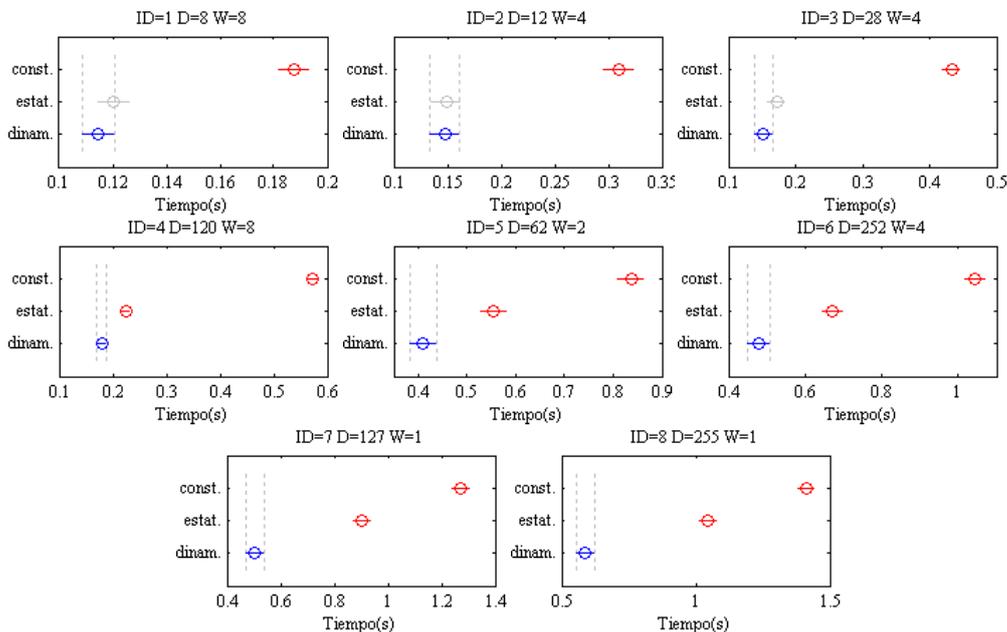


Figura 7.27. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para las combinaciones de distancias D y W con ID entre 1 y 8 bits.

En la Tabla 7.5 se muestra la velocidad de transmisión TP conjuntamente con el ancho equivalente y el tiempo de ejecución para cada ID . Se observa un ancho equivalente We significativamente menor en el escalado dinámico para valores del ID mayor que 2 bits, así como un TP mayor que crece a mayores ID con respecto al escalado estático.

ID	Tiempo(s)			We(mm)			TP(bits/s)		
	conste	estático	dinámico	conste	estático	dinámico	conste	estático	dinámico
1	0,19	0,12	0,11	3,81	3,66	4,06	8,7	13,9	13,7
2	0,31	0,15	0,15	2,30	2,51	2,68	8,5	17,0	16,6
3	0,43	0,17	0,15	2,13	3,02	2,87	8,8	19,5	22,5
4	0,57	0,22	0,18	4,30	7,00	5,69	8,5	18,7	24,9
5	0,84	0,55	0,41	1,41	1,27	1,26	6,6	10,2	13,8
6	1,04	0,67	0,48	16,61	8,26	6,60	3,8	7,4	11,0
7	1,27	0,90	0,50	4,28	2,18	2,18	3,9	6,5	11,7
8	1,41	1,05	0,59	13,92	7,35	6,55	3,0	4,9	9,0

Tabla 7.5. Promedio del tiempo de movimiento, ancho equivalente y velocidad de transmisión para cada ID y cada combinación de escalas. La columna “conste” indica escalas constantes con $s_1 = 2$ y $s_2 = 1$. La columna “estático” indica presencia de escala motora variable estática. La columna “dinámico” indica escalado motor dinámico.

El análisis del test de evaluación subjetiva se recoge en la Figura 7.28, con la puntuación promedio sobre los 18 sujetos normalizada para valores entre 1 y 10. Tras el test de Kruskal-Wallis diferencia significativa en los promedio sobre los cuatro parámetros (Fatiga $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 11.7$, $p = 0.003$; Precisión $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 14.1$, $p = 0.0008$; Velocidad $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 18.2$, $p < 10^{-4}$; Frustración $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 17.8$, $p < 10^{-4}$; Atención $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 18.4$, $p < 10^{-4}$), aunque no existe diferencia significativa en la fatiga física entre los métodos de escalado estático y dinámico, existe una clara inclinación hacia el escalado motor dinámico en términos de menor frustración y atención requerida, y de mayor precisión y velocidad percibida.

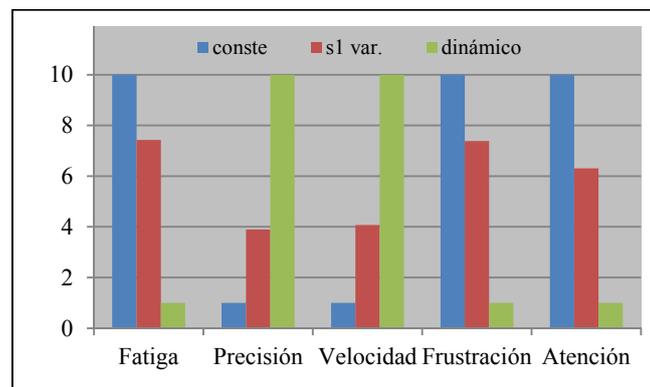


Figura 7.28. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de Fitts.

7.1.3.2. Ensayo de conexión multidireccional

Para el ensayo de conexión multidireccional se toma la misma combinación de disposición de los objetivos que la utilizada en el apartado 7.222. En total, esta prueba se compone de: 3 combinaciones de escala $\times 2 C \times 2 D \times 18$ sujetos = 216 muestras.

El resultado del análisis de todos los datos se muestra en la Figura 7.29 para el tiempo de ejecución promedio y el valor de TRE. En la Figura 7.30 el resultado de los tiempos para cada combinación de diámetros D y C . El escalado dinámico lanza los menores tiempos de ejecución ($F_{2,213} = 21.5$, $p < 10^{-4}$) así como el menor número de reentradas ($F_{2,213} = 27$, $p < 10^{-4}$), si bien esto ocurre solo al contemplar el desplazamiento mayor entre los objetivos, con el diámetro $D = 150$ mm. Esto es debido a que la velocidad

7.1. Interacción persona-ordenador

máxima que se alcanza en la ejecución con $D = 30\text{mm}$ es en general inferior a la umbral necesaria para activar el modo de corrección de escala dinámica. A diferencia del comportamiento del escalado estático, puede observarse que la variabilidad del movimiento MV obtenida en el escalado dinámico es significativamente menor ($F_{2,213} = 4.9, p = 0.0087$), esto indica que este escalado dinámico, cuando actúa, permite obtener una trayectoria más directa al objetivo.

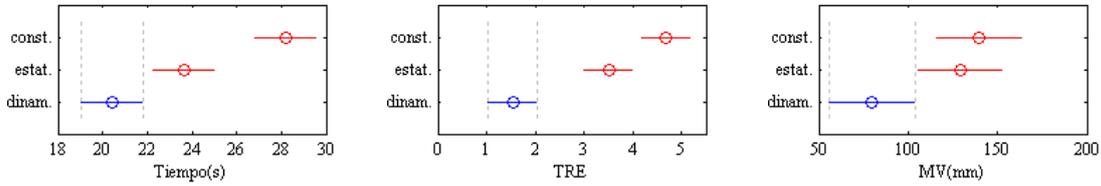


Figura 7.29. Tiempo promedio de ejecución, número promedio de reentradas y promedio de la variabilidad del movimiento para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, para todas las combinaciones de diámetros D y C .

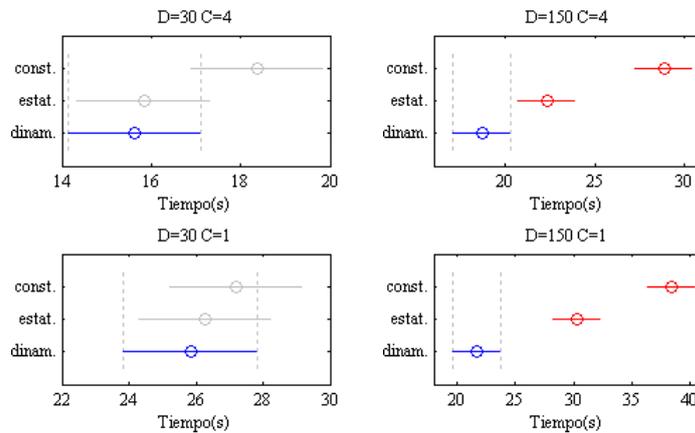


Figura 7.30. Tiempo promedio de ejecución para diferentes combinaciones de escalas visual y motora, y para cada una de las combinaciones de diámetros D y C .

En la Tabla 7.6 se muestran los promedios del tiempo de proceso, el ancho efectivo y la velocidad de transmisión TP . La Figura 7.31 muestra el promedio del TP para cada método de escalado, el escalado dinámico lanza un TP significativamente mayor ($F_{2,213} = 38.2, p < 10^{-4}$). Para las combinaciones con $D = 150\text{mm}$ donde interviene principalmente el escalado dinámico se observan menores valores promedio del ancho equivalente We .

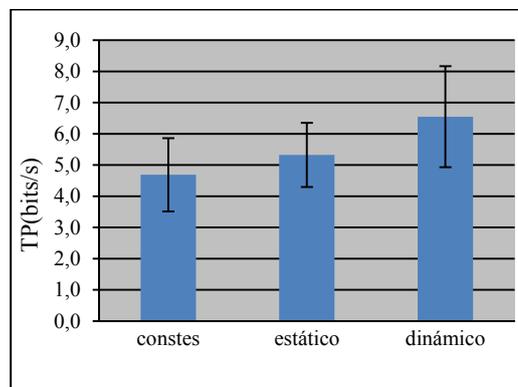


Figura 7.31. Promedio de la velocidad de transmisión para cada combinación de escalado.

<i>D-W</i>	Tiempo(s)			We(mm)			TP(bits/s)		
	const.	estático	dinámico	const.	estático	dinámico	const.	estático	dinámico
30-4	18,38	15,83	15,62	1,65	2,00	1,63	5,16	5,31	5,71
30-1	27,19	26,27	25,83	0,56	0,48	0,42	4,46	4,69	5,00
150-4	28,90	22,32	18,72	2,06	2,26	1,39	4,62	5,65	7,42
150-1	38,36	30,29	21,67	0,47	0,49	0,42	4,51	5,63	8,06

Tabla 7.6. Promedio del tiempo de movimiento, ancho equivalente y velocidad de transmisión para cada *ID* y cada combinación de escalas.

En la Figura 7.32 se recoge el resultado del test de evaluación subjetiva del ensayo de conexión multidireccional realizado sobre los 18 sujetos y normalizado entre 1 y 10. Tras el test de Kruskal-Wallis se observa diferencia significativa en los promedios sobre los cuatro parámetros (Fatiga $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 10.7$, $p = 0.005$; Precisión $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 18.9$, $p < 10^{-4}$; Velocidad $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 21$, $p < 10^{-4}$; Frustración $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 21.8$, $p < 10^{-4}$; Atención $\Rightarrow \chi^2_{2,51} = 21.1$, $p < 10^{-4}$), aunque no existe diferencia significativa en la fatiga física entre los métodos de escalado estático y dinámico, existe una clara inclinación hacia el escalado motor dinámico en términos de menor frustración y atención requerida, y de mayor precisión y velocidad percibida.

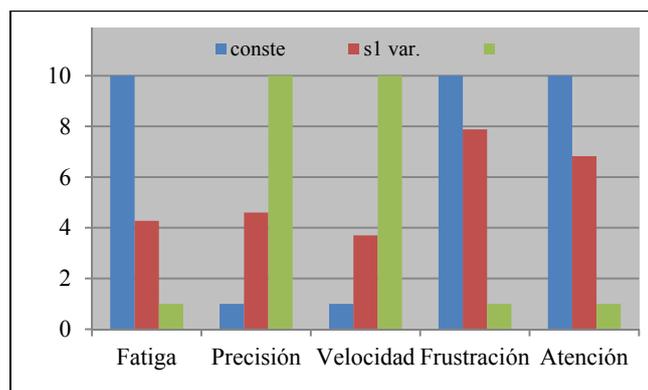


Figura 7.32. Análisis de la evaluación subjetiva en el ensayo de conexión multidireccional.

7.1.4. Comparación de dispositivos de interfaz

A continuación se procederá a realizar un test sobre el impacto de los métodos de escalado motor sobre distintos tipos de dispositivos de interfaz de entrada, concretamente se compararán el ratón (como referencia, ya que es el empleado en las anteriores pruebas), una bola trazadora, un joystick 3d y un joystick convencional de palanca, ver Figura 7.33a, b, c y d respectivamente.

Dado que estos dispositivos corresponden al espacio motor solo se contemplará el efecto de la escala motora, que al igual que en el apartado anterior se observará el efecto en cada dispositivo comparando el escalado constante, el estático y el dinámico. El experimento se lleva a cabo sobre 10 sujetos, 9 hombres y 1 mujer entre 22 y 37 años pertenecientes al entorno universitario. Para evitar sobrecargar el número de pruebas, los ensayos elegidos son: el experimento conexión unidireccional y el de trazado multidireccional, utilizando el mismo procedimiento desarrollado anteriormente y repitiéndolo para los cuatro dispositivos. Para evitar la influencia de la práctica y la fatiga se intercalan descansos entre las

7.1. Interacción persona-ordenador

pruebas y cada vez que se ensaya un dispositivo diferente, mezclando el orden de los ensayos y de los dispositivos empleados.



a) Logitech G9 Laser Mouse



b) Logitech TrackMan® Marble®



c) 3Dconnexion SpaceNavigator®



d) Trust Joystick GM-2500

Figura 7.33 Dispositivos de interfaz empleados en el ensayo.

7.1.4.1. Ensayo de conexión unidireccional

Los 10 sujetos ensayan para cada dispositivo 3 combinaciones de distancia y dos anchos de objetivo para un total de 6 *ID*. El número de muestras en este ensayo es de: 3 combinaciones de escala \times 6 *ID* \times 5 repeticiones \times 10 sujetos \times 4 dispositivos = 3600 muestras. Se analiza el tiempo de ejecución y el *TP* para cada uno de los casos, el resultado tras el análisis de la varianza y el test de comparación múltiple se muestra en la Figura 7.34 y 7.35 respectivamente.

Existe diferencia significativa entre los tres métodos de escalado en todos los dispositivos en el tiempo de ejecución (Ratón $\Rightarrow F_{2,717} = 79$, $p < 10^{-4}$; Joystick $\Rightarrow F_{2,717} = 23$, $p < 10^{-4}$; TrackBall $\Rightarrow F_{2,717} = 27$, $p < 10^{-4}$; Joy3D $\Rightarrow F_{2,717} = 75$, $p < 10^{-4}$) y el *TP* (Ratón $\Rightarrow F_{2,717} = 61$, $p < 10^{-4}$; Joystick $\Rightarrow F_{2,717} = 51$, $p < 10^{-4}$; TrackBall $\Rightarrow F_{2,717} = 31$, $p < 10^{-4}$; Joy3D $\Rightarrow F_{2,717} = 62$, $p < 10^{-4}$), ver Tabla 7.7. El *TP* obtenido en el escalado estático aumenta respecto el escalado constante entre un promedio de un 18% en el ratón hasta un 48% en el joystick 3D, y el escalado dinámico respecto al estático entre un 32% en el trackball y un 95% en el joystick 3D, ver Figura 7.36. La Tabla 7.7 recoge los tiempos promedio de ejecución y el *TP* para cada combinación de *D* y *W*.

En modo constante el dispositivo que muestra mayor velocidad de *TP* en el ratón con 5 bits/s de promedio, siendo el joystick el de menor velocidad con 2 bits/s. Gracias a los métodos de escalado el *TP*

del joystick puede alcanzar en promedio valores similares (5.5 bits/s) al obtenido con el ratón a escala constante. De hecho pueden observarse combinaciones de D y W en donde algunos dispositivos se comportan mejor que otros, en cuanto al tiempo de ejecución y TP , gracias a la inclusión de las funciones de escala.

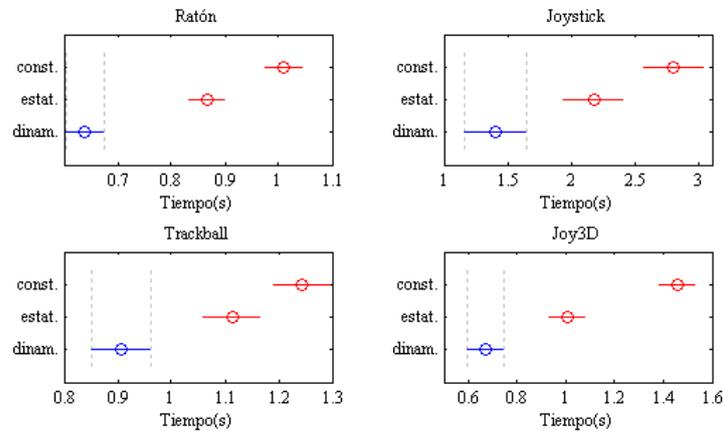


Figura 7.34. Tiempo promedio de ejecución para todos los datos en las combinaciones de escala constante, estática y dinámica para los cuatro dispositivos.

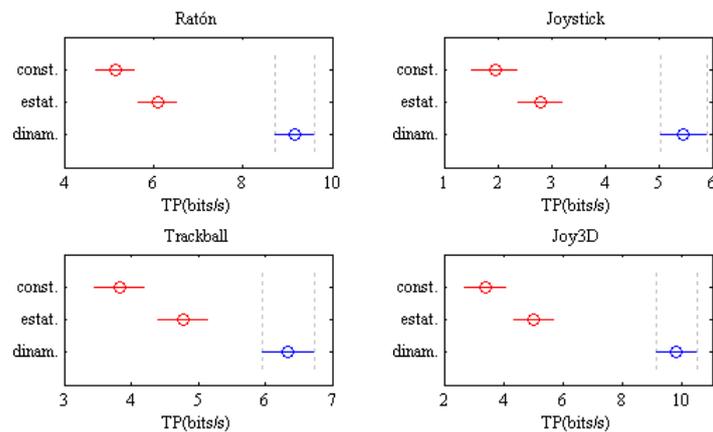


Figura 7.35. Promedio de la velocidad de transmisión TP para todos los datos en las combinaciones de escala constante, estática y dinámica para los cuatro dispositivos.

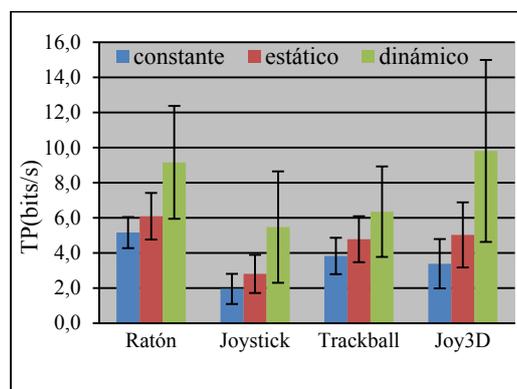


Figura 7.36. Comparación de los valores promedio de la velocidad de transmisión TP para todos los datos en las combinaciones de escala constante, estática y dinámica para los cuatro dispositivos.

7.1. Interacción persona-ordenador

			Tiempo(s)			TP(bits/s)			
<i>D</i>	<i>W</i>	<i>ID</i>	constante	estático	dinámico	constante	estático	dinámico	
Ratón	20	8	1,81	0,502	0,490	0,459	5,114	5,043	7,137
	20	2	3,46	0,926	0,907	0,673	4,574	5,004	6,716
	100	8	3,75	0,839	0,661	0,617	5,296	7,102	8,411
	200	8	4,70	1,006	0,831	0,665	5,477	6,723	9,816
	100	2	5,67	1,253	1,158	0,616	5,357	5,703	11,038
	200	2	6,66	1,511	1,163	0,720	5,141	6,986	11,840
	<i>Promedio</i>			<i>1,006</i>	<i>0,868</i>	<i>0,625</i>	<i>5,160</i>	<i>6,093</i>	<i>9,160</i>
Joystick	20	8	1,81	1,497	1,098	0,927	1,651	2,532	4,230
	20	2	3,46	2,961	1,809	1,441	1,582	2,530	3,280
	100	8	3,75	2,589	1,685	0,756	2,664	3,232	8,259
	200	8	4,70	2,761	1,989	1,148	2,282	3,383	6,921
	100	2	5,67	4,243	2,960	1,906	1,796	2,512	4,741
	200	2	6,66	3,781	2,587	1,511	1,729	2,648	5,405
	<i>Promedio</i>			<i>2,972</i>	<i>2,021</i>	<i>1,281</i>	<i>1,951</i>	<i>2,806</i>	<i>5,473</i>
TrackBall	20	8	1,81	0,739	0,713	0,688	2,793	3,997	4,323
	20	2	3,46	1,068	0,993	0,976	3,780	4,271	4,601
	100	8	3,75	1,114	1,002	0,749	3,964	4,958	6,900
	200	8	4,70	1,357	1,077	0,902	4,064	5,281	7,451
	100	2	5,67	1,534	1,322	0,974	4,148	4,937	6,962
	200	2	6,66	1,803	1,500	1,041	4,198	5,226	7,846
	<i>Promedio</i>			<i>1,269</i>	<i>1,101</i>	<i>0,888</i>	<i>3,824</i>	<i>4,778</i>	<i>6,347</i>
Joy3D	20	8	1,81	0,766	0,508	0,471	3,101	4,166	6,561
	20	2	3,46	1,621	1,051	0,611	2,372	3,876	8,749
	100	8	3,75	0,940	0,790	0,451	4,549	6,093	13,044
	200	8	4,70	1,431	0,867	0,585	4,003	6,263	13,245
	100	2	5,67	1,867	1,400	0,724	3,290	5,119	10,011
	200	2	6,66	2,401	1,564	1,193	2,983	4,653	7,267
	<i>Promedio</i>			<i>1,504</i>	<i>1,030</i>	<i>0,673</i>	<i>3,383</i>	<i>5,028</i>	<i>9,813</i>

Tabla 7.7. Promedio del tiempo de movimiento y velocidad de transmisión para cada *ID* y cada combinación de escalas para cada uno de los dispositivos.

7.1.4.2. Ensayo de trazado multidireccional

Los 10 sujetos ensayan para cada dispositivo sobre el ensayo de trazado sobre un túnel circular. Se compara el escalado dinámico de navegación con el escalado constante. Se ensayan 2 diámetros *D* de 40 y 100mm con dos diámetros *C* del objeto de 4 y 7mm manteniendo el ancho del túnel a 10mm. El número de muestras en este ensayo es de: 2 métodos de escala \times 4 *ID* \times 5 repeticiones \times 10 sujetos \times 4 dispositivos = 1600 muestras. Se analiza el tiempo de ejecución, el *TP* y el número de fallos para cada uno de los casos. El resultado tras un *t-test*, da diferencia significativa entre las medias para el tiempo de ejecución (Ratón $\Rightarrow p = 10^{-3}$, *ic* = [3.48, 15.67]; Joystick $\Rightarrow p = 10^{-3}$, *ic* = [9.07, 33.2]; Trackball $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [12.8, 28.5]; Joy3D $\Rightarrow p = 0.002$, *ic* = [1.66, 7.07]), el número de fallos (Ratón $\Rightarrow p = 10^{-3}$, *ic* = [2.47, 8.98]; Joystick $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [4.56, 10.04]; Trackball $\Rightarrow p = 10^{-3}$, *ic* = [2.28, 8.37]; Joy3D $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [2.31, 6.44]) y el *TP* (Ratón $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [-32.4, -16.3]; Joystick $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [-12.9, -5.1]; Trackball $\Rightarrow p < 10^{-4}$, *ic* = [-16.8, -7.6]; Joy3D $\Rightarrow p = 10^{-3}$, *ic* = [-34, -9.1]) en los cuatro dispositivos.

Las Figuras 7.37 a 7.39 muestran los valores promedios del tiempo de ejecución, número de fallos y TP de forma comparativa entre el escalado dinámico y constante para los cuatro dispositivos, cuyos valores para cada ID se recogen en la Tabla 7.8.

El escalado permite disminuir el tiempo de ejecución con lo que el TP aumenta en todos los casos, desde un promedio de un 51% para el joystick 3D hasta un promedio de un 98% en el *trackball* reduciéndose casi por completo el número de fallos de ejecución. A destacar la mejora en la ejecución obtenida en el joystick de palanca de difícil control, debido a la presencia de histéresis en la posición de reposo y la fuerza de accionamiento necesaria para su control, el método de escalado proporciona un TP un 71% superior con una importante reducción de fallos.

El accionamiento particular del *trackball* hace dificultoso el describir trayectorias circulares con precisión debido al continuo cambio entre los dedos para ir cambiando la dirección y lanza valores similares de rendimiento que el joystick de palanca, pero gracias al escalado dinámico se dobla la velocidad del TP . El joystick 3D de tipo isométrico es el que proporciona la mayor eficiencia y eficacia a escalas constantes, lo que lo hace un dispositivo adecuado para tareas de navegación, y con el escalado dinámico la tarea se hace aún más fluida al reducirse el tiempo de ejecución y número de fallos.

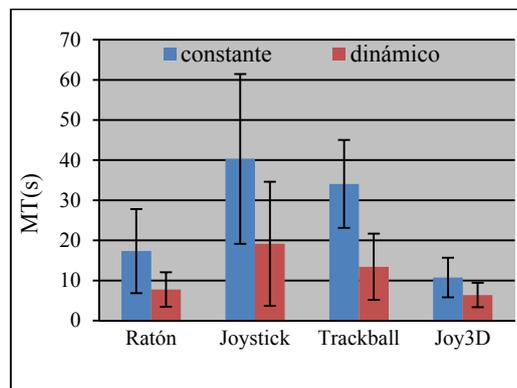


Figura 7.37. Comparación de los valores promedio del tiempo de ejecución para todos los datos en las combinaciones de escala constante y dinámica para los cuatro dispositivos.

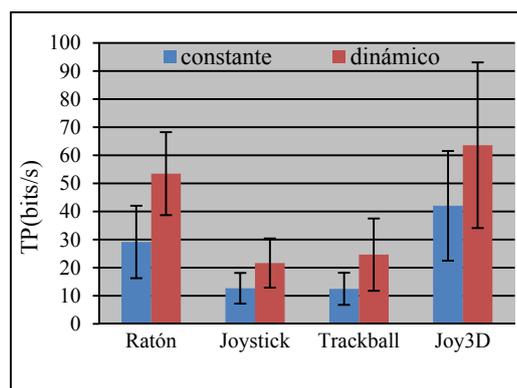


Figura 7.38. Comparación de los valores promedio de la velocidad de transmisión TP para todos los datos en las combinaciones de escala constante y dinámica para los cuatro dispositivos.

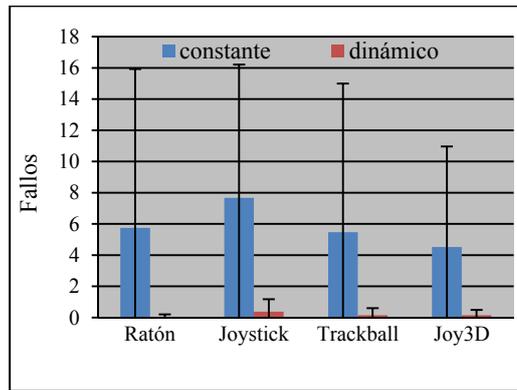


Figura 7.39. Comparación de los valores promedio del número de fallos de ejecución para todos los datos en las combinaciones de escala constante y dinámica para los cuatro dispositivos.

	<i>D</i>	<i>K-B</i>	<i>ID</i>	Tiempo(s)		TP(s)		Fallos	
				constante	dinámico	constante	dinámico	constante	dinámico
Ratón	40	6	21	5,83	4,13	26,28	44,71	4,80	0,10
	40	3	42	13,56	6,94	22,81	40,91	8,80	0,00
	100	6	52	11,26	7,76	40,74	56,93	1,00	0,00
	100	3	105	38,66	12,19	26,73	71,27	8,40	0,00
	<i>Promedio</i>			<i>17,33</i>	<i>7,75</i>	<i>29,14</i>	<i>53,46</i>	<i>5,75</i>	<i>0,03</i>
Joystick	40	6	21	24,35	12,54	11,07	17,20	2,30	0,30
	40	3	42	39,72	17,26	9,01	17,29	11,90	0,50
	100	6	52	37,28	20,41	13,78	22,41	4,40	0,30
	100	3	105	59,86	26,43	16,73	29,67	12,10	0,40
	<i>Promedio</i>			<i>40,30</i>	<i>19,16</i>	<i>12,65</i>	<i>21,64</i>	<i>7,68</i>	<i>0,38</i>
TrackBall	40	6	21	15,32	7,42	12,98	20,41	1,20	0,20
	40	3	42	30,24	10,77	9,70	20,39	7,20	0,30
	100	6	52	30,88	14,92	13,99	27,42	1,10	0,00
	100	3	105	59,82	20,55	13,19	30,34	12,40	0,10
	<i>Promedio</i>			<i>34,06</i>	<i>13,41</i>	<i>12,46</i>	<i>24,64</i>	<i>5,48</i>	<i>0,15</i>
Joy3D	40	6	21	5,64	4,23	31,01	41,57	2,10	0,00
	40	3	42	8,61	5,35	39,04	45,23	8,40	0,20
	100	6	52	9,27	6,47	49,62	80,02	1,10	0,10
	100	3	105	19,43	9,45	48,43	87,57	6,50	0,30
	<i>Promedio</i>			<i>10,74</i>	<i>6,38</i>	<i>42,03</i>	<i>63,60</i>	<i>4,53</i>	<i>0,15</i>

Tabla 7.8. Promedio del tiempo de movimiento, velocidad de transmisión y número de fallos para cada *ID* y cada combinación de escalas para cada uno de los dispositivos.

7.2. Tarea de teleoperación 2D

Con el objetivo de evaluar el efecto de las funciones de escalado dinámico en un interfaz de teleoperación, se realiza un experimento donde se compara la teleoperación manual con la teleoperación directa y la teleoperación asistida.

La tarea consiste en una manipulación de una clavija cilíndrica metálica a través de un circuito compuesto de barreras metálicas, paralelas en tramos rectos, curvos, diagonales y espirales, de diferentes anchuras de paso, ver Figuras 7.40-41.

El grupo de participantes voluntarios está formado por 8 personas habituadas al uso de ordenador, con edades comprendidas entre 20 y 39 años, hombres pertenecientes al entorno universitario.



Figura 7.40. Circuito test.



Figura 7.41. Detalle de la clavija en el interior del circuito.

7.2.1. Entorno de experimentación

Una clavija cilíndrica de 7 mm de diámetro y 65 mm de largo se acopla al extremo terminal de un robot Staubli RX60 de 6 grados de libertad. El dispositivo de interfaz de entrada empleado es un joystick de 6 grados de libertad (SpaceNavigator 3DConnexion), con el cual el operador puede mover el extremo terminal del robot de forma incremental. Una cámara Gigabit Ethernet (JAI CM-200 GE) de 1628x1236 píxeles de resolución y provista de un objetivo de 8 mm de distancia focal es colocada en un trípode y orientada hacia el circuito de prueba. Ver Figuras 7.42-43.

La interfaz visual se visualiza en una pantalla TFT de 14" con una resolución de 1280x800 píxeles. El espacio visual se configura para que el operador observe en el monitor (a una distancia de unos 400 mm) el entorno de trabajo con un tamaño aparente similar al que observa de forma directa a ojo desnudo (a una distancia de unos 800 mm), de esta manera se tiene una escala inicial visual de 1:1. La aplicación corre sobre un PC portátil Intel Core 2 Duo a 2.4 GHz.

Una segunda clavija es utilizada para la operación manual. Ambas clavijas y las barras metálicas se conectan al ordenador a través de una tarjeta de entradas/salidas digitales con el objetivo de poder captar cuando la clavija toca físicamente a las barreras del circuito.

7.2. Tarea de teleoperación 2D

El sistema se calibra para corresponder los tres espacios visual, motor y de trabajo. Esta calibración se realiza utilizando un conjunto de 28 puntos, moviendo el elemento terminal mediante el joystick y clicando sobre la pantalla en el lugar donde se visualiza el EE. La imagen se segmenta manualmente para diferenciar las barreras con el espacio libre. Aunque la imagen se proyecta sobre una pantalla 2D, la tercera dimensión se representa mediante una barra deslizante vertical, indicando la profundidad (Figura 7.44). Dada la naturaleza bidimensional de la tarea, se toman tres puntos del entorno para definir el plano del circuito por donde se desplazará el EE del robot.

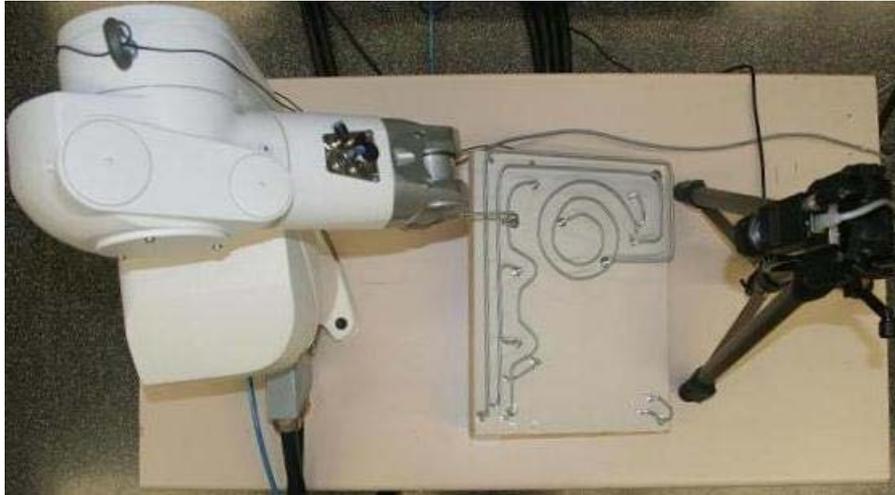


Figura 7.42. Vista superior del robot el circuito y la cámara.

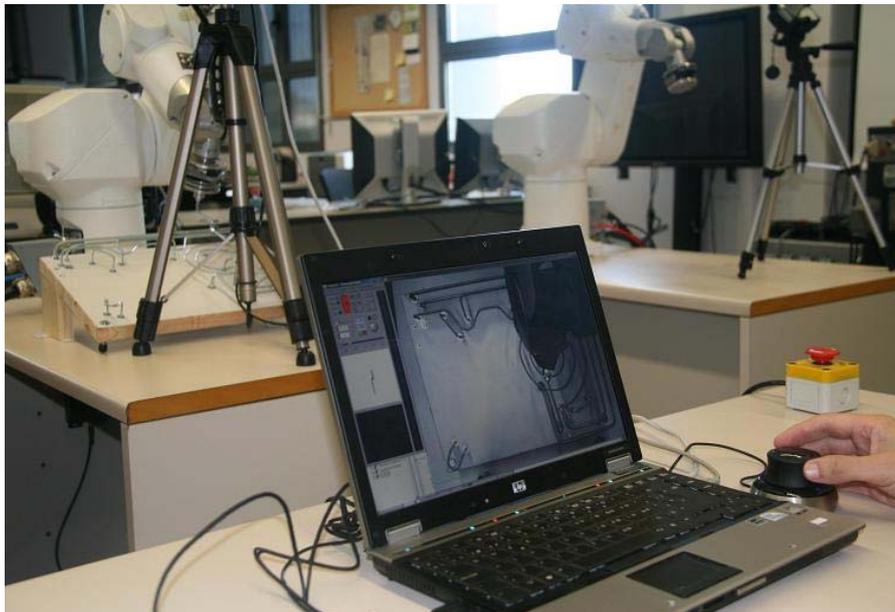


Figura 7.43. Punto de vista del operador.

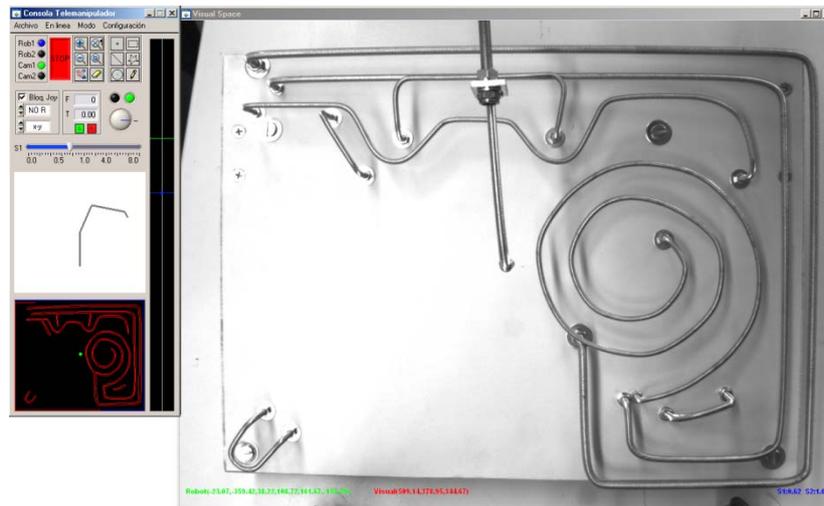


Figura 7.44. Entorno visual de la interfaz. A la izquierda una consola donde el rectángulo vertical muestra la magnitud de profundidad.

7.2.2. Operación manual

Preparado el sistema, el primer test consiste en realizar un conjunto de movimientos sobre el circuito de forma manual. En primer lugar, cada sujeto debe mover la clavija a lo largo del camino recto más largo del circuito (Figura 7.45), con una longitud de 360 mm y una anchura de 12 mm, lo que resulta en una holgura de 5mm para la clavija de 7 mm. Se realizan el movimiento (ida y vuelta) repitiéndolo 10 veces. Se mide en cada caso el tiempo total promedio en realizar el camino y el número de fallos por colisión con las barreras del camino.



Figura 7.45. Ejecución manual sobre el circuito.

Al sujeto se le informa que debe realizar esta prueba lo más rápidamente posible y cometiendo el menor número de fallos posible. Finalmente se realiza el recorrido completo, el cual consiste en una ruta con una longitud total de 2910 mm de rectas, curvas, una espiral y un par caminos libres con movimiento rápido. Esta prueba realizada lo más rápidamente posible con el menor número de fallos, se realiza dos veces.

7.2.3. Modo teleoperado

Después de la ejecución manual, cada sujeto repite el mismo test en modo teleoperado, directo y asistido. Se mezcla el orden de ejecución entre los dos modos de operación entre los sujetos de experimentación para amortiguar el efecto de aprendizaje sobre los resultados. Antes del inicio del test, cada sujeto toma

7.2. Tarea de teleoperación 2D

unos minutos para adaptarse a la interfaz, especialmente al joystick (debido a su peculiar forma de trabajar), moviendo el EE del robot en diferentes direcciones sobre una zona libre de movimiento. Durante la ejecución, las posiciones del EE sobre el VS se registran cada 0.2 segundos para poder determinar las velocidades en cada uno de los tramos así como los lugares donde se produce colisión. Al final de cada test se realiza un breve cuestionario a cada sujeto para poder evaluar cómo perciben cada modo de trabajo.

En ambos modos el escalado visual permanece constante. La escala motora permanece constante en el modo directo. En el modo asistido la escala motora evoluciona en modo dinámico de navegación, ecuaciones (5.136-139) y (6.8).

7.2.4. Resultados

En la Figura 7.46 se muestra el resultado del tiempo de medio de ejecución de todos los participantes en la ejecución del camino recto de 360 mm. Los dos modos de teleoperación directo y asistido muestran una reducción en el número de fallos respecto al modo manual, más acusado en el modo asistido ($F_{2,237} = 309, p < 10^{-4}$). El modo directo muestra una ejecución más lenta comparada con el modo manual ($F_{2,237} = 63, p < 10^{-4}$), pero el modo asistido lanza valores similares del tiempo ejecución con respecto al modo manual, no habiendo diferencia significativa.

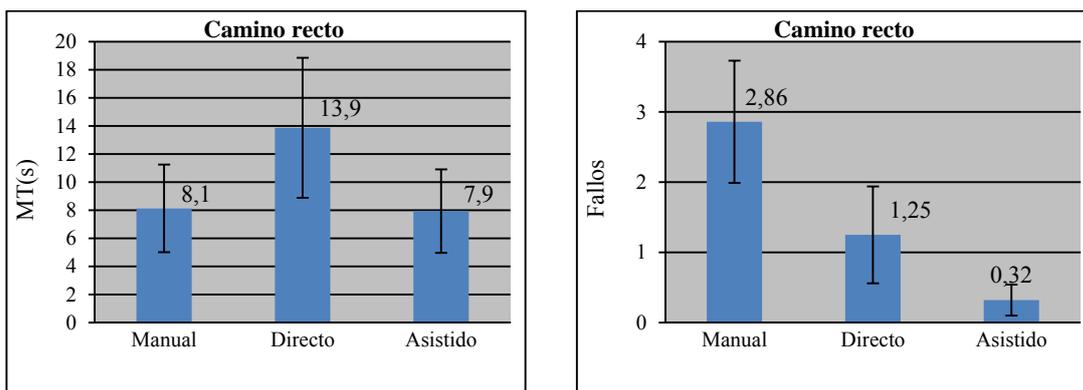


Figura 7.46. Promedio del tiempo de ejecución y N° de fallos del Experimento de seguimiento del camino recto.

Los resultados obtenidos en el experimento sobre el circuito completo se muestran en la Figura 7.47, el tiempo promedio de ejecución y numero de fallos promedio tras 5 ejecuciones. Como se observó en la prueba anterior, el promedio de fallos obtenido en el modo de teleoperación asistido se reduce significativamente con respecto a los modos manual y directo ($F_{2,117} = 92, p < 10^{-4}$), y el tiempo promedio de ejecución ($F_{2,117} = 56, p < 10^{-4}$) es reducido un 40% con respecto al modo directo (T 95% ci [55,82], $p < 10^{-4}$).

Puede observarse que el tiempo total de operación en el modo asistido es más del doble que en el obtenido en el modo manual; no obstante resultó dificultoso para todos los participantes ejecutar la tarea manualmente con un número pequeño de fallos, incluso cuando la ejecución se realizaba muy lentamente en donde el temblor de la mano causaba mayor número de fallos.

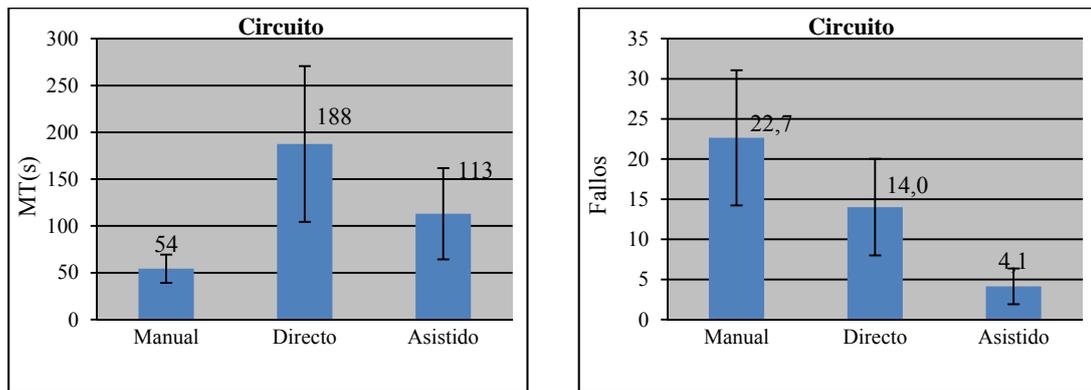


Figura 7.47. Promedio del tiempo de ejecución y N° de fallos del Experimento sobre el circuito completo.

Los lugares del circuito en donde se observa un mayor tiempo de ejecución durante la teleoperación es en los cambios de dirección, esto se observa analizando la información registrada durante la ejecución del ensayo. Una muestra representativa es la obtenida en la sección del circuito compuesta por una espiral, la cual presenta un cambio continuo en la dirección.

El tiempo promedio obtenido en el modo manual es de 8.5 s (SD = 1.6), que crece hasta 31.9 s (SD = 10.6) en modo directo, y a 19.4 s (SD = 5.7) en modo asistido. El principal motivo de esas diferencias en los tiempos de ejecución entre los modos manual y teleoperado reside en el particular modo de funcionamiento del joystick. No obstante se ha demostrado que el modo asistido puede mejorar la interfaz de teleoperación en términos de tiempo y precisión. Una breve encuesta realizada al final de la experimentación sobre la preferencia entre los modos directo y asistido mostró un 100% de preferencia hacia el modo asistido.

7.3. Tarea de teleoperación 3D

En esta sección se describe un experimento llevado a cabo en un entorno 3D de teleoperación precisa. El objetivo es evaluar el efecto combinado de las escalas visual, motora y el *panning* en la interfaz de teleoperación asistida y comparar el efecto sobre la eficiencia y eficacia con respecto a la teleoperación directa.

La tarea consiste en insertar un fino hilo en tres agujas de coser de tamaños diferentes, de forma consecutiva, ver Figuras 7.48-49. El paso efectivo de las agujas es de 0.6mm.

El grupo de participantes voluntarios está formado por 8 personas habituadas al uso de ordenador, con edades comprendidas entre 23 y 56 años, 7 hombres y 1 mujer, pertenecientes al entorno universitario.

7.3. Tarea de teleoperación 3D

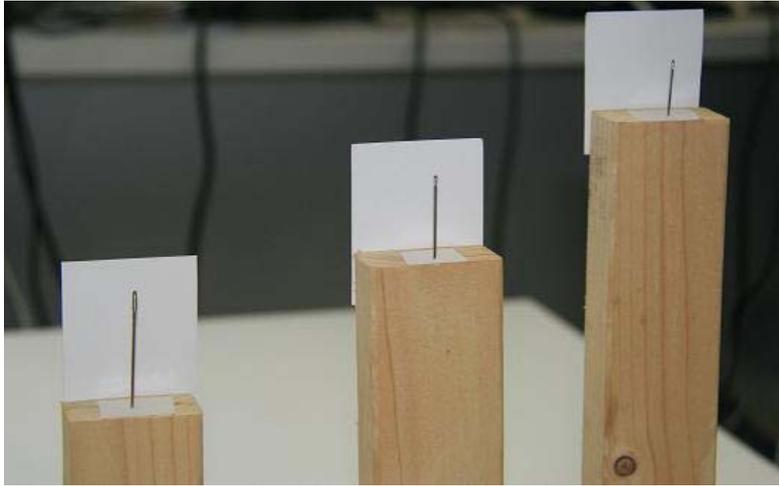


Figura 7.48. Tarea de inserción sobre tres agujas de distinto tamaño.

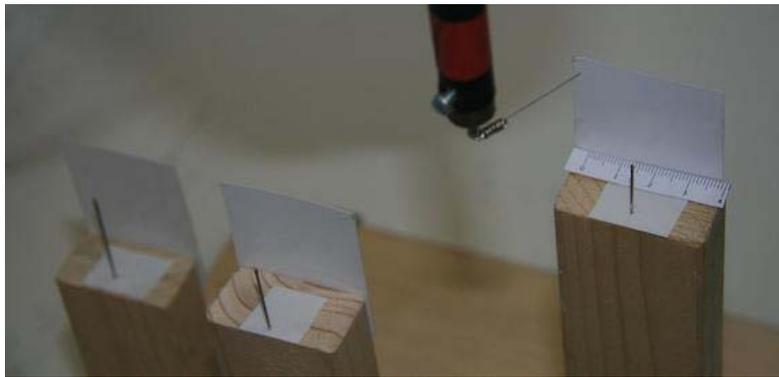


Figura 7.49. Detalle del hilo metálico colocado en el ET del robot.

7.3.1. Entorno de experimentación

Un hilo de acero de 0.3 mm de diámetro y 30 mm de largo se acopla al extremo terminal de un robot ABB IR140 de 6 grados de libertad. El dispositivo de interfaz de entrada empleado es un joystick de 6 grados de libertad (SpaceNavigator 3DConnexion), con el cual el operador puede mover el extremo terminal del robot de forma incremental en 3D. Una cámara Gigabit Ethernet (JAI CM-200 GE) de 1628x1236 píxeles de resolución provista de un objetivo de 6 mm de distancia focal es colocada en un trípode y orientada hacia el entorno de prueba. Esta cámara se encarga de capturar la imagen que forma el espacio visual. Una segunda cámara auxiliar, una webcam Logitech C310 de 720x540 píxeles de resolución, se coloca en el ET del robot para tener una imagen de detalle del hilo en el plano xz normal al plano xy del espacio visual. La interfaz visual se visualiza en una pantalla TFT de 14" con una resolución de 1280x800 píxeles. La aplicación corre sobre un PC portátil Intel Core 2 Duo a 2.4 GHz. Ver Figuras 7.50-51.

El sistema se calibra para corresponder los tres espacios visual, motor y de trabajo. Esta calibración se realiza utilizando un conjunto de 8 puntos, moviendo el elemento terminal mediante el joystick y clicando sobre la pantalla en el lugar donde se visualiza el ET. Una vez calibrado, se indica que puntos del espacio visual y trabajo corresponden a los objetivos, que serán los centros de los agujeros de las agujas. La información de profundidad se complementa mediante la imagen obtenida por la cámara instalada en el ET, una barra deslizante vertical, así como dos ventanas que representan los planos xy y xz en donde se proyectan las posiciones relativas de los objetivos y el robot, (Figura 7.52).

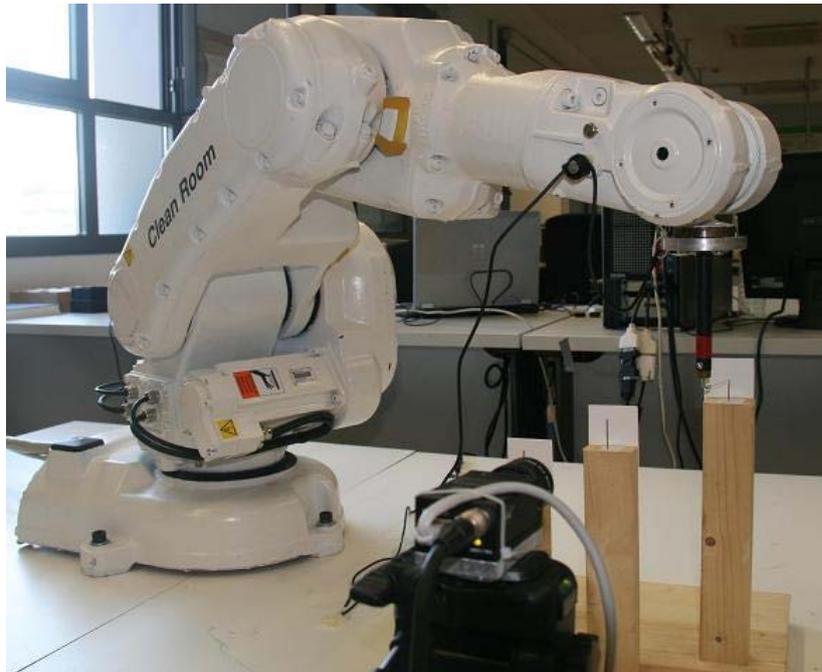


Figura 7.50. Disposición del robot, la cámara y el entorno de la tarea.



Figura 7.51. Detalle del ET del robot y la cámara auxiliar



Figura 7.52. Punto de vista del operador.

7.3. Tarea de teleoperación 3D

7.3.2. Procedimiento de los ensayos

La prueba consiste en desplazar el ET del robot de forma teleoperada empleando el joystick y observando la información visual disponible con el objetivo de insertar el hilo en cada una de las agujas desde una posición inicial alejada de los objetivos, pero visible en el espacio visual. El ensayo se realizará en modo directo y en modo asistido alternando ambos modos dos veces, el orden de ejecución de los modos será diferente entre los sujetos. La prueba debe realizarse en el mínimo tiempo posible y con la precisión necesaria para que el hilo se introduzca en la aguja sin que sufra ningún tipo de colisión o flexión. Antes de iniciar los ensayos se insta a los sujetos a realizar desplazamientos libres del robot con la interfaz de teleoperación para familiarizarse con el manejo y sensibilidad del conjunto, así como con los controles de escalado manual.

El sistema irá registrando el tiempo de ejecución así como la posición del ET cada 0.2 segundos, para así poder determinar el desplazamiento total y la precisión con la que se ha realizado. Adicionalmente se registran los instantes en los que el ET está en movimiento respecto a los que está en reposo.

En el modo directo el operador debe de seleccionar manualmente el valor de las escalas motora y visual, así como el *panning* si fuera necesario. Para el escalado visual se dispone de botones de “+” y “-” que permiten multiplicar o dividir el escalado x2 respectivamente. También existe la opción de realizar un zoom de ventana clicando y arrastrando sobre dos puntos de la imagen. El *panning* se realiza arrastrando sobre la imagen en la dirección deseada. Para el escalado motor, una barra horizontal permite modificar dicho escalado entre un valor comprendido entre 0.1 y 8.

El procedimiento en modo directo se inicia con un valor de escala motora alto y escala visual unitaria. El sujeto desplaza el ET hacia una zona cercana al primer objetivo, en donde reduce el escalado motor y aumenta el escalado visual. Con dichos ajustes se acercará al objetivo y, en función de los valores de escala anteriores, el sujeto puede considerar un tercer ajuste de escalas y *panning* o terminar la inserción. Una vez realizada la inserción, el sujeto retira el hilo de la aguja, aumenta el escalado motor y vuelve a escala visual unitaria para repetir el proceso con los otros dos objetivos.

En el modo asistido, el *panning*, y las escalas visual y motora, varían automáticamente en función de la distancia del ET respecto a los objetivos, la distancia de colisión y la velocidad. El escalado visual sigue una ley como la descrita en (5.29) y para el escalado motor (5.85), con $r_a = 20$, $r_b = 180$, $E_{a1} = 0.5$, $E_{b1} = 2$, $E_{a2} = 8$ y $E_{b2} = 1$. Con r_a y r_b expresados en coordenadas del espacio visual ($r_a = 20$ píxeles en el espacio visual a escala unitaria equivalen aproximadamente a 7.3mm en el espacio de trabajo). El flujo de *panning* es limitado actuando sobre la escala motora según (5.176). Adicionalmente la escala motora se modifica dinámicamente en la zona precisa introduciendo una función cono sobre cada objetivo, cuyo eje se encuentra sobre el centro de cada objetivo. En función de la distancia mínima y la distancia de colisión al cono se modificará la escala motora.

7.3.3. Resultados

En la Figura 7.53a se muestra el resultado del tiempo promedio de ejecución para todos los sujetos tras la ejecución del ensayo completo. Se ha diferenciado el tiempo que el ET se encuentra en movimiento con la zona más oscura de las barras del gráfico, y dicha proporción se recoge en la Figura 7.53b. El tiempo

promedio de ejecución en modo directo es de 219.6s (SD = 72.2s) y en modo asistido se reduce hasta 151.1s (SD = 64.7s) (T 95% ci [19,118], $p = 0.008$). Puede observarse que en modo asistido el tiempo en movimiento es del 90% respecto al 63% en modo directo, debido a que en modo directo el operador detiene el control del robot para poder realizar los cambios de escala, no así en modo asistido donde el movimiento es continuo en todo momento. Los tiempos promedio en estado de movimiento son similares en los dos casos (T 95% ci [-29,34], $p = 0.8$), pero el tiempo de ejecución en la zona precisa pasa de 31s (SD = 13.3) en modo directo a 18s en modo asistido (SD = 6.1s) (T 95% ci [5.3, 20.5], $p = 0.001$), Figura 7.54a. Gracias al control de la velocidad de navegación en el modo asistido la ejecución precisa de la inserción no solo se ejecuta más rápidamente sino que la desviación media en torno al eje situado en el objetivo se reduce significativamente de un promedio de 3.3mm (SD = 0.92mm) en modo directo a 0.98mm (SD = 0.09mm) en modo asistido (T 95% ci [18.5, 28.6], $p < 10^{-4}$), Figura 7.54b.

Tras los ensayos se realiza a cada sujeto una breve encuesta sobre la percepción de la precisión y velocidad de ejecución, siendo el método asistido el preferente por todos los sujetos.

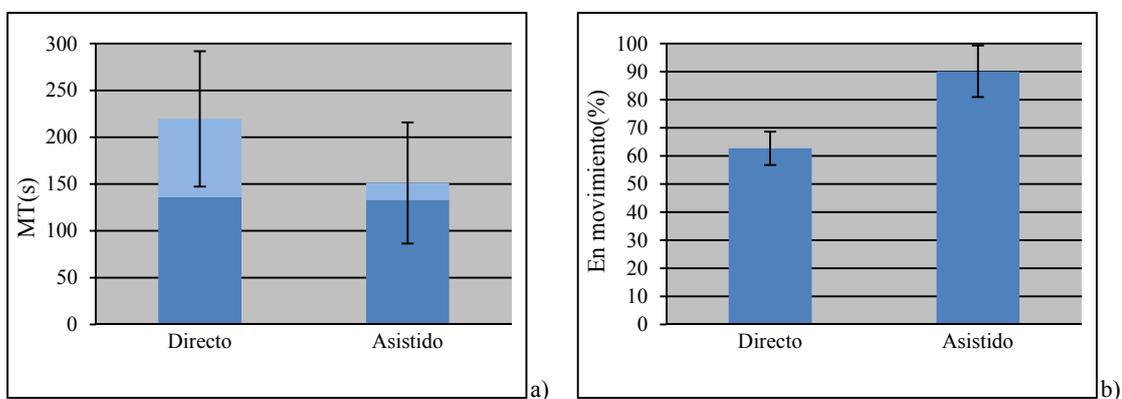


Figura 7.53. Tiempo promedio de ejecución y porcentaje de tiempo en movimiento.

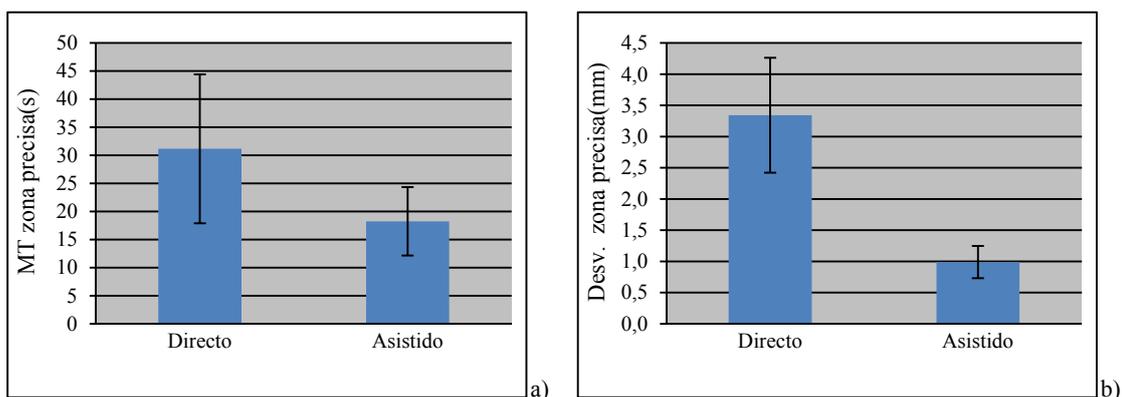


Figura 7.54. Tiempo promedio de ejecución y desviación media en torno a un eje central, en la zona precisa.

Parte IV Comentarios Finales

8. Conclusiones

En esta tesis se han analizado conceptos propios de los modelos psicomotores para poder establecer metodologías que aporten mejoras y nuevos procedimientos sobre la interacción persona máquina. Paul M. Fitts propuso en 1954 un modelo sobre la capacidad de información que la persona podía transmitir para realizar un movimiento de una amplitud dada. La ley que propuso ha sido ampliamente tratada en la interacción persona ordenador. En este trabajo se han aplicado algunos de los conceptos de estos modelos psicomotores introduciendo la interfaz con el ordenador como un elemento regulador del flujo de información entre persona y máquina.

La interfaz informática gestiona el flujo de información hacia la persona a través de las variables de escala. Las variables de escala son el vínculo entre los espacios que forman el triángulo persona-interfaz-máquina/robot, en donde intervienen el espacio visual, el motor y el de trabajo. Las variables de escala permiten que el sistema se adapte al rendimiento de la persona atendiendo a aspectos como la velocidad de ejecución y la precisión, para lograr que la tarea se efectúe eficaz y eficientemente.

Los modelos psicomotores muestran que la dificultad de una tarea viene determinada por la distancia a los objetos y la precisión deseada, sobre la cual influye del tamaño de dichos objetos o/y de los márgenes de movimiento. Las funciones de escala se diseñan no solo considerando estos factores de distancia y precisión sino otras variables relacionadas como son la distancia de colisión y la velocidad instantánea.

La distinción entre las distintas formas de órdenes de movimiento motor como el movimiento balístico o el de navegación, permite adecuar las técnicas de escalado según el contexto de la tarea. En esta tesis se utiliza un modelo simple de máquina de estados para prever los estados de movimiento motor y ajustar la escala motora para reducir la dispersión en la selección en torno a los objetos de interés. El análisis probabilístico de la dispersión de las órdenes de movimiento de la persona permite establecer relaciones entre las magnitudes del perfil de movimiento motor y los valores de desviación esperados. A partir de estas relaciones, obtenidas experimentalmente, pueden ajustarse las funciones de escalas para regular la velocidad de transmisión o *Throughput*.

El estudio de la dinámica de la respuesta de los movimientos rápidos de la mano permite crear modelos de comportamiento motor, que introducidos en una tarea de acciones definidas, como es el caso de la selección de botones e iconos en la interfaz de usuario, permiten prever el movimiento e intenciones del usuario y así puede anticiparse a ellos. En este trabajo se ha empleado este concepto para aplicarlo a las tareas de movimiento balístico con el objetivo de reducir la dispersión en torno al objetivo, observando la evolución del perfil de velocidad y actuando sobre la escala motora. Las tareas de navegación se benefician de la observación de la velocidad instantánea, y es un claro ejemplo del concepto de flujo de información a través de la interfaz desde y hacia el usuario u operador, el cual podrá ejecutar una tarea con una precisión dada a una velocidad máxima que podrá relacionarse con la velocidad de transmisión.

8.1. Contribuciones

El *panning* es una variable que debe tenerse en cuenta conjuntamente con las variables de escalado visual y motora. Durante el *panning* la imagen presentada al usuario deberá desplazarse a una velocidad acorde con la capacidad de percepción de la información visual de la persona.

La interfaz informática se beneficia de las técnicas de escalado y contempla aspectos de eficiencia y eficacia que son tratados habitualmente desde el punto de vista de la ergonomía. La norma ISO 9241-9 regula estos aspectos y describe procedimientos para evaluar los dispositivos de interfaz. En este trabajo se ha seguido las recomendaciones de esta norma para el diseño de los experimentos.

La aplicación práctica de la metodología de escalado sobre una interfaz de teleoperación debe contemplar una calibración que permita una transformación entre los espacios motor, visual y de trabajo. Esto permite establecer los valores de escalado en función del contexto de la tarea, disposición de los objetos de interés y el elemento terminal.

La evaluación experimental, tanto en el capítulo de aplicación de la metodología como en el capítulo de evaluación, ha permitido comparar y confirmar las hipótesis propuestas, y han servido de vehículo para caracterizar las funciones de escalado, poniendo valores concretos a las funciones teóricas y estableciendo que factores influyen en mayor o menor medida sobre el tiempo de tarea o la precisión.

8.1. Contribuciones

Acorde con los objetivos planteados al inicio de la memoria de la tesis a continuación se resumen las aportaciones que se han hecho durante el desarrollo de este trabajo de tesis:

- Se ha profundizado en el estudio de las técnicas de escalado aplicadas a la interfaz de usuario para el desarrollo de interfaces persona-máquina más eficientes y eficaces, y se ha demostrado que la metodología es útil en tareas de teleoperación asistida.
- Se ha establecido un modelo de la interfaz persona-máquina que relaciona el espacio del operador (espacio motor), el espacio visual y el espacio de trabajo (espacio de la tarea), a través de las funciones de escala motora y visual. El triángulo persona-interfaz-máquina/robot, con la interfaz como nexo de unión, permite un análisis de conjunto.
- Se ha establecido una metodología para caracterizar las funciones de escala motora y visual, así como el *panning*, en función de los requerimientos de la tarea, las características de la interfaz, empleando métodos probabilísticos apoyándose en modelos psicomotores establecidos.
- Se han creado modelos de comportamiento motor que contemplan la evolución dinámica del movimiento de las acciones del operador y permiten diferenciar los modos de funcionamiento de las funciones de escala.
- Se ha establecido una metodología en donde las escalas visual y motora trabajan de forma sinérgica para obtener un resultado más favorable que el obtenido por cada una de ellas por separado.
- Se ha evaluado experimentalmente, con diferentes grupos de ensayo, los métodos de escalado y su impacto sobre la eficiencia, eficacia y ergonomía en la interfaz de operador empleando las recomendaciones de la norma ISO 9241-9, así como su aplicación en una interfaz de teleoperación.

8.2. Trabajos futuros

El trabajo realizado en esta tesis sirve como punto de partida para ampliar la metodología de escalado, algunos de los aspectos a considerar serían:

- Establecer un procedimiento de autoajuste de las funciones de escala particular para cada usuario. El método propuesto ha realizado la evaluación de los resultados parametrizando las funciones de escala para un grupo de ensayo con resultados favorables. No obstante, se ha observado que algunos sujetos pueden beneficiarse de un ajuste particular de las funciones de escala lo que les permitiría ejecutar tareas con una eficiencia óptima.
- Introducir técnicas de visión por computador para el reconocimiento automático de los objetos de interés y el ET del robot que permitan una calibración automática entre los espacios motor, visual y de trabajo. La interfaz desarrollada para las pruebas experimentales emplea un método de calibración manual considerando que el entorno no cambia significativamente, si el entorno cambia en cierta medida un sistema de reconocimiento automático permitiría corregir dichos cambios.
- Integrar la metodología de escalado conjuntamente con otras técnicas o/y sistemas de ayuda a la teleoperación. El método propuesto contempla dos direcciones de acción, de la persona a la máquina vía interfaz motora, y de la máquina a la persona vía la interfaz visual. Sería interesante introducir la realimentación háptica y estudiar su efecto en el flujo de información.
- Experimentar la metodología sobre sistemas tridimensionales. Los ensayos realizados se han basado en la proyección de imágenes planas en el espacio visual. El experimento de teleoperación en 3D ha podido llevarse a cabo empleando múltiples imágenes o ayudas para complementar la dimensión de profundidad. Sería interesante aplicar el método en tareas de realidad virtual, realidad aumentada o teleoperación incorporando visión estereoscópica.

8.3. Publicaciones en el campo

Esta tesis ha permitido realizar la siguiente producción científica hasta el momento:

8.3.1. Artículos de revista

Autores: L.M. Muñoz Morgado, Alicia Casals Gelpí

Título: Improving the Human–Robot Interface Through Adaptive Multispace Transformation

revista : IEEE Transactions on Robotics (ISSN 1552-3098)

Volumen: 25 Páginas, inicial: 1208 final: 1213 Fecha: Octubre 2009

Lugar de publicación: USA

JCR 2.035

8.3. Publicaciones en el campo

Autores: L.M. Muñoz Morgado, Alicia Casals Gelpí, Manel Frigola, Josep Amat
Título: Motor-Model-Based Dynamic Scaling in Human–Computer Interfaces
revista : IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B (ISSN 1083-4419)
Volumen: 41 Páginas, inicial: 435 final: 447 Fecha: Abril 2011
Lugar de publicación: USA
JCR 2.674

8.3.2. Capítulos de libro

Autores: Josep Amat, Alicia Casals, Alexandre Monferrer, L.M. Muñoz Morgado, Manel Frigola
Título: Research in Underwater Robotics in the Automatic Control Department at the Technical University of Catalonia
Libro: Automation for the Maritime Industries
Páginas, inicial: 205 final: 226 Fecha: Noviembre 2004
Editorial: IAI-CSIC (ISBN 84-609-3315-6)
Lugar de publicación: España

Autores: L.M. Muñoz Morgado, Pedro Ponsa, Alicia Casals Gelpí
Título: Human-Computer Systems Interaction. Backgrounds and Applications 2 .“Design and Development of a Guideline for Ergonomic Haptic Interaction”
Libro: Advances in Soft Computing
Páginas, inicial: 15 final: 29 Fecha: Noviembre 2011
Editorial: Springer-Verlag
Lugar de publicación: USA

8.3.3. Contribuciones a congresos

Autores: J.Amat, L.M. Muñoz, M. Las Heras, P. Ridao
Título: Dextereus Teleoperation with Few Degrees of Freedom Arms
Tipo de participación: Poster
Congreso: International Advanced Robotics Program : Workshop on Underwater Robots
Publicación: Dextereus Teleoperation with Few Degrees of Freedom Arms
Lugar celebración: Rio de Janeiro-Brasil Fecha: 2001

Autores: J.Amat, A. Casals, L.M. Muñoz, M. Las Heras

Título: Dexterity Improvement in Teleoperation Through Computer Vision Based Automatic Correction

Tipo de participación: Poster

Congreso: 15th IFAC World Congress

Publicación: Dexterity Improvement in Teleoperation Through Computer Vision Based Automatic Correction

Lugar celebración: Barcelona

Fecha: Julio 2002

Autores: A. Casals, L.M. Muñoz, J.Amat

Título: Workspace Deformation Based Teleoperation for the increase of Movement Precision

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: IEEE Int. Conference on Robotics and Automation

Publicación: IEEE

Lugar celebración: Taipei-Taiwan

Fecha: Septiembre 2003

Autores: L.M. Muñoz, A. Casals, J.Amat

Título: Scale Dynamic Adaptation of the Local Space for Assisted Teleoperation

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: IEEE Int. Conference on Robotics and Automation

Publicación: IEEE

Lugar celebración: Nueva Orleans - EUA

Fecha: Abril 2004

Autores: L.M. Muñoz, A. Casals, J.Amat

Título: Improved micro-nano manipulation using object adapted space deformation

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: IEEE Int. Conference on Robotics and Automation

Publicación: IEEE

Lugar celebración: Barcelona

Fecha: Abril 2005

Autores: A. Casals, L.M. Muñoz, M. Frigola, J.Amat

Título: Assisted Teleoperation and Dependability

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: 2007 IARP International Workshop on Technical Challenges on Dependable Robots in Human Environments

Publicación: IEEE-IARP

Lugar celebración: Roma-Italia

Fecha: Abril 2007

Parte V Anexos

Anexo A. Glosario

- C-D Ratio Control-Display. Relación de movimiento entre el dispositivo de señalización del espacio de control o espacio motor y el movimiento resultante en el espacio visual. Es el recíproco de la escala motora.
- D Distancia al objetivo a seleccionar en una tarea de Fitts.
- D_1 Desplazamiento promedio del impulso inicial.
- D_M Desplazamiento total en el espacio de trabajo por efecto de la escala motora.
- D_V Desplazamiento total aparente en el espacio visual por efecto de la escala visual.
- D_{MV} Desplazamiento total en el espacio de trabajo resultante del efecto combinado de las escalas visual y motora.
- ε_{95} Error máximo de desplazamiento entorno al objeto para alcanzarlo con una probabilidad del 95%.
- E_a Valor de la escala constante en la zona precisa (E_{a1} para s_1 y E_{a2} para s_2).
- E_b Valor de la escala constante fuera del rango de acción (E_{b1} para s_1 y E_{b2} para s_2).
- e_p Error de precisión admitido en la tarea.
- e_T Error máximo de la teleoperación en el posicionamiento a un punto.
- ET Elemento Terminal.
- FIEO Flujo de Información de Entrada del Operador. Capacidad de la persona para procesar y reconocer la información visual que recibe.
- FISO Flujo de Información de Salida del Operador. Capacidad de la persona para generar una determinada cantidad de información motora.
- FMS Flujo Motor de Salida. Cantidad de información motora procedente del dispositivo de interfaz que se convertirá en órdenes de movimiento hacia la tarea.
- FVE Flujo de Información Visual de Entrada. Cantidad de información visual procedente de la tarea.
- Hf Vector de fuerza en la acción del movimiento del operador.
- GDL Grados de Libertad.
- ID Índice de Dificultad. En la ley de Fitts representa la cantidad de información en bits, necesaria para realizar un movimiento.
- IDe Índice de Dificultad Equivalente. Es el índice de dificultad obtenido tras un experimento de Fitts, donde el ancho del objetivo se sustituye por el ancho equivalente.
- ID_M Índice de Dificultad Motor. Es el índice de dificultad atendiendo al desplazamiento que se realiza en el espacio motor.

Anexo A. Glosario

ID_{MV}	Índice de Dificultad Motor-Visual. El índice de dificultad atendiendo el efecto combinado en el espacio visual y motor.
ID_V	Índice de Dificultad Visual. Es el índice de dificultad atendiendo únicamente al tamaño aparente de los objetos en el espacio visual.
IP	(Index of Performance) Índice de eficiencia en bits/s. Es el recíproco de la constante b en la ley de Fitts.
IPM	Interacción Persona-Máquina.
IPO	Interacción Persona-Ordenador.
K_1	Constante de proporcionalidad entre la desviación estándar del impulso inicial y la velocidad media del impulso inicial.
L_V	Rango máximo del espacio visual.
MT	(Movement Time), tiempo de ejecución de un movimiento.
MS	(Motor Space) Espacio Motor. Lugar donde se producen los movimientos del operador.
p	<i>Panning</i> . Variable de desplazamiento o barrido de la imagen.
F	Resolución del dispositivo interfaz.
r	Distancia mínima del cursor o ET al objeto de interés.
r_a	Zona precisa, distancia entorno al objeto de interés donde las escalas no cambian.
r_A	Distancia de activación. Distancia de la trayectoria del ET a los objetos de interés.
r_b	Zona de acción. Distancia al objeto de interés por debajo de la cual las escalas pueden cambiar.
r_D	Distancia en la dirección de movimiento o distancia de colisión.
R_p	Error de precisión en el espacio visual comprendido entre ω_p y ε_{95} .
S	Desviación estándar en el punto final del movimiento de una tarea de Fitts.
σ_1	Desviación estándar del desplazamiento tras el impulso inicial.
s_1	Escalado motor. Relación de movimiento entre el espacio motor y el espacio visual. Es el recíproco del ratio C-D.
s_{1D}	Escalado motor dinámico.
s_{1S}	Escalado motor estático.
s_2	Escalado visual. Relación de movimiento entre el espacio de trabajo y el espacio visual. Es el recíproco del factor de “zoom”.
t_0	Tiempo durante la fase de aceleración del impulso inicial.
T_1	Duración media del impulso inicial.
t_e	Instante estimado en que la velocidad en el espacio motor es cero tras el impulso inicial.
t_f	Instante en que la velocidad en el espacio motor es cero tras el impulso inicial.
T_H	Constante de tiempo de reacción del sistema de visión humano.

${}^M T_V$	Transformación homogénea del espacio visual al espacio motor.
${}^M T_H$	Transformación homogénea del espacio de la mano al espacio motor.
${}^V T_M$	Transformación homogénea del espacio motor al espacio visual.
${}^W T_M$	Transformación homogénea del espacio motor al espacio de trabajo.
${}^V T_W$	Transformación homogénea del espacio de trabajo al espacio visual.
${}^W T_V$	Transformación homogénea del espacio visual al espacio de trabajo.
${}^{V1} T_W$	Transformación homogénea del espacio de trabajo al espacio visual a escala unitaria.
${}^W T_{V1}$	Transformación homogénea del espacio visual a escala unitaria al espacio de trabajo.
${}^V T_{V1}$	Transformación homogénea del espacio visual a escala unitaria al espacio visual escalado.
${}^{V1} T_V$	Transformación homogénea del espacio visual escalado al espacio visual a escala unitaria.
TP	<i>Throughput</i> , medida en bits/s del tiempo empleado en ejecutar una tarea con un índice de dificultad determinado. También llamado “Velocidad de Transmisión”.
T_m	Periodo de muestreo.
V_1	Velocidad media del impulso inicial.
$V_{P_{MAX}}$	Velocidad máxima en el espacio motor sobre la cual se modifica la escala motora dinámica.
VS	(Visual Space) Espacio Visual. Lugar donde se proyecta la información visual.
V_U	Velocidad Umbral. Es el umbral de velocidad en el espacio motor entre un movimiento balístico y de navegación.
V_t	Velocidad de Transmisión. Véase <i>Throughput</i> .
${}^M \mathbf{V}$	Vector de velocidad en el espacio motor proyectado en la acción de movimiento del operador.
${}^V \mathbf{V}_n$	Vector de velocidad actual en el espacio visual.
W	Amplitud del objetivo a seleccionar en una tarea de Fitts.
W_e	Amplitud equivalente del objetivo. Para determinar el IDE el ancho del objetivo se sustituye por el ancho equivalente $W_e = 4.133 s_x$, con s_x la desviación típica de la distribución de las coordenadas de selección en la dirección del movimiento.
W_V	Amplitud del objetivo en el espacio visual.
W_M	Amplitud del objetivo en el espacio motor.
W_{MV}	Amplitud del objetivo resultante tras el efecto combinado de las escalas visual y motora.
WS	(<i>Working Space</i>) Espacio de Trabajo. Espacio de la tarea.
ω_p	Precisión requerida por la tarea en el espacio visual.
\mathbf{X}_C	Vector de posición del centro del escalado visual en el espacio visual.
x_f	Desplazamiento total estimado en el espacio motor.
\mathbf{X}_M	Vector de posición en el espacio motor.
X_{M0}	Desplazamiento hasta el instante donde la velocidad del impulso inicial es máxima.

Anexo A. Glosario

- x_{MT} Desplazamiento total en el espacio de trabajo.
- X_{MF} Desplazamiento total en el espacio motor tras el impulso inicial.
- x_p Desplazamiento en el instante donde se alcanza el valor máximo de velocidad.
- \mathbf{X}_V Vector de posición en el espacio visual.
- X_{MV} Desplazamiento total estimado en el espacio visual tras el impulso inicial.
- \mathbf{X}_W Vector de posición en el espacio de trabajo.
- ${}^V\mathbf{X}_n$ Vector de posición actual en el espacio visual.
- ${}^V\mathbf{X}_{n+1}$ Vector de posición, calculada, en el espacio visual.
- ${}^W\mathbf{X}_{n+1}$ Vector de posición, calculada, en el espacio de trabajo.

Anexo B. Calibración

En este anexo se describe el proceso de calibración llevado a cabo para la puesta en marcha de los experimentos de teleoperación descritos en el capítulo 7. Se describe como se obtienen las transformaciones de perspectiva y las transformaciones homogéneas entre los distintos espacios.

La transformación de perspectiva permite obtener las coordenadas de un punto de la imagen (del espacio visual) conocidas las coordenadas de un punto de la escena (espacio de trabajo). El proceso inverso se conoce como transformación inversa de perspectiva.

Dado un vector de coordenadas en el espacio de trabajo X_W de componentes x_W, y_W, z_W , y el vector correspondiente a las coordenadas en el espacio visual X_V y de componentes x_V, y_V, z_V , se tiene que la representación homogénea de estos vectores es:

$$X_W = \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad X_V = \begin{bmatrix} x'_V \\ y'_V \\ z'_V \\ s \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

donde x'_V, y'_V, z'_V son las coordenadas del punto en el espacio visual expresado de forma homogénea y s el factor de proporcionalidad, de tal forma que:

$$x_V = \frac{x'_V}{s} \quad y_V = \frac{y'_V}{s} \quad z_V = \frac{z'_V}{s} \quad (\text{B.2})$$

Las componentes del vector de coordenadas homogéneas en el espacio de trabajo coinciden con las componentes originales ya que el factor de proporcionalidad es 1. La matriz de transformación que relaciona ambos vectores es como sigue:

$$\begin{bmatrix} x'_V \\ y'_V \\ z'_V \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Desarrollando el producto matricial anterior se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} x'_V &= a_{11}x_W + a_{12}y_W + a_{13}z_W + a_{14} \\ y'_V &= a_{21}x_W + a_{22}y_W + a_{23}z_W + a_{24} \\ z'_V &= a_{31}x_W + a_{32}y_W + a_{33}z_W + a_{34} \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

$$s = a_{41}x_W + a_{42}y_W + a_{43}z_W + a_{44} \quad (\text{B.5})$$

Sustituyendo (B.5) en (B.2) y aplicando a las ecuaciones (B.4) resulta el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} a_{11}x_W + a_{12}y_W + a_{13}z_W + a_{14} - a_{41}x_Vx_W - a_{42}x_Vy_W - a_{43}x_Vz_W - a_{44}x_V &= 0 \\ a_{21}x_W + a_{22}y_W + a_{23}z_W + a_{24} - a_{41}y_Vx_W - a_{42}y_Vy_W - a_{43}y_Vz_W - a_{44}y_V &= 0 \\ a_{31}x_W + a_{32}y_W + a_{33}z_W + a_{34} - a_{41}z_Vx_W - a_{42}z_Vy_W - a_{43}z_Vz_W - a_{44}z_V &= 0 \end{aligned} \quad (\text{B.6})$$

Para resolver el sistema (B.6) se suele forzar una forma no homogénea de la matriz de (B.3) imponiendo que $a_{44} = 1$. Esto da un total de 15 incógnitas, dado que el sistema (B.6) consta de 3 ecuaciones se necesitan $m \geq 5$ puntos de calibración. A partir de los puntos de calibración, el sistema (B.6) se resuelve empleando un método de ajuste por mínimos cuadrados.

En una calibración donde las coordenadas de la imagen son bidimensionales, el sistema (B.6) se compondría de 2 ecuaciones, que daría lugar a 12 incógnitas y se resolvería utilizando 6 o más puntos. Dado que en la interfaz de teleoperación se desea la información de profundidad, deben introducirse de algún modo los valores de la profundidad de la imagen z_V para cada uno de los m puntos de calibración. Teniendo en cuenta que no se utiliza visión estereoscópica.

Los puntos de la escena, procedentes del espacio de trabajo, se obtienen a partir de las coordenadas del robot. Para ello se desplaza el robot por los m puntos necesarios que cubran el entorno de la tarea. A cada posición del robot le corresponde la propia en el espacio de la imagen, con lo que en cada una de estas posiciones se selecciona en la imagen la posición del *ET*, es decir a que pixel corresponde. La cuestión es que a cada pixel de una imagen plana le corresponden infinitas posiciones del *ET* unas más cercanas que otras al plano de la imagen, con lo que será necesario añadir la coordenada de profundidad visual correspondiente. Esto puede hacerse utilizando una segunda cámara, o bien utilizando alguna característica conocida de la geometría del entorno durante el proceso de calibración, siendo este último caso el procedimiento seguido.

La Figura B.1a muestra el modelo *pin-hole* de la cámara. Un punto en el espacio de la tarea se proyecta sobre el plano de la imagen a través del foco que se encuentra a una distancia λ del plano de la imagen a lo largo del eje óptico, esta es la distancia focal de la lente. Con este modelo, pueden relacionarse los puntos de la tarea con los puntos de la imagen. Si R es la distancia de un punto al origen del plano visual (Figura B.1b) y r es la distancia del mismo punto en el espacio de la tarea al eje óptico, por semejanza de triángulos se tiene:

$$\frac{R}{\lambda} = \frac{r}{Z - \lambda} \tag{B.7}$$

donde Z es la distancia en el espacio de la tarea del punto al plano de la imagen.

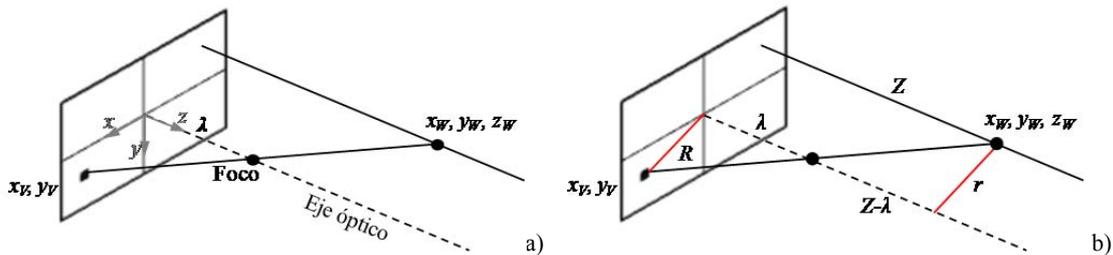


Figura B.1. Modelo *pin-hole*.

Si la distancia focal es desconocida, puede obtenerse conocidos dos puntos de la tarea y sus respectivos en el plano de la imagen, Figura B.2. Llámese a u la relación entre las distancias R y r , entonces:

$$u = \frac{r}{R} \quad (r \neq 0, R \neq 0) \tag{B.8}$$

$$u = \frac{Z - \lambda}{\lambda} \tag{B.9}$$

Para dos puntos conocidos, se tienen las relaciones u_1 y u_2 a partir de r_1, r_2, R_1 y R_2 . Entonces, a partir de (B.8-9), para cada u se tiene:

$$u_1 = \frac{r_1}{R_1} = \frac{Z_1 - \lambda}{\lambda} \quad (\text{B.10})$$

$$u_2 = \frac{r_2}{R_2} = \frac{Z_2 - \lambda}{\lambda} \quad (\text{B.11})$$

Z_1 y Z_2 no se conocen, pero sí la distancia ΔZ entre ambos, por lo tanto:

$$\Delta Z = |Z_2 - Z_1| \quad (\text{B.12})$$

$$\Delta Z = \lambda(u_2 + 1) - \lambda(u_1 + 1) \quad (\text{B.13})$$

$$\lambda = \frac{\Delta Z}{u_2 - u_1} \quad (\text{B.14})$$

Se desea que la variación de la profundidad visual z_V varíe de la misma manera que lo hace la distancia R en el plano visual a medida que los puntos se alejan del plano visual, es decir, que la derivada de la profundidad visual respecto la profundidad real sea igual a la derivada de las distancia en el plano visual respecto a la derivada en el plano real:

$$\frac{dz_V}{dZ} = \frac{dR}{dr} = \frac{\lambda}{Z - \lambda} \quad (\text{B.15})$$

$$z_V = \int \frac{\lambda}{Z - \lambda} dZ \quad (\text{B.16})$$

$$z_V = z_0 + \lambda \ln(Z - \lambda) \quad (\text{B.17})$$

donde z_0 se calcula para que z_V sea cero al punto más cercano al plano de la imagen. Por lo tanto, si u_0 es la relación r/R del punto más cercano al plano de la imagen, entonces:

$$Z_0 = \lambda(u_0 + 1) \quad (\text{B.18})$$

Si ΔZ_i es la distancia sobre el eje óptico de un punto i -ésimo, se tiene:

$$Z = Z_0 + \Delta Z_i \quad (\text{B.19})$$

Entonces a partir de (B.17-19):

$$z_0 = -\lambda \ln(Z_0 - \lambda) \quad (\text{B.20})$$

Los valores de cada ΔZ_i se obtienen a partir del producto escalar del vector de dirección del eje óptico en el espacio de la tarea y los vectores de cada uno de los i puntos, ver *Figura B.2*.

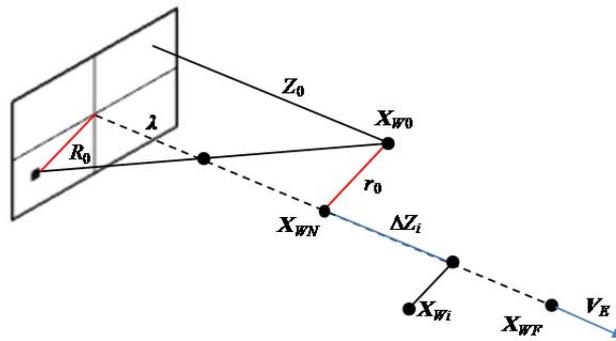


Figura B.2. Disposición de los puntos de calibración sobre el eje óptico.

Durante el proceso de calibración dos puntos del espacio de la tarea se hacen corresponder con el centro del plano de la imagen. De estos, el punto más cercano al plano de la imagen, llámese \mathbf{X}_{WN} es el que corresponde a la distancia Z_0 . Un punto cercano a \mathbf{X}_{WN} fuera del eje óptico será \mathbf{X}_{W0} . El punto más alejado al plano de la imagen que cae sobre el eje óptico se llamará \mathbf{X}_{WF} . El vector director del eje óptico en el espacio de la tarea será:

$$\mathbf{V}_E = \frac{\mathbf{X}_{WF} - \mathbf{X}_{WN}}{|\mathbf{X}_{WF} - \mathbf{X}_{WN}|} \quad (\text{B.21})$$

Las proyecciones de cada i -ésimo punto \mathbf{X}_{Wi} sobre el eje óptico se obtienen entonces:

$$\Delta Z_i = \mathbf{V}_E \cdot (\mathbf{X}_{Wi} - \mathbf{X}_{WN}) \quad (\text{B.22})$$

Anexo C. Cálculo de distancias

El cálculo de la distancia es un concepto que se aplica ampliamente en campos de la robótica como la planificación de trayectorias, evitar obstáculos, navegación autónoma, así como en modelización del entorno y otras disciplinas de CAD y gráficos por computador.

El concepto de distancia formalmente procede de la topología, donde se define un espacio métrico (M, d) como un conjunto M y una función $d: M \times M \rightarrow \mathcal{R}$ que cumplen las propiedades:

$$d(x, y) \geq 0 \text{ para todo } x, y \in M$$

$$d(x, y) = 0 \text{ si y solo si } x = y$$

$$d(x, y) = d(y, x) \text{ para todo } x, y \in M$$

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \text{ para todo } x, y, z \in M$$

Así a la distancia d también se le denomina métrica. Por ejemplo, la recta real, \mathcal{R} , es un espacio métrico con la métrica definida por $d(x, y) = |x - y|$. La conocida métrica o distancia euclídea, que en \mathcal{R}^3 se define con:

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + (x_3 - y_3)^2} \quad (\text{C.1})$$

que podría definirse como la distancia mínima entre dos puntos $p_1(x_1, y_1, z_1)$ y $p_2(x_2, y_2, z_2)$ del espacio. Esta mínima distancia también puede ser representada de forma vectorial, Figura C.1a, de la siguiente forma:

$$d_{\min} = |p_2 - p_1| = \sqrt{(p_2 - p_1) \cdot (p_2 - p_1)} \quad (\text{C.2})$$

Como se analiza en [Mortenson 1985] la mínima distancia entre dos puntos también puede determinarse en una curva abierta, como el camino más corto entre dos puntos a lo largo de la curva, Figura C.1b, o en el caso de una curva cerrada, Figura C.1c, existirán dos soluciones. Para hallar la distancia entre dos puntos a lo largo de una curva se calcula la longitud de arco. Esta distancia es útil en el cálculo de trayectorias. Por ejemplo, si tenemos una trayectoria en el espacio definida por

$$c(t) = (x(t), y(t), z(t))$$

La longitud de arco para $t_0 \leq t \leq t_1$, es

$$d = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{\|c'(t)\|^2} dt = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2 + [z'(t)]^2} dt \quad (\text{C.3})$$

La distancia mínima entre dos puntos en una superficie, Figura C.1d, o en un sólido, Figura C.1e, se determina encontrando las curvas geodésicas comunes que pasan por ambos puntos. Para esto, dada una curva c_s en una superficie S , en un punto p en la curva y la superficie, se construye el plano tangente T , ver Figura C.2. La curva c_T es la proyección ortogonal de c_s sobre T , pues bien, al vector curvatura de c_T en p se llama vector curvatura geodésica de c_s en p y se denota por k_g . Puede demostrarse que k_g es el vector proyección del vector curvatura k sobre T : $k = k_g + k_n$. Entonces, los candidatos a arcos de longitud mínima deben pertenecer a curvas a lo largo de las cuales se anula el vector de curvatura geodésica. Las curvas a lo largo de las cuales $k_g = 0$ reciben el nombre de líneas geodésicas o simplemente geodésicas.

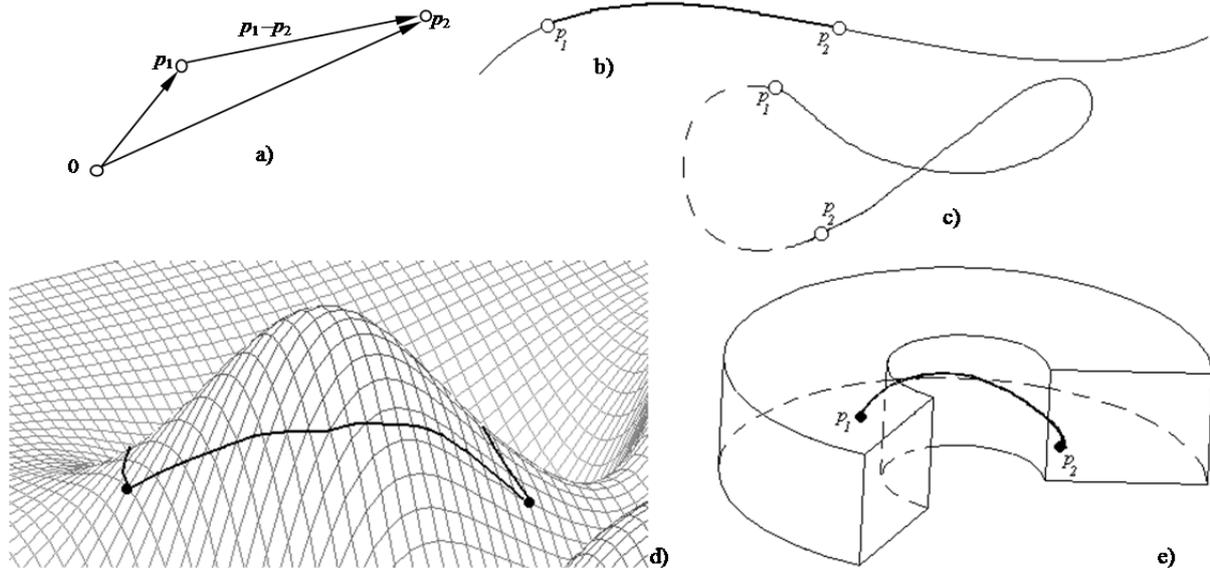


Figura C.1. Distancia mínima entre dos puntos

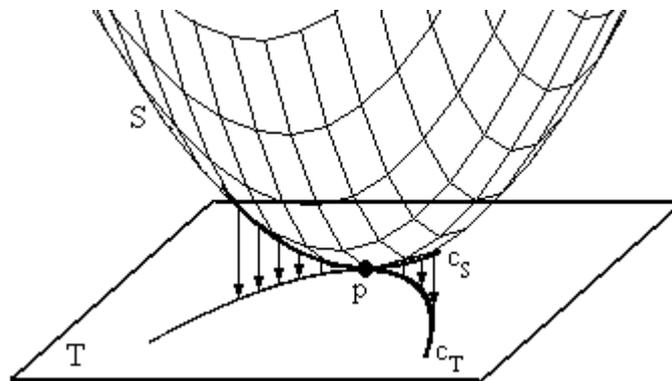


Figura C.2. Geodésica

C.1. Distancia mínima entre un punto y una recta

Dados un punto $P(x, y, z)$ y una recta infinita paralela a un vector $\vec{v} = (\alpha, \beta, \gamma)$ y que pasa por un punto $P_1(x_1, y_1, z_1)$, la distancia mínima entre el punto y la recta vendrá dada por:

$$r = \frac{\sqrt{(\beta\gamma' - \beta'\gamma)^2 + (\gamma\alpha' + \gamma'\alpha)^2 + (\alpha\beta' + \alpha'\beta)^2}}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \quad (C.4)$$

donde $\alpha' = x - x_1$, $\beta' = y - y_1$, $\gamma' = z - z_1$

Cuando la recta en cuestión no es infinita, podemos definirla por el vector $\vec{v} = (\alpha, \beta, \gamma)$ y por dos puntos $P_1(x_1, y_1, z_1)$ y $P_2(x_2, y_2, z_2)$ como puntos extremos a dicha recta. El cálculo de la distancia del punto $P(x, y, z)$ a la recta ahora dependerá de la posición relativa del punto con respecto a la recta. Así bien, si la proyección perpendicular del punto sobre la recta cae sobre ésta, la distancia vendrá dada por la ecuación (C.4), en caso contrario vendrá dada por la distancia mínima al punto más cercano:

$$r = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (C.5)$$

siendo $P_i(x_i, y_i, z_i)$ el punto más cercano a P . Ver Figura C.3.

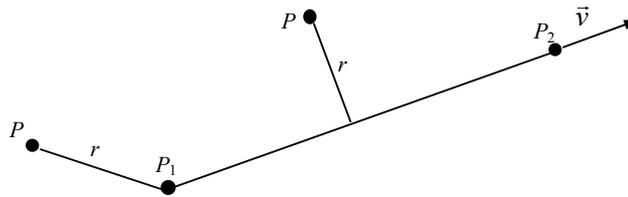


Figura C.3. Distancia a una recta finita.

El cálculo de la distancia de un punto a segmentos de línea es habitual en modelizado por computador. En [Jin & Peng 1998] se utiliza el cálculo de la distancia a distintas figuras para su deformación a efectos de animación por computador. Para el cálculo de la distancia a un segmento de línea se crea lo que llaman una *metaball*. Una *metaball* es una técnica de modelizado 3D que mediante la unión de esferas se modeliza formas más complejas. En este caso, una superficie que envuelve al segmento de línea cuyos puntos equidistan de dicho segmento, formando un cilindro con sendos casquetes esféricos en los extremos, Figura C.4.

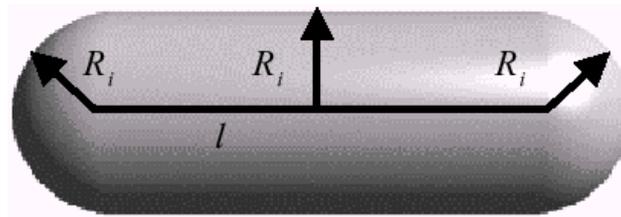


Figura C.4. *Metaball* de un segmento de línea.

Los autores para determinar la distancia al segmento de línea aplican una matriz de transformación para llevar el segmento sobre el eje x de tal forma que los puntos extremos del segmento $P_1(x_1, y_1, z_1)$ y $P_2(x_2, y_2, z_2)$, se transforman en $Q_1(0, 0, 0)$ y $Q_2(l, 0, 0)$, siendo l la longitud del segmento, posteriormente se aplica la misma transformación al resto de los puntos. Entonces el cálculo de la distancia entre el punto y la recta se calcula:

$$r = \begin{cases} \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}, & \tilde{x} < 0 \\ \sqrt{\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}, & 0 \leq \tilde{x} \leq l \\ \sqrt{(\tilde{x} - l)^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2}, & \tilde{x} > l \end{cases} \quad (C.6)$$

siendo $\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$ las coordenadas de los puntos transformados.

En cualquier caso observamos que la aplicación del cálculo de las distancias atiende a intervalos en función de la posición del punto sobre la recta, para evitar esto es conveniente utilizar una representación diferente de la recta, utilizando una representación paramétrica.

Para representar una curva en el espacio de forma paramétrica podemos relacionar cada una de las coordenadas del espacio cartesiano mediante una ecuación cúbica cuya variable independiente representa el parámetro que variará dentro de un intervalo cerrado:

$$\begin{aligned} x(u) &= a_{3x}u^3 + a_{2x}u^2 + a_{1x}u + a_{0x} \\ y(u) &= a_{3y}u^3 + a_{2y}u^2 + a_{1y}u + a_{0y} \\ z(u) &= a_{3z}u^3 + a_{2z}u^2 + a_{1z}u + a_{0z} \end{aligned} \quad (C.7)$$

donde a_{ij} son los coeficientes algebraicos y $u \in [0, 1]$.

En notación vectorial podemos representar un vector $p(x(u), y(u), z(u)) = p(u)$ según:

$$p(u) = a_3u^3 + a_2u^2 + a_1u + a_0 \tag{C.8}$$

donde a_3, a_2, a_1, a_0 son vectores columna correspondientes a los parámetros algebraicos descritos arriba. El vector tangente a la curva en un punto determinado vendrá dado por la derivada respecto a u . Se tiene entonces las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} p(0) &= p_0 = a_0 \\ p(1) &= p_1 = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \\ \frac{dp(0)}{du} &= p_{u0} = a_1 \\ \frac{dp(1)}{du} &= p_{u1} = a_1 + 2a_2 + 3a_3 \end{aligned} \tag{C.9}$$

La Figura C.5 muestra una curva paramétrica siguiendo la nomenclatura anterior.

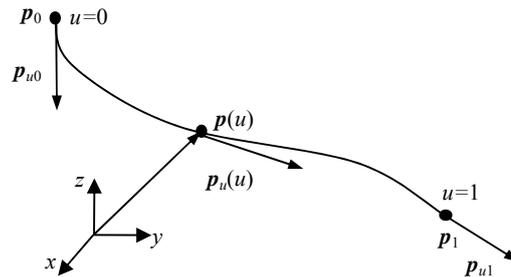


Figura C.5. Representación paramétrica de una curva.

En el caso de una recta los coeficientes a_3 y a_2 serán nulos, y la ecuación paramétrica quedará reducida a:

$$p = p_0 + u(p_1 - p_0) \tag{C.10}$$

La distancia mínima de un punto $q(x, y, z)$ a una curva paramétrica p vendrá dada por:

$$r_{\min} = |p - q| \tag{C.11}$$

con la condición:

$$(p - q) \cdot p_u = 0 \tag{C.12}$$

dado que el vector distancia r será perpendicular al vector tangente a la curva, como indica la Figura C.6.

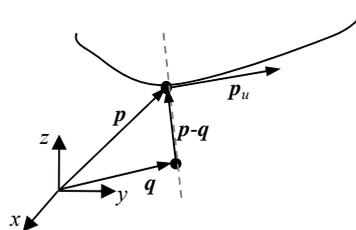


Figura C.6. Distancia a una curva paramétrica.

Para el caso de la recta:

$$p_u = p_1 - p_0 \tag{C.13}$$

$$[p_0 + u(p_1 - p_0) - q] \cdot (p_1 - p_0) = 0 \tag{C.14}$$

Se determina entonces el parámetro u resolviendo la ecuación (C.14), si el valor obtenido está fuera del intervalo $[0, 1]$, la distancia mínima será la correspondiente al extremo del intervalo más cercano al valor u obtenido. Este procedimiento es empleado en [Khatib 1985] para tareas de evitar obstáculos

computando la distancia mínima de los elementos de un manipulador a distintas figuras geométricas en tiempo real.

C.2. Distancia mínima entre un punto y un plano

Dados un punto $P(x, y, z)$ y un plano infinito definido mediante la ecuación:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{C.15}$$

Donde A, B, C y D son constantes. La distancia del punto al plano viene dada por:

$$r = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \tag{C.16}$$

escogiendo el signo adecuadamente para que la distancia sea positiva.

Si el plano en cuestión no es infinito, puede hacerse un análisis similar al realizado en el apartado anterior, considerando la posición relativa del punto sobre el plano. Como ejemplo se considera un plano S rectangular delimitado por las rectas R_1 a R_4 , como indica la Figura C.7. Si el punto cae sobre la proyección del plano, véase r_2 en la Figura C.7, la distancia mínima vendrá dada por la ecuación (C.16), en caso contrario, véase r_1 , la distancia puede computarse a la distancia mínima a la recta más próxima, como se determinó en el apartado anterior, pero esto supondrá el cálculo de cada una de las distancias a las rectas y al plano.

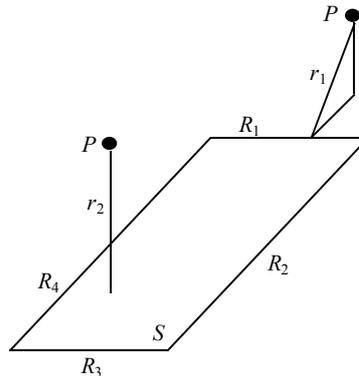


Figura C.7. Distancia a un plano delimitado.

Puede recurrirse a una representación paramétrica del plano, definiendo ahora dos parámetros u, w , ver Figura C.8.

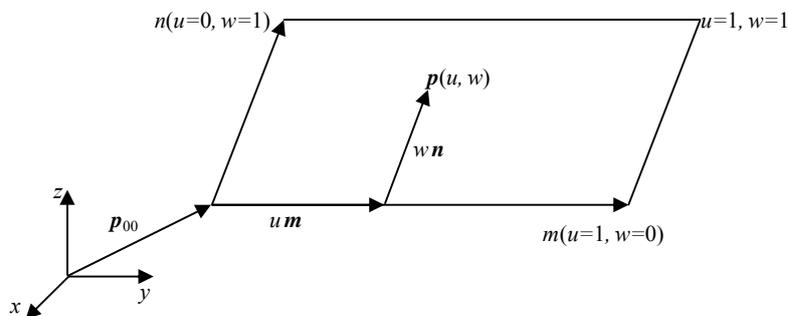


Figura C.8. Plano paramétrico.

La ecuación paramétrica de este plano vendrá dada por:

$$\mathbf{p}(u,w) = \mathbf{p}_{00} + u \mathbf{m} + w \mathbf{n} \quad (\text{C.17})$$

El plano estará situado según el vector \mathbf{p}_{00} respecto al origen de coordenadas y paralelo a los vectores \mathbf{m} y \mathbf{n} cuando los parámetros $u, w \in [0, 1]$.

La distancia mínima vendrá dada por (C.11) con la siguiente condición, que el vector $(\mathbf{p} - \mathbf{q})$ sea paralelo a la normal \mathbf{h} al plano con \mathbf{p} perteneciente al plano, Figura C.9:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{q}) \times \mathbf{h} = 0 \quad (\text{C.18})$$

$$(\mathbf{p} - \mathbf{q}) \cdot (\mathbf{p} - k\mathbf{h}) = 0 \quad (\text{C.19})$$

de (C.18) obtendremos valores de los parámetros u y w para que se cumpla la ecuación que junto con (C.19) proporcionan la distancia mínima. Al igual que con la recta, si los parámetros obtenidos se sitúan fuera del intervalo $[0,1]$ se busca la combinación u, w más próxima y con ella se computa la distancia.

En el caso de buscar la distancia mínima a una superficie cualquiera, tenemos el caso general en donde debe cumplirse:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{q}) \times (\mathbf{p}^u \times \mathbf{q}^v) = 0$$

siendo q el punto de estudio, $p(u,w)$ el punto más cercano a p de la superficie y de nuevo $d_{\min} = |\mathbf{p} - \mathbf{q}|$. Puede emplearse métodos numéricos para solventar este problema.

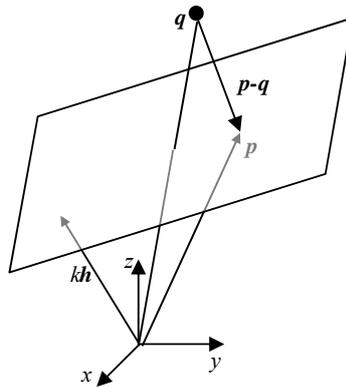


Figura C.9. Distancia mínima de un punto a un plano.

A efectos de simplificar el cálculo, es habitual reducir y ajustar las superficies de interés a un conjunto de superficies regulares, como se muestra a continuación.

C.3. Distancia de un punto a una superficie regular

Considerando el caso de una superficie esférica, con centro en P_0 y radio R , en este caso la distancia de un punto P exterior de la esfera a la superficie de la misma, vendrá dada por:

$$r_{\min} = |P - P_0| - R \quad (\text{C.20})$$

en el caso de que el punto en cuestión se encuentre en el interior de la esfera

$$r_{\min} = R - |P - P_0| \quad (\text{C.21})$$

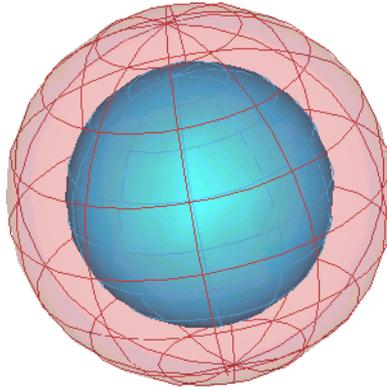


Figura C.10. La distancia a una esfera.

Este es un caso directo, y la distancia resultante de un punto exterior a la superficie a dicha superficie siempre vendrá dada por la ecuación (C.20), puesto que la ecuación de la superficie esférica con radio $(r_{min} - R)$, corresponde al lugar geométrico de los puntos que equidistan a la superficie de la esfera, Figura C.10. Este procedimiento será aplicable a cualquier figura elipsoide. Por ejemplo, en el caso de un elipsoide de centro en (x_0, y_0, z_0) y ejes mayor y menor de longitudes $2a$ y $2b$, con $a > b$, su ecuación canónica viene dada por:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c^2} = 1 \tag{C.22}$$

al igual que en la esfera la distancia de un punto a la superficie anterior puede considerarse como la mínima distancia entre dicha superficie y otra superficie elipsoidal, concéntrica a la anterior, que contenga a dicho punto. Al ser concéntricas, las proporciones entre los semiejes deben de mantenerse, ver Figura C.11, es decir:

$$a/b = a_1/b_1, \quad b/c = b_1/c_1, \quad a/c = a_1/c_1,$$

siendo a_1, b_1 y c_1 los semiejes del elipsoide buscado, cuya ecuación viene dada por:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a_1^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b_1^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c_1^2} = 1 \tag{C.23}$$

y dejando en función de un solo parámetro, por ejemplo b_1 , se tiene:

$$b_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 \frac{b^2}{a^2} + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 \frac{b^2}{c^2}} \tag{C.24}$$

Así, la distancia entre los dos elipsoides puede encontrarse con:

$$r_{min} = |b - b_1| \tag{C.25}$$

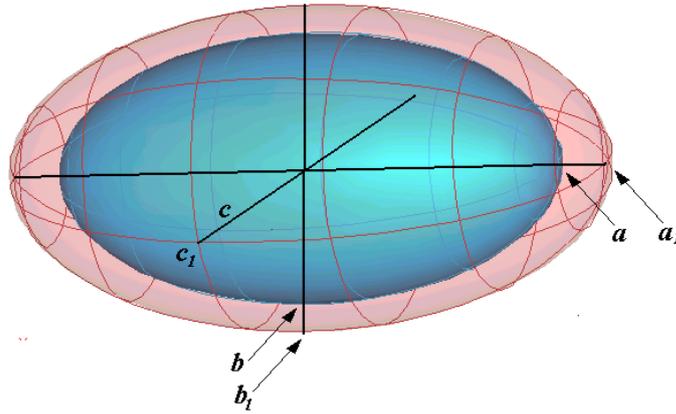


Figura C.11. Distancia a un elipsoide.

Para el caso de un cilindro recto finito de radio R y longitud L , su curva generatriz viene dada por la ecuación de una circunferencia:

$$x^2 + y^2 = R^2 \tag{C.26}$$

Como muestra la Figura C.12, pueden distinguirse tres zonas en el exterior del cilindro, para cada una de ellas las distancias corresponden a:

$$r_{\min} = \begin{cases} r_1 = \overline{PL} - R & \text{zona a} \\ r_2 = \overline{PS} \min & \text{zona b} \\ \sqrt{r_1^2 + r_2^2} & \text{zona c} \end{cases} \tag{C.27}$$

donde \overline{PL} representa la distancia del punto P a una recta L que forma el eje del cilindro, \overline{PS} es la distancia del punto P al plano S que forma la “tapa” del cilindro más cercana.

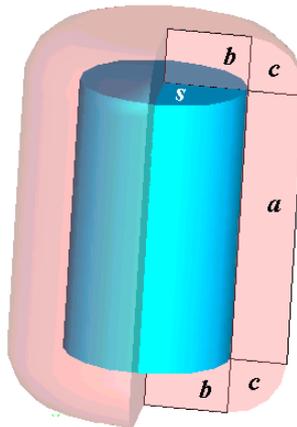


Figura C.12. Distancia a un cilindro recto finito.

Otras figuras simples como un cubo o paralelepípedo pueden tratarse de forma similar. Como muestra la Figura C.13, cuando un punto queda fuera de la proyección perpendicular de una cara debe computarse la distancia a la arista más cercana, así se crean las regiones con distancias respectivas dadas por:

$$r_{\min} = \begin{cases} r_a = \overline{PS} \min \\ r_b = \overline{PL} \min \\ r_c = \overline{PV} \min \end{cases} \tag{C.28}$$

donde \overline{PS} se calcula al plano más próximo, \overline{PL} a la arista más próxima y \overline{PV} al vértice más próximo.

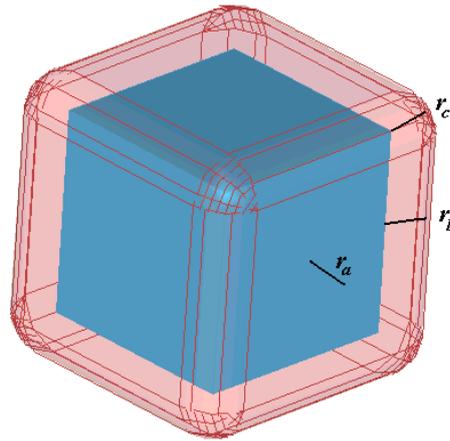


Figura C.13. Distancias a un cubo.

En la Figura C.14 pueden verse un ejemplo para el caso general de dos objetos formados por un conjunto de figuras regulares. Los objetos K_A y K_B de la figura están formados por la unión de los objetos K_i y K_j . Así, la mínima distancia entre los dos conjuntos de objetos [Gilbert et al. 1988] vendrá dada por:

$$d(K_A, K_B) = \min \{d_{ij}\} \tag{C.29}$$

$$d_{ij} = \min \{|x - y| : x \in K_i, y \in K_j\} = d(K_i, K_j) \tag{C.30}$$

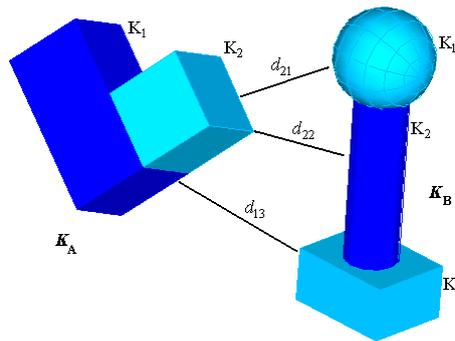


Figura C.14. Distancia entre dos conjuntos de objetos.

C.4. Métodos de cálculo de distancias en robótica

Existe una gran diversidad de métodos en el campo de la robótica para la determinación de la distancia a los obstáculos en el entorno destinado a resolver problemas de planificación de trayectorias y de modelizado. Algunos de estos métodos se basan en el ajuste a superficies conocidas, método de los poliedros convexos, coherencia del límite, distancia incremental, etc.

C.4.1. Distancia entre poliedros convexos (Diferencia de Minkowski)

Para la representación de los obstáculos en el espacio de configuración, se recurre generalmente a representaciones poligonales cuando se trabaja en dos dimensiones. Se tiene que una línea infinita descompone el plano en dos medios planos, entonces, puede definirse [Latombe 1996] una región poligonal convexa en \mathcal{R}^2 como la intersección de un número finito de medios planos cerrados. Una región poligonal es cualquier subconjunto de \mathcal{R}^2 obtenido mediante la unión de un número finito de regiones poligonales convexas. Entonces un polígono es cualquier región poligonal que es homeomórfica al disco cerrado unitario.

Anexo C. Cálculo de distancias

De una manera similar, un plano en \mathcal{R}^3 descompone el espacio tridimensional en dos medios espacios. Una región poliédrica convexa es la intersección de un número finito de medios espacios cerrados, así una región poliédrica es un subconjunto de \mathcal{R}^3 obtenido mediante la unión de un número finito de regiones poliédricas. Entonces un poliedro es cualquier región poliédrica que es homeomórfica a la bola cerrada. Pues bien, el problema de determinar la distancia entre poliedros convexos en robótica para resolver cuestiones de detección de intersecciones, detección de colisión y planificación de trayectorias se ha resuelto con diversos algoritmos. Un ejemplo [Cameron & Culley 1986] es el MTD (Minimal Translational Distance), que dados dos objetos se determina la mínima distancia traslacional entre ellos mediante la longitud de la traslación relativa más corta entre los objetos para estar en contacto, ver Figura C.14. Se calcula el espacio de configuraciones del obstáculo (CSO) como una lista de medios espacios planos y después se calcula la mínima distancia traslacional entre el origen y el CSO. Este algoritmo es complicado para casos en donde los objetos no intersecan y el segundo paso requiere a su vez muchos pasos.

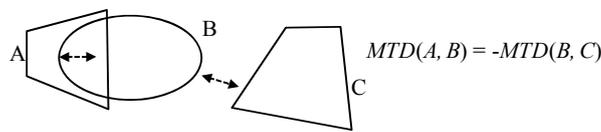


Figura C.14. Método de la mínima distancia traslacional.

Una forma de representar el problema de distancia entre polígonos mediante el espacio de configuración traslacional (TC), [Cameron 1997], donde los puntos son traslaciones relativas entre dos poliedros A y B y el conjunto de traslaciones que causaría interferencia de los dos poliedros convexos forma un nuevo poliedro convexo que se llama el espacio de configuraciones traslacional de los obstáculos (TCSO), también llamado la diferencia de Minkowski de los dos poliedros:

$$A \ominus B = \{x - y \in \mathcal{R}^n \mid x \in A, y \in B\} \tag{C.31}$$

El origen del espacio TC corresponde a la configuración inicial de los dos objetos y la distancia entre ambos poliedros equivale a la distancia del origen del espacio TC al TCSO. Si los poliedros están solapados el nuevo poliedro contiene al origen.

La Figura C.15 muestra un ejemplo de diferencia de Minkowski entre dos polígonos A y B , que como resultado da otro polígono $A \ominus B$, los puntos marcados con círculo, puntos “testigo”, en los polígonos A y B , representan los puntos más próximos, que en la figura diferencia se representa su distancia con respecto al origen.

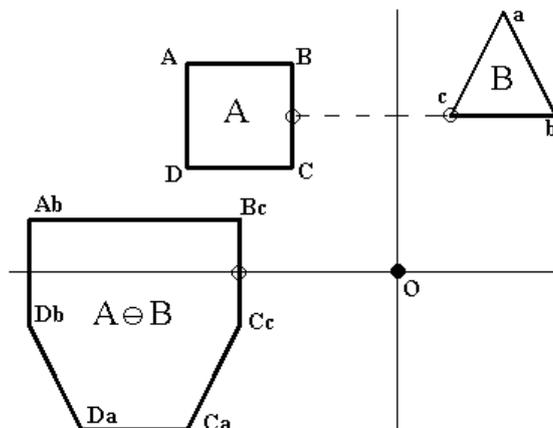


Figura C.15. Diferencia de Minkowski.

En definitiva la mínima distancia entre dos objetos es equivalente a la mínima distancia entre el origen del espacio TC y el TCSO:

$$MTD(A,B) = MTD(O, TCSO(A,B)) \tag{C.32}$$

donde O es el conjunto que contiene al origen solo, y el problema de buscar la distancia entre dos conjuntos de n -dimensiones pasa a ser el de encontrar la distancia entre un punto, el origen, y otro conjunto n -dimensional.

Existen algunos algoritmos que buscan en el TCSO este punto testigo que representa la mínima distancia respecto al origen. El algoritmo Lin-Canny [Lin & Canny 1991] mostrado en la Figura C.16, rastrea un par de puntos testigo con sus respectivas características (vértices o aristas donde se sitúan), se inicia con unas características iniciales cualquiera, en cada paso del lazo se evalúa si el par de características contiene a los verdaderos puntos de test, si no es así se buscan unas características vecinas a las anteriores y se evalúa de nuevo.

```

(fA, fB) ← inicial_features(A,B);
for i ← 1 to num_steps do
  while not best_features(i, fA, fB) do
    (fA, fB) ← refine_features(i, fA, fB);
  endwhile
endfor

```

Figura C.16. Pseudocódigo del algoritmo Lin-Canny.

En la Figura C.17 se muestra un ejemplo de aplicación de este algoritmo donde se parte de un par de puntos potenciales (+, C) marcado como + en el TCSO, el seguimiento de características toma la secuencia: (ab, C), (b, C), (b, CD), (b, D), (bc, D), (c, D), (cd, D), (d, D), (d, DA), (d, A), (de, A). Este algoritmo presenta cierta complejidad en su uso en caso tridimensional debido a las posibles direcciones que surgen en el seguimiento de características.

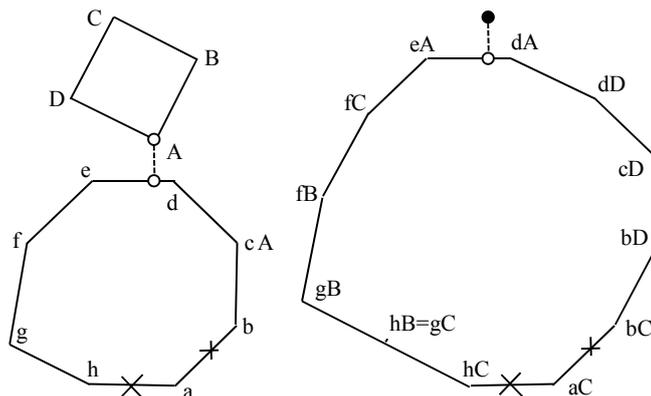


Figura C.17. Ejemplo del algoritmo LC.

Otro algoritmo con una forma similar es el GJK [Latombe 1996], se construye de igual manera el TCSO utilizando la diferencia de Minkowski. Si se consideran cuatro o menos vértices del TCSO, se tiene lo que se llama un *simplex* (puntos, líneas, triángulos o tetraedros). El algoritmo GJK resuelve este *simplex* usando el subalgoritmo de distancia para encontrar un punto de test, u . Así, dado un punto, se define una función:

$$g_u(z) = u \cdot u - u \cdot z \tag{C.33}$$

Anexo C. Cálculo de distancias

Si cada vértice, z del TCSO satisface la condición de finalización: $g_u(z) = 0$, entonces u corresponde al punto más cercano al origen de TCSO, en caso contrario se encontrará un punto del TCSO que maximice $-u \cdot z$. La función soporte de GJK que realiza esta tarea es:

$$\max(-u \cdot z) = \max(u \cdot x) + \max(u \cdot y) \quad (\text{C.34})$$

En definitiva el algoritmo realiza el seguimiento de entre uno y cuatro pares de vértices de los dos objetos, de entre los cuales se define un par de *simplex* tridimensionales que son subconjuntos de los dos objetos, y la acción del algoritmo determina los *simplex* que contienen los puntos testigo de los dos objetos. En cada paso reutiliza un “mapa de soporte” para determinar si los puntos testigos propuestos son los verdaderos, al igual que en algoritmo LC, si no es así se añaden nuevos vértices al conjunto de pares de vértices para crear nuevos *simplex*.

Ambos algoritmos GJK y LC poseen bucles externos para la búsqueda de una secuencia de pares de puntos testigos potenciales. Dado que trabajan con poliedros dichos bucles deben converger en un número finito de pasos hacia la solución, y este número de pasos puede limitarse según la complejidad de los poliedros. La principal diferencia entre ambos algoritmos reside en la forma en que se escogen los puntos testigo, para el GJK los puntos se toman del interior del poliedro, y para el LC solo se toman puntos de la superficie.

Otra forma de realizar la mínima distancia es mediante el diagrama de Voronoi. Dados dos puntos p_i y p_j , el conjunto de puntos más cercano a p_i que a p_j , lo forma el medio plano que contiene a p_i , el cual se puede definir como la perpendicular al bisector $\overline{p_i p_j}$. Así bien, el conjunto de puntos más cercano a p_i que a cualquier otro dentro de un conjunto S de N puntos en \mathcal{R}^2 , está formado por la intersección de hasta $N - 1$ medios planos, dicho conjunto de puntos se llama el polígono de Voronoi asociado a p_i . El diagrama de Voronoi $Vor(S)$ del conjunto de puntos S lo forma la colección de N polígonos de Voronoi. Cada punto (x, y) del plano pertenece a un polígono de Voronoi. Si un punto $(x, y) \in V(i)$, entonces p_i es el punto más cercano al punto (x, y) . El diagrama de Voronoi, contiene pues toda la información necesaria para resolver problemas de proximidad dado un conjunto de puntos de \mathcal{R}^2 , la idea puede extenderse a dimensiones superiores. El diagrama de Voronoi se definió originalmente para un conjunto de puntos, cuando se trata de otras características se habla del diagrama de Voronoi Generalizado. En definitiva, el diagrama de Voronoi consiste en un conjunto de segmentos rectos y arcos parabólicos. Un segmento recto en el diagrama es el conjunto de puntos más cercanos al mismo par de vértices, un segmento parabólico es el correspondiente al conjunto de puntos más cercano a una arista y un vértice, ver Figura C.18.

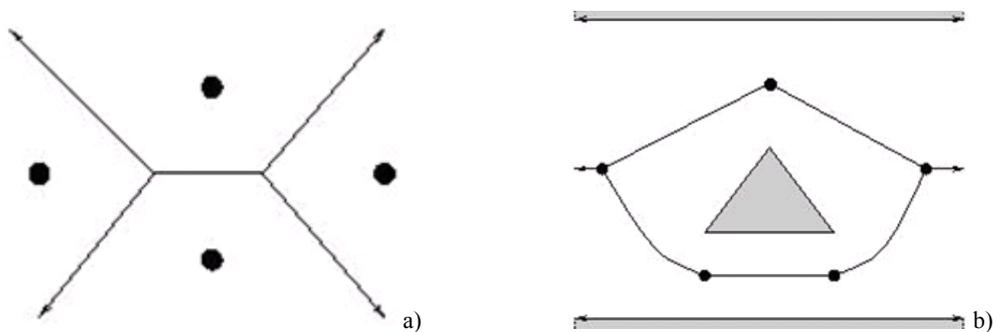


Figura C.18. Diagramas de Voronoi a) Ejemplo de diagrama de Voronoi b) Diagrama de Voronoi generalizado entre 4 puntos entre un triángulo y dos segmentos rectos.

Los diagramas de Voronoi se han utilizado extensamente como método de planificación en robótica, en métodos de mapas de caminos, véase [Dúnlaing & Yap 1982] donde se presentó por primera vez para el caso de un disco moviéndose entre polígonos, y en [Leven & Sharif 1985] un polígono entre polígonos.

En general el diagrama de Voronoi generalizado está compuesto por superficies cuadráticas. Si los objetos son convexos el diagrama lo compone superficies planas, de donde surgen las *regiones de Voronoi*. Una región de Voronoi asociada a una característica es un conjunto de puntos exterior al poliedro que es más cercano a dicha característica que a otra. Las regiones de Voronoi forman una partición del espacio fuera del poliedro según la característica más próxima. La Figura C.19 muestra las regiones de Voronoi de un pentágono.

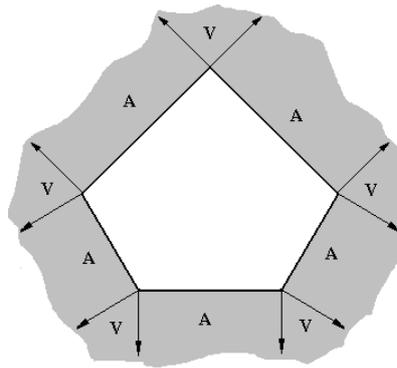


Figura C.19. Regiones de Voronoi en un pentágono, las A indican aristas, las V vértices.

La colección de regiones de Voronoi de cada poliedro forma el diagrama de Voronoi del poliedro. En [Lin 1993] se describe un algoritmo incremental del cálculo de la distancia que utiliza el concepto de las regiones de Voronoi y las propiedades de los poliedros convexos para llevar a cabo detección de colisión en tiempo esperado constante. La idea es buscar y seguir los puntos más cercanos, especialmente aplicado cuando los objetos se mueven en una secuencia de pequeños pasos lo que proporciona distancias repetitivas. El método funciona encontrando y manteniendo un par de características (vértice, arista o cara) en los dos poliedros mientras se mueven, con la particularidad de que las características próximas cambian poco mientras los objetos se mueven sobre trayectorias suaves. Preprocesando los poliedros, verifican que las características próximas no han cambiado o se actualiza a una característica vecina en un tiempo esperado constante. El tiempo de ejecución esperado del algoritmo es constante e independiente de la complejidad de los poliedros, siempre que el movimiento sea suave.

C.4.2. Ajuste de superficies

El modelizado de formas relativamente complejas mediante poliedros, suele requerir una información completa sobre estructura de vértices, aristas y caras, con lo que simplificar las formas que ajustan los objetos es vital para reducir el coste computacional. El cálculo de la distancia entre el robot y el entorno que lo rodea es necesario para reaccionar en tiempo real para planificar y corregir su trayectoria. Para determinar esta distancia rápidamente se emplean superficies conocidas más simples que los poliedros, que rodean los elementos del robot y obstáculos y posteriormente computar el espacio entre dichas superficies. En [Rimon & Boyd 1992] se utiliza esta técnica rodeando los elementos del robot y obstáculos mediante el elipsoide óptimo para después computar el espacio entre el robot y los obstáculos mediante una función de distancia generalizada. En primer lugar se busca la elipsoide óptima que contiene el poliedro convexo de los obstáculos y los elementos del robot, este proceso se conoce como el

problema LJ (Löwner-John) [Rimon & Boyd 1997], después el margen libre de cada una de los elementos del robot elipsoidales se calcula a tiempo constante por obstáculo elipsoidal, calculando la distancia entre las elipsoides, ver Figura C.18. El margen libre sobre un n -ésimo elemento del robot en un entorno formado por la unión de m poliedros consume un tiempo de cálculo $O(n \cdot m)$.

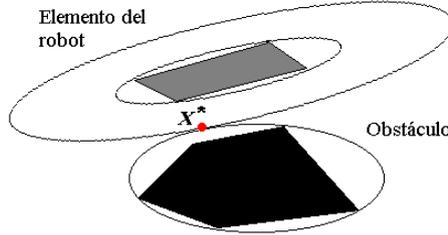


Figura C.18. Punto más cercano de entre dos elipsoides.

El problema de encontrar el mínimo elipsoide que encierre al poliedro consiste en reducir las variables empotrando el poliedro tridimensional en cuatro dimensiones, un plano tridimensional con altura unitaria, es decir el algoritmo trata de encontrar el elipsoide de cuatro dimensiones de mínimo volumen centrado en el origen y conteniendo a un poliedro en un plano 3D con altura unitaria. Un elipsoide de n dimensiones puede expresarse por su centro indicando su posición y una matriz simétrica y definida positiva, cuya inversa describe el tamaño, forma y dirección de los ejes:

$$\mathcal{E}^n(x_0, X) = \{x \in \mathcal{R}^n : (x - x_0)^T X (x - x_0) \leq 1\} \quad (C.35)$$

donde $x_0 \in \mathcal{R}^n$, $X \in \mathcal{R}^{n \times n}$, entonces $\mathcal{E}^4(0, X^*)$ será el elipsoide óptimo de cuatro dimensiones centrado en el origen que contiene al poliedro. El elipsoide LJ deseado, $\mathcal{E}^3(y, Y)$, se obtiene por intersección de $\mathcal{E}^4(0, X^*)$ con $x_4 = 1$, [Rimon & Boyd 1997]. La matriz en cuestión está formada por:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{bmatrix} \quad (C.36)$$

donde X_{11} es una matriz 4×4 , X_{12} es 4×1 , y X_{22} es un escalar. Las variables del elipsoide tridimensional $\mathcal{E}^3(y, Y)$ vienen dadas por:

$$y = -X_{11}^{-1} X_{12} \quad (C.37)$$

$$Y = \frac{X_{11}}{1 - \mu(X)} \quad (C.38)$$

donde $\mu(X) = X_{22} - X_{12}^T X_{11}^{-1} X_{12}$, $0 < \mu(X) < 1$

El algoritmo trata de resolver:

$$\min_x \varphi(X) = -\log(\sqrt{\det(X)}) \quad (C.39)$$

con las restricciones:

$$\psi_1(X) = \lambda_{\min}(X) > 0$$

$$\psi_2(X) = \max_{i=1, \dots, m} \left\{ v_i^T X v_i \right\} \leq 1$$

donde m es el número de vértices y $\bar{v}_i = \{v_i, 1\}$ es el i -ésimo vértice del poliedro.

Para calcular el margen libre entre dos elipsoides \mathcal{E}_1 y \mathcal{E}_2 , el margen libre de \mathcal{E}_1 con respecto a \mathcal{E}_2 se calcula en términos de x^* :

$$\text{margen}((\varepsilon_1, \varepsilon_2)) \begin{cases} < 0 \text{ si } \varepsilon_1 \text{ solapa } \varepsilon_2 \\ = 0 \text{ si } \varepsilon_1 \text{ toca } \varepsilon_2 \\ > 0 \text{ en otro caso} \end{cases} \quad (\text{C.40})$$

Geoméricamente, el $\text{margen}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ es la distancia entre ε_1 y ε_2 determinada por la métrica asociada con la matriz de ε_1 . Cuando ε_1 se mueve a lo largo de una trayectoria se tiene una función de su actual configuración (posición y orientación del elipsoide). Bajo esta interpretación la condición $\text{margen}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq 0$, caracteriza el espacio de configuraciones del obstáculo debido a ε_2 , es decir, configuraciones de ε_1 que intersectan con ε_2 .

En [Shiang et al. 2000] simplifican el problema calculando el elipsoide encerrado, en vez de la exterior, es decir el algoritmo trata de maximizar un elipsoide concéntrico del elipsoide LJ anterior el cual esté contenido en el poliedro convexo. Para verificar que un elipsoide está contenido en un poliedro se utiliza un método para calcular la distancia entre un elipsoide y un plano S , una cara del poliedro. Para confirmar la intersección del elipsoide con el plano se aplica un cambio de coordenadas que transforma el elipsoide $\mathcal{E}(a, A)$ en una bola unitaria centrada en el origen, ver Figura C.19:

$$\begin{cases} x' = A^{1/2}(x - a) \\ x = a + A^{-1/2}x' \end{cases} \quad (\text{C.41})$$

Si se toman tres vértices del poliedro a, b y c , estos se transforman en a', b' y c' y el plano S en S' , un vector normal al plano será $a_n = (b' - a') \times (c' - a')$, se cumple que $a_n \cdot x' = K$, con $K = a_n \cdot a'$, la intersección vendrá dada por:

$$I(\varepsilon) = \frac{|K|}{|a_n|} - 1 \quad (\text{C.42})$$

$I(\varepsilon) < 0$ indicará solapamiento.

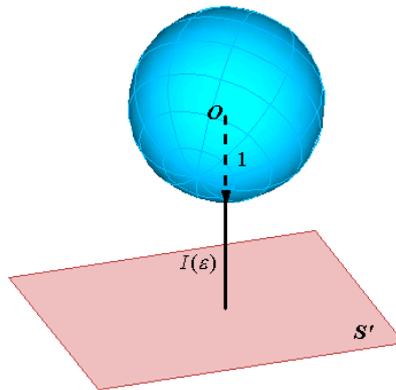


Figura C.19. Intersección de la bola unitaria con el plano.

El indicador focalizará el problema de la búsqueda del elipsoide completamente incluida en el poliedro. El elipsoide a buscar $\varepsilon_i = \mathcal{E}^3(y, 16Y)$ mediante un método de bisección hasta encontrar el mayor elipsoide encerrado. Posteriormente se estima la distancia con un método similar al expuesto anteriormente.

C.4.3. Consideraciones en figuras curvas

Para tratar la distancia de forma más general entre objetos de formas más complejas que las poliédricas, y que no sean necesariamente convexas, las técnicas más usuales es descomponer dichas figuras en la unión de un conjunto de figuras convexas. Así dados dos objetos no convexas A y B se descomponen en la unión de m y n objetos convexas:

$$A = \bigcup_{i=1}^m A_i \text{ y } B = \bigcup_{i=1}^n B_i \quad (\text{C.43})$$

entonces se realiza la búsqueda de la distancia mínima entre los mn pares resultantes, [Cameron 1985]. El trabajo con objetos convexas proporciona ventajas a la hora de desarrollar rápidos algoritmos, no obstante no siempre es posible la construcción con objetos convexas, o se requiere de figuras más precisas. Una modificación del algoritmo GJK para trabajar con objetos curvos es el Gilbert-Foo [Gilbert & Foo 1990], en donde los *simplex* se describen como pares de puntos arbitrarios de la superficie de los dos objetos, ya que el mapa de soporte no tiene porqué devolver vértices, como por ejemplo en una esfera. En este caso las distancias entre los *simplex* tenderán a converger, pero no se garantiza en un número finito de pasos, con lo que se requiere un nuevo criterio de finalización del bucle cuando se está suficientemente cerca.

Los objetos con formas complejas suelen modelizarse con la ayuda de superficies paramétricas como los parches Bézier, los B-spline y los NURBS. Un método extendido para calcular la mínima distancia entre dos objetos complejos consiste en descomponer de forma recursiva los dos objetos hasta un determinado grado de resolución, para después generar pares de posibles candidatos que contengan los puntos más cercanos y finalmente eliminar los pares que tengan en su distancia cotas inferiores mayores que las cotas superiores en la distancia mínima entre los dos objetos. En [Thomas et al. 2000] utilizan parches Bézier y describen un algoritmo que introduce a este método la restricción de que las normales de los puntos más cercanos están alineadas y opuestas. En [Turnbull & Cameron 1988] los autores emplean este algoritmo con superficies NURBS (*non-uniform rational B-spline*).

C.5. Distancia de colisión

Se define la distancia de colisión como la distancia mínima en la dirección de movimiento de un objeto al objeto más cercano que se encuentra en su trayectoria. Se considera un objeto B en reposo y el objeto A en movimiento cuya dirección de movimiento viene dada por el vector \mathbf{v}_D , la distancia r_D será la distancia de colisión, ver Figura C.20.

Para el caso general de una curva paramétrica $\mathbf{p}(u)$, y un punto \mathbf{q} que se desplaza con una dirección dada por el vector \mathbf{v}_D , la distancia de colisión del punto a la curva se obtiene según (C.11) con la condición:

$$\mathbf{p}(u) = \mathbf{h}(u) \quad (\text{C.43})$$

siendo $\mathbf{h}(u)$ la recta paramétrica con la dirección del vector \mathbf{v}_D , ver Figura C.21.

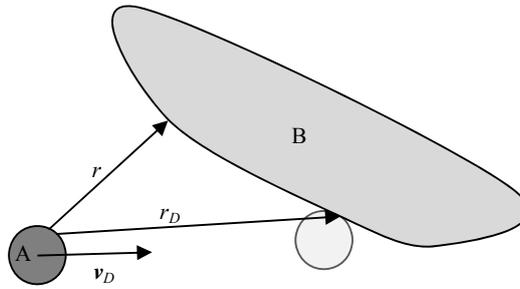


Figura C.20. Distancia mínima r y distancia de colisión r_D del objeto A que se desplaza en la dirección determinada por v_D hacia el objeto B.

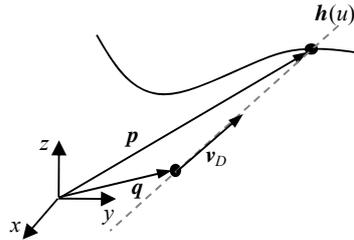


Figura C.21. Distancia de colisión de un punto a una curva.

El método de cálculo de distancia de colisión en la interfaz de teleoperación de los ensayos del capítulo 7 perfila los objetos de interés a partir de un conjunto de segmentos rectos y curvos, y se calcula el mínimo de las distancias de colisión a los segmentos “visibles” (que haya línea libre entre el ET y el segmento o curva). El ET no se considera un punto sino una circunferencia de radio R_A (que representa el radio de acción o el tamaño de la herramienta) centrado en el TCP.

Para el cálculo particular de la distancia de colisión a los segmentos rectos, se tiene un objeto A como una circunferencia de radio R_A con centro en el punto p_A , y una recta finita B definida por los puntos p_1 y p_2 . El objeto A se desplaza en la dirección definida por el vector v_D , ver Figura C.22a. La distancia de colisión en la dirección de v_D del punto p_A a la recta entre p_1 y p_2 puede determinarse según (C.43), el punto de colisión donde se interseca la trayectoria de p_A con la recta es el punto p_c . La distancia mínima de p_A a la recta es r_A , siendo p_r el punto más cercano. Puede determinarse la distancia de colisión de la circunferencia A a la recta, por semejanza de triángulos (Figura C.22b):

$$r_D = \frac{p_c p_A}{r_A} (r_A - R_A) \tag{C.44}$$

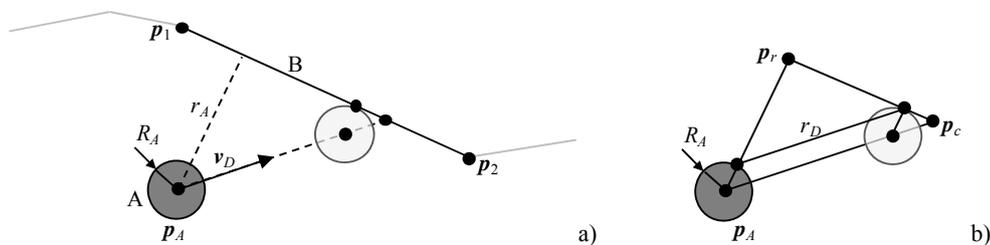


Figura C.22. Distancia de colisión de una circunferencia a una recta. (La circunferencia sombreada en color claro representa la circunferencia A cuando alcanza a la recta B).

Para el cálculo particular de la distancia de colisión a los segmentos circulares, se tiene un objeto A como una circunferencia de radio R_A con centro en el punto p_A , y un arco de circunferencia B entre los puntos p_1 y p_2 definida por el centro p_B y el radio R_B . El objeto A se desplaza en la dirección definida por el vector

Anexo C. Cálculo de distancias

v_D , ver Figura C.23a. La distancia de colisión en la dirección de v_D del punto p_A al arco de circunferencia puede determinarse según (C.43), el punto de colisión donde se interseca la trayectoria de p_A con el arco de circunferencia es el punto p_c . La distancia mínima de p_A al arco es r , siendo p_r el punto más cercano. Puede determinarse la distancia de colisión de la circunferencia A al arco B, por la ley del coseno (Figura C.23b):

$$(R_A + R_B)^2 = r_D^2 + r_{AB}^2 - 2r_D r_{AB} \cos \beta \quad (C.45)$$

y resolver (C.45) para r_D , donde r_{AB} es la distancia de p_A a p_B y β el ángulo entre $\overline{p_c p_A}$ y $\overline{p_B p_A}$.

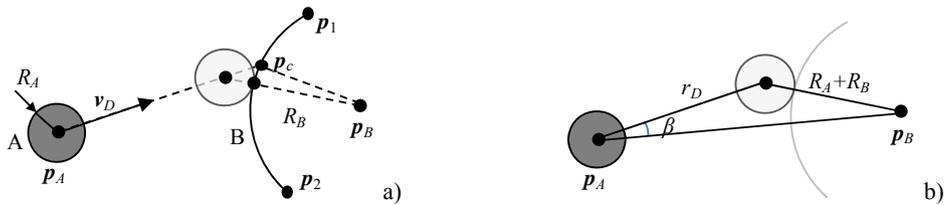


Figura C.23. Distancia de colisión de una circunferencia a un arco de circunferencia.

Referencias

- [Abdel-Malek & Marmarelis 1990] Abdel-Malek, A., Marmarelis, V. A Model of Human Operator Behavior During Pursuit Manual Tracking – What does it Reveal? *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Pp.674-676, LA, CA, USA, 4-7 November 1990.
- [Abend, Bici & Morasso 1982] Abend, W., Bici, E., Morasso, P. Human Arm Trajectory Formation. *Brain*, 105, pp. 331-348, 1982.
- [Accot & Zhai 1997] Accot, J., Zhai, S. Beyond Fitts' Law : Models for Trajectory-Based HCI Tablets. *Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)* pp. 295-302, 1997.
- [Accot & Zhai 2001] Accot, J., Zhai, S. Scale Effects in Steerin Law Tasks. *Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)*, March 31-April 4. Seattle, WA, USA, 2001.
- [Accot & Zhai 2003] Accot, J., Zhai, S. Refining Fitts' law models for bivariate pointing. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'01)*. Pp 193-200. ACM, New York, USA. March/April 2001.
- [Accot 2001] Accot, J. *Les Tâches Trajectorielles en Interaction Homme-Machine – Cas des tâches de navigation*. Ph.D. Thesis. Université de Toulouse 1, Toulouse, France. 2001.
- [Aigner & McCarragher 1996] Aigner, P. McCarragher, B.J. Simultaneors Human and Autonomous Control with Constrained human Action. *Proc. 1996 Australian New Zealand Conference on Intelligent Information Systems*. Adelaide, Australia, November 1996.
- [Aigner & McCarragher 1997] Aigner, P. McCarragher, B.J. Human Integration into Robot Control Utilising Potential Fields. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, New Mexico, April 1997.
- [Aigner & McCarragher 2000] Aigner, P. McCarragher, B.J. Modeling and Constraining Human Interactions in Shared Control Utilizing a Discrete Event Framework. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 30, no. 3, May 2000.
- [Akamatsu, Sato & MacKenzie 1994] Akamatsu, M., Sato, S., MacKenzie, I.S. Multimodal mouse: A mouse type device with tactile and force display. *Presence* 3: pp.73–80, 1994.
- [Akesson, Jain & Ferreira 2002] Akesson, K. Jain, S. Ferreira, P.M. Hybrid Computer-Human Supervision of Discrete Event Systems. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Washington, DC, May 2002.

Referencias

- [Albus, Lumia & McCain 1988] Albus, J.S. Lumia, R. McCain, H.G. Hierarchical Control of Intelligent Machines Applied to Space Station Telerobots. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 24, no. 5, September 1988.
- [Albus, McCain & Lumia 1987] Albus, J.S. McCain, H.G. Lumia, R. NASA/NBS Standard Reference Model Telerobot Control System Architecture (NASREM), NBS Technical Note 1235, July 1987.
- [Alvarez, Harrop & Yoneyama 1999] Alvarez, G.O., Harrop, R.H., Yoneyama, T. Extracting Fuzzy Rules form Experimental Human Operator Data. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics – Part B: Cybernetics*. Vol. 29, no 3, June 1999.
- [Ando, Lee & Hashimoto 1999] Ando N., Lee J.H., Hashimoto H. A Study on Influence of Time Delay in Teleoperation. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'99)*. Pp.317-322, Atlanta, Georgia, USA, September 1999.
- [Ando, Ohta & Hashimoto 2000] Ando, N., Ohta, M., Hashimoto, H. Micro Teleoperation with Haptic Interface. *Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON2000)*. Pp.13-18, Nagoya, Japan, October 2000.
- [Arbib 1985] Arbib, M.A. Schemas for the Temporal Control of Behaviour. *Human Neurobiology*, 4, pp. 63-72, 1985.
- [Barraquand, Langlois & Latombe 1991] J. Barraquand, B. Langlois, J. Latombe, *Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning*, Robotics Laboratory, Department of Computer Science, Standford Universiy, 1991.
- [Barraquand, Langlois & Latombe 1992] Barraquand, J., Langlois, B., Latombe, J. Numerical Potential Field Techniques for Robot Path Planning. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 22, no. 2. March/April 1992.
- [Baudisch et al. 2003] Baudisch, P., Cutrell, E., Robbins, D., Czerwinski, M., Tandler, P., Bederson, B., Zierlinger, A. Drag-and-pop and drag-and-pick: techniques for accessing remote screen content on touch- and pen-operated systems. *Proceedings of Interact*. Pp. 57–64, 2003.
- [Baudisch 2005] Baudisch, P., Collomb, M., Hascoët, M., Lee, B. Improving drag-and-pop on wall-size displays. *Proceedings of Graphics Interface*. Pp. 25-32, Victoria, BC, Canada, May 9-11 2005.
- [Bezine, Alimi & Sherkat 2004] Bezine H., Alimi A.M., Sherkat N. Generation and Analysis of Handwriting script with Beta-Elliptic Model. *Proceedings of the Ninth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition*. Pp. 515-520, October 2004.
- [Blanch et al. 2004] Blanch, R., Guiard, Y. & Beaudouin-Lafon, M. Semantic pointing: improving target acquisition with control-display ratio adaptation, in *Proceedings of the 2004 conference on Human factors in computing systems*, ACM Press, pp. 519–526, 2004.
- [Bouzit et al. 2002] Bouzit, M., Popescu, G., Burdea, G., Boian, R. The Rutgers Master II-ND Force Feedback Glove. *Proceedings of IEEE VR 2002 Haptics Symposium*, Orlando FL, USA, March 2002.

- [Brewster, Chohan & Brown 2007] Brewster, S., Chohan, F., Brown, L. Tactile Feedback for Mobile Interactions. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. San Jose, CA, USA, 28 April 3 May 2007.
- [Bullock & Grossberg 1988] Bullock D., Grossberg S. Neural Dynamics of Planned Arm Movements: Emergent Invariants and Speed-Accuracy Properties During Trajectory Formation. *Psychological Review*, 95, pp. 49-90, 1988.
- [Bullock & Grossberg 1988b] Bullock D., Grossberg S. Neuromuscular Realization of Planned Trajectories. *Neural Networks*, 1, Supplement 1, 329, 1988.
- [Caby & Crosnier 2001] Caby, C., Crosnier, A. Collision free manipulation for teleoperated assembly tasks. *ROMAN'01 : 10th International Workshop on Robot and Human Communication*. Pp. 38-43, 2001.
- [Callahan et al. 1988] Callahan, J., Hopkins, D., Weiser, M., Shneiderman, B., An empirical comparison of pie vs. linear menus. *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp. 95-100, 1988.
- [Cameron 1985] Cameron, S., (1985) A study of the Clash Detection Problem in Robotics. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pp. 488-493, St. Louis, March 1985.
- [Cameron & Culley 1986] Cameron, S.A., Culley, R.K., (1986) Determining the Minimum Translational Distance Between two Convex Polyhedra. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 3, pp. 551-596, 1986.
- [Cameron 1997] Cameron, S. (1997) A comparison of Two Fast Algorithms for Computing the Distance Between Convex Polyhedra. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 13, no. 6, December 1997.
- [Cao et al. 2004] Cao, A., Ellis, R., Composto, A., Pandya, A., MD, A. and A. G. Optimizing the surgeon-robot interface: the effect of index of difficulty and control-display gain on movement time. *In Proceedings of the 2nd International Conference on Computing, Communication and Control Technologies*, Austin TX, 2004.
- [Casiez et al. 2008] Casiez, G., Vogel, D., Balakrishnan, R. and Cockburn, A. The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks. *In Human-Computer Interaction*, 23:3, pp. 215-250, September 2008.
- [Chapuis et al. 2009] Chapuis, O., Labrune, JB., Pietriga, E. Dynaspot: Speed-Dependent Area Cursor. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp. 1391-1400, Boston, MA, USA, April 4-9 2009.
- [Chikura et al. 1999] Chikura, D. Takahashi, M. Watanabe, S. Kitamura, M. Adaptation of User Behaviour to the Different Level of Tele-Operation Support. *IEEE SMC '99 International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 3, pp. 739-744, Tokyo, Japan, October 1999.

Referencias

- [Cho et al. 1995] Y.J. Cho, Y. Tanie, K. Akella, P. Kotoku, T. Command Sequence Replanning Using DiscreteEvent -Based Task Model in Tele-Robotic Part Mating. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, May 21-27, 1995.
- [Chuang & Ahuja 1991] J. Chuang, N. Ahuja, Path Planning using the Newtonian Potential. *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Sacramento, California, USA, April 1991.
- [Cockburn & Firth 2003] Cockburn, A., Firth, A., Improving the acquisition of small targets. *Proceedings of the British HCI Conference*. Pp. 181–196, 2003.
- [Cockburn & Savage 2003] Cockburn, A., Savage, J. Comparing speed-dependent automatic zooming with traditional scroll, pan and zoom methods, in *People and Computer XVII: British Computer Society Conference on Human Computer Interaction*. Pp. 87–102, Bath, England, 2003.
- [Cockburn et al. 2005] Cockburn, A., Savage J., and Wallace, A. Tuning and Testing Scrolling Interfaces that Automatically Zoom. *Proceedings of ACM CHI 2005 Conference on Human Factors in Computing Systems*. , pp. 71-80, Portland, Oregon, 2-7 April 2005.
- [Conway, Volz & Walker 1990] Conway, L., Volz, R.A., Walker, M.W. Teleautonomous Systems: Projecting and Coordinating Intelligent Action at a Distance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, no. 2, April 1990.
- [Conway, Volz & Walker 1990] Conway, L. Volz, R.A. Walker, M.W. Teleautonomous Systems: Projecting and Coordinating Intelligent Action at a Distance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 6, no 2, April 1990.
- [Darin et al. 2004] Darin Ellis, R., Cao, A., Pandya, A., Composto, A., Chaco, M., Klein, M., Augner, G. Optimizing the surgeon-robot interface: the effect of control-display gain and zoom level on movement time. *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, New Orleans LA, 2004.
- [Dennerlein, Martin & Hasser 2000] Dennerlein, J., Martin, D., Hasser, C. Force-Feedback Improves Performance for Steering and Combined Steering-Targeting Tasks. *CHI Letters* 2 (1): pp. 423–429, 2000.
- [Dennerlein, Shahion & Howe 2000] Dennerlein J., Shahion, E., Howe, R. Vibrotactile Feedback for an Underwater Teleoperated Robot. *Proc. Of the International Symposium on Robotics with Applications (ISORA)*, Maui Hawaii, 2000.
- [Diaper 1989] Diaper, D. «The discipline of human-computer interaction» en *Interacting with computers*, no. 1, vol. 1, Butterworth-Heinemann Ltd., Guildford, UK, 1989.
- [Diolaiti & Melchiorri 2002] Diolaiti, N., Melchiorri, C. Teleoperation of a Mobile Robot Through Haptic Feedback. *HAVE 2002 IEEE Int. Workshop on Haptic Virtual Environments and Their Applications*, Ottawa, Canada, 17-18 November 2002.
- [Dix et al. 1993] Dix, A., Finaly, J., Abowd, G. and Beale, R. *Human-computer interaction*. Prentice Hall, 1993.

- [Doman 1998] Doman, D. Projection Methods for Order Reduction of Optimal Human Operator Models. PhD Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. June 1998.
- [Drascic 1991] Drascic, D. Skill acquisition and task performance in teleoperation using monoscopic and stereoscopic video remote viewing. *Proc. Human Factors Society 35th Annual Meeting*, pp. 1367-1371, San Francisco, CA, 1991.
- [Drury 1971] Drury, C. Movements with lateral constraint. *Ergonomics*, 14/2, pp. 293-305, 1971.
- [Dubey et al. 2001] Dubey, R.J., Everett, S.E., Pernalet, N., Manocha, K.A. Teleoperation Assistance Through Variable Velocity Mapping. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, no. 5, October 2001.
- [Dunbar et al. 1990] Dunbar R. M., Klevelant H., Lexander J., Svensson S., Tennant A. W.; Autonomous underwater vehicle communications; ROV '90, *The Marine technology Society*, pp. 270-278, 1990.
- [Dúnlaing & Yap 1982] O'Dúnlaing, C., Yap, C.K. A Retraction Method for Planning the Motion of a Disc. *Journal of Algorithms*, 6, pp. 104-111, 1982.
- [Ellis et al. 2004] Ellis, R.D., Cao, A., Pandya, A., Composto, A., Chaco, M., Klein, M. and Augner, G. Optimizing the Surgeon-Robot Interface: The effect of Control-Display Gain and Zoom Level on Movement Time. *In Proc. Of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2004.
- [Emeagwali et al. 2004] Emeagwali, I., Marayong, P., Abbot, J.J, Okamura, A.M. Performance Analysis of Steady-Hand Teleoperation versus Cooperative Manipulation. 2004 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. *IEEE Virtual Reality*, Chigago IL, March 27-28, 2004.
- [Eslambochilar & Murray-Smith 2004] Eslambolchilar, P. & Murray-Smith, R. Tilt-based automatic zooming and scaling in mobile devices. *In Mobile HCI 2004*.
- [Feng, Woch & Plamondon 2002] Feng, ch., Woch, A., Plamondon, R. A Comparative Study of Two Velocity Profile Models for Rapid Stroke Analysis. *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'02)*. Vol. 4, pp. 52-55, 2002.
- [Ferrell & Sheridan 1967] Ferrell W. R., Sheridan T. B. Supervisory control of remote manipulation. *IEEE Spectrum*, pp. 81-88, October 1967.
- [Flash & Hogan 1985] Flash, T., Hogan, N. The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model. *J. Neurosci* 5, pp. 1688-1703, 1985.
- [Fitts 1954] Fitts, P.M. The information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, pp. 381-391, 1954.
- [Furnas & Bederson 1995] Furnas, G.W., Bederson, B.B. Space-Scale Diagrams: Understanding Multiscale Interfaces. *Human Factors In Computing Systems CHI ' 95 Conference Proceedings*, pp. 234-241, 1995.

Referencias

- [Galt et al. 1997] Galt, S. Luk, B.L. Cooke, D.S. Collie, A.A. A Tele-Operated Semi-Intelligent Climbing Robot for Nuclear Applications. *Proceedings of the 4th Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*. WA, USA 1997.
- [Garcia, López & Guerrero 1999] Garcia F., López J., Guerrero A. Design of an Antropomorphic Finger Using Shape Memory Alloy Springs. *IEEE SMC '99 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 794-799, Tokyo, Japan, 1999.
- [Ge & Cui 2000] S. S. Ge, Y. J. Cui, New Potential Functions for Mobile Robot Path Plannin. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, no. 5, October 2000.
- [George & Cardullo 1999] George, G.R., Cardullo, F. Application of Neuro-Fuzzy Systems of Behavioral Representation in Computer Generated Forces. *Proc. 8th Conference. On Comp. Generated Forces*, pp. 575-585, 1999.
- [Gilbert et al. 1988] Gilbert, E.G., Johnson, D.W., Keerthi, S. S. A Fast Prodedure for Computing the Distance Between Complex Objects in Three-Dimensional Space. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. 4, no. 2, April 1998.
- [Gilbert & Foo 1990] Gilbert, E. G., Foo, Ch-P., (1990) Computing the Distance Between General Convex Objects in Three-Dimensional Space. *In IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 6, no. 1, February 1990.
- [Göllü & Varaiya 1989] Göllü, A. Varaiya, P. Hybrid Dynamical Systems. *Proc. 28st IEEE Conf. Decisión and Control*, pp. 2708-2712, Tampa, FL, Dec 1989.
- [Goto, Chatani & Fujita 1995] Goto, N., Chatani, K., Fujita, S. H_{∞} -Model of the Human Pilot Controlling Unstable Aircraft. *IEEE SMC '95 International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 3, pp 2657-2662, Vancouver, Canada, Oct. 1995.
- [Grossman & Balakrishnan 2005] Grossman T., Balakrishnan R. A Probabilistic Approach to Modeling Two-Dimensional Pointing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 12, No. 3, pp. 435–459, September 2005.
- [Grossman & Balakrishnan 2005] Grossman, T., Balakrishnan, R. The Bubble Cursor: Enhancing Target Acquisition by Dynamic Resizing of the Cursor's Activation Area. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Portland, OR, USA, pp. 281-290, April 2-7 2005.
- [Guiard, Blanch & Beaudouin 2004] Guiard, Y., Blanch, R., Beaudouin-Lafon, M., 2004. Object pointing: a complement to bitmap pointing in GUIs. *Proceedings of Graphics Interface*, pp. 9–16. 2004.
- [Gutwin 2002] Gutwin, C. Improving focus targeting in interactive fisheye views. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2002. pp: 267-274.
- [Hart, S. 1988] Hart Sandra et al., Development of NASA-TLX: Results of Empirical and Theoretical Research, Human Mental Workload, *Elsevier Science Publishers B.V. Holland*, pp.139-183, 1988.

- [Hayati & Venkataraman 1989] Hayati S., Venkataraman S. T.; Design and Implementation of a Robot Control System with Traded and Shared Control Capability. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1310-1315, 1989.
- [Healey et al. 1996] Healey, C. G., Booth, K. S., and Enns, J. T. High-Speed Visual Estimation Using Preattentive Processing. *ACM Transactions on Human Computer Interaction* 3(2), pp. 107-135, 1996.
- [Hess 1990] Hess, R.A. Methodology for the Analytical Assessment of Aircraft Handling Qualities, in Control and Dynamics Systems, Vol. 33, *Advances in Aerospace Systems Dynamics and Control Systems*, Part 3, pp. 129-150. Leondes C.T., Ed. Academic. San Diego, 1990.
- [Hewett et al. 1992] Hewett, B., Card, C., Gasen, M., Strong Perlman, and Verplank. Acm sigchi curricula for human-computer interaction.
http://old.sigchi.org/cdg/cdg2.html#2_1
- [Hideaki et al. 2000] Hideaki, T. Fukuda, T. Arai, F. Inaba, A. Niwa, Y. Improvement of Operation for Tele-manipulation System using Virtual Reality. Realization of common movement direction and common force direction. *IEEE International Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2000*. Vol. 2, pp. 948-953. October 2000.
- [Hoffmann 1991] Hoffmann, E.R. Capture of moving targets: A modification of Fitts' law. *Ergonomics*, 34(2): pp. 211-220, 1991.
- [Hogan 1984] Hogan, N. An organizing principle for a class of voluntary movements. *J. Neuroscience*. Vol. 4, no 11, pp. 2745-2754. November 1984.
- [Hwang & Ahuja 1988] Y. K. Hwang, N. Ahuja, Path Planning using a Potential Field Representation. University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA, 1988.
- [Hwang & Ahuja 1992] Y. K. Hwang, N. Ahuja, A Potential Field Approach to Path Planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, no. 1, February 1992.
- [Hwang et al. 2000] Hwang, F. King, J. Hale, R. Rokonuzzaman, M. Gosine, R. Norvell, T. O'Young, S. Fsher, A. Discrete Event Control of Mobile Robotic Systems with Potential Applications in Helathcare. *Proceedings of the 22nd Annual EMBS International Conference*, Chicago IL, USA, July 23-28, 2000.
- [Igarashi & Hinckley 2000] Igarashi, T. & Hinckley, K. Speed-dependent automatic zooming for browsing large documents, in *Proceedings of the 13th Annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, San Diego, CA, USA, ACM Press, pp. 139-148. November 2000.
- [Igarashi & Hinckley 2000] Igarashi, T., Hinckley, K., Space-dependent Automatic Zooming for Browsing Large Documents. *Proc. UIST 2000, ACM Symp. User Interface Software and Technology. CHI Letters*, Vol. 2, n° 2, pp. 139-148. November 2000.
- [Inagaki & Itoh 1997] Inagaki, T. Itoh, M. Situation-Adaptative Autonomy: The Potential for Improving Takeoff Safety. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*. pp. 302-307, October 1997.

Referencias

- [Inagaki 1993] Inagaki, T. Situation-Adaptive Degree of Automation for System Safety. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*. pp. 231-236, Tokyo, Japan, November 1993.
- [ISO 9241-9:2000] Ergonomic requirements for office work with visual display terminals, Part 9: Requirements for non-keyboard input devices, 2000.
- [Jagacinski et al. 1980] Jagacinski, R.J., Repperger, D.W., Ward, S.L., Moran, M.S. A test of Fitts' law with moving targets. *Human Factors*, 22(2): pp. 225-233, 1980.
- [Jakubowski, Osowski & Chwaleba 2001] Jakubowski J., Osowski S., Chwaleba A., Increasing Effectiveness of Human Hand Tremor Separation Process by Using Higher-Order Statistics. *Measurement Science Review*. Vol. 1, no. 1, 2001.
- [Jin & Peng 1998] Jin, X. Peng, Q. General Constrained Deformations Based on Generalized Metaballs. *Sixth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. Pp. 115-124, 26-29 October 1998.
- [Jones et al. 2005] Jones, S., Jones, M., Marsden, G., Patel, D. & Cockburn, A. An evaluation of integrated zooming and scrolling on small-screens. *In International Journal of Human-Computer Studies*. Vol. 63, Issue 3, September 2005.
- [Kabbash & Buxton 1995] Kabbash, P., Buxton, W. The "Prince" Technique: Fitts' Law and Selection Using Area Cursors. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, CO, USA, pp. 273-279, May 7-11 1995.
- [Katano & Takahashi 1999] Katano Y., Takahashi M., Space Perception in the Proprioceptive Information. *Proceedings of The First Joint BMES/EMBS Conference Serving Humanity, Advancing Technology*, Atlanta, GA, USA, October 13-16, 1999.
- [Keyson 1997] Keyson, D.V. Dynamic cursor gain and tactual feedback in the capture of cursor movements. *Ergonomics*, vol. 40, issue 12, pp. 1287-1298, December 1997.
- [Khatib 1985] Khatib, O. Real Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *International Journal of Robotics Research*. Vol. 5 Issue 1, 1985.
- [Kleinman, Baron & Levison 1970] Kleinman, D.L., Baron, S., Levison, W.H. An Optimal Control Model of Human Response, Part I: Theory and Validation. *Automatica*, Vol. 6, pp. 357-369, Pergamon Press, Ltd., 1970.
- [Kraiss 2006] Kraiss, K. F. Advanced Man-Machine Interaction. *Springer* 2006.
- [Kramer 1985] Kramer, U. On the Application of Fuzzy Sets to the Analysis of the System-Driver-Vehicle Environment, *Automatica*, 21(1), pp. 101-107, 1985.
- [Krüger 1990] Krüger, J.J, Shaw, I.S. A Fuzzy Learning System Emulating a Human Tracking Operator. *First International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, 1990*. pp. 25-28, 3-5 December 1990.

- [Kuang et al. 2004] A. B. Kuang, S. Payandeh, B. Zheng, F. Henigman, and C. MacKenzie. Assembling virtual fixtures for guidance in training environments. *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Pp. 367–374, March 2004.
- [Kulisevsky & Grau 2003] Kulisevsky J., Grau-Veciana JM., Temblor: diagnóstico diferencial y métodos de valoración. Servicio de Neurología. Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Departamento de Medicina. Universidad Autónoma de Barcelona, 2003.
- [Latombe 1996] Latombe, J.C. Robot Motion Planning. *Kluwer Academic Publishers*. 1996.
- [Leven & Sharif 1985] Leven, D., Sharif, M. Planning a Purely Translational Motion for a Convex Object in Two-Dimensional Space Using Generalized Voronoi Diagrams, *Technical Report No. 34/35, The Eskenasy Institute of Computer Science, Tel Aviv University*, 1985.
- [Li, Tarn & Xi 1999] Li, S. Tarn, Xi, N. Intelligent Teleoperation of Robotic Assembly Systems. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 3, pp. 745-750, Tokyo, Japan, October 1999.
- [Lin 1993] Lin, M. Efficient Collision Detection for Animation and Robotics, *Ph.D. thesis, University of California, Berkeley*, 1993.
- [Lin & Canny 1991] Lin, M. C., Canny, J. F. A fast Algorithm for Incremental Distance Calculation. *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, USA, April 1991.
- [Linares et al. 2006] Linares A., Paz R., Jiménez G., Pedreño J.L., Molina J. AER Neuro-Inspired Interface to Anthropomorphic Robotic Hand. *International Joint Conference on Neural Networks*. Vancouver, Canada, July 16-21, 2006.
- [Liu & Li 2005] Liu, Z., Li, H-X. A Probabilistic Fuzzy Logic System for Modeling and Control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 13, no 6, December 2005.
- [Liu & Wu 1993] Liu, T.S., Wu, J.C. A Model for a Ryder-Motorcycle System Using Fuzzy Control. *IEEE Transactions System, Man, and Cybernetics*, 23(1), pp. 267-276, 1993.
- [Lumia, Fiala & Waveling 1988] Lumia, R. Fiala, J.C. Waveling, A.J. An Architecture to Support Autonomy, Teleoperation, and Shared Control. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 1, pp. 472-476, August 1988.
- [MacKenzie 1992] MacKenzie, I.S. Fitts Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction* 7, pp. 91-139, 1992.
- [MacKenzie & Buxton 1995] MacKenzie, I.S., Buxton. Extending Fitts' Law to Two-Dimensional Tasks. *Proceedings CHI'92: ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp. 219-226, 1992.
- [MacKenzie et al. 2001] MacKenzie, I.S., Kauppinen, T., Silfverberg, M. Accuracy Measures for Evaluating Computer Pointing Devices. *Proceeding CHI '01: ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp. 9-16, NY, USA, 2001.

Referencias

- [Maeda & Tachi 1991] Maeda T., Tachi S., Space Perception Model which Generates Horopter. *International Joint Conference on Neural Networks*, Singapore, November 1991.
- [Massimino & Sheridan 1994] Massimino M., Sheridan T. B. Teleoperator Performance with Varying Force and Visual Feedback. *Human Factors*, 36(1), pp. 145-157, 1994.
- [McAuley & Marsden 2000] McAuley J.H., Marsden C.D., Physiological and pathological tremors and rhythmic central motor control. *Brain* (2000), Vol. 123 pp. 1545-1567. Oxford University Press 2000.
- [McAuley et al. 1999] McAuley J.H., Farmer S.F., Rothwell J.C., Marsden C.D., Common 3 and 10 Hz oscillations modulate human eye and finger movements while they simultaneously track a visual target. *The Journal of Physiology*. Pp.515;905-917, 1999.
- [McCarragher & Asada 1992] McCarragher, B.J. Asada, H. The Discrete Event Control of Robotic Assembly Tasks. *Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control*. Tucson, Arizona, December 1992.
- [McGuffin & Balakrishnan 2005] McGuffin, M.J., Balakrishnan, R. Fitts' Law and Expanding Targets: Experimental Studies and Designs for User Interfaces. *ACM Transactions on Computer_Human Interaction*, Vol. 12, no.4, pp. 388-422, December 2005.
- [McKinnon & King 1988] McKinnon M., King M.; Manual control of telemanipulators; *Proceedings of International Symposium on Teleoperation and Control*, pp. 263-276, Bristol, UK , July 1988.
- [McRuer 1966] McRuer, D.T. Remarks on Some Neuromuscular Subsystem Dynamics. *IEEE Transactions on Human Factors in Telerobotics*. May 1966.
- [McRuer 1967] McRuer, D.T., Jex, H.R. A Review of Quasi-Linear Pilot Models. *IEEE Transactions on Human factors in Electronics*, Vol. HFE-8, no. 3, September 1967.
- [Meyer et al. 1988] Meyer, D.E., Smith, J.E., Kornblum, S., Abrams, R.A., Wright, C.E., Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review* 95, pp. 340-370, 1988.
- [Meyer et al. 1990] D. E. Meyer, K. J. E. Smith, S. Kornblum, R. A. Abrams, C. E. Wright, Speed-Accuracy Tradeoffs in Aimed Movements: Toward a Theory of Rapid Voluntary Action. *Attention and Performance XIII*, pp. 173-226. M. Jeanerod, Ed. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1990.
- [Milgram & Kishino 1994] Milgram, P. Kishino, F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems E77-D (12)*: pp. 1321-1329, 1994.
- [Milgran, Zhai & Drascic 1993] Milgran, P. Zhai, S. Drascic, D. Applications of Augmented Reality for Human-Robot Communications. *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Yokohama, Japan. July 26-30, 1993.
- [Mortenson 1985] Mortenson, M. E. Geometric Modeling. E. John Kiley & Sons, pp. 305-318, 1985.

- [Mottet & Bootsma 1999] Mottet, D., Bootsma Reinoud, J. The Dynamics of Goal-directed Rhythical Aiming. *Biological Cybernetics*, no. 80, pp. 235–245, 1999.
- [Nielsen 1993] Nielsen, J. *Usability Engineering*. 1993.
- [Noyes & Sheridan 1984] Noyes M., Sheridan T. B.; A Novel Predictor for Telematipulation through a Time Delay. *Proceedings of International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1984.
- [Payandeh & Stanisic 2002] Payandeh, S., Stanisic, Z. On Application of Virtual Fixtures as an Aid for Telematipulation and Training. *Proceedings of the 10th Symp. On Haptic Interfaces For Virtual Envir. & Teleoperator Sysys. (HAPTICS.02)*, 2002.
- [Peñín et al. 1998] Peñín, L.F., Caballero, A., Aracil, R., Barrientos, A. Human Behavior Modeling in Master-Slave Teleoperation with Kinesthetic Feedback. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Leuven, Belgium, May 1998.
- [Peshkin et al. 2001] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphprasit, C. Moore, R. B. Gillespie, and P. Akella. Cobot architecture. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 17, no. 4, pp. 377–390, 2001.
- [Phillips & Repperger 1997] Phillips, C.A., Repperger, D.W. Why Engineers Should Know and Use Fitts' Law? *Proceedings of the 19th International Conference – IEEE/EMBS* Chicago, IL, USA, Oct. 30 - Nov. 2, 1997.
- [Phillips & Repperger 1999] Phillips, C.A., Repperger, D.W. An Informatic Model of Human Operator Control. *Proceedings of The First Joint BMES/EMBS Conference Serving Humanity, Advancing Technology*. Atlanta, GA, USA, October 1999.
- [Plamondon 1995] Plamondon R. A Kinematic Theory of Rapid Human Movements Part I. Movement representation and generation. *Biological Cybernetics*. No. 72, pp. 295–307, 1995.
- [Plamondon 1995b] Plamondon R. A kinematic theory of rapid human movements Part II. movement time and control. *Biological Cybernetics*. No.72, pp. 309-320, 1995.
- [Prasad et al. 2004] Prasad Sunil M., Prasad Sandip M., Maniar Hersh S., Chu C., Schuessler Richard B., Damiano Ralph J. Surgical robotics: impact of motion scaling on task performance. *Journal of the American College of Surgeons*; 199(6):863-8, 2004.
- [Radix et al. 1999] Radix, C., Robinson, P., Nurse, P. Extension of Fitts' law to modelling motion performance in man-machine interfaces. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 29, no. 2, pp. 205-209, March 1999.
- [Rastogi, Milgram & Drascic 1996] Rastogi, A. Milgran, P. Drascic, D. Telerobotic Control with Stereoscopic Augmented Reality. *SPIE Volume 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III*. Pp. 115-122. California, USA, 1996.
- [Riddley, Shaw & Krüger 1988] Riddley, J.N., Shaw, I.S., Krüger, J.J. Probabilistic Fuzzy Model for Dynamic Systems. *Electronic Letters*, Vol. 24, Issue 14, July 1988.

Referencias

- [Rimon & Boyd 1992] Rimon, E., Boyd, S. P. Efficient Distance Computation Using Best Ellipsoid Fit. *Proceedings of the 1992 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Pp. 360 – 365, August 1992.
- [Rimon & Boyd 1997] Rimon, E., Boyd, S. P. Obstacle Collision Detection Using Best Ellipsoid Fit. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. Vol. 18, pp. 105-126, 1997.
- [Riviere & Khosla 1997] Riviere C.N., Khosla P.K., Augmenting the human-machine interface: improving manual accuracy. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automatio*. Albuquerque, New Mexico, April 1997.
- [Riviere & Thakor 1994] Riviere C.N., Thakor N.V., Linearity of Human Commands for Telerobotics. *Proceedings of the 16th Annual Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Vol. 2, pp.1039-1040, Baltimore, November 1994.
- [Riviere & Thakor 1996] Riviere C.N., Thakor N.V., Modeling and Canceling Tremor in Human-Machine Interfaces. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*. Vol. 15(3), pp. 29-36, 1996.
- [Savage & Cockburn 2005] Savage, J. and Cockburn, A. Comparing Automatic and Manual Zooming Methods for Acquiring Off-Screen Targets. *People and Computers XIX: British Computer Society Conference on Human Computer Interaction*. Pp. 439-454. Edinburgh, Scotland, 2005.
- [Schiele & Visentin 2003] Schiele, A., Visentin, G. The ESA Human Arm Exoskeleton for Space Robotics Telepresence. *Proceeding of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space: i-SAIRAS 2003*, NARA, Japan, May 19-23, 2003.
- [Sedgwick 1986] Sedgwick H. A. Space Perception; *Handbook of Perception and Human Performance*, Ed. Boff, Koffman, Thomas, Wiley Interscience, Chapter 21, 1986.
- [Sheridan & Ferrell 1974] Sheridan, T.B., Ferrell, W.R. Man-Machine Systems: Information, Control, and Decision Models of Human Performance. MIT Press. Pp. 187-188, 1974.
- [Sheridan 1992] Sheridan T. B. Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control. *MIT Press*. 1992.
- [Shiang et al. 2000] Shiang, S-P., Liu, J-S., Chien, Y-R., (2000) Estimate of Minimum Distance between Convex Polyedra Based on Enclosed Ellipsoids. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vol. 1, pp. 739-744, Takamatsu, Japan, 31 October 5-November 2000.
- [Singh & Riviere 2002] Singh S.P.N., Riviere C.N., Physiological Tremor Amplitude during Retinal Microsurgery. *Proc. 28th IEEE Northeast Bioeng. Conf.* Pp. 171-172, Philadelphia, April 20-21, 2002.
- [Smagt 1998] Smagt P. V. Cerebellar Control of Robot Arms. *Connection Science*, no. 10, pp. 303-320, 1998.
- [Spence 2002] Spence R. Rapid, serial and visual: a presentation technique with potential. *Information Visualization* 1, pp. 13-19, 2002.

- [Stiver & Antsaklis 1992] Stiver, J. A. Antsaklis, P. J. Modeling and Analysis of Hybrid Control Systems. *Proc. 31st IEEE Conf. Decisión and Control*. Pp. 3748-3751, Tampa, FL, December 1992.
- [Stone 1991] Stone, R.J. Advanced Human System Interfaces for Tele-robotics using Virtual Reality and Telepresence Technologies. *Proceedings of the 5th Internacional Conference on Advanced Robotics*, Pisa, Italy, 1991.
- [Sturges 1991] Sturges R. H. J.; Reliability and Safety in Teleoperation; *Safety, Reliability and Human Factors in Robotic Systems*, pp. 83-115. Ed. J. H. Graham, New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [Tarn & Xi 1998] Tarn, T-J. Xi, N. Heterogeneous Function-Based Human/Robot Cooperations. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Leuven, Belgium, May 1998.
- [Tarn et al. 1994] Tarn, T-J. Bejczy, A.K. Guo, Ch. Xi, N. Intelligent Planning and Control for Telerobotic Operations. Department of Systems Science and Mathematics, Washington University. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 1994.
- [Tarn et al. 1995] Tarn, T. Xi, N. Guo, Ch. Bejczy, A.K. Function-Based Control Sharing for Robotic Systems. *Proceedings IEEE/RSJ 1995 International Conference on Intelligent Robots and Systems. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots'*. Vol. 3, pp. 1-6, Pittsburgh, PA, USA, August 1995.
- [Taylor & Ming 2004] R.H Taylor and L. Ming. Spatial motion constraints in medical robot using virtual fixtures generated by anatomy. *International Conference on Robotics and Automation*. Pp. 1270 – 1275, 2004.
- [Thomas et al. 2000] Thomas, F., Turnbull, C., Ros, Ll., Cameron, S., (2000) Computing Signed Distances between Free-Form Objects. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, April 2000.
- [Treisman, 1985] A. Treisman, Preattentive Processing in Vision, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 31(2): pp. 156-177, August 1985.
- [Turnbull & Cameron 1988] Turnbull, C., Cameron, S., (1998) Computing Distances Between NURBS-defined Convex Objects. *In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium, May 1998.
- [Vadakkepat, Tan & Liang 2000] P. Vadakkepat, K C.Tan, W. Ming-Liang, *Evolutionary Artificial Potential Fields an Their Application in Real Time Robot Path Planning*, Department of Electrical Engineering, The National University of Singapore, 2000.
- [Wang & Chirikjian 2000] Y. Wang, G. S. Chirikjian, A New potential Field Method for Robot Path Planning. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, USA, April 2000.

Referencias

- [Wijk & Nuij 2004] Wijk, J.J., Nuij, W.A.A. A Model for Smooth Viewing and Navigation of Large 2D Information Spaces. *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*. Vol. 10, no. 4, July/August 2004.
- [Wobbrock et al 2009] Wobbrock, J.O., Fogarty, J., Liu, S-Y., Kimuro, S., Harada, S. The Angle Mouse: Target-Agnostic Dynamic Gain Adjustment Based on Angular Deviation. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp. 1401-1410, Boston, MA, USA, April 4-9 2009.
- [Worden et al. 1997] Worden A., Walker N., Bharat K., Hudson S., Making Computers Easier for Older Adults to Use: Area Cursors and Sticky Icons. *Proceedings of CHI'97 Conference on Human Factors in Computing Systems*. Pp 266-271, Atlanta, Georgia, March 22-27 1997.
- [Wu, Tsukamoto & Kitazawa 2000] Wu J.L., Tsukamoto K., Kitazawa M., Measurement and Analysis of Human Characteristics on Distance Perception for Man-Machine Interface of Teleoperation Systems. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, November 2000.
- [Xi, Tarn & Bejczy 1993] Xi, N. Tarn, T-J. Bejczy, A.K. Event-Based Planning and Control for Multi-Robot Coordination. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1, pp. 251-258, May 1993.
- [Yokokohji et al. 1992] Yokokohji, Y. Ogawa, A. Hasunuma, H. Yoshikawa, T. Operation Modes for Cooperating with Autonomous Functions in Intelligent Teleoperation Systems. *Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 275-281, Tokyo, Japan, September 1992.
- [Zhai & Milgran 1991] Zhai, S. Milgran, P. A Telerobotic Virtual Control System. *Proceedings SPIE*. Vol. 1612, pp. 311-320. *Cooperative Intelligent Robotics in Space II*. Boston, 1991.
- [Zhai et al. 2003] Zhai, S., Conversy, S., Beaudouin-Lafon, M., Guiard, Y. Human On-line Response to Target Expansion. *CHI 03 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, Ft. Lauderdale, FL, USA. April 5-10, 2003.

