



Aportació als Criteris de Disseny Ergonomic de les Interfícies Persona-Màquina (HMI) per a Vehicles Submarins Teleoperats

Doctorand:

David Bonyuet Lee

Director de la Tesi:

Dr. Alexandre Monferrer

Setembre, 2002

Presentat al

**Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i
Informàtica Industrial**

com un requeriment per a l'obtenció del títol de
Doctor per la **Universitat Politècnica de Catalunya**
(U.P.C.)

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial

Edifici U, Campus Sud.

Carrer Pau Gargallo, # 5

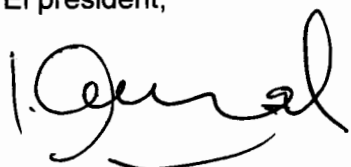
08018, Barcelona. Espanya.

Aquesta Tesi Doctoral ha estat llegida avui dia 27 de setembre de 2002 a la Sala d'Actes de la Facultat de Nàutica de Barcelona (UPC) i ha obtingut la qualificació de:

NOTABLE

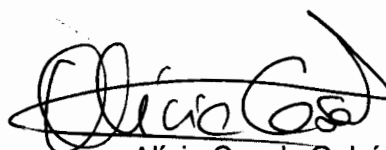
Barcelona, 27 de setembre de 2002.

El president,



Josep Amat Girbau

El secretari del Tribunal,



Alícia Casals Gelpí

Vocal,



Kamal Youcef-Toumi

Vocal,



Pere Ridao Rodríguez

Vocal,



Gabriel Oliver Codina



Thesis Summary

The growth of robotics -specially in intelligent systems- continues at an ever-faster pace, even though we still lack of totally autonomous systems to work in complex, unknown environments. Cost, safety needs and development time, among other considerations, make teleoperation an appealing way to perform some tasks. As we know, however, interaction between human operators and computers remains problematic -as can be seen in rescue operations from the Titanic to Chernobyl and, more recently, the missing teleoperated airplane in Afghanistan. These examples underscore the difficulties inherent in information utilization and robot teleoperation. An adequate user interface would solve these problems, increasing both user satisfaction and system usage. **The present project offers a contribution to the development and ergonomic design rules of user interfaces for teleoperated systems, specifically in the case of underwater robot applications.**

Teleoperated robots are currently employed in different fields, for example: mine exploration, spatial and underwater research, high-risk exploration areas and other applications where human intelligence is indispensable. Kress (from IEEE Robotics & Automation Society) <www.engr.utk.edu/maes/ff/rlk/ieee/> and others have pointed out that human machine interfaces (HMI) are critical to the success of teleoperation systems. A teleoperation task must display a great deal of information. Thus, virtual reality was added as a tool to enhance the plane camera images. Virtual reality helps solve some of those problems, e.g. spatial representation and object programming. This approach allows even for visual enhancement: the real image might be affected by weather conditions (rain, fog, etc.), time of the day (afternoon, night, etc.) and by natural environment (water composition can reduce underwater visibility). Virtual reality, allowing a clean, filtered image, would eliminate these and other inconveniences.

As this research progressed, several human-machine interfaces (HMI) were developed, taking into account the needs and reactions of average as well as expert users. The interfaces were created with virtual reality tools and programmed in C language. Two interfaces were developed to analyze the impact of information visualization and controllability. One of them was designed with enhanced information windows to focus primarily on data visualization; while the other simplifies robot maneuverability and control. The fruit of this research allows for both a framework and guidelines for HMI design and a model for teleoperated human-machine interaction.

In addition to the framework design, two interface evaluation methodologies were proposed. One, the Interface Index, is for rapid assessment. The other, the Usability Assessment, is for deep interface analysis, covering several parameters and stages in human-computer interaction. Several papers related to the development, design and evaluation of these interfaces have been published in international congresses related to this field.

Keywords: *Human Machine Interface, HMI, Man Machine Interface, MMI, Graphic User Interface, GUI, user interface, UI, teleoperation, virtual reality, VR, robotic, underwater robot, visualization, information visualization, information graphics, data presentation, graphic representation, interface evaluation, ergonomics, human factor.*

Resum de la tesi

El creixement de la robòtica (especialment en l'àrea dels sistemes intel·ligents) continua a grans passos, malgrat que encara no hi ha sistemes totalment autònoms per treballar en entorns complexos i desconeguts. Consideracions de cost, seguretat, temps de desenvolupament i altres, fan molt atractiva la teleoperació per a algunes tasques. És ben sabut que la interacció entre els operadors humans i els ordinadors encara és molt problemàtica (com es pot veure en les operacions de rescat del Titànic, Txernòbil i, més recentment, en la pèrdua d'un avió teleoperat a l'Afganistan). Aquests exemples fan ressaltar les dificultats inherents en la utilització de la informació i la teleoperació de robots. Una interfície persona-màquina (HMI) adequada podria resoldre aquest problema, cosa que incrementaria la satisfacció de l'usuari i la utilització del sistema. **Aquest projecte ofereix una contribució al desenvolupament i els criteris de disseny ergonòmic d'interfícies d'usuari per a sistemes teleoperats, especialment en el cas d'aplicacions amb robots submarins.**

Aquesta recerca es va desenvolupar com part del projecte UN.I.O.N i el projecte GARBÍ, aquest últim és el robot submergit teleoperat dissenyat per el Dr. Josep Amat i el seu equip, per ajudar als usuaris en les seves tasques marines. Una de les eines que ajuda a treballar millor un sistema teleoperat és la interfície persona-màquina (HMI) que serveix com canal de comunicació entre el sistema i l'usuari. Per iniciar el disseny de la interfície s'ha fet una recerca per determinar el marc teòric i l'estat de l'art en sistemes teleoperats, interfícies d'usuari i eines ergonòmiques de disseny. S'han desenvolupat eines per mesurar qualitativament la qualitat de les interfícies persona-màquina (HMI) dels sistemes teleoperats presents en la literatura científica i determinar les millores que s'haurien d'introduir en les interfícies en ordre de millorar la velocitat de transferència d'informació.

Les tasques de teleoperació han de mostrar una gran quantitat d'informació; aquesta situació es va resoldre en part mitjançant la realitat virtual, que es va fer servir com una eina per millorar les imatges de les càmeres. La realitat virtual, doncs, ajuda a resoldre alguns d'aquests problemes, com ara la representació espacial i la programació d'objectes. Aquest enfocament també permet una millora visual: la imatge real podria estar afectada per les condicions climàtiques (pluja, boirassa, etc.), per la part del dia (tarda, nit, etc.) i per l'entorn natural (la composició de l'aigua pot reduir la visibilitat submarina); la realitat virtual elimina tots aquests inconvenients i ofereix una imatge neta i filtrada.

Un entorn virtual es va crear per introduir a l'usuari dintre de les tasques marines i totes les eines necessàries per la conducció del vehicle es van posar en la interfície. Per desenvolupar una interfície ergonòmica i òptima s'ha d'involucrar als usuaris en el procés i aquestes activitats s'han de desenvolupar en forma específica i organitzada. Durant aquesta recerca es van desenvolupar diverses interfícies persona-màquina, tenint en compte les necessitats i reaccions d'usuaris nous i experts. Dues interfícies es van desenvolupar per analitzar l'impacte de la visualització de la informació i la controlabilitat: una de les interfícies es va dissenyar amb finestres d'informació millorada per enfocar-la més a la visualització de dades i en l'altra es va simplificar el control i la manipulació del robot. El procés d'avaluació de les interfícies es va descriure, incloent una nova metodologia basat en els paràmetres d'utilització, la qual abasta diversos paràmetres i etapes de la interacció usuari-ordinador: la tasca, l'usuari i la interfície. Aquesta metodologia es va provar amb les interfícies desenvolupades i amb interfícies de jocs semblants.

Paraules clau: *interfície persona-màquina, HMI, MMI, interfície gràfica d'usuari, GUI, interfície d'usuari, UI, teleoperació, realitat virtual, VR, entorns virtuals, robòtica, robots submarins, visualització, visualització d'informació, informació gràfica, presentació de dades, representació gràfica, avaluació d'interfícies, ergonomia, factor humà.*

Agraïment

Aquesta tesi marca la culminació de gaire be deu anys com estudiant de doctorat de la **Universitat Politècnica de Catalunya** i durant aquest temps vaig gaudir d'una oportunitat increïble al compartir i treballar amb els meus bon companys del departament d'**Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial** i tots els altres departaments de la universitat. Les experiències que vaig guanyar en aquest temps son invalorables i inoblidables.

Estic especialment endeutat amb el meu tutor Dr. Alexandre Monferrer, per la seva dedicació i paciència en tots aquest anys, el seu continu suport va ser imprescindible per permetre la culminació d'aquesta etapa de la meua vida i l'inici d'un altre. El suport i confiança del Dr. Josep Amat va ser infinitament important en el desenvolupament d'aquesta recerca i els seus comentaris i punts de vista van enriquir significativament tots els aspectes continguts en aquesta tesi. Les correccions dels revisors externes van ser invaluables i van oferir significatives millores en aquest projecte. Agraïxo profundament les seves recomanacions i ajudes. També el suport durant la carrera del doctorat dels Dr. Andreu Català i Dr. Joan Climent van ser molt important.

Al Servei de Llengües i Terminologia en la Unitat d'Assessorament Lingüístic, en especial a la Marta de Blas, per la seva paciència, dedicació i rapidesa en les correccions. Han fet un esforç molt gran en entendre els meus escrits originals. No deixo d'aprendre el català amb entusiasme, però em sap greu que encara no pugui fer-ho perfectament.

Estic molt agraït amb la meua família pel seu continu suport: el meu pare per suportar-me tots aquest anys i per ser l'exemple de dedicació i treball; la meua dona Damaris i la meua filla Dairen per la seva paciència i ajuda: van jugar un paper molt important durant totes les entrevistes i el desenvolupament de les proves. Sense elles no hauria pogut atendre als enquestats i acabar la tesi. Les seves atencions i galetes van guanyar la atracció de mes participants i voluntaris.

A tots els meus companys del departament d'**ESAI**: Alicia Casals, Rita Planas, Josep Fuertes, Pere Caminal, Jaume Pagès, Andreu Català, Joseba Quevedo, Joan Aranda, Joan Climent, Bernardo Morcego, Juan Carlos Aguado, Josep Fernández, Antoni Guasch, Antonio Martínez, Ricard Vila, Vincenç Puig, Manel Frigola, Pere Mares, Jordi Riera, Jaume Figueres, i tots els membres del departament, que sempre han demostrat la qualitat de la amistat catalana al rebre a un veneçolà perdut en la gran Catalunya. Per a mi va ser un plaer i honor treballar i compartir amb tots vosaltres.

Aquesta tesi reflexa la influencia catalana en forma directa o indirecta de totes i cadascuna de les persones amb qui he treballat.

A tots vosaltres i a Catalunya, de tot cor,

MERCI!

i

Força Barça

*“School is a drill for the battle of life.
If you fail in the drill you will fail in the battle.”*

**Karl G. Maeser
(1828–1901)**

CONTINGUT

Thesis Summary	iii	
Resum de la Tesi	v	
Agraïment	vii	
Contingut	ix	
1	CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	1
1.1.-	INTRODUCCIÓ	2
1.2.-	ROBÒTICA, TELEOPERACIÓ I INTERFÍCIES D'USUARI	2
1.3.-	CAMPS D'APLICABILITAT DE LA TELEOPERACIÓ	3
1.4.-	DIFICULTATS I MANCANCES DELS SISTEMES TELEOPERATS	3
1.4.1.-	PROBLEMES DE LA TELEOPERACIÓ	3
1.4.2.-	OPERACIÓ DELS ROVS	4
1.4.3.-	PROBLEMES DE LES INTERFÍCIES DE VEHICLES TELEOPERATS	5
1.4.4.-	CONDUCCIÓ ASSISTIDA DE ROBOTS SUBMARINS	6
1.5.-	ESTUDIS ACTUALS	7
1.6.-	OBJECTIUS DE LA TESI	8
1.7.-	ESTRUCTURA DE LA TESI	9
1.8.-	METODOLOGIA DE TREBALL I AVALUACIÓ DELS RESULTATS	10
2	CAPÍTOL 2. MARC TEÒRIC I ESTAT DE L'ART	11
2.1.-	INTRODUCCIÓ	12
2.2.-	ERGONOMÍA	12
2.2.1.-	EVOLUCIÓ HISTÒRICA DE L'ERGONOMÍA	12
2.2.1.1.-	Etapa Intuïtiva	12
2.2.1.2.-	Etapa Científica	13
2.2.1.3.-	Etapa Humanista	14
2.2.2.-	APLICACIÓ DE L'ERGONOMÍA EN L'ÀMBIT INDUSTRIAL	14
2.2.3.-	INTERACCIÓ I INTERFÍCIE	15
2.3.-	L'ERGONOMIA EN LES INTERFÍCIES INTERACTIVES	16
2.3.1.-	AVANTATGES D'UN SOFTWARE HUMÀ	16
2.3.2.-	AVALUACIÓ I FACTORS HUMANS MESURABLES	16

2.4.-	VISUALITZACIÓ MITJANÇANT L'ORDINADOR	17
2.5.-	ALTERNATIVES DE VISUALITZACIÓ	17
2.5.1.-	LA REALITAT VIRTUAL	17
2.5.1.1.-	Antecedents de la Realitat Virtual	18
2.5.2.-	SISTEMES MULTIMEDIA	18
2.5.3.-	INSTRUMENTACIÓ VIRTUAL	18
2.6.-	TELEROBÒTICA	18
2.7.-	INTERFÍCIES DE SISTEMES RELACIONATS	19
2.7.1.-	INTERFÍCIES PER A SISTEMES AERIS	19
2.7.2.-	INTERFÍCIES PER A LA TELEOPERACIÓ DE BRAÇOS ROBOTITZATS	21
2.7.2.1.-	El sistema MEISTER	21
2.7.2.2.-	Les Interfícies del Laboratori JPLATOP	22
2.7.2.3.-	El Telerobot a Internet < http://telerobot.mech.uwa.edu.au/ >	23
2.7.2.4.-	Sistema ARS/A (Aerospace Robot System for Aoba Arm)	25
2.7.2.5.-	Sistema VEMI (Virtual Environment Manipulator Interface)	26
2.7.2.6.-	Sistema Telerobot VR	27
2.7.2.7.-	Sistema DARTS (Dual-Arm Robot Teleoperation in Space)	28
2.7.2.8.-	Interfície del Braç Robotitzat per al Satèl·lit ETS-VII	29
2.7.2.9.-	Interfície pel Robot RANGER	30
2.7.3.-	INTERFÍCIES PER A VEHICLES TELEOPERATS	31
2.7.3.1.-	La Primera Actuació d'un Robot Teleoperat: Recuperant el Titànic	31
2.7.3.2.-	La Teleoperació Espacial	31
2.7.3.3.-	Teleoperació d'Helicòpters	32
2.7.4.-	NAVEGACIÓ I LOCOMOCIÓ EN MON VIRTUALS	32
2.7.4.1.-	Vehicles Virtuals	32
2.7.4.2.-	Utilització de Gràfiques en Miniatura	34
2.7.4.3.-	Una Cova Real en un Entorn Virtual	34
2.7.4.4.-	Sistema NUMBAT	35
2.7.4.5.-	Interface pel al Control de Robots Cooperatius	37
2.7.4.6.-	Sistema Multiusuari Distribuït VE (Multi-User Distributed Virtual Environments)	38
2.7.4.7.-	Teleoperació en PDA	39
2.7.4.8.-	Simulador Virtual dels Robots Submarins	40
2.7.4.9.-	Robot FIDO (Field Integrated Design and Operations)	41
2.7.4.10.-	Control d'Avions de Reconeixement No Pilotats	42
2.8.-	COMPARACIÓ DE LES INTERFÍCIES	43
2.9.-	AVALUACIÓ QUALITATIVA DE LES INTERFÍCIES	43

3	CAPÍTOL 3. ESTRUCTURA DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) I L'ÍNDIX D'INTERFÍCIES	41
3.1.-	INTRODUCCIÓ	42
3.2.-	¿QUÈ SÓN LES INTERFÍCIES?	42
3.3.-	DISSENY DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI)	45
3.4.-	DISSENY D'INTERFÍCIES INTERACTIVES	45
3.4.1.-	CONCEPCIONS DE LES INTERFÍCIES	46
3.4.1.1.-	El Disseny Conceptual	46
3.4.1.2.-	El Disseny Funcional	47
3.4.1.3.-	Disseny Seqüencial	47
3.4.1.4.-	Disseny de Validació	47
3.4.2.-	DISSENY D'INTERFÍCIES D'USUARI: ENFOCAMENT DE COMPORTAMENT (BEHAVIORAL) I DE CONSTRUCCIONS (CONSTRUCTIONAL)	48
3.5.-	ESTILS D'INTERFÍCIES INTERACTIVES	48
3.5.1.-	COMANDES	49
3.5.2.-	INTERFÍCIE DE FINESTRES (WINDOWS), ICONES I MANIPULACIÓ DIRECTA	49
3.5.3.-	LA BARRA DE MENÚS	51
3.5.4.-	ALTRES FORMES DE DIÀLEG	52
3.5.4.1.-	What You See Is What You Get (WYSIWYG)	52
3.5.4.2.-	Interfícies de Llenguatge Natural	52
3.5.4.3.-	Finestres de Menús amb Carpetes	53
3.5.4.4.-	Comparació dels Diferents Estils de Presentació	53
3.6.-	DISSENY DE DISPOSITIUS I CONTROLS	54
3.7.-	SEGURETAT D'UTILITZACIÓ DE LA INTERFÍCIE	54
3.8.-	LA IMPORTÀNCIA DEL COLOR A LES INTERFÍCIES	55
3.8.1.-	LA VISIÓ DEL COLOR	55
3.8.2.-	DEFICIÈNCIES VISUALS	55
3.9.-	DISSENY GRÀFIC PER A UNA EFECTIVA COMUNICACIÓ VISUAL	56
3.9.1.-	CODIFICACIÓ DEL COLOR	57
3.9.2.-	COLOR A INTERFÍCIES	58
3.9.3.-	IMATGES, SÍMBOLS, I ICONES	58
3.9.4.-	HABILITAT D'OPERACIÓ REQUERIDES PER L'USUARI	60
3.10.-	DISCRIMINACIÓ DELS SENYALS	61
3.11.-	TEMPS DE REACCIÓ	62
3.11.1.-	MÀXIMA VELOCITAT ALS ESTÍMULS	63

3.12.-	LES PERSONES GRANS I LA UTILITZACIÓ DE LES INTERFÍCIES D'ORDINADOR	63
3.13.-	EL PROCÉS NORMATIU: NORMES I GUIES	64
3.13.1.-	ESTÀNDARDS D'INTERACCIÓ	65
3.13.2.-	GUIES DE DISSENY D'INTERFÍCIES	65
3.13.3.-	GUIES COMERCIALS	65
3.13.4.-	GUIES DEL CLIENT	66
3.14.-	LES REGLES D'OR	66
3.15.-	AVALUACIÓ RÀPIDA D'INTERFÍCIES: ÍNDEX D'INTERFÍCIES	66
3.15.1.-	EXEMPLE DE L'ÍNDEX D'INTERFÍCIES	68
3.15.2.-	INTERPRETACIÓ DE L'ÍNDEX D'INTERFÍCIES	70
3.15.3.-	APLICACIÓ DE L'ÍNDEX D'INTERFÍCIES A LES INTERFÍCIES ESTUDIADES	71
4	CAPÍTOL 4. OPTIMITZACIÓ FUNCIONAL DE LA INTERFÍCIE PERSONA - MÀQUINA (HMI)	75
4.1.-	INTRODUCCIÓ	76
4.2.-	PIRÀMIDE DE COMPLEXITAT	76
4.3.-	FENÒMENS PSICOPERCEPTIUS	77
4.3.1.-	PERCEPCIÓ VISUAL	78
4.3.1.1.-	Formes	78
4.3.2.-	ESPAI	79
4.3.3.-	MOVIMENT	80
4.3.4.-	LA CLAREDAT VISUAL	80
4.3.4.1.-	L'Escola Gestalt	80
4.3.4.2.-	Les Variables Visuals de Jacques Bertin	82
4.3.4.3.-	Les Primitives de Fernande Saint-Martin	83
4.4.-	LLINDAR ENTRE EL DISSENY ARTÍSTIC I EL DISSENY NTEL·LECTUAL: EL DISSENY CREATIU	83
4.4.1.-	IDIOMA DE LA INTERFÍCIE	84
4.5.-	PRIORITZACIÓ DE LA INFORMACIÓ EN LA PANTALLA	85
4.6.-	EL PRE - DISSENY: INFORMACIÓ D'INICI EN EL DISSENY	86
4.7.-	REQUERIMENTS DE LES INTERFÍCIES DE SISTEMES TELEOPERATS DE ROBOTS MÒBILS	86
4.8.-	REQUERIMENTS DEL SISTEMA	87
4.8.1.-	NECESSITATS DE CONTROL	87
4.8.2.-	NECESSITATS DE VISUALITZACIÓ	88
4.8.3.-	PARÀMETRES DE CONTROL I VISUALITZACIÓ DEL VEHICLE SUBMARÍ	89

4.9.-	ETAPES DE DESENVOLUPAMENT A PARTIR DE LA INTERFÍCIE CONCEPTUAL	90
4.9.1.-	EL DISSENY PLA	90
4.9.2.-	EL DISSENY DE PLA COMPOST: PLA D'ESCENA I ALÇADA	91
4.9.3.-	AVALUACIÓ	91
4.9.3.1.-	Preavaluació del Disseny	91
4.9.4.-	INTERFÍCIE TRIDIMENSIONAL AMB LÍNIES	93
4.9.5.-	INTERFÍCIE TRIDIMENSIONAL MITJANÇANT EINES D'ENTORNS VIRTUALS	93
4.9.5.1.-	Esquemes de Presentació de la Relació Superfície-Robot-Fons	95
4.9.5.2.-	Representació de la Ubicació Espacial: Ombres Virtuals	96
4.9.5.3.-	Distribució dels Comandaments i Funcions en Pantalla	98
4.10.-	INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PROPOSADES	101
4.10.1.-	DEFINICIÓ DE LA INTERFÍCIE PERSONA-MÀQUINA (HMI) "A"	102
4.10.2.-	DEFINICIÓ DE LA INTERFÍCIE PERSONA-MÀQUINA (HMI) "B"	104
4.11.-	L'ÍNDEX DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PROPOSADES	106
4.12.-	OPTIMITZACIÓ FUNCIONAL DE L'HMI	108
4.12.1.-	DISSENY FUNCIONAL	108
4.12.2.-	DISSENY ÒPTIM	110
4.12.3.-	TELEOPERACIÓ EN ENTORNS COOPERATIUS	113
5	CAPÍTOL 5. PROPOSTA DELS PARÀMETRES D'AVAUACIÓ DE LA INTERFÍCIE PERSONA-MÀQUINA (HMI)	113
5.1.-	ALTERNATIVES DE VISUALITZACIÓ EN DIFERENTS ENTORNS INFORMÀTICS	114
5.2.-	TEORIES D'USUARIS: ¿QUÈ TENEN AL CAP?	115
5.2.1.-	FACTORS DEPENDENTS DELS USUARIS	115
5.2.2.-	CATEGORITZACIÓ DELS USUARIS	116
5.3.-	MÈTODES D'AVAUACIONS D'INTERFÍCIES	117
5.3.1.-	AVALUACIÓ HEURÍSTICA	118
5.3.2.-	GUIES D'UTILITZACIÓ	118
5.3.3.-	INSPECCIÓ ESTÀNDARD	119
5.3.4.-	ASSAIG COGNOSCITIU PRELIMINAR	119
5.3.5.-	EXECUCIONS EN VEU ALTA	119
5.3.6.-	COMPARACIONS DE METODOLOGIES D'AVAUACIÓ	119
5.4.-	PARÀMETRES PROPOSATS D'AVAUACIÓ D'INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA	121
5.4.1.-	PARÀMETRES D'UTILITZACIÓ	123
5.4.1.1.-	Facilitat d'Ús	124

5.4.1.1.1.-	Intuïtivitat	124
5.4.1.1.2.-	Facilitat d'Aprenentatge	125
5.4.1.2.-	Eficàcia	127
5.4.1.3.-	Prestacions	128
5.4.2.-	FORMES DE MESURAR ELS PARÀMETRES D'AVUACIÓ	128
5.5.-	ESQUEMA DE LA RECERCA	129
5.5.1.-	COMPOSICIÓ DE LES PROVES	129
5.5.2.-	METODOLOGIA D'AVUACIÓ D'INTERFÍCIES	129
5.5.3.-	REALITZACIÓ DE L'AVUACIÓ	130
5.5.3.1.-	Informació d'Inici	131
5.5.3.1.1.-	Explicació de l'Avuació	132
5.5.3.1.2.-	Explicació del Sistema	132
5.5.3.1.3.-	Tranquil·litzar als Usuaris	132
5.5.3.1.4.-	Recomanacions dels usuaris	133
5.5.3.2.-	Distribució dels Usuaris	133
5.5.3.3.-	Selecció de les Preguntes de la Interfície	134
5.5.4.-	DEFINICIÓ DE LES PROVES	134
5.5.4.1.-	Per a la Determinació de la Facilitat d'ús	135
5.5.4.1.1.-	Prova d'Intuïtivitat	135
5.5.4.1.2.-	Prova de Facilitat d'Aprenentatge	137
5.5.4.2.-	Eficàcia de les Tasques	138
5.5.4.2.1.-	Valoració dels Perifèrics d'Entrada	139
5.5.4.3.-	Per a la Determinació de les Prestacions	140
5.5.5.-	RESUM DEL PROCÉS D'AVUACIÓ	141
5.5.6.-	COMPARACIÓ DE L'ÍNDIX D'INTERFÍCIES I ELS PARÀMETRES D'AVUACIÓ	142
6	CAPÍTOL 6. RESULTATS DE LES PROVES D'INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI)	139
6.1.-	INTRODUCCIÓ	140
6.2.-	SELECCIÓ DE LES PREGUNTES DE LA INTERFÍCIE	140
6.2.1.-	PREGUNTES DEL TIPUS "INFORMATIU"	141
6.2.2.-	PREGUNTES DEL TIPUS "ACCIÓ" (COMANDA)	142
6.3.-	ESCALA DELS PARÀMETRES	142
6.3.1.-	SIGNIFICAT DELS PARÀMETRES	142
6.3.2.-	VARIABLES SIMPLS	143
6.3.3.-	VARIABLES DESPLAÇADES	143

6.3.4.-	VARIALES INVERTIDES	143
6.3.5.-	OPERACIONS AMB ELS PARÀMETRES	144
6.4.-	PROVES REALITZADES	144
6.4.1.-	RESULTAT DE LES PROVES DE FACILITAT D'ÚS	145
6.4.1.1.-	Resultats de les Proves d'Intuïtivitat	145
6.4.1.2.-	Càlcul de la Intuïtivitat	146
6.4.1.3.-	Resultats de la Facilitat d'Aprenentatge	146
6.4.1.3.1.-	Resultat de les Proves de la Interfície "A"	147
6.4.1.3.2.-	Resultat de les Proves de la Interfície "B"	147
6.4.1.4.-	Càlcul de l'Aprenentatge	148
6.4.1.5.-	Càlcul de la Facilitat d'Ús	149
6.4.2.-	RESULTAT DE LES PROVES D'EFICIÈNCIA	149
6.4.2.1.-	Resultat de la Prova "Conducció del Robot a un Punt"	150
6.4.2.2.-	Resultat de la Prova "Cercar un Objecte"	150
6.4.2.3.-	Càlcul de l'Eficàcia	151
6.4.3.-	RESULTAT DE LES PROVES DE PERIFÈRICS D'ENTRADA: TECLAT, RATOLÍ I PAD	152
6.4.3.1.-	Condicions de la Prova de Perifèrics	152
6.4.3.2.-	Conducció del Robot cap a un Punt Determinat	152
6.4.3.3.-	Cerca d'Objectes en el Fons Mari	153
6.4.3.4.-	Satisfacció dels Usuaris amb els Perifèrics	153
6.4.4.-	PRESTACIONS	154
6.4.4.1.-	Satisfacció General	154
6.4.4.2.-	Càlcul de les Prestacions	155
6.4.4.3.-	Grau d'Utilitat: Valoració de les Dades	155
6.4.4.3.1.-	Metodologia de Recol·lecció de Dades	155
6.4.4.3.2.-	Valoració dels Elements de la Interfície "A"	155
6.4.4.3.3.-	Valoració dels Elements de la Interfície "B"	156

7 CAPÍTOL 7. ANÀLISI DELS RESULTATS D'AVAUACIÓ I PROPOSTA DE CRITERIS DE DISSENY ERGONÒMIC DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PER A VEHICLES SUBMARINS **157**

7.1.-	INTRODUCCIÓ: ANÀLISI DE RESULTATS	158
7.2.-	COMPARACIÓ DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA "A" I "B" PROPOSADES	158
7.2.1.-	AVAUACIÓ DE LES INTERFÍCIES AMB ELS PARÀMETRES DE VISUALITZACIÓ I COMANDAMENT PROPOSATS	158

7.2.1.1.-	Avaluació de la Interfície A	158
7.2.1.2.-	Avaluació de la Interfície B	159
7.2.2.-	AVALUACIÓ DE LES INTERFÍCIES AMB ELS PARÀMETRES TRADICIONALS	161
7.2.2.1.-	Paràmetres Tradicionals en la Interfície "A"	161
7.2.2.2.-	Paràmetres Tradicionals en la Interfície "B"	162
7.3.-	INTERFÍCIES DE JOCS INFORMÀTICS	162
7.3.1.-	DEEP FIGHTER	162
7.3.2.-	W2W UNDERWATER SUBMARINE TORPEDO GAME	163
7.3.3.-	SUB CULTURE	164
7.3.4.-	SUBMARINE TITANS	164
7.4.-	AVALUACIÓ DE LES INTERFÍCIES DE JOCS INFORMÀTICS	165
7.4.1.-	ÍNDIX DE LES INTERFÍCIES DE JOCS	165
7.4.2.-	AVALUACIÓ DE W2W UNDERWATER SUBMARINE TORPEDO GAME	166
7.4.3.-	AVALUACIÓ DE SUB CULTURE	166
7.4.4.-	AVALUACIÓ DE DEEP FIGHTER	167
7.4.5.-	AVALUACIÓ DE SUBMARINE TITAN	167
7.4.6.-	ANÀLISI COMPARATIVA DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA PROPOSADES I LES DELS JOCS	168
7.5.-	LES ACTIVITATS DELS USUARIS	168
7.6.-	PROPOSTES DE CRITERIS DE DISSENY ERGÒNOMIC DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PER A VEHICLES SUBMARINS	169
7.6.1.-	EL PROCÉS COGNOSCITIU DE LA RELACIÓ: USUARI – INTERFÍCIE – SISTEMA	171
7.7.-	GUIA DE LA PROPOSTA DE CRITERIS DE DISSENY ERGÒNOMIC DE LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PER A VEHICLES SUBMARINS	172
8	CAPÍTOL 8. CONCLUSIONS, APORTACIONS I ALTRES ÀREES D'INVESTIGACIÓ	173
8.1.-	CONCLUSIONS	174
8.2.-	APORTACIONS A LES INTERFÍCIES PERSONA-MÀQUINA (HMI) PER A VEHICLES SUBMARINS	175
8.3.-	TREBALLS PUBLICATS	177
8.4.-	ÀREES OBERTES DE POSSIBLES TREBALLS FUTURS	179
A	ANNEX A. RESULTATS DE L'AVAUACIÓ DELS JOCS INFORMÀTICS	181
A.1.-	INTRODUCCIÓ	182
A.2.-	RESULTAT DE LES PROVES AMB SUBMARINE TITANS	182

A.2.1.-	RESULTATS DE LA FACILITAT D'ÚS DE SUBMARINE TITAN	182
A.2.1.1.-	Resultats de la Intuïtivitat de Submarine Titan	182
A.2.1.2.-	Càlcul de la Intuïtivitat de Submarine Titan	183
A.2.1.3.-	Resultats de la Facilitat d'Aprenentatge de Submarine Titan	183
A.2.1.4.-	Càlcul de l'Aprenentatge de Submarine Titan	184
A.2.1.5.-	Càlcul de la Facilitat d'Ús en Submarine Titan	184
A.2.2.-	RESULTAT DE LES PROVES D'EFICIÈNCIA EN EL JOC SUBMARINE TITAN	184
A.2.2.1.-	Càlcul de la Eficàcia en Submarine Titan	185
A.2.3.-	PRESTACIONS DE SUBMARINE TITAN	185
A.2.3.1.-	Càlcul de les Prestacions de Submarine Titan	185
A.3.-	RESULTAT DE LES PROVES AMB DEEP FIGHTER	185
A.3.1.-	RESULTATS DE LA FACILITAT D'ÚS DE DEEP FIGHTER	185
A.3.1.1.-	Resultats de la Intuïtivitat de Deep Fighter	185
A.3.1.2.-	Càlcul de la Intuïtivitat de Deep Fighter	186
A.3.1.3.-	Resultats de la Facilitat d'Aprenentatge de Deep Fighter	186
A.3.1.4.-	Càlcul de l'Aprenentatge en el Joc Deep Fighter	187
A.3.1.5.-	Càlcul de la Facilitat d'Ús de Deep Fighter	187
A.3.2.-	RESULTAT DE LES PROVES D'EFICIÈNCIA EN EL JOC DEEP FIGHTER	187
A.3.2.1.-	Càlcul de l'eficàcia en el Joc Deep Fighter	188
A.3.3.-	PRESTACIONS DE DEEP FIGHTER	188
A.3.3.1.-	Càlcul de les Prestacions de Deep Fighter	188
A.4.-	RESULTAT DE LES PROVES AMB SUB-CULTURE	188
A.4.1.-	RESULTATS DE FACILITAT D'ÚS DE SUB-CULTURE	188
A.4.1.1.-	Resultats de la Intuïtivitat de Sub-Culture	188
A.4.1.2.-	Càlcul de la Intuïtivitat de Sub-Culture	189
A.4.1.3.-	Resultats de la Facilitat d'Aprenentatge de Sub-Culture	189
A.4.1.4.-	Càlcul de l'Aprenentatge en el Joc Sub-Culture	189
A.4.1.5.-	Càlcul de la Facilitat d'Ús de Sub-Culture	190
A.4.2.-	RESULTAT DE LES PROVES D'EFICIÈNCIA EN EL JOC SUB-CULTURE	190
A.4.2.1.-	Càlcul de l'eficàcia en el Joc Sub-Culture	190
A.4.3.-	PRESTACIONS DE SUB-CULTURE	191
A.4.3.1.-	Càlcul de les Prestacions de Sub-Culture	191
A.5.-	RESULTAT DE LES PROVES EN EL JOC W2W UNDERWATER SUBMARINE TORPEDO GAME	191
A.5.1.-	RESULTATS DE LA FACILITAT D'ÚS DE W2W SUBMARINE GAME	191
A.5.1.1.-	Resultats de la Intuïtivitat de W2W Submarine Torpedo Game	191
A.5.1.2.-	Càlcul de la Intuïtivitat de W2W Submarine Torpedo Game	191
A.5.1.3.-	Resultats de la Facilitat d'Aprenentatge de W2W Submarine Game	192

A.5.1.4.-	Càlcul de l'Aprenentatge en el Joc W2W Submarine Game	192
A.5.1.5.-	Càlcul de la Facilitat d'Ús de W2W Submarine Game	192
A.5.2.-	RESULTAT DE LES PROVES D'EFICIÈNCIA EN W2W SUBMARINE GAME	192
A.5.2.1.-	Càlcul de l'Eficàcia en el Joc W2W Submarine Game	193
A.5.3.-	PRESTACIONS DE W2W SUBMARINE GAME	193
A.5.3.1.-	Càlcul de les Prestacions de W2W Submarine Game	193

B ANNEX B. EFECTES DE LES ROTACIONS I ELS MOVIMENTS EN L'ENTORN VIRTUAL 195

B.1.-	INTRODUCCIÓ	196
B.2.-	GEOMETRIA DE L'OBSERVACIÓ	196
B.2.1.-	TRANSLACIÓ D'OBJECTES	196
B.2.2.-	ROTACIÓ D'OBJECTES	196
B.2.3.-	ROTACIÓ I TRANSLACIÓ D'OBJECTES	197
B.2.4.-	ROTACIÓ DEL PUNT DE VISTA	198
B.2.5.-	TRANSLACIÓ DEL PUNT DE VISTA	198

REFERENCIES BIBLIOGRAFiques 201

Capítol 1

Introducció

*“The only way of discovering the limits of the possible
is to venture a little way past them into the impossible”*

Arthur C. Clarke

Capítol 1. Introducció

1.1.- Introducció

La robòtica està creixent ràpidament des de sistemes senzills cap a sistemes més intel·ligents i complexos. Però encara som una mica lluny d'aconseguir un sistema totalment independent en entorns desconeguts [BEJ 96, POL 01]. Stephen M. Rock, de la Universitat de Stanford, va comentar que "the robustness of autonomous robotic systems to unanticipated circumstances is typically insufficient for use in the field" [ROC 98], i Pollack va dir: "One big obstacle remains: it is expensive to design and make robots smart enough to adapt readily to different tasks and physical environments, the way human beings do" [POL 01]. Les dificultats tècniques, econòmiques, de seguretat i de temps de realització de certes tasques fan més atractiva la teleoperació com a alternativa per dur a terme aquests treballs.

Els sistemes teleoperats, i en particular els ROV (Remotely Operated Vehicle), suposen un esforç d'operació i control per al conductor que, en condicions crítiques, poden arribar a resultats poc satisfactoris o, en el pitjor dels casos, a situacions dolentes. Rigaud i el seu equip van dir: "These vehicles (ROV) are typically controlled by a human user through a teleoperation interface. This form of operation is extremely flexible and powerful, but it is also very expensive, very tedious for the human operator, and very slow." [RIG 98] Desastres com el de la central nuclear de Txernòbil (1986), les dificultats d'operació de robots teleoperats (vegeu



Fig.- 1.1 Imatge del rescat del *Titànic*
<<http://www.geocities.com/titanicandco/discovery.htm>>

la fig. 1.1) durant la cerca i el rescat de l'RMS *Titànic* (1985), el complicat rescat de les peces de l'avió TRW que va caure a les costes de Nova York (1995) mitjançant robots teleoperats i, recentment, la pèrdua de l'avió espia que va ser enviat a l'Afganistan durant l'atac dels terroristes (2001). Aquests són exemples de treballs en què la interacció persona-màquina va ser crítica. A la figura 1.2 es pot veure una simulació del procés de rescat d'un avió enfonsat, creat per Scott McHolland, que es pot trobar a la següent adreça electrònica: <<http://homepages.msn.com/TimesSquare/smcholland/>>



Fig.- 1. 2.- Rescat d'un avió, mitjançant un robot submari, imatge creada per Scott McHolland
<<http://homepages.msn.com/TimesSquare/smcholland/>>

Les interfícies d'usuari són la finestra que ens permet "veure" el comportament del sistema que estem controlant, i és l'entrada de les dades que el sistema requereix per operar; per tant, un bon disseny de la interfície és fonamental. Amat i el seu equip van considerar que "Man-Machine Interface (MMI) is crucial for optimizing interaction between humans and computers" [AMA 99]. En aquests darrers anys s'ha treballat molt en l'aplicació de l'ergonomia en els aspectes més recents de la tecnologia, i és un bon moment per aplicar-la a la robòtica.

1.2.- Robòtica, Teleoperació i Interfícies d'Usuari

La **robòtica** és la ciència d'imitar accions humanes o d'expandir la capacitat de l'ésser humà mitjançant eines mecàniques, elèctriques, electròniques o informàtiques. Els robots ajuden en totes les accions en què cal fer operacions repetitives, sincronitzades i automatitzades.

La **teleoperació** consisteix a controlar un robot des d'un altre lloc més confortable i segur per a un ésser humà. La meta és aconseguir robots intel·ligents capaços d'actuar per ells mateixos. Mentre això no sigui possible a causa dels requeriments informàtics necessaris, la teleoperació és l'opció més viable [ABI 92, BEJ 96, CHO 00]. Amb la teleoperació s'afegeix la intel·ligència humana a la força i a la capacitat operativa del robot.

Les **interfícies d'usuari**, també conegudes com a man-machine interface (MMI), human machine interface (HMI) o interfícies persona-màquina, són el conjunt de dades presentades del sistema robotitzat a les pantalles d'ordinador que un usuari ha de fer servir a fi de controlar-lo i visualitzar-ne l'estat operatiu. Les interfícies, en aquest cas, són les eines de comunicació entre l'usuari i el robot teleoperat. A la tesi farem servir qualsevol dels quatre noms esmentats.

1.3.- Camps d'Aplicabilitat de la Teleoperació

El camp d'aplicació de la robòtica cada vegada s'està expandint més. Totes les accions que un ésser humà pot realitzar es poden fer amb robots. Actualment s'estan utilitzant els robots teleoperats en camps com l'exploració de mines, la investigació i la cerca submarina, les operacions espacials, les activitats perilloses, el treball amb material nociu i altres aplicacions en què la força o la capacitat de moviment d'un robot és preferible a la de l'ésser humà, però en què la intel·ligència d'aquest és indispensable (com als àmbits de la cirurgia remota —telemedicina—, la tele-rehabilitació, la nanorobòtica, etc.).

Amb l'expansió d'Internet és molt probable que les activitats teleoperades de certes tasques es tornin populars. Sobretot per la facilitat del teleensenyament, és a dir, l'ensenyament a distància, en el qual una persona molt capacitada, però llunyana, fa servir l'equip, mentre que els alumnes, en un altre indret, aprenen les activitats relacionades. Per altra banda, Internet també facilita la repetició de les accions i la simulació de tasques, ja que els operadors poden practicar i repassar les activitats diverses vegades.

1.4.- Dificultats i Mancances dels Sistemes Teleoperats

1.4.1.- Problemes de la Teleoperació

Alguns dels problemes que es poden trobar en l'operació dels ROV, són els següents:

- Els ROV són sistemes de dinàmica variable que treballen en espais tridimensionals amb sis graus de llibertat; a aquesta llibertat s'hi afegeix la dificultat de treballar amb un robot i tots els seus comandaments. S'ha de considerar que a l'espai tridimensional la possibilitat d'anar amunt, avall, cap a la dreta, cap a l'esquerra, endavant i endarrere són moviments habituals; però no és així a la nostra vida quotidiana. Rong Zhou i el seu equip de la Universitat de Mississipi treballen per millorar la seguretat en robots teleoperats mitjançant interfícies d'usuaris [KAB 97a].



Fig.- 1.3 Restes d'un vaixell enfonsat
<www.noaa.gov/baker/imatges/>

- **L'entorn on es desplaça el ROV és advers (poden haver-hi obstacles, perturbacions i altres condicions de conducció difícils, com ara aigua bruta) i desconegut per a l'operador.** Fins i tot pot passar que aquest entorn hagi canviat per efectes de l'erosió o per condicions ambientals pròpies d'aquell lloc. En el cas de robots submarins, el fet de desplaçar-se en un entorn fluid condiciona la velocitat de reacció tant de l'usuari com del mateix robot i, per tant, és molt important entendre totes les dades que ens dona el robot. A més a més, es poden trobar obstacles per tot arreu, i l'usuari ha de tenir aquesta informació disponible. La figura 1.3 mostra les restes d'un vaixell enfonsat: un usuari hauria d'interpretar aquestes imatges per deduir que ha trobat el que buscava. Alan Graves [GRA 98] va exposar que les interfícies de robots teleoperats eren, per definició, complexes, a causa de l'entorn de treball i dels requeriments del sistema. Per tant, cal millorar les interfícies per facilitar les operacions dels ROV.
- **Nombre limitat d'usuaris experts.** D'acord amb Šafaric: "Many enterprises experience difficulty in training people to work with expensive equipment, which is needed for carrying out profitable work tasks (e.g. production line robots). Similar problems are found when work is of a complex and safety critical nature (e.g. nuclear environments, explosive placement, surgery)" [SAF 01]. L'operació de robots no és una tasca gaire coneguda per la majoria d'usuaris i, d'altra banda, els robots no són eines tan generalitzades per poder dir que hi ha un gran nombre d'usuaris. Pot ser que hi hagi usuaris que no saben res de l'operació de robots, que no saben fer servir ordinadors o que no tenen prou coneixements en operacions de vaixells o altres vehicles marins.
- **Els sensors instal·lats en els ROV donen massa informació a l'operador, que només està interessat a assolir la seva tasca.** Molta d'aquesta informació només s'utilitza a l'efecte de la comprovació inicial o en cas d'errades. Un altre conjunt d'informació només serveix de forma combinada i, per tant, cal presentar-la en la forma adequada perquè l'usuari no hagi d'aprendre noves coses o hagi de fer l'esforç mental d'haver d'interpretar aquesta informació. Com Tan & Lee van indicar "The effectiveness of human-machine systems is often determined by the quality of the human-machine interface" [TAN 99].
- **Els aspectes humans de la interacció persona-màquina no s'han estudiat prou en el cas dels robots teleoperats.** Existeix la possibilitat de millorar la productivitat i l'eficiència de l'ús dels robots mitjançant millores en les interfícies d'acord amb les necessitats dels usuaris. El doctor Terrance Boulton, de la Universitat de Lehigh, va comentar que cal estudiar amb més profunditat les relacions persona-màquina en el cas dels sistemes robotitzats [BOU 00]. En aquest sentit, Rock va comentar que "to incorporate the human into the system, a useful interaction between man and machine must exist" [ROC 98]. Aquesta efectiva interacció serà possible amb una interfície molt ben dissenyada, en què l'usuari sigui considerat el principal element del disseny. La Divisió de Robotia & Process Systems (RPSD) del Laboratori Nacional Oak Ridge (EUA) va dir a la seva pàgina web: "In teleoperation human factors can be an even more critical technology because the design of the controlled system should make use of human performance data." <<http://www.ornl.gov/rpsd/humfac>> Aleshores, les teories basades en el benestar de l'ésser humà, com l'ergonomia, o els factors humans en el disseny s'han de tenir molt en compte per millorar les interaccions dels usuaris amb el robot teleoperat.

1.4.2.- Operació dels ROVs

La majoria dels sistemes ROV depenen d'un sistema de visió integrat en una interfície d'usuari juntament amb altres dades del sistema; però aquesta informació depèn molt de les condicions meteorològiques i de l'entorn. Per exemple, si l'aigua o l'aire són bruts, si l'entorn és fosc, si a l'entorn hi ha pols, si plou, si hi ha boira, etc., són condicions que degraden significativament tota la informació que podríem rebre. Com es pot veure a les figures 1.3 i 1.4, la qualitat de les imatges està bastant degradada.

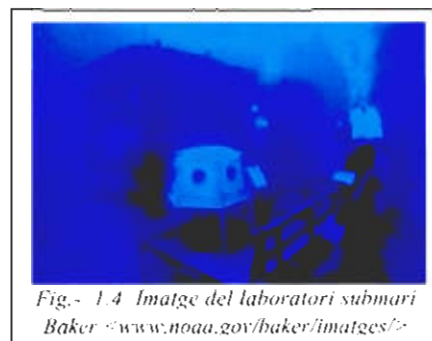


Fig.- 1.4 Imatge del laboratori submari Baker <www.noaa.gov/baker/imatges/>

Cal considerar que a l'espai aquests vehicles tenen plena llibertat de moviment: disposen de sis graus de llibertat i, per tant, l'usuari hauria de tenir un complet sistema d'orientació, visió i seguiment que li digués què hi ha a qualsevol dels costats del vehicle. Les dificultats pròpies de l'entorn, que són desconegudes i incontrolables per a l'usuari, com pertorbacions, corrents submarins (o corrents d'aire, si es pensa en un vehicle a l'espai), obstacles, irregularitat de la geografia del terreny (topologia), etc., fan que la tasca de conducció sigui encara més difícil. Per exemple, a la figura 1.4 s'hi pot veure un laboratori submarí on els operadors han de fer tasques específiques abans d'entrar-hi (cabina del centre); la quantitat d'elements al voltant d'aquest laboratori incrementa la complexitat de l'àrea de treball. Els ROV estan proveïts de molts sensors que ens diuen la situació i les condicions externes. A més a més, hi ha els actuadors, que podrien ser: el control dels motors de desplaçament, el control dels braços robòtics i tots els elements que el conductor ha de tenir en compte.

1.4.3.- Problemes de les Interfícies de Vehicles Teleoperats

Els problemes actuals de les interfícies dels vehicles teleoperats es poden resumir en els següents apartats:

1. **No s'ha treballat gaire en la visualització dels vehicles teleoperats i el seu entorn.** La quantitat d'informació que s'ha de presentar en sistemes de robots teleoperats ha estat molt poc estudiada. D'acord amb el grup de l'Institut de Robòtica de la Universitat Carnegie Mellon, "user interfaces for remote driving have remained largely unchanged during the past fifty years" <<http://imts7.epfl.ch/projects/ati/pdadriver>>. Si bé en els últims anys s'han desenvolupat algunes interfícies millorades, Trewin va comentar que, en sistemes robotitzats, "as interfaces become more sophisticated, a corresponding explosion in the number of configuration option is likely" [TRE 00]. Així mateix, Cantoni *et al.* van dir que "a GUI can display only a limited number of icons without cluttering the screen" [CAN 97].
2. **Existeix la necessitat d'estudiar i dissenyar una interfície més idònia per a la teleoperació de ROV i de representar la ubicació i l'operació del ROV en el seu entorn de treball amb una optimització de la informació presentada.** A propòsit del control de vehicles teleoperats, Péruch va dir que "a major issue is the format of visual information" [PER 99]. Hainsworth comenta que "current commercial interfaces are relatively unsophisticated, evolving from line-of-sight remote control systems with the addition of video displays" [HAI 01]. Els treballs de teleoperació tenen un requeriments especials que cal considerar en el desenvolupament de les seves interfícies. Harrison, Buxton i el seu equip de treball, de la Universitat de Toronto, van dir que els "interface designers can take advantage of both the intrinsic properties of the task and of an understanding of human visual attention to design new display techniques and systems" [HAR 95]; així doncs, les interfícies s'han de dissenyar tenint en compte quins són els requeriments de la tasca i les necessitats dels usuaris a fi de dissenyar una interfície adequada.
3. **Existeix la necessitat d'avaluar les interfícies per determinar-ne les funcionalitats en funcions de control i manipulació de robots teleoperats.** Com Ben Shneiderman, de la Universitat de Maryland, va indicar: "creative work starts with problem formulation and ends with evaluation plus refinement" [SHN 99]. Així, un cop definida la interfície, cal determinar-ne l'efectivitat i mesurar-ne la utilització en usuaris potencials. Xi considera que "to make a teleoperation environment useful and user friendly, three major issues, i.e. communication, robot's autonomy and user interfaces, must be seriously taken into account" [XI 01]. Per determinar la facilitat d'una interfície cal avaluar-la i millorar-ne les característiques de facilitat d'ús.

Aquesta tesi vol aportar solucions a tots aquests punts desenvolupant una interfície que minimitzi els problemes d'interacció entre l'usuari i el ROV per tal de facilitar les operacions de comandament i seguiment. A més a més, vol oferir un punt de partida de cara al disseny de noves interfícies basat en un

índex qualitatiu de la interfície i en una metodologia per fer-ne una avaluació operativa mitjançant un conjunt de paràmetres de rendiment.

1.4.4.- Conducció Assistida de Robots Submarins

L'operació a distància d'un robot i, més específicament, dins del mar, no exigeix una gran velocitat de resposta, i això és, en part, gràcies al fet que la capacitat de desplaçament dins de l'aigua es redueix dràsticament. No obstant això, aquest és el nostre únic avantatge dins d'un "mar" de dificultats. Com que es treballa en el comandament i el seguiment d'un robot a distància, és molt important fer servir les imatges de les càmeres de vídeo, que són les que ens donaran la informació de l'entorn. Aquesta informació serà molt important per a l'usuari que ha de conduir el robot, però té unes certes limitacions (vegeu les figures 1.5, *a* i *b*), ja que la falta de claredat de les imatges està associada a la manca de llum en el fons marí i això és un element indicatiu de les dificultats visuals en aquests entorns. A més, tenim que:

- La imatge obtinguda només és bidimensional.
- El conductor només té una petita imatge del seu entorn: la que ens dona la càmera de vídeo.
- Aquesta imatge pot ser no gaire nítida (sobretot en un vehicle marí).
- Hi ha obstacles que podrien dificultar la visibilitat de la zona de treball.
- El moviment de la càmera (a causa dels moviments laterals del vehicle), afecten la qualitat de la imatge.
- L'usuari no sent les perturbacions que afecten el robot en l'entorn de treball (corrents marines, cops, etc.).
- Com que el vehicle treballa en un entorn tridimensional, és molt fàcil que l'operador es desorienti. El robot podria trobar-se "de cap per avall" i en la direcció contrària si no donem una bona referència al pilot.
- La localització dels punts de treball no són gaire visibles en les imatges de les càmeres del robot.



a.- Treballs marins



b.- Submarinistes en operacions marines

Fig. 1.5.- Operacions marines -http://www.pbs.org/wgbh/nova/monitor/filmingn04.html

Per intentar superar aquestes limitacions, s'ha incorporat al robot un conjunt de sensors a fi de donar a l'usuari tota la informació necessària (cinemàtica i estàtica del robot). Totes aquestes dades són un món d'informació que un usuari principiant no sabria distingir i, per tant, s'ha de crear un esquema de presentació que sigui coherent, convincent, simple i adequat per a diferents usuaris.

1.5.- Estudis Actuals

La teleoperació de vehicles és una activitat força recent, i s'està fent servir en les tasques difícils o perilloses en què l'ésser humà no hi pot ser. Com que es tracta d'una activitat tècnica molt

nova, no existeixen prou estudis d'ergonomia en aquest sentit. Dels exemples que hem vist abans, podem dir que:

- **No existeixen prou estudis que diguin quan hi ha massa informació i control ni quan en falta.** L'avanç tecnològic ofereix sensors per mesurar-ho quasi tot, i la tendència en aquests sistemes és presentar totes les dades a l'usuari. Aquesta tendència suposa un excés d'informació per a l'usuari inexpert, el qual sovint es troba saturat d'informació. Taylor i Dalton van comentar que “the user interface can significantly influence operator behaviour” [TAY 00]; per tant, és d'esperar que diferents interfícies tinguin un impacte en la forma en què l'usuari respongui (en termes de velocitat de treball i aprenentatge). Mullet i Sano [MUL 95] deien que una representació clara és essencial per a una comunicació efectiva; per tant, l'òptima operació d'un robot teleoperat depèn molt de la interpretació de les dades que es rebran del robot.
- **No s'ha treballat gaire en la visualització de sistemes teleoperats dins del seu entorn.** Totes les dades que es reben del vehicle es presenten de forma individual, independentment del sistema i de l'activitat que s'està realitzant. Per exemple, les dades d'alçada, distància recorreguda, ubicació, orientació, etc., es presenten normalment de forma numèrica, barrejada i sense un ordre que faciliti l'operació. Codourey indica que “visualization tools can considerably improve the speed, accuracy and simplicity of teleoperation tasks”, i també comenta que “manipulation tools are the complement required to perform these actions precisely” [COD 97].
- **Interessa poder definir una interfície que faciliti l'ús dels robots teleoperats en entorns desconeguts.** Això obliga a:
 - * Poder definir una interfície simple i clara, fàcil d'entendre i d'aprendre. Això vol dir que l'usuari pugui entendre tot el que faci i que no li costi recordar les coses que va aprenent.
 - * Que aquesta interfície li tregui feina i li faciliti la tasca.
 - * Que la interfície sigui de frustració mínima.
 - * Que l'usuari sempre tingui la màxima ajuda possible.
 - * Que la interfície permeti a l'usuari tenir el control necessari.
 - * Que la interfície suporti les errades de l'usuari i pugui recomanar les accions correctes.
- **No existeix una interfície clara i definida de com s'han de presentar les dades a l'usuari:**
 - * Com representar la ubicació i l'operació del ROV en el seu entorn de treball?
 - * Existeix alguna forma òptima per presentar aquesta informació?
 - * Quanta informació s'ha de donar a l'usuari?
 - * Quina informació és realment important per treballar amb el ROV?

Kress va comentar (a IEEE Robotics & Automation Society) <www.engr.utk.edu/maes/ff/rk/ieee> que “human machine interfaces (HMI) are critical to the success of teleoperation systems”. Per tant, és indispensable treballar en aquests sistemes a fi de millorar la interacció i facilitar la càrrega d'informació visual a l'usuari.

Un dels problemes que cal tenir en compte a l'hora de desenvolupar aquesta interfície és saber de quines dades cal disposar tècnicament per representar a l'usuari com opera el robot. Possiblement, si l'usuari pogués fer servir un exo esquelet robotitzat, és a dir, si pogués treballar dins del robot, i tots els seus moviments fossin, de forma immediata, la resposta del robot, doncs precisament aquesta seria la millor alternativa d'actuació. Però aquesta situació no és possible avui dia, ja que se suposa que l'usuari no pot fer la feina directament i, encara que la pogués fer, necessitaria certa informació per situar-se i treballar.

Per entendre la dificultat de controlar un robot teleoperat en un entorn desconegut, imagineu-vos que teniu un robot que és una rèplica de vosaltres mateixos i que l'envieu a un centre comercial perquè faci una tasca específica: per exemple, la cerca d'una botiga. Per fer-ho, disposeu de totes les

dades que el vostre cos té; això vol dir: dues càmeres, sensors auditius, sensors de força a totes les extremitats i capacitat de control de totes les extremitats (incloent-t'hi la capacitat de moviment del cap, etc.). Per començar, cal mirar contínuament tot el que hi ha al voltant per no ensopegar i caure en un clot. Per això cal fer moure constantment el cap, controlar les càmeres de visió i canviar el zoom i el diafragma cada cop que calgui. S'està fent un control teledirigit i, per tant, cal veure tota la informació que rep el nostre robot. També s'ha de poder sentir qualsevol senyal d'advertència i, a més, s'ha de notar si el robot ensopega amb algun entrebanc, etc. Treballar amb el nostre robot a distància, amb tota aquesta informació i des d'una pantalla d'ordinador suposa massa feina i no és gens fàcil.

Aquesta interfície l'hem aconseguida després d'estudiar els diferents treballs sobre ergonomia d'interfícies i, després de considerar la importància dels diferents senyals que pot rebre el vehicle, farem una avaluació en un nombre d'usuaris relativament gran i dispers a fi de verificar-ne la utilitat. A més, també hem desenvolupat un esquema d'avaluació que permet tenir en compte les necessitats tant dels usuaris com del sistema de manera conjunta.

1.6.- Objectius de la Tesi

Aprofundir en el disseny d'interfícies per al comandament i la visualització de vehicles submarins teleoperats en espais tridimensionals per poder definir els aspectes que poden condicionar la millora d'aquestes interfícies, potenciar-ne l'ús i facilitar la transferència d'informació a l'usuari. Presentarem una interfície que faciliti l'operació d'aquests vehicles en el seu entorn de treball i augmenti l'eficiència de l'usuari, la seguretat del treball i l'èxit de l'operació.

El fet de conduir un vehicle a distància en un lloc desconegut presenta un conjunt de dificultats que, tècnicament, tractarem de resoldre mitjançant la potenciació de la percepció de l'entorn. Al capítol 2 presentarem alguns tipus d'interfícies desenvolupades amb aquesta orientació: totes les dades a la pantalla i cada informació en una finestra. Tota aquesta informació és impossible presentar-la a l'usuari de forma excessivament exhaustiva i poc ergonòmica i, per tant, hem desenvolupat un esquema per presentar la informació de la manera més òptima possible; és a dir, una interfície que doni a qualsevol usuari la màxima transferència d'informació amb el mínim d'esforç d'interpretació i d'ambigüitat possibles per garantir-li la màxima facilitat d'operació.

Al capítol 2 fem una anàlisi de les diferents interfícies per al control de sistemes robotitzats que existeixen en la actualitat aplicats a diferents tasques. Els principals problemes amb què ens podem trobar són els següents:

1. **Excessiva presentació d'informació a la pantalla.** Presentar totes les dades del sistema és molt important durant el procés de desenvolupament i programació del robot, però deixa de ser-ho quan un usuari nou ha de fer servir el mateix sistema per a activitats quotidianes.
2. **Múltiples tipus de dades i formats al mateix temps.** Les persones tenen una capacitat limitada de percepció, i la presentació de moltes dades només disminueix la velocitat de reacció de l'usuari davant de qualsevol activitat.
3. **Finestres d'informació i de control barrejades a tota la pantalla.** Si les dades que es presenten són a quals evol lloc de la pantalla, l'usuari s'ha de mirar el monitor per totes bandes abans de fer servir qualsevol funció del sistema.
4. **Escasses referències sobre l'origen i la destinació de les tasques.** Per tal de guiar el robot al seu punt de treball l'usuari ha de disposar d'eines d'orientació que li permetin realitzar més fàcilment la conducció.
5. **Mínima ajuda del sistema.** Els sistemes analitzats no tenen unes ajudes clarament definides per guiar els usuaris nous.

Aquesta recerca intenta resoldre aquests problemes. El que volem aportar en aquesta tesi és la presentació de la informació que es rep del ROV d'una manera clara, i per això hem desenvolupat una interfície que elimini o minimitzi els problemes d'interacció entre l'usuari i el ROV de manera que es faciliti l'operació i el control de submarins en entorns tridimensionals no estructurats. A més, es va

presentar una proposta per avaluar aquestes interfícies de cara a les funcions que es volen desenvolupar. Els paràmetres d'avaluació proposats han estat implementats i verificats per diferents tipus d'usuaris a fi de determinar-ne l'eficàcia i l'esquema d'avaluació proposat. Finalment, hem estudiat les condicions i els paràmetres que condicionen aquesta millora en el rendiment de l'usuari per poder, a partir d'aquí, presentar una guia de disseny per a interfícies de sistemes teleoperats en entorns tridimensionals.

1.7.- Estructura de la Tesi

A continuació descrivim el contingut de cada un dels capítols que conté la tesi (vegeu la Fig. 1.6):

En el **capítol 1** presentem una introducció de les àrees que estan relacionades amb aquesta tesi. Presentem les motivacions i els objectius que ens han fet abordar aquest projecte i la metodologia de treball que hem seguit.

El **capítol 2** conté l'estat de la qüestió, un resum de les tendències de l'ergonomia com una ciència per desenvolupar sistemes més aptes per a l'ésser humà. Aquí presentem una breu revisió de les interfícies utilitzades per a diferents sistemes, des de vehicles fins a robots i sistemes robotitzats. També fem una anàlisi de cada una d'aquestes interfícies i, al final del capítol, presentem una anàlisi senzilla de la seva efectivitat.

En el **capítol 3** descrivim la teoria d'interfícies gràfiques i els seus usuaris. Aquí fem referència a les inconsistències visuals que dificulten la utilització de les eines en el món i les diferents concepcions per resoldre la interfície per usuari. També exposem els diferents tipus d'errors de visió i el tractament del color, la discriminació dels senyals i les normes de la realització d'interfícies. En aquest capítol presentem el concepte d'índex de la interfície com una eina per avaluar les interfícies d'una manera ràpida i senzilla. Els índexs de les interfícies estudiades en el capítol 2 les presentem aquí.

En el **capítol 4** fem una descripció dels aspectes psicoperceptius de l'entorn que influeixen en els usuaris, els conceptes de disseny d'interfícies i el procés de disseny de la interfície desenvolupat amb eines de realitat virtual. El tractament psicoperceptiu, la codificació visual i la discriminació del senyal són part de la base conceptual del desenvolupament de la interfície. També fem referència al procés de disseny inicial d'una interfície, que inclou les especificacions del sistema, els usuaris potencials i el predisseny; també indiquem les diferents percepcions de la interfície pel control del robot submarí. Aquí presentem les raons tècniques del desenvolupament de dues interfícies i les seves funcionalitats i, finalment, presentem el procés per al disseny d'interfícies funcionals i òptimes per a sistemes teleoperats.

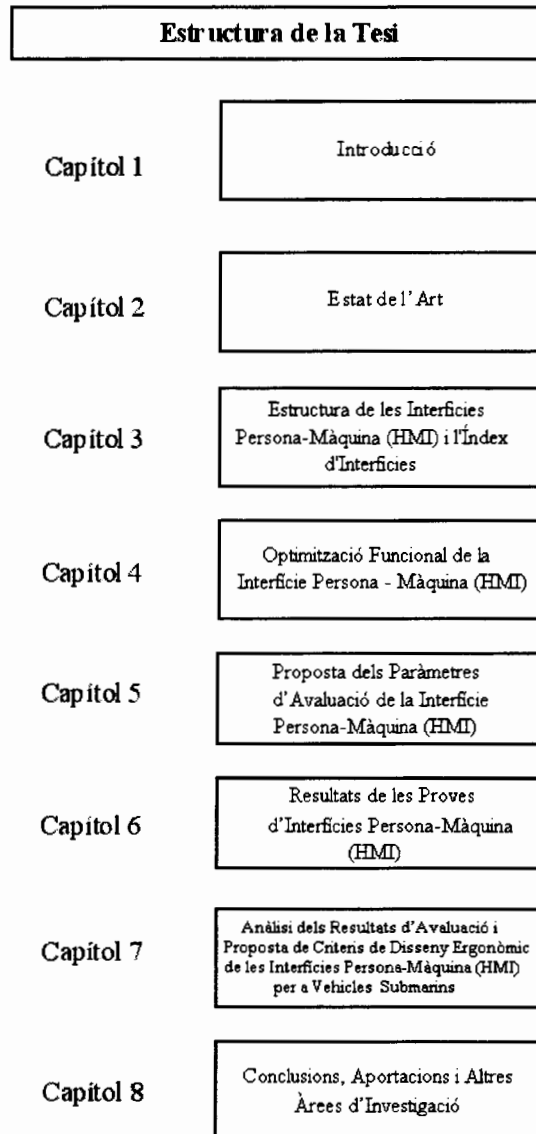


Fig. 1.6.- Estructura de la Tesi

En el **capítol 5** presentem una anàlisi de les diferents alternatives de comparació d'informació, en què fem referència a cada un dels paràmetres que cal considerar en l'avaluació de les interfícies abans desenvolupades; també indiquem les diferents eines d'avaluació d'interfícies. La nova forma proposada per avaluar interfícies permet determinar la funcionalitat del sistema en funcions específiques de visualització o de comandament: l'usuari (facilitat d'ús), la tasca (productivitat) i la interfície (utilització). En aquest capítol explicarem el procediment que farem servir per avaluar les interfícies desenvolupades, i exposarem els objectius de cada un dels paràmetres escollits.

En el **capítol 6** presentem els resultats de les proves realitzades amb les dues interfícies que hem definit en el capítol 5, aplicades a diferents tasques.

El **capítol 7** conté l'anàlisi de la informació presentada amb gràfics de comparació i interpretació de les dades. Aquí mostrem les dades basades en l'esquema d'avaluació recomanat i avaluem altres interfícies de jocs (d'activitats submarines que compleixen la mateixa funcionalitat) i les comparen entre si.

El **capítol 8** presentem les conclusions d'aquest treball i també una descripció de les aportacions de la tesi. També hi esmentem els articles que s'han publicat arreu del món sobre els temes exposats a fi de defensar els diferents punts que han estat tractats en aquest projecte, amb una breu descripció del contingut de cada un. Finalment, exposem els temes d'investigació que queden oberts de cara a futurs treballs.

Finalment, tenim els annexes A i B. El primer presenta els resultats de l'avaluació dels jocs informàtics presentats en el capítol 7 i el annex B presenta els efectes de les rotacions i els moviments en l'entorn virtual.

1.8.- Metodologia de Treball i Avaluació dels Resultats

Per assolir els objectius proposats farem ús d'interfícies gràfiques amb eines de realitat virtual, i procurarem elaborar la interfície amb la màxima interactivitat possible. Però, certament, és difícil fer una representació gràfica que ofereixi als usuaris una idea clara i sense cap dubte de com s'ha de conduir. Per això cal definir una metodologia que faciliti la **visualització** de la informació que rebrem del robot teleoperat d'una forma clara, sobretot considerant de quina manera altres usuaris interpreten la presentació i la interfície. També cal considerar les eines de control necessàries per a una adequada manipulació del sistema. Cal resoldre el **què** i el **com**, és a dir, quines dades es presenten i de quina manera.

Aquest disseny serà avaluat en relació amb les interfícies d'altres autors i, per tant, desenvoluparem eines qualitatives que permetin avaluar amb criteris objectius l'eficiència d'aquestes interfícies i fer servir aquestes dades i experiències en el desenvolupament de sistemes millorats.

La principal raó de tota aquesta avaluació és obtenir una interfície veritablement adequada per al comandament i la visualització d'un vehicle teleoperat a l'espai per qualsevol usuari. Aquest resultat ha de ser quantitativament comprovable en percentatge i, sens dubte, per una mostra significativa d'usuaris Així doncs, l'avaluació efectiva de la interfície també és una part important d'aquest projecte.