UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica

Avda. Països Catalans 26, Campus Sescelades, 43007 Tarragona

Diseño de hardware específico para extracción de características y comparación de huellas dactilares

Tesis presentada para la calificación del doctorado

por

Nicolau Cañellas

Director:

Dr. Jean-Pierre Deschamps

Tarragona 2006

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Per a la Mariona

I per a les nenes: la Mariona i la Joana

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Indice

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Agradecimientos

Esta tesis se empezó a forjar con el intento por despegar de un pequeño grupo de investigación dentro del Departament d'Enginyeria Electrònica, Eléctrica i Automática de la Universitat Rovira i Virgili. Al final el intento no ha finalizado de forma completamente exitosa, pero uno de sus frutos siempre será especial para mí, por lo que debo empezar por agradecer al Dr. Xavier Correig el impulso inicial que dio al grupo y el apoyo que siempre me ha manifestado. También les doy las gracias a todos aquellos que, de una forma u otra, han puesto su grano de arena durante este tiempo.

Agradecer a mi esposa e hijas el soporte, la comprensión y los ánimos que me han proporcionado; parte del tiempo que he dedicado a este trabajo se lo he quitado a ellas y son las que más han sufrido mis cambios de estado de ánimo durante el largo proceso de redacción.

Gracias a Lluis, a Josep, a Jesús y a tantos amigos y compañeros que me han dado aquel empujón que a menudo he necesitado para no abandonar en los momentos complicados.

Debo también dar las gracias a Marcos y a Joan, alumnos de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria que han realizado conmigo sus respectivos trabajos final de carrera y que, con ellos, han contribuido a la realización de esta Tesis validando resultados, detectando errores y aportando ideas. Y tambin a Lola i a Albert su colaboración para poder disponer de un algoritmo de emparejado efectivo.

Y, para acabar, darte las gracias a ti Jean-Pierre, porque desde un principio has trabajado con empeño por el éxito de esta empresa y porque a ti se debe en gran parte este final feliz, siempre estaré en deuda contigo.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Resumen

El método de identificación mediante huella dactilar es uno de los más fiables que se conocen y un serio candidato a ser incorporado a la vida cotidiana. En los últimos años la biometría de huella dactilar se ha ido acercando al gran público y ya no es extraña la utilización de sistemas automáticos de verificación dactilar para el acceso a algunas instalaciones.

El mercado se encamina hacia un tipo de tarjetas personales que integren un sensor de huella dactilar junto a un dispositivo en el que se lleven a cabo todos los pasos del algoritmo biométrico. Dentro de este contexto, la tesis persigue la integración de sistemas biométricos y tarjetas inteligentes con el objetivo de implementar un "embedded security system" capaz de evitar posibles usos fraudulentos mediante la verificación de la identidad del titular a partir de la utilización de la biometría de huella dactilar.

Tradicionalmente, los algoritmos utilizados para realizar la extracción de características de huellas dactilares se basan en la sucesiva aplicación de complicados algoritmos de procesado de imagen. El desarrollo de estos algoritmos se realiza pensando en la correcta extracción de las características, pero hasta la fecha no se ha pensado en una optimización del coste o de la portabilidad; los sistemas se han desarrollado sobre una plataforma con un ordenador personal, o empleando un microprocesador de altas prestaciones (y coste), cuando no un procesador digital de señal (DSP) específico.

En el marco de esta tesis se ha desarrollado un algoritmo para la extracción de las características físicas de las huellas dactilares; el procesado, que se realiza directamente sobre la imagen de la huella en escala de grises, no precisa de productos ni divisiones ni operaciones en coma flotante. Puesto que la correcta estimación de las direcciones de las líneas de la huella suele ser la parte más crítica, y computacionalmente más costosa, de los algoritmos de extracción de características, también se ha desarrollado un algoritmo específico para realizar esta operación.

Con objeto de disponer de un sistema de extracción en tiempo real apto para ser implementado en microprocesadores de bajo coste, se ha realizado el codiseño de un

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

sistema hardware – software. Así, se han implementado los coprocesadores correspondientes a la realización mediante hardware de los algoritmos de estimación de dirección así como del resto de tareas críticas; éstas se han identificado analizando el perfil de ejecución de los algoritmos diseñados.

El método de estimación de la dirección diseñado incorpora una novedosa optimización de cálculo, que se adapta a las necesidades específicas de precisión y evita la realización de operaciones de elevado coste computacional. A la orientación calculada se le asocia un valor numérico, indicativo de la fiabilidad en la estimación, que va a facilitar la realización de una fase previa de segmentación de la huella, un punto importante en el proceso de extracción, y que, habitualmente, se ha venido estudiando de forma separada al proceso de extracción.

Todas estas modificaciones nos permitirán realizar un dispositivo electrónico (hardware + software) de pequeñas dimensiones, bajo coste y alta calidad en los resultados, obteniendo así la posibilidad de la utilización de la identificación o autentificación de huellas dactilares en nuevos campos de aplicación.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Abstract

Nowadays, fingerprint-based biometrics is one of the most reliable identification methods available, and therefore it is a serious candidate for being used in daily life applications. In recent years, an increasing number of devices incorporate fingerprint biometrics and, nowadays, it is not strange to see the use of automatic fingerprint identification systems to gather access into restricted areas.

The society is evolving towards a new kind of smart cards, joining a fingerprint sensor together with a device capable of performing all of the biometric identification steps. In this framework, the thesis focuses on the integration of biometric systems and smart cards; the goal of this study is to implement an embedded security system, based in fingerprint biometrics, in order to avoid fraudulent access by means of identity verification.

Traditionally, algorithms used in fingerprint feature extraction have been based in the recursive iteration of complex image processing functions. These algorithms have been designed looking only for the correct feature extraction but, until now, there is no algorithm optimized for low cost or portable applications; the commercial systems available have been developed to run on a personal computer based platform, or using a high feature (and costly) microprocessor such as an specific digital signal processing (DSP) device.

This work shows the development of a new algorithm for the extraction of the fingerprint physical details (minutiae) directly from a grey scale image; the algorithm does not need any product or division and neither any floating point operation. As the correct estimation of the ridge lines direction usually becomes the most critical step and it is the computationally most expensive part of the minutiae extraction algorithms, a specific algorithm has also been developed for this specific task.

In order to develop a real-time automatic identification system implemented in a low cost microprocessor, the design of an integrated (hardware+ software) solution has been carried out. Therefore, 2 coprocessors have been designed: one related to the

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

hardware implementation of the ridge lines direction estimation and the second one dedicated to the rest of critical tasks; these have been identified executing the software version of the algorithm and analyzing the execution profile.

The ridge orientation estimation algorithm proposed introduces an original computing approach, which is adapted to the specific precision needs and eliminates the use of highly computational cost operations. A numerical value, indicative of the estimation reliability, is associated to the computed orientation. This value will be used to simplify the execution of a fingerprint segmentation step, previous to the feature extraction. Until now, this step has been carried out as an independent part of the process with the consequent increase in the total computational time needed.

With the presented set of functions and algorithms, and their hardware counterparts (hardware software co-design), an electronic device with a small size, low cost, and high quality results has been developed. As a result, the thesis brings fingerprint biometry closer to new application fields related to personal identification procedures.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

1 Introducción y objetivos

En este capítulo se darán algunas consideraciones previas que situarán el estado actual de la identificación personal mediante técnicas biométricas, presentarán el entorno tecnológico en el que se basan los sistemas actualmente existentes, y plantearán algunos puntos débiles no resueltos hasta ahora. En este contexto se describirá la motivación de la tesis, enmarcada en un proyecto de investigación que se está llevando a cabo dentro del grupo de diseño VLSI del Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica de la Universitat Rovira i Virgili, y se presentarán los objetivos propuestos en el trabajo así como la estructuración del documento.

1.1 Identificación personal y biometría

La necesidad de autenticación ha sido inherente a la evolución social de la humanidad. Ya desde épocas antiguas, firmas, códigos, sellos y claves han sido empleados para verificar el origen fidedigno de documentos [MOE-71]. En la sociedad actual, esta necesidad no ha hecho más que aumentar, y constantemente se está trabajando en la obtención de fórmulas precisas y económicas para la correcta autenticación de los individuos.

Los sistemas de autenticación que se han venido utilizando hasta hoy se han basado en dos características o en su combinación. La primera es conocer algo que nadie más conoce y la segunda tener alguna cosa que nadie más tenga. Referente a la primera característica: "*algo que sepas*", se han creado sistemas como el PASSWORD y/o PIN, ambos se basan en la misma técnica que consiste en una combinación de signos que identifican unívocamente a una determinada persona, para el acceso a cualquier tipo de recurso protegido. Normalmente la diferencia entre PIN y PASSWORD radica en su utilización y no en la técnica en la que se basan. El mayor campo de utilización de este sistema es en la telefonía móvil. La segunda característica: "*algo que tengas*", hace referencia a sistemas tan utilizados como podría ser el DNI (Documento Personal de Identidad) o tarjetas de fichaje y/o acceso utilizadas por empresas para el control de sus trabajadores. El sistema más extendido que combina ambas características es la tarjeta bancaria o de crédito, ya que se compone de un sistema "*algo que tengas*", como es la propia tarjeta y de un sistema "*algo que sepas*" como es el número PIN asociado para su utilización de forma segura.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Los dos tipos de sistemas antes citados tienen el gran inconveniente de ser más o menos fáciles de falsear, es decir que cualquier persona podía hacerse pasar por nosotros y aprovecharse de nuestros privilegios en diferentes servicios; de ahí la necesidad del siguiente paso en la identificación personal: utilizar las características biométricas.

Si bien según el Diccionario de la Real Academia Española, la biometría es el "estudio mensurativo o estadístico de los fenómenos o procesos biológicos", actualmente el término se utiliza para hacer referencia a los métodos automáticos que analizan determinadas características humanas con el fin de identificar y autentificar a las personas mediante alguna característica inherente a la persona, es decir un "*algo que se es*".

Así, la biometría nos muestra un método mucho más seguro para la identificación de personas. Esta característica es la que permite que tenga un amplio campo de aplicación. Puede ser utilizado como tarjeta de embarque en aeropuertos o billetes de tren. También puede realizar las funciones de contraseñas para la apertura de puertas o transacciones comerciales. Permitiendo así que no pueda ser usurpada la identidad, ya que es necesaria la presencia física de la persona en cuestión para una correcta identificación.

1.2 Tipos de reconocimientos biométricos

En función de las características usadas para la identificación, se pueden establecer dos grandes grupos, dependiendo de si se analizan aspectos físicos (biometría estática) o se analizan aspectos vinculados a la conducta (biometría dinámica).

En general se acepta que, para que permitan ser utilizadas como elementos de identificación, las características físicas y conductales deben cumplir con los siguientes requisitos básicos [CLA-94] [WOO-97]:

- *Universalidad*: todas las personas tienen que presentar la característica.
- *Singularidad*: no debe haber dos personas iguales en términos de la característica biométrica.
- *Estabilidad*: la característica biométrica debe permanecer (suficientemente) invariante con el tiempo.
- *Mensurabilidad*: la característica biométrica debe poder ser medida cuantitativamente mediante un sensor (práctico) adecuado.
- *Aceptabilidad:* los usuarios del sistema, así como la población en general no deben tener (fuertes) objeciones a proporcionar su propia información biométrica (someterse al proceso de adquisición).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

1.2.1 Tipos de reconocimientos fisiológicos

Este tipo de reconocimiento es el de mayor seguridad y el que hace casi imposible su suplantación por otro individuo. A continuación se muestra un listado de los sistemas más utilizados y sus características principales [MAL-03].

Huella dactilar: .Es el método de reconocimiento biométrico que se encuentra en una etapa más madura, ampliamente utilizado en las divisiones forenses para la investigación criminal. Se trata de la comprobación del dibujo que forman las cestas papilares de la piel de los dedos, capturadas mediante un escáner. Es un método con un elevado índice de seguridad.

ADN: Se trata de comparar la cadena de ADN de cada individuo para su identificación. Cada individuo tiene su propia cadena de ADN, a excepción de la existencia de gemelos idénticos que a priori tendrían la misma cadena de ADN. Este sistema es el más utilizado por los médicos forenses a la hora de realizar identificaciones de cadáveres. El sistema a priori parece él más seguro, pero dependiendo de la aplicación que se realizara dejaría de serlo, puesto todo individuo deja el rastro de su ADN, sería fácil obtener su clave biométrica a partir de gotas de sangre, saliva, etc.. De todas formas hoy en día realizar un sistema de identificación mediante ADN de una forma comercial es inviable, ya que es un método muy agresivo y de una tecnología muy cara y un alto tiempo de ejecución.

Oreja: Reconocimiento de la estructura física del pabellón auditivo. Se basa en identificación de los puntos del pabellón auditivo más alejados del centro de la oreja y de las características remarcables. Este método tiene el inconveniente de ser bastante molesto para los usuarios, ya que es necesario extraer una imagen de la oreja y además, se necesitaría extraer un patrón de cada individuo cada cierto tiempo, ya que las orejas son unas de las pocas partes del cuerpo humano que crecen a lo largo de toda la vida. Es un sistema de seguridad media - baja.

Cara: El reconocimiento de la cara es uno de los métodos biométricos más aceptados, ya que es el método que utilizan las personas a la hora de realizar una identificación visual. Este método no es nada invasivo para el usuario, ya que es muy fácil conseguir una imagen de la cara . Estos sistemas son capaces de reconocer expresiones de la cara y poses haciendo una adquisición en 2D o 3D.El principal inconveniente del sistema es que se ve afectado por cambios de imagen del usuario, ya sea un corte de pelo, cambio de modelos de gafas, etc. Este sistema muestra un índice de seguridad medio alto

Termogramas de manos, rostro: Este sistema se basa en extraer un termograma o una fotografía térmica del rostro, de las manos, pies y hasta del cuerpo de una persona. Es característico de cada individuo tener zonas más o menos calientes en nuestro cuerpo aun que existan zonas comunes entre todos. Esto permite realizar una identificación según los puntos calientes y fríos de cada individuo. El mayor inconveniente de este sistema es que puede descartar reconocimientos debido a factores meteorológicos externos que harían variar la presencia de puntos calientes y fríos en el termograma o el estado de salud del usuario, ya que la presencia de fiebre podría

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

invalidar el reconocimiento. Este sistema tiene un grado de seguridad medio - alto según el tipo de aplicación.

Geometría de Manos y Dedos: Esta técnica identifica la forma característica de las manos o dedos de cada individuo. Ya que normalmente son invariantes y particulares. Identificando la forma de cada mano o dedo así como su longitud y grosor característicos. El mayor inconveniente de este sistema es la mayor necesidad de la colaboración del usuario y su alto coste, ya que necesita de mucha cantidad de memoria y de poder de cálculo para su aplicación. Es un sistema de alto grado de seguridad.

Iris: el iris se forma en nuestro estado embrionario y es invariable en el tiempo. Existe una imagen diferente del iris para cada ojo y para cada individuo. Es un sistema nada agresivo. Esta técnica necesita de una alta cooperación del usuario. ya que la imagen tiene que ser tomada de una forma concreta para que los resultados sean aceptables. Se trata de un sistema de alta seguridad, pero su principal inconveniente es su elevado precio, ya que para su aplicación son necesarios equipos muy precisos.

Escáner de Retina: Cada retina tiene una estructura particular y es diferente para cada ojo y para cada individuo. Esta técnica está llamada a ser la más segura, ya que es muy difícil su cambio o suplantación. Necesita una gran cooperación del usuario para realizar el escáner de la retina y hoy en día la técnica para extraer la imagen de la retina no es aconsejable realizarla a personas con hipertensión. El mayor inconveniente de este sistema es su elevado precio, ya que necesita de materiales tecnológicamente avanzados y precisos haciendo inviable su aplicación en aplicaciones comerciales.

Olor: es conocido que cada objeto tiene un olor. Este olor se puede caracterizar según su composición química, y esto nos puede permitir identificar varios objetos. El olor emitido por un individuo o un animal es característico de sí mismo. Pero no es evidente la posibilidad de aislar el olor de cada uno cuando esta mezclado con perfumes, desodorantes y el olor característico de cada zona.

1.2.2 Tipos de reconocimientos comportamentales

Este tipo de reconocimiento es el de menor seguridad y el que puede ser imitado con facilidad. A continuación se muestra un listado de los sistemas más utilizados y sus características principales.

Forma de andar (gait): cada persona tiene una forma de andar características, aunque no es única para cada individuo. Esta técnica no se utiliza para realizar un reconocimiento seguro del individuo, pero si que nos sirve para descartar algunos. Esta técnica es utilizada para extraer características de grabaciones de individuos en videos, que permitan de esta forma encontrar algún sospechoso.

Forma de teclear (keystroke dynamics): este sistema se basa en la hipótesis que cada persona teclea de una forma característica. Aunque no fuera así, nos permite recopilar información para discriminar o aceptar posibles sospechosos en una investigación, tras una monitorización de su forma de teclear característica.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Característica	Universalidad	Singularidad	Estabilidad	Mensurabilidad	Funcionalidad	Aceptabilidad	Fiabilidad
Cara	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Baja
Huella dactilar	Media	Alta	Alta	Media	Alta	Media	Alta
Geometría mano	Media	Media	Media	Alta	Media	Media	Media
Tecleo	Baja	Baja	Baja	Media	Baja	Media	Media
Iris	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Baja	Alta
Retina	Alta	Alta	Media	Baja	Alta	Baja	Alta
Firma	Baja	Baja	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
Voz	Alta	Baja	Baja	Media	Baja	Alta	Baja
Termograma	Alta	Alta	Baja	Alta	Media	Alta	Alta
Olor	Alta	Alta	Alta	Baja	Baja	Media	Baja
ADN	Alta	Alta	Alta	Baja	Alta	Baja	Baja
Forma de andar	Media	Baja	Baja	Alta	Baja	Alta	Media
Oreja	Media	Media	Alta	Media	Media	Alta	Media

Tabla 1.1 Comparación entre distintas tecnologías biométricas

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Firma: es conocido que cada persona firma de una forma característica y que no hay dos firmas iguales. Esta técnica es válida o esta aceptada por muchos gobiernos y en transacciones comerciales. Pero también es conocido que una misma persona puede firmar de una forma diferente según su estado de ánimo y que existe gente que es capaz de falsificar una firma con mucha exactitud, hasta el punto que no existan diferencias para el ojo humano.

Voz: el reconocimiento de voz, mediante una grabación, es aceptable por muchos tribunales del mundo. Pero realizar un sistema de reconocimiento automático es bastante complicado, ya que el patrón a guardar tendría que ser muy grande y la comparación con una base de datos casi inviable. También tiene en contra que la voz nos cambia según el estado de salud de cada uno (resfriados, con fiebre, etc.). Y también la calidad de la voz puede empeorar al grabarla a través de micrófonos, etc.

Cada tecnología biométrica tiene sus puntos fuertes y sus limitaciones (ver tabla 1.1) [JAI-99], no existiendo ninguna que cumpla con todas las necesidades de todo tipo de aplicaciones. También debe tenerse en cuenta que, aunque cada una de estas técnicas ha sido usada en algún tipo de aplicación práctica o es susceptible de serlo, no muchas de ellas son consideradas legalmente como evidencias de identidad.

1.3 Sistemas automáticos de identificación biométrica.

La primera referencia acerca del uso de una característica biométrica con fines identificativos se remonta al siglo VIII, fecha en la que se encentran en China huellas dactilares, tanto en documentos como en esculturas de arcilla [MOE-71]. Sir William Herschel, en 1856 fue el primero en implantar la huella del pulgar como método de identificación para personas analfabetas. Posteriormente, hacia finales del siglo XIX, diversos estudios establecieron dos características de las huellas dactilares que condujeron a su utilización para la identificación criminal: no se han encontrado dos huellas iguales, y la estructura de las crestas de la huella permanece sin alteración durante la toda la vida.

Hacia la mitad del siglo XX la industria comienza a dedicar esfuerzos a la identificación por voz, y los primeros sistemas de reconocimiento automático de huella dactilar, que empiezan a implantarse en los años 70. Por razones diversas, el interés en aplicaciones totalmente automatizadas ha ido creciendo desde mediados los 90, y en paralelo han ido creciendo los presupuestos de financiación para la investigación y desarrollo vinculados a la Biometría. Pruebas de ello son los innumerables artículos de divulgación publicados, la organización de conferencias y congresos sobre biometría, la aparición de revistas especializadas, la atención creciente por todo lo relacionado con la biometría por parte de empresas de seguridad e instituciones financieras, e incluso la reciente creación de empresas especializadas.

Si bien las primeras etapas de la investigación biométrica se centraron en métodos de identificación a los que ya se estaba habituado; ya fuese por la capacidad humana, fruto de la propia evolución, para ese tipo de reconocimiento: voz o cara por ejemplo; o por estar habituados a su uso: firma o huella dactilar, no es evidente que

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

éstas técnicas sean las más adecuadas para sistemas de identificación biométrica completamente automáticos. De ahí la necesidad de la investigación en nuevas tecnologías que se vayan adecuando a las necesidades del mercado, tanto en lo referente a las necesidades de la electrónica de consumo: simplicidad, facilidad de uso y bajo coste; como a los requerimientos de alta fiabilidad y seguridad.

1.3.1 Estructura de un sistema automático de identificación.

Se pueden diferenciar dos grandes tareas a abordar en el reconocimiento automático de personas:

- **Verificación**: donde se trata de autenticar la identidad reclamada por el usuario.
- **Identificación**: si se comparan las muestras de entrada con todos los patrones de los usuarios inscritos en el sistema para comprobar que un usuario que reclama estar inscrito lo está (identificación positiva), o que un usuario que reclama no estar inscrito, realmente no lo está (identificación negativa).

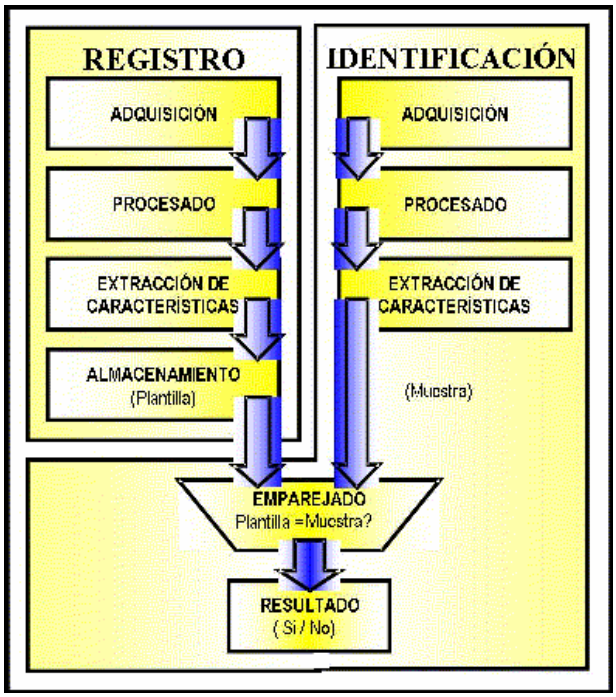


Figura 1.1 Sistema Automático de Reconocimiento Biométrico

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Cualquier sistema automático de identificación (o verificación) biométrica opera en dos modos distintos (Figura 1.1): Registro e Identificación (verificación). Las medidas biométricas se obtienen y cuantifican durante la fase de registro, y la información necesaria se almacena en una base de datos. En el modo de identificación el sistema mide las características, y busca en el archivo de registro hasta obtener una respuesta positiva o, en caso contrario, decidir que el individuo no se encuentra en la base de datos.

Las implementaciones actuales de sistemas de identificación biométrica, han optado, mayoritariamente, por el empleo de sistema modulares por etapas, como el que se muestra en la figura 1.1, heredando la estructura más común de los sistemas de reconocimiento de patrones; con los que guardan mucha similitud.

Dadas las especificaciones de velocidad, precisión, coste y fiabilidad deseadas en el sistema biométrico, hay un conjunto de preguntas que deben hacerse antes de abordar su diseño: (i) ¿cómo adquirir y cuantificar la característica biométrica?, (ii) ¿qué tipo de representación interna de los datos es la adecuada para un sistema automático de identificación?, (iii) ¿cómo definimos el concepto de distancia que permita medir el grado de similitud entre la muestra y el patrón?, (iv) ¿cómo podemos implementar esta métrica? La respuesta a todas estas preguntas es una tarea compleja y que necesita algunas condiciones de contorno para circunscribir la respuesta a soluciones socialmente aceptables y tecnológicamente viables.

En la fase de adquisición el sistema debe validar la entrada, en el sentido de determinar si la muestra adquirida cumple unos mínimos de calidad y, posteriormente, realizar la segmentación entre la información irrelevante (‘background’) y el objeto de interés (‘foreground’).

Posteriormente la medida biométrica se procesa, con el objeto de facilitar la adquisición de los datos que serán la representación de la información biométrica. Estos datos son la esencia del sistema, y constituyen el espacio de medida que es invariante para el mismo individuo (baja variación intraclase) y que difiere de forma máxima para otras identidades (alta variación interclase).

Para algunas aplicaciones también deberán tenerse en cuenta la disponibilidad de almacenamiento de datos, por ejemplo en una smart card, de forma que se elegirán representaciones biométricas que requieran poco espacio.

La obtención de la representación biométrica a partir de la medida realizada suele ser un proceso de extrema dificultad, especialmente en entornos donde la medida se adquiere con un ruido elevado. Además, no todas las características biométricas usadas en sistemas manuales, son susceptibles de ser incorporadas a sistemas automáticos; por lo que a menudo debe prestarse atención a una redefinición de los parámetros biométricos a emplear.

La última etapa del sistema es el emparejado entre el patrón y la muestra. Se trata de cuantificar el grado de similitud entre el patrón y la muestra. La dificultad radica en la elección de una métrica adecuada, capaz de distinguir entre dos representaciones correspondientes a dos identidades diferentes, manteniéndose inmune al ruido y a

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

variaciones estructurales y estadísticas entre dos representaciones distintas de la misma identidad.

1.3.2 Elección del entorno biométrico.

Los actuales ordenadores, potentes y de bajo coste, así como la aparición de nuevos sensores más económicos, han cambiado la percepción de que las tecnologías biométricas son sistemas de alta tecnología y coste elevado y ha empujado a la tecnología biométrica hacia nuevos mercados que requieren de una fiable identificación personal. Si a ello le unimos las posibilidades de nuevas tecnologías de procesado en paralelo y el desarrollo de nuevos métodos de medición y de cálculo, se facilitará la adopción de los sistemas automáticos de identificación personal en un amplio rango de aplicaciones de uso cotidiano: seguridad en transacciones financieras, comercio electrónico, control de acceso, seguridad en accesos a sistemas de información, aduanas e inmigración, sistemas de identificación de ciudadanos, voto electrónico, …

La pregunta de qué tipo de biometría debe usarse, debe ser respondida para cada distinto tipo de aplicación, y la respuesta no se basa sólo en tasas de error, sino que son diversos los factores que van a influir en la elección. En primer lugar es evidente que el tipo de característica biométrica va a determinar el coste, así como el nivel de seguridad. La fiabilidad también será determinante, pero no tiene por qué ser el aspecto principal de la elección. La velocidad de respuesta, así como la facilidad de uso o el coste de los sensores empleados para la adquisición pueden ser, en ciertos casos, los principales aspectos a tener en cuenta (figura 1.2).

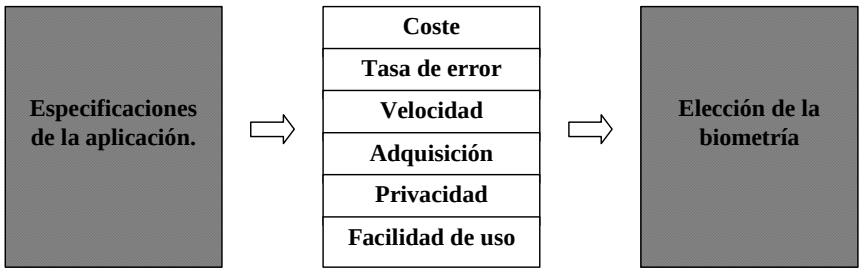


Figura 1.2 Factores que deben considerarse para la correcta elección de la biometría a usar.

Debemos pues fijar ciertos atributos de las características biométricas, así como de los sensores necesarios para adquirirlas i cuantificarlas, que nos permitan realizar la comparación entre distintos tipos de biometría:

.- Madurez: en referencia al grado de desarrollo de la tecnología para adquirir una característica y realizar la comparación entre muestras y patrones.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

.- Tipo de sensor: En caso de necesitarse contacto se necesita la cooperación (y un cierto grado de conocimiento) por parte del usuario; mientras que en caso de no ser necesario el contacto, estaremos en entornos menos intrusivos, especialment útiles para tareas de vigilancia.

.- Tamaño del sensor: está, en muchos casos, directamente ligado a la característica biométrica a medir, y en otros a la calidad de la señal adquirida. Así, en aplicaciones en las que la robustez y el tamaño del sensor sean una importante condición de contorno, la gama de posibles elecciones puede verse muy reducida.

.- Coste del sensor: En muchos casos irá directamente ligado al coste final del producto acabado.

.- Tamaño de la plantilla: Es la cantidad de bytes de memoria que ocupa la representación de una muestra de la característica biométrica. Un menor tamaño va asociado a menores dispositivos de almacenamiento; y a menudo también a menores necesidades computacionales en la comparación con el patrón.

.- Escalabilidad: Un tipo de biometría altamente escalable es aquel que puede ser empleado como método de identificación en grupos grandes, sin incurrir en tasas de error inaceptables o en tiempos de respuesta excesivamente elevados.

La tabla 1.2 [BOL-03] resume el valor de estos atributos en las características biométricas más habituales.

	Huella dactilar	**Cara**	**Voz**	**Iris**	**Mano**	**Firma**
Madurez	muy alta	media	media	media	alta	media
Tipo de sensor	contacto	no intrusivo	no intrusivo	no intrusivo	contacto	contacto
Tamaño del sensor	pequeño	pequeño	muy pequeño	medio	grande	medio
Coste del sensor	< 200 €	< 50 €	< 5 €	< 300 €	< 500 €	< 300 €
Tamaño de la plantilla (bytes)	< 500	< 1000	2000	256	< 100	200
Escalabilidad	alta	media	baja	muy alta	baja	alta

Tabla 1.2 Comparación entre distintas características biométricas

El otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la propia aplicación final: ¿qué quiere protegerse?, ¿quiénes son los usuarios autorizados y quienes los fraudulentos?, ¿cuál es el coste de las violaciones de seguridad?, …

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

El control de acceso al lugar de trabajo, por ejemplo, se caracteriza por la obligada cooperación del usuario, que ve su identificación como un requisito adicional de su empleo; con lo que hay una parte de los aspectos negativos, en lo que se refiere a comodidad de uso, que van a perder importancia relativa. Un caso muy diferente es el acceso a un aeropuerto, en el que el coste pierde importancia frente a la seguridad, dado el alto coste que tienen los errores de identificación.

El escenario totalmente opuesto sería la identificación para transacciones comerciales en general, y para el uso de la tarjeta de crédito en particular. El número de usuarios potenciales es muy elevado, mientras que el coste de un error (en una transacción concreta) es relativamente bajo. El aspecto principal es la aceptación por parte del usuario, que podría decantarse por un producto alternativo, quizás sin protección biométrica, sencillamente por razones de comodidad de uso. Además, el coste económico de la implantación de un control biométrico debe ser bajo debido a la reducción del margen comercial, potencialmente bajo.

1.3.3 Evaluación del sistema.

El sistema biométrico que se vaya a implantar para determinada aplicación deberá ser analizado, entre otros aspectos, desde un punto de vista de su rendimiento en el reconocimiento automático de personas, tanto si se trata de identificación como de verificación.

La situación ideal sería la evaluación del sistema mediante la realización de pruebas sobre todos los posibles usuarios del mismo, para tener así una medida real de su rendimiento, Sin embargo, y dada la imposibilidad de ésta opción, las pruebas se realizan sobre un subconjunto de individuos. Son diversas las instituciones que están trabajando para fijar unos estándares que establezcan prácticas y criterios comunes en la evaluación (véase [CCB-02], [BWG] y [MAN-02]), de forma que sea posible una comparación objetiva entre distintos sistemas.

Para poder realizar la evaluación es necesario adquirir muestras de la característica biométrica, tanto para crear los patrones (medidas de referencia que se almacenan para cada usuario), como para las pruebas del sistema (medidas biométricas a comparar con los patrones). Esta adquisición podrá ser “offline”, si se emplean muestras previamente grabadas, u “online”, si la inscripción o el reconocimiento se realizan en el mismo momento en que es adquirida la muestra. En el primer caso debe definirse un protocolo adecuado de adquisición, de forma que no se limite la fiabilidad de los resultados obtenidos.

También será necesario, antes de realizar la evaluación, hacer un análisis detallado de todos los factores que puedan influir en el rendimiento del sistema. Una vez identificados los aspectos que puedan afectar a la medición, será necesario diseñar las pruebas para hacerlas independientes de su influencia.

En lo referente a los datos, debe decidirse si se controla o no la calidad de las muestras adquiridas, tanto durante la inscripción como durante la operación. La

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

composición de la población y el entorno de adquisición (iluminación, ruido de fondo, tipo de captador, …), son elementos importantes a tener en consideración en el proceso de adquisición.

Aunque, de cara a la evaluación, cabe considerar las tasas de fallos en todas las etapas del sistema, se suelen usar como medidas representativas, aquellas que se refieren a los errores en la decisión final:

- **Tasa de Falsas Aceptaciones (False Acceptance Ratio o FAR):** Es la proporción esperada de operaciones con identidad o no identidad falsamente reclamada que son correctamente confirmadas. En identificación positiva y verificación se tendrá una falsa aceptación cuando erróneamente le sea asignada la identidad de un cliente a un individuo inscrito o no, y en identificación negativa cuando sea rechazado un usuario ya inscrito en el sistema
- **Tasa de Falsos Rechazos (False Rejection Ratio o FRR):** Es la proporción esperada de operaciones con identidad o no identidad correctamente reclamada que son incorrectamente rechazadas. En identificación positiva y verificación se produce un falso rechazo cuando es rechazado un cliente, y en identificación negativa cuando es confirmado como inscrito un usuario realmente no inscrito en el sistema.

1.4 Entorno tecnológico.

Considerando toda la diversidad de factores involucrados, características de los sensores, necesidades de procesado, aceptabilidad, … sólo el reconocimiento de huella dactilar parece ser, en la actualidad, un serio candidato a poder ser incorporado a la vida cotidiana.

En los últimos años la biometría de huella dactilar se ha ido acercando al gran público, y ya no es extraña la utilización de sistemas automáticos de verificación dactilar para el acceso a algunas instalaciones.

La empresa suiza *Fingerprint Cards* desarrolló durante el año 2002 los tres componentes básicos requeridos en todo sistema embebido de reconocimiento biométrico de huella dactilar: sensores, algoritmos de reconocimiento y los dispositivos de aplicación específica encargados de realizar las tareas básicas asociadas.

La tendencia actual no es el desarrollo de componentes discretos sino todo lo contrario, la integración de cada uno de éstos en un único dispositivo SoC (*System-on-Chip*), capaz de albergar bajo un mismo substrato el sistema microprocesador, la memoria, los periféricos y un dispositivo lógico programable –preferiblemente con capacidad de reconfiguración dinámica– donde sintetizar procesadores hardware específicos que permitan acelerar aquellas tareas computacionalmente críticas. Con ello se pretende incrementar la fiabilidad y la seguridad del sistema de reconocimiento biométrico, reduciendo a su vez el tamaño de silicio requerido y por consiguiente el

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

coste del sistema. Se tiende hacia el desarrollo de arquitecturas que permitan implementar tareas complejas en sistemas embebidos flexibles y versátiles basados en dispositivos FPGA o SoC.

Estudiantes de doctorado de la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA), desarrollaron durante el año 2003 el prototipo *"Thumbpod"*, un dispositivo electrónico encargado de llevar a cabo las tareas típicas de todo sistema de autentificación personal basado en técnicas biométricas (adquisición, extracción, almacenamiento, emparejado y encriptado del resultado). La arquitectura del diseño se basa en una FPGA Virtex II (XC2V1000), albergando un procesador software Leon2 de 32 bits y 2 coprocesadores hardware (un cripto-procesador AES *–Advanced Encryption Standard–* y un procesador biométrico DFT *–Discrete Fourier Transform–* con el fin de acelerar las tareas de mayor coste computacional), junto con periféricos de memoria SDRAM y un sensor biométrico de huella dactilar completa. El algoritmo de extracción y emparejado (conocido habitualmente por su nombre en inglés: *matching*) consigue eficiencias FAR del 0,01% y FRR del 0,5%.

En el campo de aplicación de la seguridad informática, SuperToken es una solución completa y muy atractiva de verificación biométrica y firma digital Se trata de un dispositivo electrónico de bolsillo que integra un sensor biométrico de huella dactilar, un coprocesador biométrico encargado de las tareas de adquisición y verificación, un cripto-procesador de 8 bits generador de clave RSA, 32 kbytes de memoria EEPROM donde se almacenan los patrones dactilares y las claves criptográficas, y un puerto USB a través del cual es posible la conexión a cualquier sistema compatible con Microsoft Windows orientado a aplicaciones y servicios de red principalmente: autentificación segura en red, VPN (*Virtual Private Network*), acceso a web, *secure eMail*, firma electrónica, encriptación de documentos, etc. Se trata de una espléndida solución de alta seguridad por el hecho de ser un sistema integrado en el que el patrón o firma de la huella dactilar nunca abandona el dispositivo, realizándose el proceso de emparejado internamente en el propio dispositivo. Además, los índices FAR y FRR son configurables.

Otro dispositivo comercial es el Puppy FIU-710 de SONY. Se trata de un sistema completo de verificación biométrica con lector capacitivo de huella dactilar y conexionado USB. Dispone de hardware dedicado y 512 kbytes de memoria con el que se lleva a cabo todo el procesado biométrico. El patrón digital de la huella se almacena en 512 bytes y el tiempo de verificación que se alcanza es inferior a 1 s, con unos índices resultantes FAR=0,1% y FRR=1%.

1.5 Motivación de la tesis.

Como se puede comprobar analizando el entorno tecnológico, la verificación de personas a partir de sus impresiones dactilares es, en la actualidad, un problema casi completamente resuelto. Hay numerosas empresas que ofrecen todo tipo de productos que permiten atender la problemática del control de acceso de las personas a distintos servicios.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En los últimos años, como ya se ha mencionado, con la aparición de las tarjetas inteligentes [INF][STM][IDE][OBE], se ha vuelto a plantear el problema de la verificación, por la necesidad de que ésta se realice directamente en el procesador de la tarjeta. Inicialmente aparecen los lectores de tarjetas inteligentes (‘*smart card readers’*), que integran un sensor de huella dactilar y que permiten el proceso de emparejamiento o ‘*matching’*. En un primer momento es el propio sistema lector, externo a la tarjeta, el que procesa la información recogida de cara a la verificación, por lo que la firma biométrica del usuario de la *smart card* debe ser transmitida al sistema externo. Esta técnica se conoce como ‘*off-card matching’*, y en ella la propia *smart card*, antes de facilitar el patrón biométrico, autentifica el dispositivo lector. En caso de resultar una verificación negativa, la *smart card* ya no facilita la información al exterior. A pesar de ello, esta técnica presenta la desventaja de baja seguridad: el hecho de que la muestra patrón de la huella dactilar abandone la *smart card* entraña la posibilidad de que esta información sea interceptada de forma fraudulenta.

A continuación, se implanta la técnica *matching on-card*: el proceso de emparejamiento se realiza en la propia tarjeta, con lo que el patrón biométrico del usuario no abandona en ningún momento la *smart card*, si bien continúa un punto de baja seguridad debido al establecimiento de comunicación con el dispositivo lector antes de realizarse una identificación positiva.

Actualmente la seguridad se intenta mejorar mediante la integración en la propia tarjeta de un sensor biométrico de huella dactilar: *Fingerprint-ID-Card*. Se trata de una nueva generación de *smart cards* con los máximos índices de confianza gracias a la integración de un sensor capacitivo CMOS en la propia tarjeta. Con esta tecnología, conocida como ‘*Authentication on-Card’* o ‘*System on-Card’* se pretende abordar todas las tareas del algoritmo biométrico: desde la adquisición y procesado de la imagen de la huella, hasta la extracción de la firma y el posterior proceso de emparejamiento con el patrón. Sin embargo, hasta la fecha sólo se ha conseguido integrar el sensor dactilar en la tarjeta, en concreto sensores capacitivos, en prototipos que todavía no cumplen con todas las especificaciones ISO, principalmente las referentes a los tests de espesor y torsión. Existiendo también problemas adicionales para la obtención de programas con bajos requerimientos de proceso y de memoria.

A nivel de patentes, destacar una llevada a cabo por la compañía suiza *Fingerprint Cards* (Bo Löfberg US Pat. No 4.582.985) en la que se define un tipo de tarjeta personal que integra un sensor de huella dactilar y en la que se llevan a cabo todos los pasos del algoritmo biométrico en el propio dispositivo. Esta *smart card* maneja además operaciones criptográficas y corresponde a la próxima generación de *Trusted Smart Cards*.

En este contexto, el grupo de diseño VLSI del Departament d’Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica de la Universitat Rovira i Virgili entró a formar parte del proyecto Technology Responses to Ubiquitous Secourity Threats for a-Security (TRUST-eS). Este proyecto MEDEA+ pretendía salvar las limitaciones y cuellos de botella actuales, y desarrollar respuestas o avances tecnológicos de cara a las soluciones futuras de seguridad para transacciones electrónicas (e-Security) y aplicaciones para el ciudadano y administración pública (e-Government).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

1.6 Objetivos.

La labor concreta del autor, y motivación de la tesis, es la integración de sistemas biométricos y tarjetas inteligentes en el ámbito de sensores y aplicaciones SW para una verificación de identidad más segura. Se persigue el objetivo de implementar un "*embedded security system*" capaz de verificar la identidad de cualquier individuo a partir de la utilización de la biometría de huella dactilar.

En particular se realiza el análisis y la modificación de un algoritmo para la extracción de las características físicas de las huellas dactilares directamente a partir de una imagen en escala de grises, optimizándolo para ser ejecutado en microprocesadores de media – baja potencia de cálculo. Las modificaciones que se proponen van dirigidas a permitir una implementación hardware de las partes críticas del algoritmo; en concreto se diseña un coprocesador que haga posible bajar las necesidades del sistema, y permita disponer de un sistema de extracción en tiempo real de los puntos característicos de huellas dactilares en microprocesadores de bajo coste.

Habitualmente la parte más crítica, y computacionalmente más costosa, de los algoritmos de extracción de características radica en la correcta estimación de las direcciones de las líneas de la huella; por lo que se pretende optimizar un algoritmo y diseñar un coprocesador para esta tarea específica.

Como objetivo adicional se pretende analizar las fases de segmentación y procesado previas a la extracción. Estas fases requieren de cálculos que son susceptibles de aprovechar las prestaciones de los coprocesadores que van a diseñarse para la fase de extracción; sin embargo habitualmente se han desarrollado algoritmos independientes sin estudiar los beneficios de un diseño común.

1.7 Plan de trabajo.

Tradicionalmente, los algoritmos utilizados para realizar la extracción de características de huellas dactilares se basan en la sucesiva aplicación de complicados algoritmos de procesado de imagen. El desarrollo de estos algoritmos se realiza pensando en la correcta extracción de las características, pero hasta la fecha no se ha pensado en una optimización del coste o de la portabilidad; los sistemas se han desarrollado sobre una plataforma con un ordenador personal, o empleando un microprocesador de altas prestaciones (y coste), cuando no un procesador digital de señal (DSP) específico.

En este trabajo se analizan los distintos métodos empleados habitualmente para la extracción de características, para poder elegir entra aquellos que permitan unos resultados aceptables sin una excesiva carga computacional.

Una vez elegido el algoritmo propuesto por los doctores Dario Maio y Davide Maltoni [MAI-97], que propone la extracción de las características de las huellas dactilares directamente de imágenes en escala de grises, y teniendo en mente la implementación hardware de un coprocesador, se ha modificado el algoritmo,

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

eliminando los productos y las divisiones, así como todas las operaciones en coma flotante.

Se van a analizar distintos algoritmos para la correcta estimación de las direcciones de las líneas de la huella, manteniendo una buena eficiencia sin excesivas necesidades computacionales. Y se van a presentar soluciones que eviten cálculos complejos y que permitan el diseño de coprocesadores específicos de bajo coste.

Los nuevos algoritmos presentados van a facilitar la realización de una fase previa de segmentación de la huella, un punto importante en el proceso de extracción, y que, habitualmente, se ha venido estudiando de forma separada al proceso de extracción.

Finalmente se analizan las características del mapa de direcciones de la huella, para aprovecharlas en una mejor discriminación final entre los posibles tipos de puntos característicos.

Todas estas modificaciones nos permitirían realizar un dispositivo electrónico (hardware + software) de pequeñas dimensiones, bajo coste y alta calidad en los resultados, obteniendo así la posibilidad de la utilización de la identificación o autentificación de huellas dactilares en nuevos campos de aplicación. Una de las posibles aplicaciones de uso es como llave de acceso, ya sea en hoteles substituyendo las tarjetas o llaves de apertura de habitaciones, como en grandes o medianas empresas como control de acceso de áreas restringidas.

1.8 Organización del documento.

En este capítulo se han presentado unas consideraciones previas que marcan las líneas a seguir en la memoria escrita de esta Tesis, que se estructura en los capítulos siguientes:

Las bases teóricas en las que se fundamenta la identificación biométrica mediante huella dactilar se resumen en el capítulo 2, presentándose además la situación actual de su uso como método de identificación. Se describen las características fisiológicas que permiten utilizar las huellas dactilares como sistema de identificación, así como las implicaciones tecnológicas derivadas.

El capítulo 3 detalla el método que se va a usar para extraer las características de una huella dactilar a partir de su representación. En este capítulo se presentan las optimizaciones que aporta esta tesis de cara a reducir el coste computacional de los algoritmos asociados, lo que va a permitir desarrollar un hardware específico para desarrollar sistemas de reconocimiento automático de bajo coste y de bajo consumo.

El capítulo 4 se centra en el desarrollo de un método preciso y eficiente para la estimación de las direcciones de las crestas papilares, imprescindible para realizar correctamente la extracción de las características de la huella. Se analizan distintas alternativas y se evalúa el coste computacional de cada una de ellas de cara a la viabilidad de un sistema de bajo coste para la identificación automática en tiempo real.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

El capítulo 5 aborda el diseño de un sistema software que permita la identificación automática mediante huella dactilar en sistemas basados en microprocesadores de bajo coste sin aritmética de coma flotante. Se validan los algoritmos empleados y se estudia su perfil de ejecución, analizando las funciones críticas y proponiendo una distribución de tareas que facilite el desarrollo de coprocesadores específicos para la ejecución de las tareas críticas y que permita un diseño final capaz de realizar una extracción de características en tiempo real.

En el capítulo 6 se presenta el diseño de los coprocesadores específicos, tanto para la estimación de direcciones, como para el seguimiento de crestas. En cada caso se ha buscado una estructura a la vez sencilla y eficiente, que minimice el retardo del sistema y permita una identificación en tiempo real mediante procesadores de bajo coste.

El capítulo 7 presenta las conclusiones del trabajo y propone las líneas de futuros trabajos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

2 Biometría de huella dactilar

Como paso previo a la utilización de las huellas dactilares como método de identificación, debemos responder satisfactoriamente a una serie de preguntas: ¿qué son las huellas dactilares y que tienen de particular?, ¿qué es y de que se compone un sistema de identificación automático de huellas dactilares?, ¿qué tipo de sensores existen para captar las imágenes de las huellas dactilares para poder ser procesadas? y. ¿qué tipos de algoritmos existen para encontrar las características de las huellas dactilares?. Este capítulo explica las bases teóricas de la biometría de huellas dactilares y presenta la situación actual de su utilización como método de identificación. Se describen las características fisiológicas que permiten utilizar las huellas dactilares como sistema de identificación, así como las implicaciones tecnológicas derivadas.

2.1 Huellas dactilares

Según el Diccionario de la Real Academia Española, la huella dactilar es la impresión que suele dejar la yema del dedo en un objeto al tocarlo, o la que se obtiene impregnándola previamente en una materia colorante. Esta impresión es una réplica de la estructura interna de la zona de la piel que ha dejado la marca.

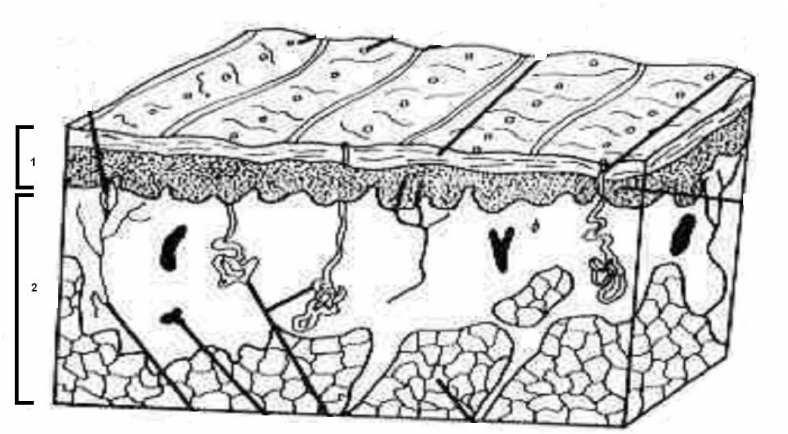


Figura 2.1 Sección de la piel de las yemas de las manos. (1) epidermis, (2) dermis.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La piel humana está formada por dos capas: la más externa, marcada como 1 en la figura 2.1 y que recibe el nombre de *epidermis*, y en la que se realizan los procesos de regeneración de la piel; y la capa más interna que recibe el nombre de *dermis* (zona 2). Con el fin de aumentar la superficie sensible y la capacidad de evacuación vascular, la dermis dispone de pequeñas prominencias y pliegues llamadas papilas. Estas papilas se alinean formando unas estructuras llamadas *crestas papilares*, que son las que se reproducen en las huellas dactilares.

2.1.1 Factores que influyen en las crestas papilares.

La forma de las papilas es muy variable y su número medio es de 36 por centímetro cuadrado. Su tamaño oscila entre 55 y 225 micras. Entre cada dos crestas papilares queda una depresión longitudinal llamada *surco interpapilar o valle* cuya anchura oscila entre 0,2 y 0,5 milímetros. Al estar formado en la dermis, dicho dibujo no se ve afectado por acciones externas, salvo que éstas sean lo suficientemente profundas (acción de ácidos, trabajo manual agresivo continuado, accidentes, etc.).

Existen tres factores que influyen en las características de las crestas papilares, [PUE-03] pudiendo determinar su grosor e incluso un patrón de su forma:

Edad: Aunque los dibujos papilares no sufren ninguna modificación con el paso del tiempo, sí que aumentan de grosor tanto las crestas como los surcos. En general se pueden distinguir tres grupos de edades: individuos de edad inferior a catorce años, entre catorce y sesenta y cinco e individuos con más de sesenta y cinco años.

Sexo: La diferencia entre las crestas papilares del hombre y de la mujer es el grosor. En general, las del hombre son más gruesas que las de la mujer, por lo que conociendo la edad del individuo se puede determinar el sexo de una persona a partir de la medida del grosor de sus crestas papilares.

Herencia: Aunque cada persona tiene un dibujo papilar distinto de otra, incluso entre gemelos, sí está demostrado que entre personas de la misma familia hay una tendencia a reproducir patrones de forma en los dibujos papilares.

Existen además una serie de características personales que pueden afectar en gran medida a las impresiones dactilares. A este respecto podemos citar [PUE-03]:

Profesiones especiales: existen determinados profesionales cuyo trabajo se realiza exponiendo sus dedos a un intenso agente abrasivo (ácido, desgaste por rozamiento, etc.). En estas personas es muy difícil realizar ningún tipo de estudio ya que pueden llegar a carecer casi completamente del dibujo papilar.

Accidentes: evidentemente el que mayor impacto representa sería la amputación completa de la primera falange. Sin llegar a ese extremo existen una gran variedad de los mismos (quemaduras, heridas profundas, etc.) que pueden afectar al dibujo papilar.

Enfermedades: algunas enfermedades provocan alteraciones epidérmicas graves que afectan a las falanges de los dedos. Entre las más usuales se puede citar la hiper o hipohidratación, sindactilia, polidactilia, etc.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

2.1.2 Extracción de características de huellas dactilares.

Una huella dactilar, o dactilograma, es el dibujo que forman las crestas papilares de la yema del dedo de la mano de una persona. Las bases de la moderna identificación por huella dactilar se establecieron a finales del siglo XIX principios del XX. En esa época ya se tiene un buen conocimiento de los principios en que se basa la formación de las huellas, así como de un conjunto de características que permiten la utilización de las huellas dactilares como elemento identificativo [MOE-71]:

Perennidad: Las crestas se mantienen en la piel durante toda la vida (salvo traumatismos graves). La única diferencia en el dibujo papilar de una persona durante su crecimiento es el cambio en el tamaño y anchura de las crestas, pero no en su disposición espacial ni en su tipología.

Inmutabilidad: Las crestas son invariables en número, forma, situación y dirección. Ninguna enfermedad modifica los dibujos. En todo caso, para que puedan ser destruidas total o parcialmente, el agente externo debe ser capaz de llegar hasta la dermis, ya que es en esta capa más interna de la piel donde se forman las crestas.

Diversidad: Los dibujos son distintos para cada persona y para cada dedo de una misma persona. Incluso son distintos los dibujos entre gemelos univitelinos.

Clasificabilidad: Si bien los dibujos de la huella son distintos, la variación se ciñe a unos límites que permite la clasificación sistemática.

Una vez establecida la posibilidad de utilizar las huellas dactilares como método de identificación, debe buscarse el conjunto de características que van a permitir una métrica adecuada, que permita la comparación mediante sistemas automáticos.

2.1.2.1 Sistemas dactilares.

Se denomina sistema dactilar a cada parte en que puede dividirse un dactilograma [PUE-03]. Existen tres sistemas dactilares (figura 2.2):

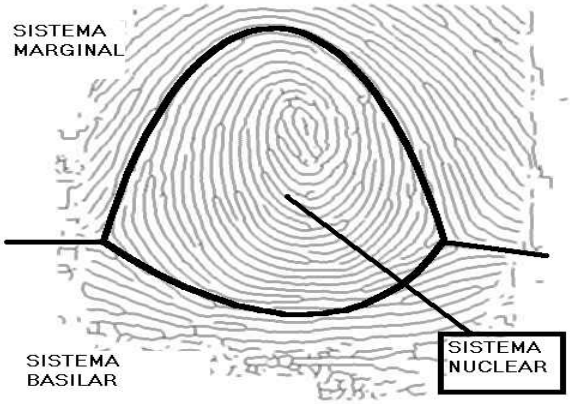


Figura 2.2 Sistemas dactilares: marginal, basilar y nuclear.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Sistema basilar: Zona entre la segunda y tercera falange, salvo para el dedo pulgar, donde se encuentra entre la primera y segunda falange. Normalmente sus crestas son horizontales, paralelas al pliegue de flexión de la falange.

Sistema marginal: Zona más exterior del dactilograma. Normalmente corresponde a la zona de la punta de los dedos y los bordes del mismo. Sus crestas suelen ser angulosas.

Sistema nuclear: Zona comprendida entre el sistema basilar y el marginal. Contiene el centro de la impresión dactilar (núcleo) y la mayor parte de los puntos característicos del dactilograma.

2.1.2.2 Deltas y núcleos.

En una huella existen dos tipos de puntos llamados "*singulares"* que son muy importantes en las etapas de clasificación:

Núcleo. Centro no geométrico del sistema nuclear. En la figura 2.3 (izquierda) se muestra su localización. Normalmente se suele tomar el punto más alto de la cresta central del dactilograma, alrededor de la cual aparece el resto. Esta definición hace muy complicada su extracción automática aunque existen diversas fuentes que han desarrollado métodos para encontrar zonas en la imagen donde pueda ser encontrado.

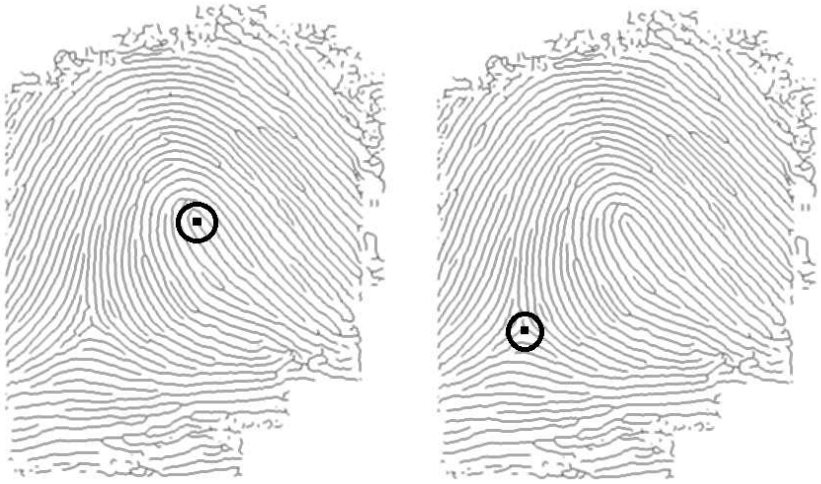


Figura 2.3 Muestra de la situación de los puntos singulares: núcleo y delta

Delta. Punto de encuentro de todos los sistemas (basilar, marginal y nuclear). Normalmente se trata de un punto bifurcación en la zona de confluencia, o del centro de una figura triangular de confluencia de los tres sistemas dactilares; ver figura 2.3 (derecha). Existen dactilogramas anucleados, que no presentan deltas y, en cualquier caso, su localización suele ser difícil, puesto que se trata de un punto singular situado en una zona periférica de la huella.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

2.1.2.3 Clasificación de impresiones dactilares.

El dibujo de la huella, analizado a distintas escalas, muestra distintos tipos de características. Y si bien es el análisis local y detallado el que se utiliza para el emparejamiento de huellas, ha sido el estudio a nivel global el más habitualmente empleado para establecer una clasificación que permita ordenar las huellas dentro de una gran base de datos.

Las primeras normas de clasificación fueron establecidas por Purkinje [MOE-71], pero el primer estudio científico en profundidad se realizó por Francis Galton [GAL-92], quien clasificó las huellas en tres clases principales: "arch", "loop", "whorl", dividiendo después cada categoría en subcategorías[1]. Diez años después, Edward Henry refinó la clasificación de Galton incrementando el número de clases [HEN-00]. Así, en cualquiera de las clasificaciones empleadas en los distintos países, el flujo de las crestas papilares muestra un patrón que se asocia a alguno de los mostrados en las figuras 2.4 a 2.9.

Los tres tipos básicos son:

"Arch": Una huella del tipo "arch" (figura 2.4) tiene crestas que vienen de un extremo, suben en forma de una pequeña abolladura y siguen hasta el lado opuesto al inicial. No aparecen núcleos ni deltas. Corresponden al tipo adelto de la clasificación de Olóriz

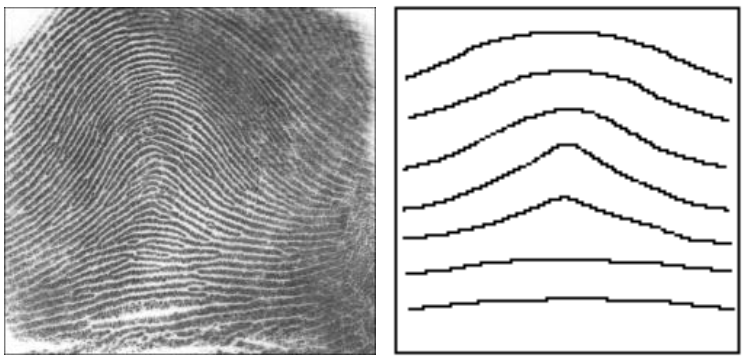


Figura 2.4 Dactilograma de tipo "arch".

"Tented arch": Similar a la anterior, excepto en el hecho de que al menos una cresta muestra una fuerte curvatura, apareciendo un núcleo y un punto delta (figura 2.5). Corresponden al tipo pseudodelto de la clasificación de Olóriz.

[1] No se traducen los nombres de las categorías puesto que en España de adoptó el método del Dr. Federico Olóriz [OLO-09], basado en un sistema anterior del argentino Juan Vucetich. Según ésta clasificación se establecen como tipos principales: adelto, dextrodelto, sinestrodelto, bidelto e ilegible. Aunque las dos aproximaciones son distintas en la práctica los resultados de la clasificación coinciden casi exactamente.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

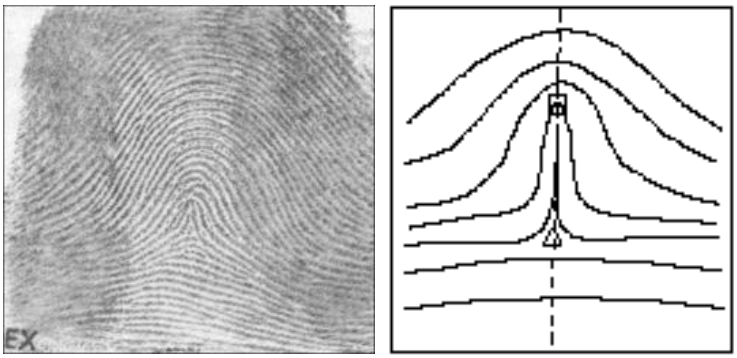


Figura 2.5 Dactilograma de tipo "tented arch".

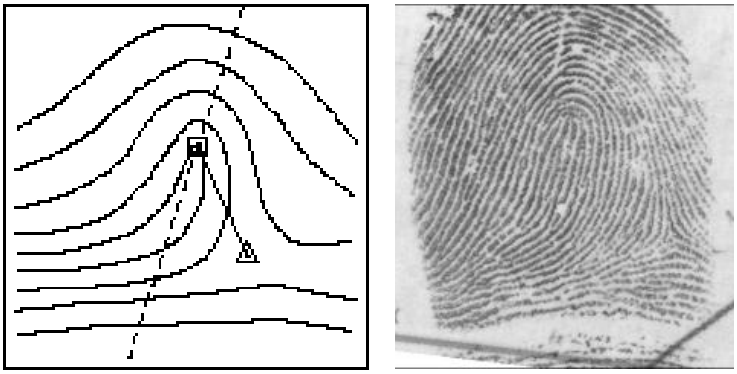


Figura 2.6 Dactilograma de tipo "left loop".

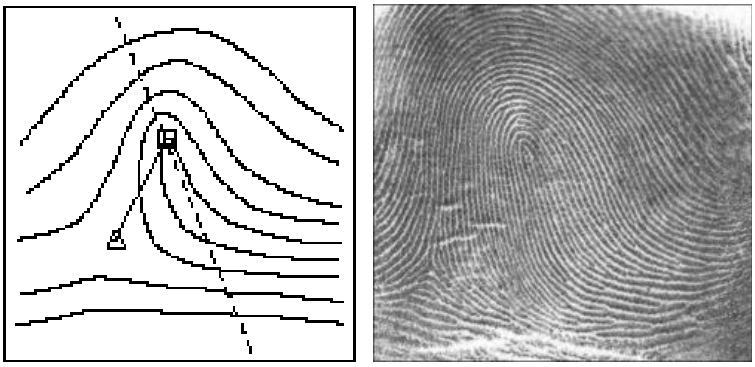


Figura 2.7 Dactilograma de tipo "right loop".

"Loop": dactilograma en el que una o más crestas entran por un lado, se curvan hacia atrás, y vuelven a salir por el mismo lado por el que han entrado. Aparecen singularidades de tipo núcleo i delta. Se subdividen en dos tipos según las líneas

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

entren y salgan por la izquierda (corresponden a los dextrodeltos según la clasificación de Olóriz y se caracterizan por tener un solo punto delta a la derecha del punto núcleo) (figura 2.6), o por la derecha (corresponden a los siniestrodeltos según la clasificación de Olóriz y se caracterizan por tener un solo punto delta a la izquierda del punto núcleo) (figura 2.7).

"Whorl": Al menos una de las crestas completa un camino que rodea completamente el centro de la huella, realizando un giro de 360 grados (figura 2.8). Se caracteriza por la presencia de dos puntos singulares delta y corresponde al tipo bidelto de la clasificación de Olóriz. És una categoría compleja que suele subdividirse en "twin loop" i "plain loop"

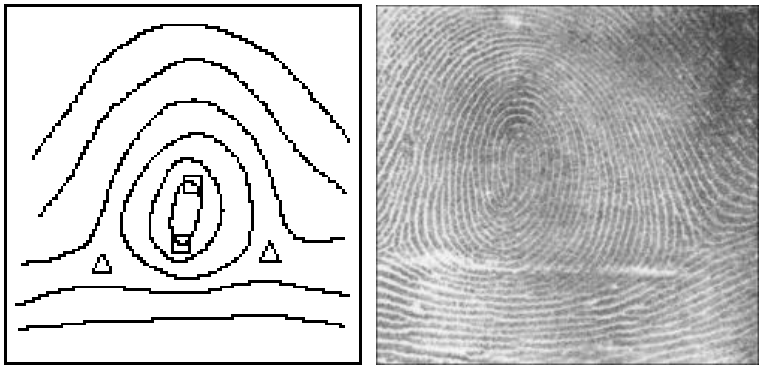


Figura 2.8 Dactilograma de tipo "whorl".

Como se ha mencionado anteriormente, la clasificación de los dactilogramas o huellas dactilares no es materia de este trabajo. Como en el caso anterior, se ha creído conveniente incluir esta información para que los lectores tengan más información sobre el reconocimiento de huellas dactilares y como se pueden clasificar en las bases de datos para posibles comparaciones. En cualquier caso, gracias al avance de las tecnologías, actualmente es suficiente con guardar la matriz de los puntos característicos extraídos de las huellas dactilares para poder realizar su comparación y reconocimiento.

2.1.2.4 Minutiae

Mientras que, como se ha visto, el análisis de las huellas a nivel global ha sido empleado en los sistemas de clasificación de huellas; el análisis local muestra una variedad de puntos característicos que se emplean en la identificación.

Las crestas papilares presentan, con frecuencia, puntos de coincidencia con otras crestas o bien terminan de manera abrupta. Cada uno de estos puntos de ruptura en el dibujo del dactilograma recibe el nombre de minutia y constituye un "*punto característico*" de la huella. Existen varios tipos de minutias atendiendo a la forma en que aparecen en una cresta y su conjunto, conocido habitualmente por el vocablo en latín minutiae, caracteriza de forma única una huella dactilar (en singular las palabras latina y castellana coinciden, no siendo así en plural; en el resto del texto se empleará minutias como plural de minutia, mientras que la palabra latina minutiae se reservará

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

para identificar el conjunto completo de los puntos característicos de una huella). Habitualmente en la caracterización se emplean sólo los dos tipos de minutias:

Final: Terminación abrupta de una cresta (figura 2.9). Representan el 56,3 % de los puntos en el dactilograma. En la figuran se muestran tres de estos puntos denominados A, B y C.

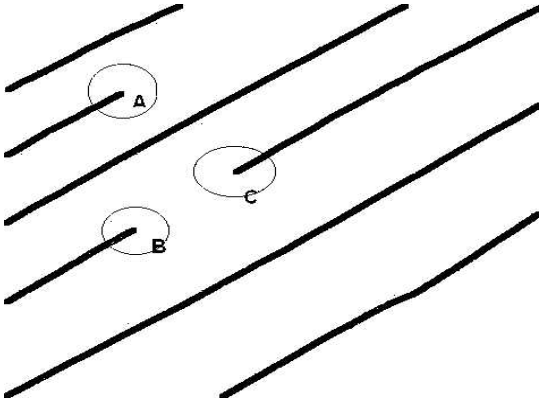


Figura 2.9 Punto final de una cresta

Bifurcación: Punto en que una cresta se transforma en dos crestas. Por analogía también se denomina así a la convergencia de dos crestas (figura 2.10). Representan el 30,5 % de los puntos. En la figura son los puntos A y B.

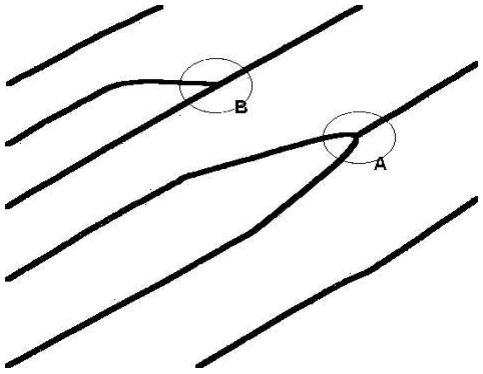


Figura 2.10 Bifurcación de una cresta

El minutiae de las huellas dactilares, como el resto de parámetros característicos de los dactilogramas, no es invariante con las condiciones de adquisición de la huella; sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con otros, suele ser estable, y lo bastante robusto a las condiciones de impresión como para ser empleado como elemento identificativo. En todo caso, un sistema automático de extracción puede tener problemas en huellas de baja calidad, por lo que a menudo es necesario emplear técnicas de mejora de la calidad de las imágenes.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

2.2 Emparejado de huellas

El emparejado fiable de huellas dactilares es un problema extremadamente difícil, principalmente como consecuencia de la gran variabilidad entre impresiones de la misma huella (gran variabilidad intra-clase). Los principales factores responsables de esta variabilidad son: traslación, rotación, solapado parcial, distorsión no lineal, variaciones en la presión, alteraciones de las condiciones de la piel, ruido y los problemas derivados de la extracción de características. Así, como puede apreciarse en la figura 2.11, impresiones del mismo dedo pueden parecer bastante diferentes, mientras que huellas de dedos distintos pueden parecer similares (pequeña variabilidad inter-clase).

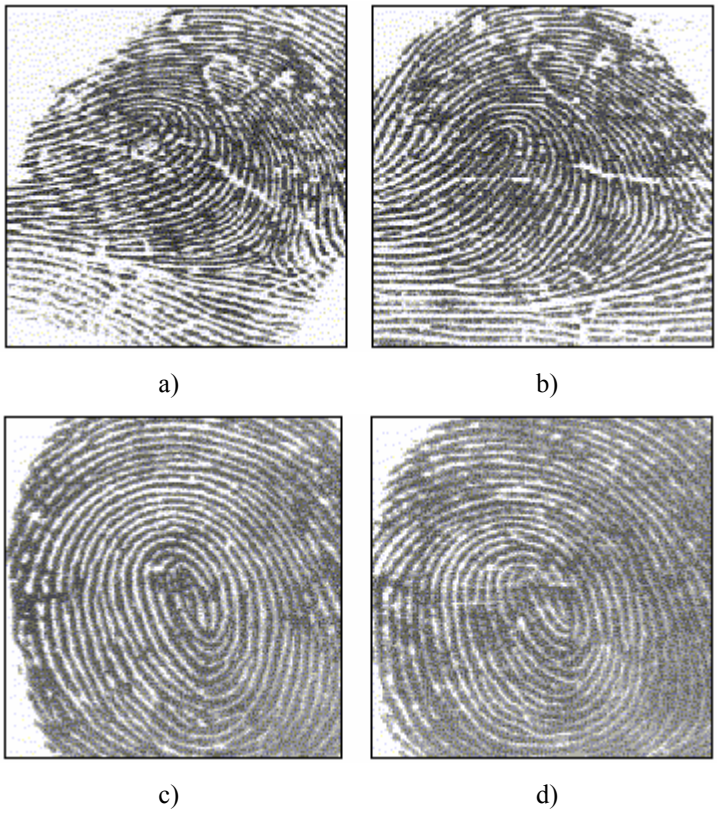


Figura 2.11 Las impresiones a) y b) parecen distintas, pero pertenecen al mismo dedo, mientras que las huellas c) y d) parecen iguales para unos ojos inexpertos pero son de dedos distintos.

Los expertos en la identificación mediante huella dactilar evalúan distintos factores para decir que dos impresiones distintas pertenecen a la misma huella:

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

- Las dos huellas deben pertenecer al mismo tipo desde un punto de vista del análisis global.
- Correspondencia cualitativa entre el minutiae de las dos impresiones, es decir concordancia desde un punto de vista local.
- Similitud mínima cuantitativa, que especifica el mínimo número de parejas entre el minutiae de las dos huellas para validar legalmente la identificación (de 12 a 14 parejas dependiendo del país).

Los sistemas automáticos de verificación dactilar, si bien se han inspirado en el procedimiento manual, han derivado en multitud de distintas soluciones pensadas explícitamente para ser implementadas en una computadora. En general, estas soluciones para el emparejado automático de huellas, pueden clasificarse en tres categorías:

- **Emparejado basado en correlación:** se calcula la correlación, de los niveles de intensidad de los pixels, entre distintas alineaciones (varios desplazamientos y rotaciones) de las dos imágenes a comparar.
- **Emparejado basado en minutiae:** se extrae el minutiae de las dos huellas y se almacena como dos conjuntos de puntos en el plano bidimensional. Se trata de encontrar la alineación entre el patrón y la muestra que derive en el máximo número de parejas de minutias.
- **Emparejado basado en características de crestas:** se trata de comparar otras características de las crestas, como orientación, grosor, forma y frecuencia ; que son más fáciles de obtener que el minutiae, especialmente en impresiones de baja calidad.

2.3 Sistema automático de identificación dactilar

Un Sistema Automático de Identificación Dactilar (SAID), formado por un conjunto de subsistemas físicos y lógicos, es un equipo que permite la verificación o identificación de una persona a partir del análisis de sus impresiones o huellas dactilares.

El SAID tiene tres modos de funcionamiento en la identificación personal por medio de impresiones dactilares:

- **Registro:** en este modo se extraen las características de las huellas dactilares y se guardan para poder ser comparadas.
- **Verificación:** en la que dos impresiones (una de persona conocida y otra desconocida) se cotejan a fin de conocer si la identidad de la segunda persona corresponde con la primera.
- **Identificación:** en la que se dispone de una impresión de una persona desconocida y de una base de datos, más o menos voluminosa, de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

impresiones dactilares. La identificación de la persona se realiza mediante una búsqueda en dicha base de datos.

En algunas ocasiones no se distingue entre si el SAID está trabajando en modo de verificación o de identificación, y se hace referencia, de forma genérica, al modo de reconocimiento.

El SAID, indistintamente del modo de funcionamiento en el que trabaje, tiene varios bloques en común para extraer la información de las huellas dactilares; éstos bloques coinciden con los de cualquier otro tipo de sistema de reconocimiento biométrico (figura 1.1).

- **Captura ("Image Acquisition"):** Proceso de adquisición de la imagen de una impresión o huella dactilar para su introducción en un sistema de procesamiento de la imagen.
- **Procesado de imagen ("Image Processing"):** Tareas tendentes a mejorar la calidad de la imagen capturada de la impresión objeto de estudio. Entre las principales técnicas podemos citar la eliminación de ruido, mejora del contraste, realce de bordes, etc.
- **Extracción de características ("Feature Extraction"):** Obtención, a partir de la imagen de entrada, de las características intrínsecas a la impresión dactilar. Éstas no deben depender de la forma de adquisición de la imagen, ni de los valores de la imagen original, sino que provienen del estudio de la topología de la imagen. La correcta extracción de características precisa de un "*modelo de impresión dactilar"*, previamente definido. Éste está formado por un modelo de representación de las características, y por un sistema de coordenadas de referencia, que permita especificar las ubicaciones relativas de las mismas.
- **Comparación o emparejado ("Matching"):** Esta etapa determinará si la impresión dactilar pertenece a la misma persona de la impresión de referencia. El modelo original se compara con el patrón, estableciéndose, a partir de la medida de distancia previamente definida, un valor de identidad. En caso de identificación se obtiene un conjunto pequeño de candidatos (usualmente menos de 20) sobre los que un operador realiza una comprobación uno a uno de forma manual.

En la fase de registro el sistema mide las características biométricas del usuario. A partir de esta medida se extrae un código patrón (o "*template"*) que se asocia a la identidad del usuario. El tamaño de dicho código no suele ser mayor de 1 kbyte de memoria, y se almacena en una base de datos como código identificador o ID. A partir de este instante el usuario queda dado de alta en el sistema de reconocimiento biométrico.

Durante la fase de reconocimiento, el sistema vuelve a medir las características biométricas del usuario, y se repite el proceso de extracción del código de identidad. Dicho código es comparado con el código de identidad, previamente almacenado en la fase de registro, a fin y efecto de autentificar la identidad del usuario en función del grado de similitud entre ambas muestras.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En apartados siguientes se explica con más detalle los distintos módulos que forman parte del sistema de reconocimiento biométrico.

2.3.1 Adquisición de huellas dactilares

La tecnología actual de sensores biométricos de huella dactilar abarca un amplio abanico de posibilidades, cada una de ellas fundamentada en fenómenos físicos distintos. Sensores ópticos (cámaras CMOS o CCD), ultrasónicos (adquisición de la imagen dérmica de la huella), basados en RF, o micro-electro-mecánicos (*microswitches*) son algunas de las posibles alternativas de implementación. A pesar de ello, y con la finalidad de centrarnos en *embedded systems* de bajo coste (que es uno de los objetivos del proyecto MEDEA+), en este apartado sólo se mencionan aquellas tecnologías de sensores dactilares que permiten su integración en silicio: los llamados *silicon chip sensors*.

Se conocen tres tipos distintos de sensores *on-chip*. Todos ellos permiten capturar una imagen digital de la huella dactilar por simple contacto de ésta con la superficie del sensor:

Sensores de presión. Basan su funcionamiento en el efecto piezo-eléctrico. A partir de una matriz de pixeles, constituida por material sensible a la presión, es posible captar un patrón de la huella aplicada sobre el sensor. Tiene numerosas desventajas: baja sensibilidad, incapacidad de diferenciar dedos reales de artificiales, susceptibilidad a dañarse por exceso de presión, …, a pesar de las cuales continúan existiendo fabricantes que se inclinan por esta opción.

Sensores capacitivos. Es en la actualidad una de las tecnologías más populares, basada en las propiedades del campo eléctrico. El dedo y la lámina sensora constituyen un condensador cuyo dieléctrico varía acorde a la propia discontinuidad de las crestas y los valles de la huella. Es esta variación del dieléctrico la que permite capturar las características de la huella dactilar. Su principal inconveniente es, sin duda, su excesiva vulnerabilidad a descargas electrostáticas.

Sensores térmicos. Son sensores basados en el efecto piroeléctrico: el material piroeléctrico del sensor permite convertir las diferencias de temperatura originadas por las ondulaciones de la huella en contacto o no con el sensor (crestas o valles respectivamente) en diferencias de tensión. Estos niveles de tensión son finalmente traducidos, mediante un conversor A/D, en un escalado de grises de los píxels que constituyen la imagen de la huella dactilar adquirida. Además de su fuerte inmunidad a descargas ESD, destaca el hecho que el equilibrio térmico entre el sensor y la huella se alcanza en un tiempo muy breve, lo cual hace que la imagen se desvanezca enseguida, y se evita la deposición de imágenes remanentes sobre la superficie del dispositivo sensor una vez transcurrida la fase de sensado.

En función de la fracción de huella capaz de capturar instantáneamente el sensor, éstos se clasifican en dos tipos: sensores completos, aquellos que permiten capturar la porción de huella requerida de forma instantánea, y sensores de *scan* o *sweeping*, en el caso de aquellos que requieren un barrido secuencial de la huella.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Los sensores completos, de dimensiones tales que cubren la porción de huella necesaria, permiten capturar la imagen total de forma estática e instantánea. A pesar de permitir adquirir la imagen completa, la desventaja de esta tecnología se encuentra en el tamaño del sensor –y por lo tanto en el coste del mismo–, además de la problemática en materia de seguridad ocasionada si la imagen de la huella se mantiene latente encima de la superficie sensora incluso después de retirar el dedo del sensor.

Figura 2.12 Sensor Completo.

El segundo planteamiento consiste en reducir el sensor a una lámina que comprende el ancho de la huella pero sólo algunos pixeles de altura. En este caso la adquisición completa de la imagen se produce de forma dinámica y secuencial, a medida que el usuario desliza su dedo sobre la superficie sensora. Mediante este barrido se capturan, en serie y solapadas, las distintas rebanadas horizontales que constituyen la huella. Aunque ello supondrá un procesado adicional para reconstruir la imagen, la principal ventaja se encuentra en su coste, no sólo por el propio tamaño del sensor sino principalmente por cuestiones de optimización de la originaria oblea de silicio. En este caso además no aplican los problemas de la permanencia de imágenes remanentes de la huella sobre la superficie del sensor.

Figura 2.13 Sensor parcial

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Existe un compromiso entre la calidad de la imagen dactilar adquirida y el coste del dispositivo sensor, la resolución, la calidad, …Muchos de estos parámetros están asociados a la superficie del elemento sensor y, en general, independientemente de la tecnología del sensor, cuanto mayor es el dispositivo, mayor es su coste.

El reconocimiento de huellas adquiridas mediante sensores de pequeña superficie es difícil debido a la posibilidad de tener una área de superposición muy pequeña entre muestra y patrón, con lo que, en el caso de emplear una identificación basada en el minutiae, el número de correspondencias puede disminuir significativamente, hasta el punto de que el algoritmo de emparejado no sea capaz de tomar una decisión con el suficiente grado de certeza.

Jain, Prabhakar y Ross [JAI-99a] compararon el rendimiento de un mismo algoritmo de reconocimiento, sobre dos bases de datos que contenían huellas de los mismos individuos adquiridas bajo el mismo protocolo, pero adquiridas con sensores de distintos tamaños, observando una diferencia substancial en los resultados obtenidos. Conclusiones similares pueden obtenerse extrapolando los datos de las distintas ediciones de la Fingerprint Verification Competition.

Sin embargo, los fabricantes tienden a reducir el área de los dispositivos sensores en aras de un menor coste. Por lo general, indistintamente de la tecnología de sensado empleada, se acostumbra a trabajar con tamaños de 300 x 300 píxeles y resoluciones de 500 dpi (tamaños de los píxels de 50µm x 50µm). En referencia al escalado o digitalización de la imagen adquirida, se usan conversores A/D de 8 bits, lo que supone un rango en escala de grises de 256 niveles.

2.3.2 Procesado de la imagen

Aunque alguna técnicas de emparejado de imágenes comparan imágenes directamente a través de métodos basados en correlación, la mayoría de los sistemas actuales emplean el minutiae de la huella como característica básica de reconocimiento. En cualquier caso, se requiere de una etapa de extracción de características, y posiblemente de mejora de la imagen, previa a la comparación. Esta etapa es necesaria para minimizar el efecto de una serie de problemas que pueden afectar al proceso de reconocimiento:

a) El minutiae puede variar entre dos impresiones debido a multitud de factores, especialmente aquellos relacionados con las condiciones de adquisición.

b) Rotación, traslación, cambio de escala o deformación no lineal de la huella.

c) Ruido no uniforme y distorsión.

d) Variaciones naturales como cortes, sequedad, aspereza, …

El procesado de la imagen y la extracción del minutiae, es la parte más dificultosa, y con mayor coste de cálculo, de cara a realizar una identificación correcta,

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

ya que en estos dos bloques es donde se realiza el estudio de la huella dactilar y se extrae el patrón de minutias a ser comparadas.

Existen multitud de referencias bibliográficas sobre extracción de características de huella. La mayor parte de ellas transforman la impresión dactilar en una imagen binaria, y entonces realizan un proceso de adelgazamiento que reduce las crestas a un píxel de ancho. Así, el minutiae se localiza sobre la imagen adelgazada. Moayer y Fu [MOA-86] propusieron una técnica de binarización basada en la aplicación iterativa de un operador laplaciano y un algoritmo con umbral dinámico. Verma [VER-87] desarrolló una aproximación borrosa, también com umbral adaptativo, para preservar el mismo número de píxeles blancos y negros dentro de cada vecindad.

Por otro lado, O'Gorman y Nickerson [OGR-89] proponen un método de mejora y binarización basado en la convolución de la imagen con un banco de filtros orientados según la imagen direccional de la huella, definida como una matriz cuyos elementos representan la dirección de la tangente a las crestas papilares de la huella correspondiente (ver apartado 2.3.2.2). Sherlock [SHE-94] emplean un banco de filtros para filtrar la imagen en el dominio de la frecuencia. Szekely [SZE-93], propone una técnica de detección del minutiae basada en el cálculo de la divergencia de la imagen direccional obtenida de la imagen binaria de la huella.

Mehtre describe un sistema de identificación automático completo en [MEH-93], que incluye un algoritmo de mejora que minimiza el efecto del ruido en imágenes en escala de gris. Weber [WEB-92] propone una solución que emplea filtros en el dominio de la frecuencia para mejorar la calidad de la imagen como paso previo a la binarización; después realiza la extracción del minutiae sobre las crestas gruesas en la imagen binaria (sin adelgazamiento).

La bibliografía también incluye diversas propuestas que utilizan redes neuronales. M.T. Leung [LEU-90] utiliza un perceptrón multicapa para extraer el minutiae mediante el análisis de de la salida de un banco de filtros de Gabor aplicados a la imagen en escala de grises. W.F. Leung [WFL-91] usa una red neuronal de tres capas, entrenada para extraer el minutiae de imágenes binarias adelgazadas. Los resultados que se obtienen empleando redes neuronales suelen ser buenos si se aplican a imágenes de alta calidad, pero los sistemas no suelen ser lo suficientemente robustos para tratar imágenes ruidosas. En estos casos suelen emplearse técnicas de postprocesado [HUN-93][XIA-91] para eliminar falso minutiae, y mejorar así el rendimiento y la velocidad del proceso de emparejamiento.

Existe otro grupo de métodos de extracción de minutiae, objeto de optimización en esta tesis y para los que se han desarrollado coprocesadores, que se basan en el seguimiento de las crestas, con el fin de extraer las minutias, directamente sobre la imagen capturada [MAI-97]. La eliminación de complejas etapas de filtrado mejora el tiempo de ejecución y reduce las necesidades de cálculo; pero continua necesitándose, para evitar la aparición de falso minutiae, de la segmentación de las partes de la imagen de baja calidad así como una buena estimación de la orientación local de las crestas.

Independientemente del método utilizado y de sus características particulares, existen una serie de etapas, habitualmente ejecutadas de forma secuencial, que son de aplicación general y que se describen a continuación. Un primer grupo lo forman los

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

procesos destinados a mejorar la calidad de la imagen: normalización, estimación de la orientación local, estimación de la frecuencia y filtrado; mientras que un segundo grupo de procesos está directamente relacionado con los métodos de extracción de características mediante binarización. Finalmente, el proceso de segmentación no pertenece claramente a ninguno de los dos grupos anteriores y su posición, dentro de la secuencia de etapas, dependerá de los pasos previos a ejecutar para realizarla.

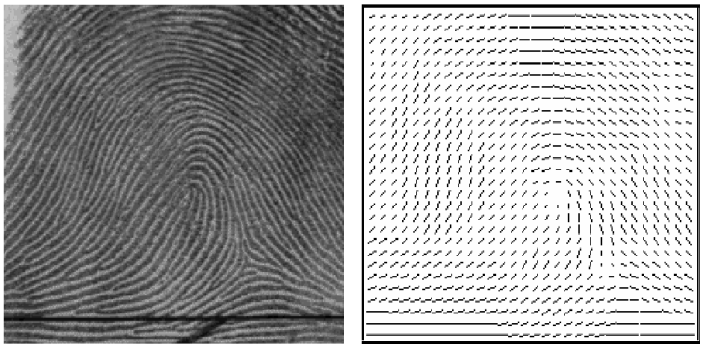
2.3.2.1 Normalización

La normalización tiene por objeto la reducción de las variaciones de nivel de gris entre crestas y valles, de forma que se facilite la realización del resto de operaciones. Se trata de una operación, realizada a nivel de píxel, en la que al final el conjunto de la imagen tiene unos valores de media y de varianza preestablecidos. Éste proceso no modifica la claridad de la estructura de crestas y valles, y no es necesario en muchos de los métodos de extracción de minutiae, pero es conveniente en algunos otros, en los que evita la necesidad de umbrales variables.

2.3.2.2 Estimación de la orientación local de las crestas papilares

Dado un píxel genérico [x,y] en una imagen, la orientación local en [x,y] es el ángulo θ_{xy} que forman, respecto del eje horizontal, las crestas papilares que cruzan una pequeña ventana centrada en [x,y]. Puesto que las crestas no están orientadas, a θ_{xy} se le asigna un valor entre 0 y 180 grados.

En lugar de calcular la orientación local en cada píxel, la mayoría de los métodos de procesado de huellas, en caso de necesitar la orientación de la impresión dactilar, emplean una estimación en posiciones discretas, de cara a reducir la carga computacional.



(a) (b)

Figura 2.14 Huella dactilar (a) y su correspondiente imagen direccional (b).

Grasseli [GRA-69] fue el primero en introducir el concepto de imagen direccional (fig. 2.15). Se trata de una matriz en la que los elementos codifican la orientación local de las crestas de la huella. La imagen se divide en celdas, y cada elemento θ_{ij}, representa la orientación media de las crestas en la celda [i,j], con centro

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

en el píxel $[x_i,y_j]$. A menudo se asocia un segundo valor r_{ij} a cada elemento θ_{ij}, para indicar la fiabilidad de la orientación. El valor r_{ij} es bajo en zonas ruidosas de la imagen y alto en las regiones de calidad elevada.

Distintos métodos se han propuesto para estimar la orientación de las crestas [KAS-87] [KAW-84] [RAO-90]; siendo la forma más sencilla la basada en el cálculo de gradientes en la imagen. La dirección del gradiente indica la dirección de máxima variación de la intensidad de los píxeles del dactilograma. Por tanto, la dirección de las crestas que cruzan una región de la huella centrada en $[x_i, y_j]$ va a ser ortogonal a la dirección obtenida para el gradiente en ese punto $[x_i, y_j]$.

Este método, aunque simple y eficiente, tiene ciertos inconvenientes que van a ser tratados en detalle en el capítulo 4, que aborda la estimación de direcciones mediante distintos métodos, así como su optimización para el diseño de un coprocesador específico.

2.3.2.3 Estimación de la densidad local de crestas

La densidad (o frecuencia) de crestas en un punto [x,y] de la imagen es la inversa del número de crestas por unidad de longitud que se cortan siguiendo un hipotético segmento centrado en [x,y] y ortogonal a la orientación local de la cresta θ_{xy}. Se puede definir una imagen de frecuencia, análoga a la de orientación, si se estima la densidad de crestas en posiciones discretas dentro de una matriz.

La densidad de crestas es un parámetro variable entre distintos dedos e incluso entre zonas de una misma huella. Suele medirse, sobre una sección ortogonal a la dirección local de una cresta, como el número medio de píxeles entre dos máximos consecutivos en el nivel de gris de dicha sección [HON-98]. En caso de imágenes ruidosas se proponen procesos adicionales de interpolación y de filtrado paso bajo.

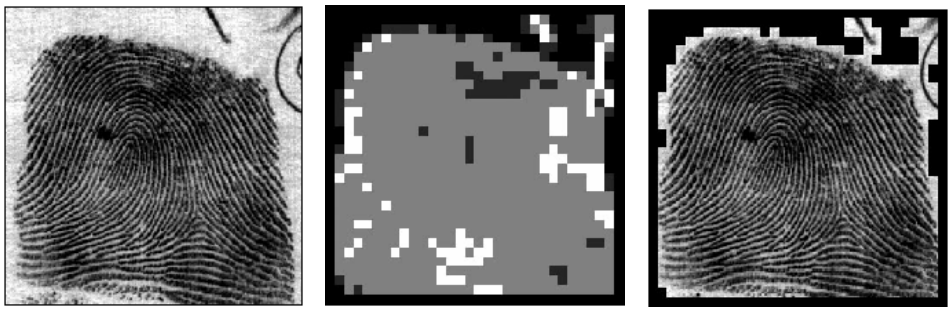
La correcta estimación de este parámetro es especialmente importante en algunos algoritmos de mejora de la imagen mediante técnicas de filtrado. El empleo de filtros parametrizados con la densidad local de crestas mejora sensiblemente los resultados, sin embargo debe pagarse el coste computacional de la estimación del parámetro y de la mayor complejidad de los filtros a emplear.

2.3.2.4 Segmentación

Habitualmente la imagen procedente del sensor de huella tiene zonas opacas en los bordes. Además, las partes de la huella cercanas a los bordes suelen ser más ruidosas. Estas zonas constituyen una información no deseada, que es conveniente excluir del proceso de extracción de características, para evitar la aparición de falso minutiae que posteriormente dificultaría mucho el proceso de emparejado de huellas.

La segmentación es el proceso por el cual se separan las zonas de la imagen que corresponden al primer plano, o zona de interés, de aquellas que corresponden al segundo plano. Es habitual ampliar el concepto de segmentación al proceso de analizar la calidad de la imagen por zonas, con el objeto de centrar la búsqueda de minutiae en las porciones de la huella adquiridas con mejor calidad, es decir, aquellas donde hay menos ruido o que tienen un mejor contraste [PAL-93].

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007



(a) (b) (c)

Figura 2.15 (a) Imagen original. (b) Máscara. (c) Imagen segmentada.

Con el objeto de identificar la zona de interés, es decir separar la huella del fondo y de las zonas más ruidosas, la imagen dactilar se divide en bloques mediante una cuadrícula. El objetivo de la segmentación es la clasificación de las celdas según pertenezcan al primer plano o no.

Existen dos grandes grupos de algoritmos para segmentación: los basados en el análisis de la varianza, que analizan la intensidad de la imagen en escala de grises dentro de cada bloque [HAR-85]; y los basados en la imagen direccional, que miden la calidad de cada celda en función de la variabilidad del gradiente entre un píxel y sus vecinos [BIG-87], es este caso se suele añadir éste parámetro de calidad a la imagen para su posterior utilización. Ambas aproximaciones pueden usarse conjuntamente [MEH-89] para, en ciertos casos, mejorar los resultados.

2.3.2.5 Realce del borde

En este proceso la imagen se ve sometida a filtros de mejora y realce de crestas, que son las que contienen la información a extraer, con lo que se eliminan ciertos tipos de ruido y evitan errores en etapas posteriores. Los tipos de filtro a emplear son muy diversos, siendo los direccionales los que suelen dar mejores resultados, y entre ellos el más habitual es un filtro de Gabor sintonizado a las orientaciones y frecuencia de cresta locales de la imagen [DAU-85][JAI-91].

Los filtros direccionales no tienen máscaras simétricas en todas las direcciones, sino que actúan de distinta forma en función de la dirección con la que se aplican. En consecuencia es imprescindible una correcta estimación de la orientación de las crestas así como de la frecuencia de las mismas de cara a la obtención de buenos resultados. Si nos imaginamos los lóbulos del filtro de la figura 2.16, orientados de acuerdo a las crestas de una impresión dactilar, podemos entender como filtra eliminando ruido y aumentando notablemente el contraste entre crestas y valles (figura 2.17). Pero del mismo modo, resulta evidente que una incorrecta estimación de direcciones, que provoque una orientación errónea del filtro, puede empeorar la imagen e incluso acarrear una pérdida de información.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

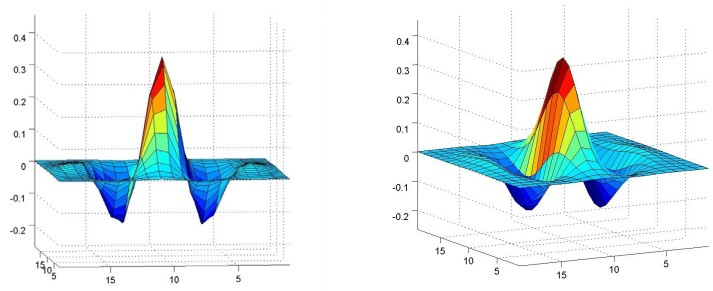
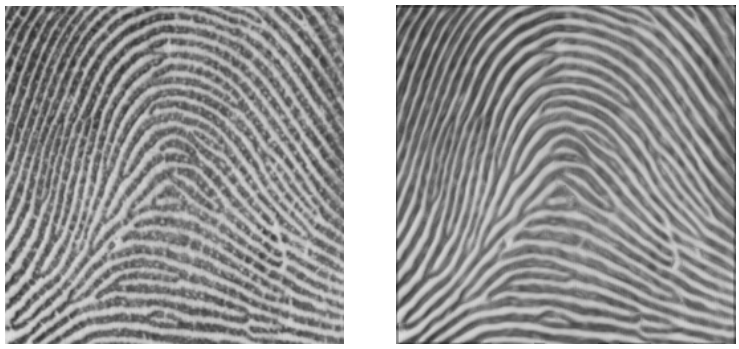


Figura 2.16 Dos perspectivas de un filtro de Gabor**.**



(a) (b)

Figura 2.17 Ejemplo realce de borde: (a) Imagen original y (b) imagen realzada**.**

Debido a las fuertes variaciones de orientación y densidad de crestas dentro de una imagen, existe un compromiso a la hora de fijar el tamaño y de la ventana sobre la que aplicaremos el filtro, y en el número de posibles orientaciones de éste. Los mejores resultados se obtienen con ventanas pequeñas, y empleando un filtro parametrizable para cualquier valor de la orientación y frecuencia local de las crestas, pero en este caso debe asumirse el coste de unas altas prestaciones computacionales y unos elevados tiempos de procesado.

2.3.2.6 Binarización

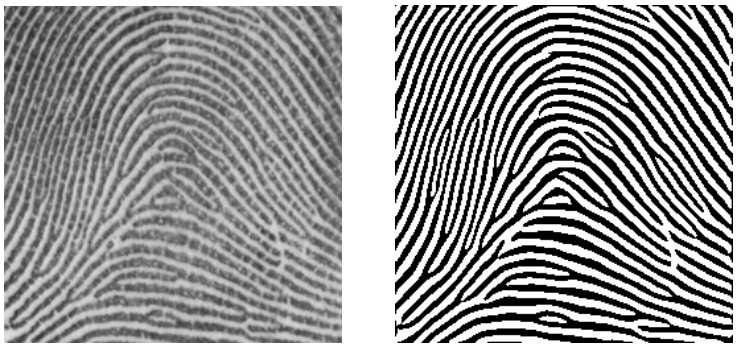
Consiste en transformar la imagen en escala de grises a una imagen en formato binario, donde las zonas negras de la imagen obtienen valor 1 y las zonas blancas 0 (figura 2.18). Se trata de un proceso especialmente delicado como etapa previa (anterior al adelgazamiento y la poda) para la extracción de minutiae ya que, de no realizarse correctamente, se puede llegar a perder mucha información del dactilograma original y generarse una imagen no apta para la extracción del minutiae.

El problema genérico de la binarización ha sido estudiado en distintos ámbitos, especialmente en el tratamiento de imágenes y el reconocimiento de patrones [TRI-95]. Una primera propuesta de solución emplea un umbral global, dinámico o fijado de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

antemano en función de si la imagen se normaliza previamente en media y varianza o no, de forma que se ponen a cero los píxeles con nivel de gris inferior al umbral y a uno el resto.

En general, el contraste y la intensidad varían tanto entre distintas zonas del dactilograma que un umbral fijo no es suficiente para una correcta binarización, por lo que se introducen técnicas para el cálculo de umbrales locales, que se adaptan dinámicamente a la intensidad local de la imagen [MOA-86] [VER-87][RAT-95].

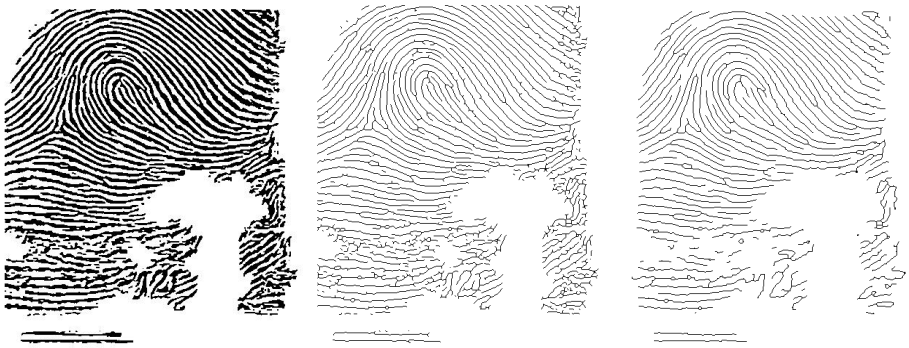


(a) (b)

Figura 2.18 Ejemplo binarización: (a) imagen original, (b) imagen binarizada.

2.3.2.7 Adelgazamiento y podado

La obtención del minutiae a partir de imágenes binarias se suele hacer después de realizar un paso de adelgazamiento, en el que se reduce la anchura de las crestas a un píxel, dando lugar a lo que podríamos llamar el esqueleto de la huella. Se trata de unos algoritmos bastante críticos, puesto que las irregularidades en la imagen binaria pueden convertirse en pequeñas espigas detectadas posteriormente como falso minutiae.



(a) (b) (c)

Figura 2.19 Resultado de la esqueletización (b) y posterir poda (c), de una imagen binarizada (a).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En el proceso de adelgazamiento suelen emplearse técnicas de análisis no lineal de la imagen basadas en estructuras geométricas [HAR-87]. La imagen se va adelgazando, en un proceso iterativo, hasta la obtención del esqueleto final. En cada iteración se realiza la búsqueda de coincidencias de la imagen con unos patrones determinados, de forma que se acaban eliminando de la imagen los píxeles que satisfacen dichos patrones [ESP-03].

El proceso de adelgazamiento viene seguido de una operación de depuración (podado) para eliminar ramas parásitas residuales, que han surgido en el proceso previo de adelgazamiento. En general, los dactilogramas originales suelen tener bordes ruidosos, lo que resulta en ramas parásitas no deseadas en la versión esqueletizada. El objetivo de este paso es limpiar éstas sin desconectar los arcos. En el proceso de podado se eliminan crestas espurias introducidas incorrectamente en la operación de adelgazamiento como se muestra en la figura. En el mismo proceso también se aprovecha para conectar crestas rotas, es decir, unir todas las líneas que presenten sus finalizaciones con dirección similar, y que se hallen próximas entre sí.

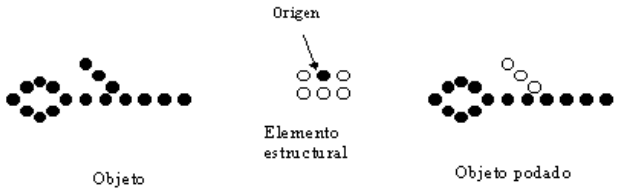


Figura 2.20 Proceso de podado

2.3.3 Extracción de minutias

Como se ha mencionado anteriormente, existen diferentes clases de puntos característicos. En este proyecto, al igual que en la mayoría de la bibliografía consultada, sólo se realiza la extracción de dos tipos de minutias o puntos característicos: terminaciones y bifurcaciones.

En este apartado sólo se explica como se realiza la extracción de minutias en el método clásico o de binarización, ya que la extracción de minutias en el segundo método también esta explicado en el capítulo 4.

Una vez se ha obtenido la imagen binarizada, adelgazada y podada de la huella dactilar a estudiar, para la extracción de estos dos tipos de minutias sólo hace falta seguir la estructura o esqueleto de la imagen.

Este seguimiento se obtiene de realizar un estudio de los pixels vecinos al punto a estudiar tal y como se muestra en la figura 2.21. El funcionamiento es muy sencillo ya que sólo hay que mirar el número de pixels negros en una ventana 3x3 , donde el punto central de esta ventana sea el punto a estudiar. Si en esta ventana hay un punto negro sin contar con el punto a estudiar es un terminación (b), si hay dos puntos negros es un

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

punto intermedio de la cresta (a) y si hay tres puntos en negros se trata de una bifurcación (c).

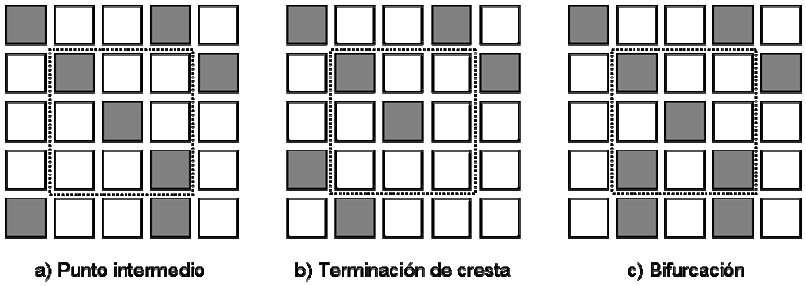


Figura 2.21 Identificación de minutias.

Una vez realizada la extracción de minutias, muchas veces es necesaria una etapa de post-procesado para eliminar minutias falsas encontradas en la imagen, para ello el método de la binarización utiliza un filtrado de minutias estructural, ya que pueden ser fácilmente encontradas en el esqueleto de la imagen 2^N. Las estructuras a filtradas (figura 2.22) son crestas que tienen puntos finales encarados (a, b), bifurcaciones encaradas con puntos finales (c) o con otras bifurcaciones (d), algunas puntos espuria (e), puentes (f), triángulos (g) y estructuras cuadradas (h).

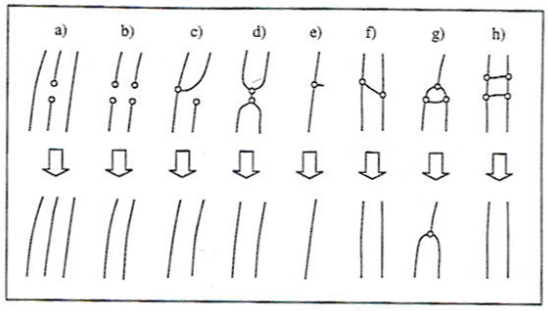


Figura 2.22 Filtraje estructural.

2.3.4 Emparejado de huellas

El módulo de emparejado debe determinar, a partir de dos representaciones, si las huellas asociadas pertenecen al mismo dedo; para ello se define una medida del grado de similitud entre dos representaciones dactilares. La elección del algoritmo de emparejado va a depender del tipo de información utilizado para caracterizar la huella; en el caso que nos ocupa se emplea el basado en el minutiae. Una vez se ha calculado el grado de similitud entre las dos huellas, éste se compara con un valor umbral para

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

determinar si pertenecen al mismo dedo o no. La correcta elección del umbral se determinará por los valores deseados para el FAR i FRR del sistema.

En condiciones ideales la verificación dactilar podría ser un problema relativamente sencillo; sin embargo, en condiciones reales se convierte en una tarea difícil, puesto que el sistema debe ser capaz de funcionar con unas tasas de error bajas a pesar de una serie de problemas que afectan a las representaciones de las que se va a disponer, tanto para la imagen patrón como para la huella a verificar. Las etapas de captura de la huella y de extracción de parámetros van a introducir errores de traslación, rotación y deformación de la huella, a los que se deben añadir las propias modificaciones de las crestas papilares, ya sean permanentes (cortes) o transitorias (suciedad).

Las técnicas basadas en el minutiae suelen emparejar los conjuntos de minutias de la muestra y el patrón encadenando una primera etapa de alineación y una posterior de localización de minutias coincidentes; la comparación del número final de parejas entre los dos conjuntos de minutias con un valor umbral va a determinar la coincidencia o no entre las dos representaciones dactilares. La alineación entre la muestra y el patrón puede realizarse de distintas formas: mediante la imagen direccional, empleando la localización de singularidades como el núcleo o el punto delta o usando las propias crestas [JAI-97], empleando técnicas de emparejado de grafos empleando el grafo formado por las minutias [HRE-90][ISE-86], mediante la transformada de Hough []RAT-96], … Una vez realizada la alineación, y considerando ciertas tolerancias, se realiza el emparejado de las minutias.

El método de Mital y Teoh [MIT-97] emplea un modelo de emparejado estructural dividido en dos etapas. En una primera fase se realiza un emparejado mediante correlación empleando características locales, es decir, localizando estructuras de 5 a 10 minutias que se reproduzcan en la huella muestra y en el patrón; de esta forma se consigue alinear la muestra y el patrón, y se obtiene una lista de posibles parejas de minutias. La segunda etapa realiza un emparejado por correlación empleando características globales, analizando ahora la totalidad de la huella como un conjunto y no como la suma de pequeñas vecindades, pero considerando sólo las minutias que han superado la primera fase del análisis.

Son muy variadas las alternativas de extracción y emparejado desarrolladas en los últimos años y mayoritariamente funcionan de forma correcta sobre un porcentaje elevado de la población; sin embargo, los resultados continúan siendo deficientes cuando se procesan imágenes dactilares de baja calidad. En este tipo de imágenes los algoritmos basados en correlación suelen funcionar mejor que los basados en minutiae, pero como contrapartida presentan una disminución de rendimiento conforme aumenta el periodo de tiempo transcurrido entre las fases de registro y verificación. En cualquier caso, las deficiencias del sistema no se suelen asociar al proceso de emparejado sino a la fase previa de extracción de características.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

3 Extracción directa en escala de grises

Maio y Maltoni [MAI-97] proponen la extracción directa del minutiae de la huella a partir de la imagen en escala de grises, presentándolo como un método más robusto y eficiente que los basados en la binarización de la imagen. Las razones argumentadas por los autores para elegir la extracción del minutiae en la imagen sin binarizar són:

- En el proceso de binarización se pierde gran cantidad de información.
- El elevado tiempo de procesado requerido por los algoritmos de binarización y esqueletización.
- El método es más robusto a las variaciones en el nivel de gris de diferentes zonas de la imagen.

Algunas de estas razones pueden ser más o menos discutibles, pero sí que es cierto que, realizando la extracción del minutiae directamente de la imagen en escala de grises, se evitan algoritmos con un alto coste computacional, tanto en tiempo como en recursos. Se trata por tanto de un método especialmente interesante de cara al desarrollo de sistemas de reconocimiento automático de bajo coste y de bajo consumo.

La idea básica propuesta por el Algoritmo de Maio consiste en seguir las crestas directamente de la imagen capturada en escala de grises. Podemos considerar el dactilograma como una cuadrícula de píxeles A x B en la que asignamos a cada celda el nivel de gris del píxel correspondiente. Los valores de gris próximos a cero identifican los valles, mientras que los valores más oscuros identifican las crestas que queremos reseguir.

Si partimos de una representación tridimensional de la huella (figura 3.1), en la que asociamos la coordenada z con el nivel de gris, podemos imaginar el funcionamiento del algoritmo que, empleando la dirección local de las crestas, trata de navegar por ellas evitando caer en los valles.

Se eligen una serie de puntos de inicio mediante la superposición de una cuadrícula sobre la imagen dactilar. Para cada punto de inicio el algoritmo realiza el seguimiento de la correspondiente cresta hasta que ésta termina o intersecciona con otra (con lo que se detecta una minutia). El algoritmo va marcando las líneas papilares ya reseguidas para localizar intersecciones y no examinar dos veces la misma cresta.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

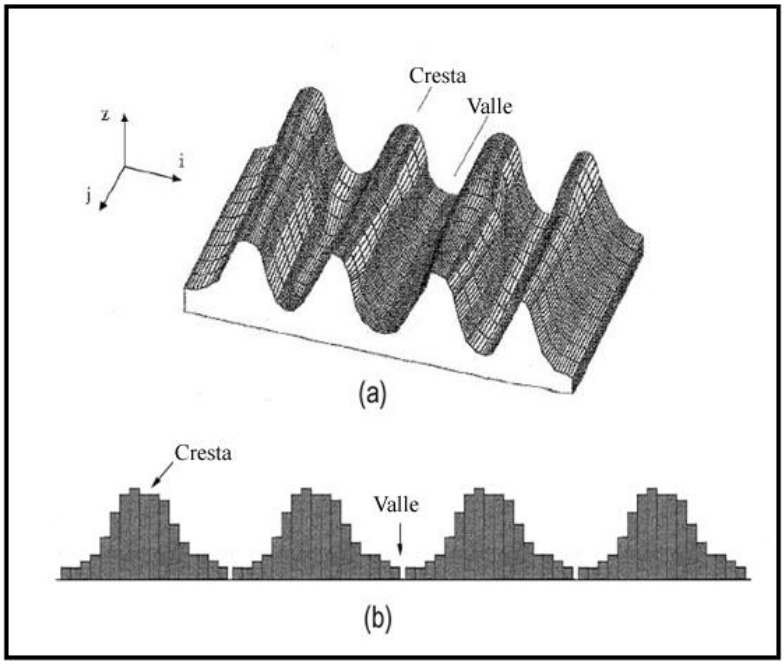


Figura 3.1. Sección transversal de una huella dactilar (a). Sección crestas capturadas (b).

En este capítulo se detalla el funcionamiento del algoritmo y se proponen una serie de modificaciones que permiten optimizar su implementación en plataformas basadas en microprocesador. Para facilitar la comprensión, se explican por separado las partes de seguimiento de crestas y de extracción de minutiae. El último apartado se dedica a detallar una serie de modificaciones que tienen por objeto la reducción de la carga computacional necesaria para la ejecución del algoritmo.

3.1 Seguimiento de las crestas

Podemos definir una cresta, desde un punto de vista matemático, como un sistema de puntos que son máximos locales a lo largo de una dirección. A partir de esta definición, Maio y Maltoni proponen un algoritmo para el seguimiento que consiste en localizar, a cada iteración, un máximo local en una sección ortogonal a la dirección de la cresta. De esta forma, conectando los máximos consecutivos se consigue una aproximación poligonal de la cresta a ser estudiada.

El algoritmo se aplica sobre una huella dactilar en escala de grises, representada como una imagen I, de A x B píxeles, y en la que gris(i,j) representa el nivel del píxel (i,j) de la imagen I. A cada iteración, el algoritmo parte de un punto (i_c,j_c) que pertenece a una cresta y calcula un nuevo punto (i_t,j_t) mediante un desplazamiento de μ píxeles en dirección φ_c, ya que se supone que la orientación local del punto (i_c,j_c) coincide con la dirección de la cresta a seguir (figura 3.2).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

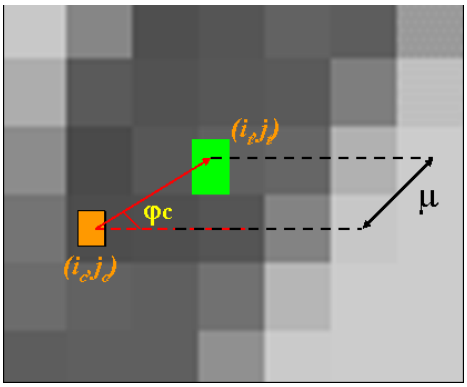


Figura 3.2 Desplazamiento de μ píxeles en la dirección φ_c, desde el punto (i_c,j_c) hasta el punto (i_t,j_t).

El punto (i_t,j_t) puede que no se encuentre bien centrado en la cresta, que es la zona donde se encuentran los máximos, y hasta podría ser que el punto estuviera situado fuera de la misma si el ángulo φ_c, no estuviera bien calculado o no coincidiese exactamente con la dirección de la cresta a seguir. Para evitar que el nuevo punto a seguir no esté bien centrado, el algoritmo propone una corrección de la posición, buscando un nuevo punto sobre un segmento Ω, formado por el conjunto de $2\sigma+1$ píxeles situados sobre un corte, en el plano de la imagen, de dirección $\varphi_c+\pi/2$ y centrado en el punto (i_t,j_t) (figura 3.3).

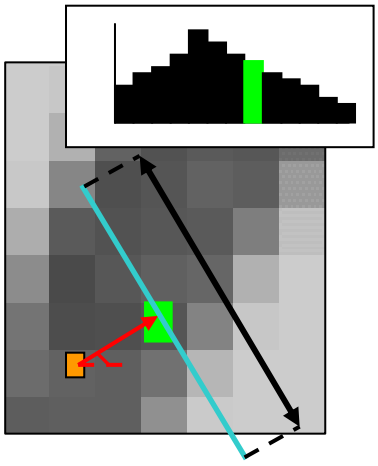


Figura 3.3 Corte de dirección $\varphi_c+\pi/2$ centrado en (i_t,j_t) y longitud $2\sigma+1$.

En esta sección Ω se busca el punto máximo (i_n,j_n), es decir aquel con un valor más alto de la función gris(i,j), ya que este punto sí que estará centrado en la cresta (figura 3.4).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

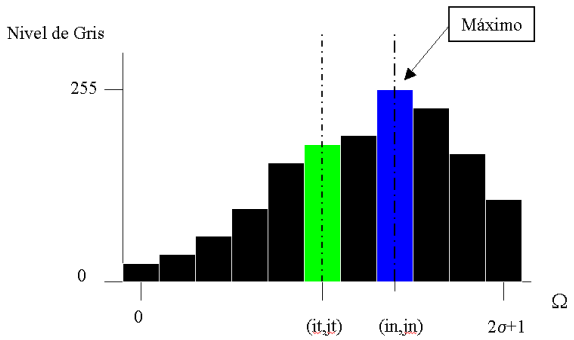


Figura 3.4 Búsqueda del punto (i_n,j_n) en la sección **Ω**.

El punto (i_n,j_n) pasa a ser el punto inicial (i_c,j_c) de la siguiente iteración, repitiéndose el proceso hasta que se cumpla con alguno de los criterios de parada que determinan que se ha acabado de seguir la cresta actual.

La figura 3.5 muestra el pseudo-código correspondiente al algoritmo, mientras que la figura 3.6 sintetiza los pasos realizados en cada iteración para completar el seguimiento.

```
seguimiento_cresta(is,js,φ0)
{
end:=false;
(ic,jc):=(is,js);
φc= φ0;
while (!end)
{
(it,jt)=(ic,jc)+ desplazamiento;
//desplazamiento= μ píxels en dirección φc
Ω=realizar_seccion(it,jt, φc+π/2);
//Devuelve sección de puntos de la cresta
//punto central (it,jt) y dirección φc+π/2.
(in,jn)=maximo_local(Ω);
//devuelve el punto que es máximo local en Ω.
end=criterio_parada();
//busca condiciones de parada en los puntos calculados,
//ya sea por haber encontrado el final de la cresta,
//el cruce de dos crestas o por perdida de seguimiento.
(ic,jc)=(in,jn);
φc =calculo_direccion(ic,jc);
}
}
```

Figura 3.5 Algoritmo de seguimiento de la cresta.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

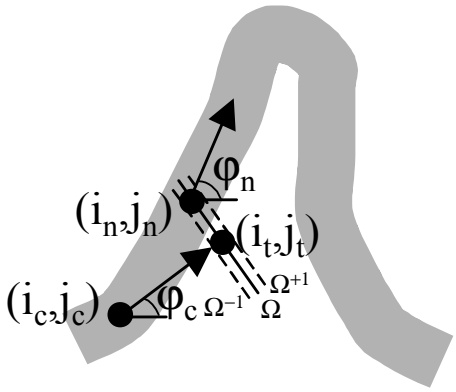


Figura 3.6 Seguimiento de una cresta desde el punto (i_c,j_c) al punto (i_n,j_n).

El valor óptimo de los parámetros μ i σ se puede determinar en función del grosor medio de las crestas de la huella.

En los siguientes apartados vamos a detallar las funciones: **m*aximo_local(), criterio_parada() y calculo_direccion()***, ya que son de especial interés por ser críticas en el funcionamiento del algoritmo y por la carga computacional que suponen

3.1.1 Cálculo del máximo

En cada una de las iteraciones el algoritmo debe encontrar, dentro de la sección Ω ortogonal a la cresta, el punto con máximo nivel de gris. Maio y Maltoni proponen buscar, después de haber realizado un pequeño filtro para minimizar el efecto del ruido, un punto que sea un máximo local débil en la sección. Un máximo débil es un punto con un nivel de gris no inferior al de sus dos vecinos, aunque quizá haya valores más altos no mucho más alejados. El hecho de buscar máximos débiles en lugar de máximos absolutos radica en evitar la posibilidad de saltar a una cresta vecina y en suponer que, con el avance de μ píxeles, no nos hemos alejado mucho del centro de la cresta que estamos siguiendo.

El filtro previo s imprescindible para minimizar los efectos negativos del ruido y el contraste de la imagen, que pueden producir desviaciones en el nivel de gris de la cresta y enmascarar la posición real del máximo dentro de la sección Ω.

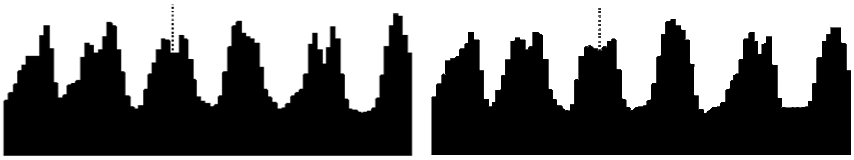


Figura 3.7 Representación de cortes transversales donde se aprecia la influencia de ruido.

La figura 3.7 representa dos secciones de una huella. Las crestas pueden identificarse fácilmente en cada una de las imágenes, pero la situación del centro de la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

cresta no es tan evidente. Algunas veces en el centro de la cresta, donde debería encontrarse un máximo local, se halla un mínimo que produce la típica silueta en forma de volcán (línea de puntos en la figura 3.7). Para intentar evitar estos efectos producidos por la presencia de ruido en la imagen, Maio y Maltoni proponen realizar un filtrado en dos pasos:

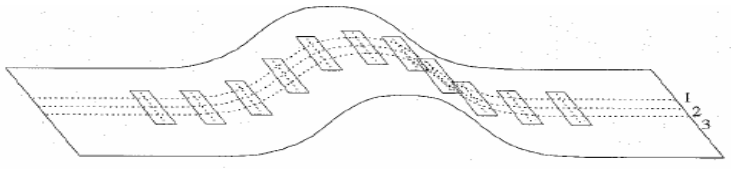


Figura 3.8: Representación de las secciones paralelas propuestas: 1= Ω+1, 2= Ω, 3= Ω-1.

- En primer lugar se calcula la media de los niveles de gris de los píxeles correspondientes a tres secciones paralelas adyacentes, la sección de interés Ω, y dos secciones del mismo tamaño paralelas y distanciadas un píxel de Ω tal y como se muestra en la figura 3.8.
- El segundo paso consiste en realizar una convolución con una máscara gaussiana (figura 3.9).

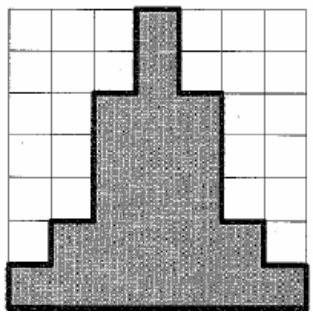


Figura 3.9 Máscara Gaussiana.

Una vez realizados los dos pasos anteriores, se obtiene una Ω' donde realizar la búsqueda de un máximo débil fácilmente tal y como se ha mencionado anteriormente en este apartado. La figura 3.10 nos muestra como quedarían las crestas con ruido mostradas anteriormente una vez realizado estas dos etapas de mejora.

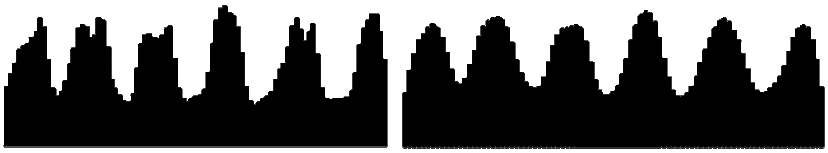


Figura 3.10 Comparación entre la sección original y la resultante del proceso de filtrado.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

3.1.2 Cálculo de la dirección

A cada iteración el algoritmo calcula un nuevo punto (i_t,j_t) avanzando μ píxeles en la dirección φ_c a partir del punto actual (i_c,j_c). El cálculo de la dirección es uno de los puntos más críticos del algoritmo, ya que un cálculo incorrecto de ésta imposibilita realizar un seguimiento correcto de la cresta.

La bibliografía propone distintos métodos para estimar la imagen direccional. La aproximación más sencilla se basa en el cálculo del gradiente. La orientación del vector gradiente indica la dirección de máxima pendiente, es decir, la de mayor variación en la intensidad de gris. Por lo tanto, la dirección φ_c, que indica la orientación de la cresta centrada en el píxel (i_c,j_c) es ortogonal al vector gradiente en (i_c,j_c).

Maio y Maltoni utilizan en su algoritmo el método propuesto por .Donahue y Ronkhlin en [DON-93], que consiste en calcular la dirección calculando el gradiente en una ventana de 3x3 píxeles; una vez realizado este cálculo se realiza el promedio sobre una ventana local por el método de mínimos cuadrados. En el capítulo siguiente se analizan las características de algunos métodos alternativos.

El método permite estimar una dirección, fijándose la orientación de la misma de forma arbitraria durante el seguimiento. A cada iteración el algoritmo de seguimiento elige la orientación de forma que φ_c esté lo más cerca posible de la dirección estimada en la iteración precedente.

Para los casos en los que no sea asumible la elevada carga computacional del algoritmo de Donahue, especialmente alta si se emplea sobre ventanas grandes, se propone la alternativa de preestimar las direcciones sobre una rejilla y usar interpolación, sin embargo como se verá en el capítulo siguiente esto presenta inconvenientes para poder realizar el seguimiento en zonas que presenten fuertes curvaturas en las crestas o que tengan una alta densidad de minutias.

3.1.3 Criterios de parada

La sucesión normal de iteraciones durante la ejecución del algoritmo comporta el seguimiento de una cresta papilar. Este seguimiento finalizará al cumplirse uno o más de los criterios de parada que fija el algoritmo. Una buena elección de estos criterios va a determinar el grado de fidelidad del seguimiento y, en consecuencia, la correcta localización del minutiae de la huella.

Los criterios de parada propuestos por Maio i Maltoni son:

- **Salida del Área de Interés:** normalmente, el seguimiento de las crestas se realiza sólo en una parte de la huella, que evita los bordes de la imagen capturada, ya que suelen ser las zonas donde hay más ruido y donde hay menos información en forma de minutiae. También se excuyen del seguimiento las zonas segmentadas por presentar baja calidad.
- **Terminación:** El algoritmo detiene el seguimiento de la cresta al llegar al final de la misma, marcando la posición de una minutia en ese punto. La forma propuesta en [MAI-97] para detectar la terminación es la evaluación de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

la diferencia entre φ_c, es decir la dirección local estimada en el punto (i_c,j_c), y la dirección del segmento que forman los puntos (i_c,j_c) e (i_n,j_n), dirección local real de la cresta en el mismo punto (i_c,j_c). Se supone que, durante un seguimiento correcto, la estimación de la dirección será relativamente buena y no diferirá en exceso de la dirección real de la cresta. El algoritmo fija cierto umbral β, tal que si el ángulo diferencia evaluado es mayor que dicho umbral se deduce que la cresta ha dejado de seguirse correctamente por haberse llegado al final de la misma.

- **Intersección:** Si, durante el seguimiento de una cresta, se alcanza un punto (i_n,j_n) que ya ha sido marcado con anterioridad como perteneciente a otra, se deduce que se ha localizado una minutia de tipo bifurcación, por lo que se marca la minutia correspondiente y se da por finalizada la iteración actual.

- **Curvatura excesiva:** Maio i Maltoni proponen un cuarto criterio para finalizar el seguimiento. Se trata de un criterio parecido a la búsqueda de terminaciones, pero en este caso no se detecta un cambio de dirección excesivo respecto a la dirección estimada, si no en relación al ángulo medio de la cresta en las últimas iteraciones. El algoritmo fija cierto umbral ψ, tal que si la diferencia entre la dirección del segmento que forman los puntos (i_c,j_c) e (i_n,j_n) de la iteración actual, dirección local real de la cresta en el punto (i_c,j_c), y la dirección media de la cresta, calculada realizando la media de las direcciones de los segmentos $(i_c,j_c)(i_n,j_n)$ en las últimas K iteraciones, es mayor que dicho umbral se deduce que la cresta ha dejado de seguirse correctamente. En este caso se supone que el error de seguimiento ha sido debido al efecto del ruido, por lo que no se marca ningún tipo de minutia en el punto (i_c,j_c).

La sucesión normal de iteraciones durante la ejecución del algoritmo comporta el seguimiento de una cresta papilar. Este seguimiento finalizará al cumplirse uno o más de los criterios de parada que fija el algoritmo. Una buena elección de estos criterios va a determinar el grado de fidelidad del seguimiento y, en consecuencia, la correcta localización del minutiae de la huella.

3.2 Detección de minutiae.

Una vez analizado el funcionamiento de la rutina de seguimiento de las crestas, falta definir la forma que emplea el algoritmo para realizar la extracción de la totalidad de las crestas de la imagen y, en consecuencia, detectar el minutiae. Puede observarse fácilmente que los criterios de parada del apartado anterior corresponden a la localización del minutiae. Así, los criterios de parada de terminación de cresta y curvatura excesiva identifican las terminaciones, mientras que la intersección corresponde a una bifurcación.

El problema que queda por resolver es la forma de asegurar que cada cresta se analiza una única vez y en la capacidad de localizar las intersecciones con las crestas ya reseguidas. Para solucionar este problema Maio y Maltoni propone la utilización de una imagen auxiliar **T** del mismo tamaño que la imagen a estudiar.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Esta imagen **T**, estaría inicializada a 0 en todos sus píxeles. Cada vez que se realiza la extracción de una nueva cresta de la imagen, los píxeles de T correspondientes a dicha cresta se marcan con una etiqueta. Para ello, los píxeles en T correspondientes a una cresta son los píxeles pertenecientes a un polígono, de ε píxeles de grosor, que une dos máximos consecutivos (i_n,j_n), localizados mediante el algoritmo de seguimiento de crestas explicado en el apartado anterior (figura 3.11).

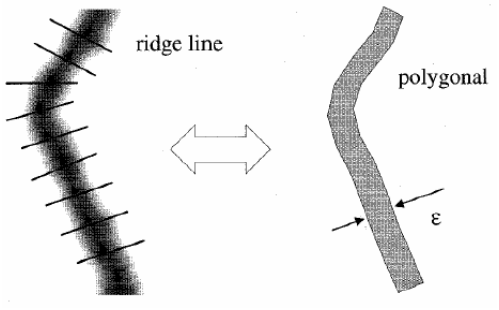


Figura 3.11 Ejemplo cresta original y la cresta poligonal obtenida en la imagen auxiliar T

Para encontrar las bifurcaciones o evitar empezar el seguimiento en partes ya estudiadas sólo tendríamos que consultar el valor de (i, j) en la imagen T. Si el píxel está etiquetado, se trata de una zona ya estudiada, por lo que se debe empezar en otro punto, en caso de estar buscando nuevas crestas a reseguir, o se habrá localizado una bifurcación si se estaba siguiendo una cresta.

Hasta ahora se ha explicado la forma que emplea el algoritmo para extraer una cresta de la imagen, a partir de un punto inicial de la misma. También se ha detallado el uso de una imagen auxiliar para no seguir dos veces la misma cresta, así como la forma de encontrar el posible minutiae de la cresta analizada. Vamos pues a describir la forma de operar para asegurar el seguimiento completo de la imagen.

El barrido completo de la imagen se asegura mediante un bucle que superpone a la imagen una matriz cuadrada de de granularidad ν (en píxeles), y emplea todos los nodos de la matriz pomo punto de partida (i_s,j_s) para la búsqueda del minutiae.

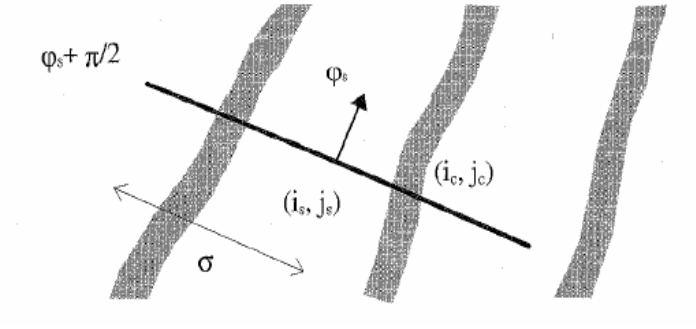


Figura 3.12 Ejemplo cálculo punto (ic,jc).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

A partir del punto origen (i_s,j_s), el algoritmo busca la cresta más cercana de una forma muy parecida la empleada para avanzar por las crestas (figura 3.13). Se calcula la dirección tangencial φ_s en el punto (i_s,j_s) y se obtiene la sección Ω, ortogonal a φ_s, en ese punto. El punto de Ω con máximo nivel de gris se empleará como punto inicial de la siguiente cresta a seguir, siempre y ciuando no se haya etiquetado previamente como ya analizado en la matriz T. Puesto que la sección Ω tiene una longitud de $2\sigma+1$ píxeles, y σ es la distancia máxima en píxeles entre dos crestas observada en la imagen, podemos estar seguros de que el máximo encontrado va a pertnecer a la cresta más cercana a nuestro punto inicial.

Una vez el algoritmo ha realizado el seguimiento de toda la imagen, Maio y Maltoni proponen un filtraje a la lista del minutiae encontrado, ya que ha podido encontrar alguna falsa minutia provocada por la calidad y la morfología de la huella estudiada.

El filtraje propuesto en el algoritmo consiste en eliminar del minutae:

- Las parejas de tipo terminación separadas por menos de 6 píxeles de distancia.
- Dejar sólo una de las minutia de tipo bifurcación dentro de una vecindad de 6 píxeles de diámetro.

Los valores de las constantes citadas en este apartado que se proponen en [MAI-97] son: $\mu=3,\sigma=7,\beta=\psi=30º,\varepsilon=3,\nu=2$.

3.3 Reducción de la carga computacional.

Los algoritmos empleados para realizar la extracción de características de huellas dactilares se han basado, tradicionalmente, en la sucesiva aplicación de complicados algoritmos de procesado de imagen. El desarrollo de estos algoritmos se realiza pensando en la correcta extracción de las características, pero hasta la fecha no se ha pensado en una optimización del coste o de la portabilidad. Los sistemas se han desarrollado sobre una plataforma basada en un ordenador personal, o empleando un microprocesador de altas prestaciones (y coste), cuando no un procesador digital de señal (DSP) específico, sin considerar que, analizando las características específicas del problema a tratar, se pueden realizar una serie de optimizaciones con el objetivo de reducir las necesidades computacionales del algoritmo sin afectar en absoluto a las prestaciones obtenidas.

Durante la fase de desarrollo de los algoritmos es habitual emplear un lenguaje de programación de alto nivel, así como distintas librerías de apoyo con paquetes de funciones de procesado de señal. De esta forma se pueden probar rápidamente nuevos algoritmos, reduciendo el tiempo de desarrollo de los sistemas automáticos de identificación. Sin embargo, a menudo este afán conlleva una baja o nula dedicación a la fase de optimización.

La mayor parte de la bibliografía sobre los nuevos algoritmos emplea filtros continuos para el tratamiento de problemas discretos. En el caso concreto de las huellas,

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

nuestro punto de partida es una imagen discreta, de mayor o menor resolución, con niveles de gris también discretos para cada píxel; y el objetivo es localizar las coordenadas (discretas) del minutiae dentro de dicha imagen. Puesto que hay un grado de error mínimo inherente a la discretización que no va a poderse reducir, ¿por qué no aprovecharlo para reducir las necesidades computacionales del procesado? La respuesta es que se pueden modificar los algoritmos, en nuestro caso el propuesto por Maio y Maltoni, sin pérdida de prestaciones.

En el caso que nos ocupa, se eliminan las operaciones en coma flotante, sustituyéndolas por equivalentes en coma fija o por funciones tabuladas, con una resolución calculada para las necesidades concretas del problema. Además, siempre que sea posible se proponen cambios de escala, de forma que todos los productos y divisiones sean por valores potencias enteras de dos (de forma que equivalgan a desplazamientos en binario). Todas estas modificaciones nos permitirían realizar un dispositivo electrónico (hardware + software) de pequeñas dimensiones, bajo coste y alta calidad en los resultados, obteniendo así la posibilidad de la utilización de la identificación o autentificación de huellas dactilares en nuevos campos de aplicación [CAÑ-03][CAN-04][CAÑ-05].

3.3.1 Estimación de la dirección local

La modificación más importante en el algoritmo afecta al cálculo de la estimación local de la dirección de la cresta, φ_c. Esta dirección, tangente a la cresta en el punto (i_c,j_c) se calcula como la perpendicular al gradiente en ese punto. Maio y Maltoni emplean el método propuesto por Donahue y Rokhlin [DON-93], más costoso computacionalmente que el presentado en [WIL-93] y empleado por Halici y Ongun en [HAL-96]. La máscara propuesta ha sido modificada para obtener 12 direcciones distintas, con un paso de variación de 15º, de acuerdo al valor de μ=3 empleado por Maio (fig. 3.14).

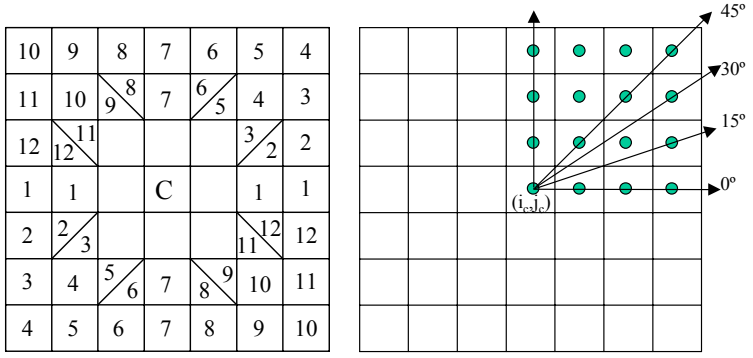


Figura 3.13 Máscara empleada para la estimación de direcciones en pasos de 15 º.

En el caso particular del algoritmo de seguimiento de crestas que nos ocupa, el avance sobre la cresta se realiza en incrementos de 3 píxeles. Así, como se aprecia en la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

figura 3.14 nos basta con estimar la orientación local en el píxel (i_c,j_c) con una precisión de 15º para poder realizar correctamente el seguimiento. Las pruebas realizadas muestran que no es necesaria una mayor precisión en la estimación puesto que:

- No podemos bajar del nivel de error cometido por la discretización inherente al hecho de avanzar un número entero de píxeles, desde el punto (i_c,j_c) al punto (i_t,j_t).
- La presencia de poros en el dactilograma, así como el ruido inherente a la adquisición de la imagen de la huella dactilar, provoca un error en la estimación de la dirección local.
- La orientación local de la cresta en el punto (i_c,j_c) sólo va a coincidir con la dirección de la recta que une los puntos (i_c,j_c) e (i_t,j_t), en el caso de ausencia total de ruido y de crestas perfectamente rectas. La propia curvatura de las crestas va a obligar a un reposicionamiento buscando el punto (i_n,j_n) correspondiente a un máximo local.
- El propio algoritmo de seguimiento se basa en localizar máximos locales en secciones ortogonales a la dirección de la cresta, y asume que éste no se encontrará en el punto obtenido avanzando en la dirección de la tangente a la cresta.

El siguiente capítulo se dedica explícitamente a la estimación de la dirección de la cresta, y en él se analizará la precisión necesaria en el cómputo, así como el método más adecuado para realizar dicho cálculo.

3.3.2 Búsqueda del máximo

La inspección del algoritmo de extracción del minutiae muestra otro paso con un elevado coste computacional; se trata de la búsqueda del máximo dentro de la sección Ω, ortogonal a φ_s.

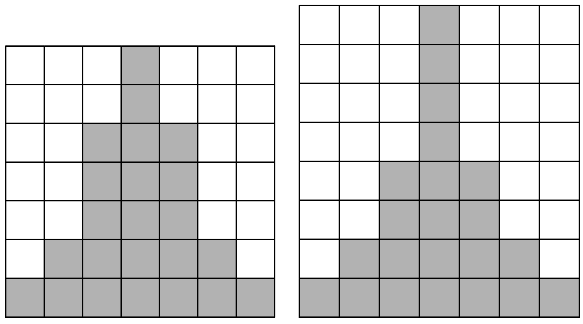


Figura 3.14 (a) Máscara con silueta gausiana propuesta para el filtraje en [MAI-97], con pesos [1/23, 2/23, 5/23, 7/23, 5/23, 2/23, 1/23]. (b) máscara empleada, con pesos [1, 2, 4, 8, 4, 2, 1].

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

El algoritmo propuesto en [MAI-97] realiza la media de tres secciones paralelas, y después realiza la convolución con la máscara gausiana de la figura 3.15 (a). Realmente Maio y Maltoni proponen la realización conjunta de los dos pasos, en forma de convolución de una pequeña porción de la imagen con una máscara tridimensional, con el objeto de minimizar el número de operaciones.

La mejora que se propone tiene por objeto reducir la complejidad de las operaciones; con ese objeto:

- Se realizan los cambios de escala necesarios para que todos los productos y divisiones se realicen por factores potencia entera de dos.
- Se sustituye la máscara gausiana por la de la figura 3.15 (b).

La primera de las modificaciones propuestas equivale a un cambio de escala que, evidentemente, no va a modificar la posición del máximo que se quiere localizar. Sin embargo, el cambio de máscara sí que puede alterar el resultado del filtro. Por esa razón se han realizado distintas pruebas para comprobar el correcto seguimiento de distintos dactilogramas; en ninguno de los casos se ha modificado el minutiae extraído respecto del obtenido con la máscara gausiana original. En la figura 3.16 puede observarse la comparación entre las secciones filtradas con y sin las modificaciones.

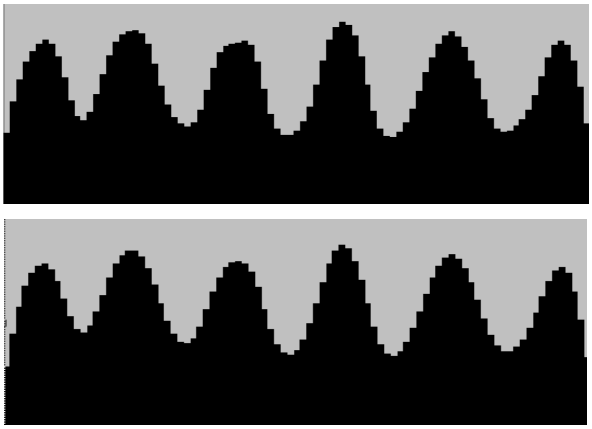


Figura 3.15 Comparación de las secciones filtradas, empleando la máscara de [MAI-97] (imagen central) y la máscara propuesta en esta tesis (imagen inferior).

Con estos cambios van a poder sustituirse las operaciones producto y división realizadas en el algoritmo por operaciones de desplazamiento de bits, que pueden ser implementadas de forma muy eficiente en hardware.

3.3.3 Operaciones trigonométricas

La tercera modificación importante aborda la forma en que se realizan los cálculos que impliquen operaciones trigonométricas. Se trata de operaciones que afectan a distintas partes del algoritmo debido a las numerosas conversiones entre coordenadas polares y rectangulares. Puesto que, como ya se ha analizado, los ángulos se han

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

representado mediante un número discreto de valores, se adopta la solución de tabular dichas operaciones. En muchos casos las tablas empleadas son mayores de lo teóricamente necesario si, a partir de las propiedades de las funciones trigonométricas, se relaciona el ángulo de interés con el tabulado; sin embargo, ello siempre es a costa de realizar varias comparaciones para determinar el cuadrante (o el octante) de interés y relacionarlo con el tabulado. De cara a una implementación hardware siempre será más interesante aumentar un poco el tamaño de la tabla que complicar el flujo de diseño mediante múltiples decisiones.

El algoritmo precisa de las funciones seno, coseno y arcotangente. Para las dos primeras la tabulación es una solución común, especialmente interesante cuando, como en este caso, el número de ángulos a tratar es pequeño. Estas funciones se emplean para convertir los desplazamientos por la imagen de la huella dactilar de coordenadas polares (se conoce el número de píxeles que hay que desplazarse y la dirección en la que moverse) a rectangulares (la imagen está indexada por sus coordenadas cartesianas). Por lo que respecta a la función arcotangente, se emplea en el proceso de cálculo de la orientación local de las crestas, y también en la comprobación de los criterios de parada, para evaluar si se ha producido una curvatura excesiva entre dos iteraciones consecutivas.

Si se analizan en detalle las necesidades reales en el cálculo de las funciones seno y coseno se puede ver que, a cada iteración, el algoritmo parte de un punto (i_c,j_c) que pertenece a una cresta y calcula un nuevo punto (i_t,j_t) mediante un desplazamiento de μ píxeles en dirección φ_c, de forma que se cumple:

$$\begin{bmatrix} i_t \\ j_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_c + \mu \cdot \cos\varphi_c \\ j_t + \mu \cdot sen\varphi_c \end{bmatrix}$$

Durante el cálculo de la sección Ω se van a realizar desplazamientos de hasta 7 píxeles. Maio emplea el algoritmo de Bresenham [BRE-65] para obtener dicha sección, lo que obliga nuevamente a emplear las funciones seno y coseno y a multiplicar por la longitud de la sección deseada.

La aportación adicional de este trabajo, respecto de la versión de Maio, está en la tabulación de la función coseno para los distintos valores posibles del desplazamiento (el seno se obtiene como el coseno del ángulo complementario). De esta forma se evitan los productos tanto al calcular el punto central de la siguiente iteración como al obtener la sección Ω. Puesto que, como se ha analizado en el apartado 3.2.1, se emplea un conjunto de sólo 12 direcciones se precisa, mediante la utilización del valor del ángulo suplementario, una tabla de 7x6 posiciones para almacenar todos los valores necesarios.

La función arco tangente también se calcula mediante tablas, aunque se va a emplear dos tablas distintas. Una para calcular el ángulo entre los puntos inicial (i_c,j_c) y final (i_n,j_n) de una iteración, que se encuentran dentro de un radio inferior a los 6 píxeles. La segunda tabla será necesaria para calcular la orientación local en el caso de emplear el algoritmo de Donahue o el de Rao; en el capítulo siguiente se presenta una comparación de las distintas alternativas, así como la evaluación de su coste computacional.

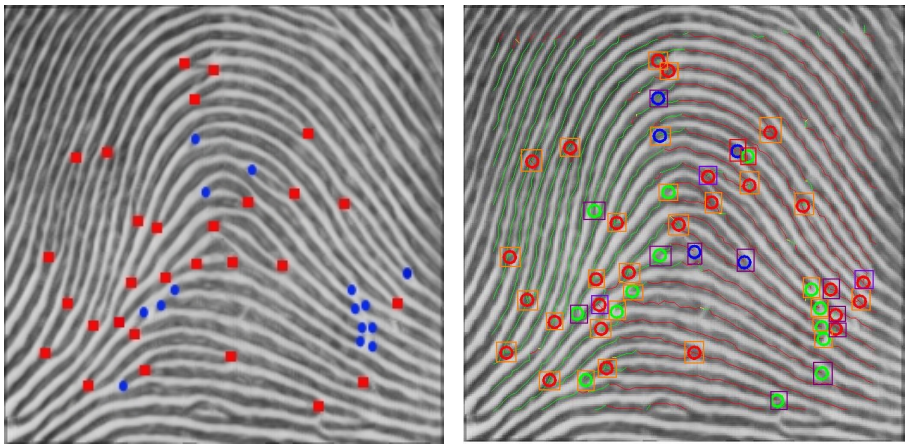
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

3.4 Validación de la extracción

Hasta este punto se ha detallado el algoritmo de extracción a implementar y las modificaciones propuestas de cara a mejorar sus prestaciones; sin embargo, debe hacerse notar que no se dispone del código del algoritmo original, ni siquiera de una versión ejecutable, sino que se ha desarrollado una versión del algoritmo completamente nueva a partir de la descripción del método [MAI-97] [RAT-03][MAL-03]. Por esta razón, se ha realizado una validación del programa desarrollado para la extracción del minutiae, comparando sus resultados con los obtenidos mediante un algoritmo comercial y con los presentados en [MAI-97].

El algoritmo se ha refinado mediante un proceso iterativo en varias etapas. En primer lugar se ha analizado el seguimiento de un conjunto de huellas, corrigiéndose ciertas anomalías detectadas, particularmente durante el seguimiento de huellas con crestas muy anchas o en el caso de imágenes muy oscuras. En una segunda fase se han validado las soluciones implementadas, al tratarse de detalles no especificados en la bibliografía de referencia, comparando los resultados con el minutiae extraído manualmente y también con el detectado por otras aplicaciones comerciales y con los resultados presentados en [MAI-97].

Para la validación se han empleado las mismas imágenes utilizadas por Maio y Maltoni en su artículo. Se ha realizado una primera inspección visual para identificar las minutias presentes en cada una de ellas, y después se ha comparado el resultado con el minutiae obtenido en la ejecución del algoritmo.



(a) (b)

Figura 3.16 Minutiae obtenido manualmente (a) y por el algoritmo (b).

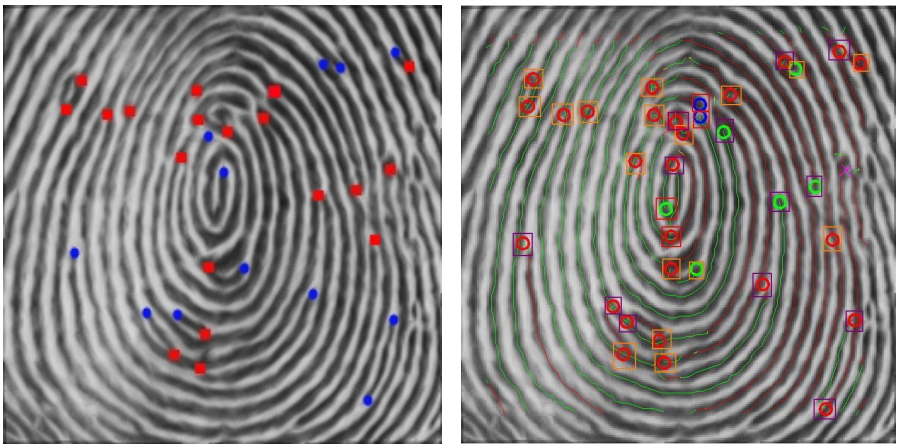
En las figuras 3.16 y 3.18 se muestran los resultados obtenidos para dos de las huellas. La imagen de la izquierda (a) corresponde a una extracción manual, en la que se identifican las bifurcaciones mediante un cuadrado rojo y los finales con un círculo azul. A la derecha (b) se muestra el resultado de la extracción automática, marcándose en rojo las bifurcaciones y en verde o azul los finales (en función del criterio del algoritmo que

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

se haya utilizado para su identificación). Si el sistema automático de extracción funciona correctamente la mayor parte de las minutias se van a identificar exactamente, pero siempre va a ser inevitable un cierto número de discrepancias (como también puede haberlas entre distintas personas que realicen una extracción manual). Estas diferencias se identifican como minutias perdidas (no localizadas por el algoritmo), minutias falsas (el algoritmo localiza minutias en puntos donde no las hay según una extracción manual) o como minutias cambiadas de tipo (finales identificados como bifurcaciones o viceversa). En el proceso de comparación las discrepancias se indican mediante el código de colores que se muestra en la tabla 3.1.

Código de colores de los cuadrados					
	Minutias idénticas en las dos extracciones		Minutias Falsas		Minutias cambiadas de tipo

Tabla 3.1 Código de colores empleado para la comparación entre extracciones



(a) (b)

Figura 3.17 Minutiae obtenido manualmente (a) y por el algoritmo (b).

Las primeras pruebas se han realizado sobre imágenes de muy buena calidad, con la intención de validar el sistema, dejándose su optimización para más adelante (la detección del minutiae en imágenes de mala calidad puede no ser evidente a simple vista, por lo que el examen manual no proporciona una referencia suficientemente exacta como para validar el sistema). Como se aprecia, la primera versión del algoritmo presenta un funcionamiento más que satisfactorio, detectándose de forma correcta la mayor parte de las minutias; en la tabla 3.2 se resumen los resultados obtenidos en 4 de las imágenes. También se obtienen buenos resultados por lo que se refiere al número de minutias no detectadas.

Las principales deficiencias del algoritmo corresponden a la detección de minutias falsas y al intercambio de tipo. No se considera preocupante el número de falsas minutias detectado, puesto que se localiza en las zonas de la imagen con peor

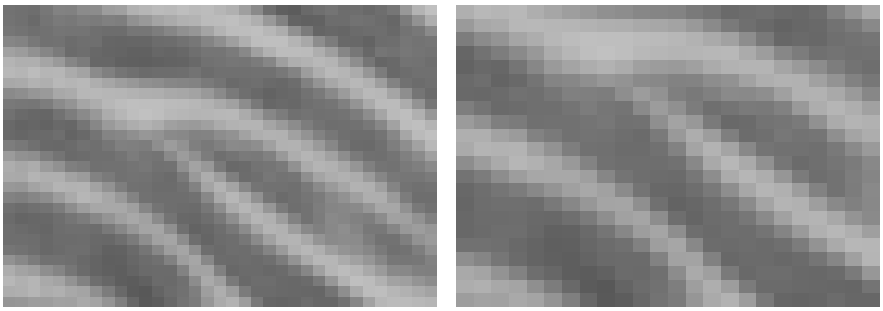
UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

calidad, lo que no indica un mal funcionamiento de la extracción si no la necesidad de un paso previo de segmentación en la implementación definitiva del sistema automático de identificación (en [MAI-97] se presentan los resultados tras un filtrado manual que justifica el bajo número de falsas minutias).

IMAGEN	MINUTIAS EXISTENTES	EXTRACCIÓN AUTOMÁTICA			
		N	D	F	X
1	44	46	0	2	14
2	31	34	1	4	13
3	28	35	3	12	5
4	21	31	0	11	6
N = Número de minutias		**D= Número de minutias perdidas**			
F= Número de minutias falsas		**X= Número de cambios de tipo**			

Tabla 3.2 Resumen de resultados en diferentes huellas

Más preocupante parece, en principio, el elevado número de cambio de tipo de minutia; se trata sin embargo de un problema secundario, puesto que la mayor parte de los algoritmos de emparejado de minutias no consideran el tipo de minutia como una característica a tener en cuenta en el proceso de comparación. A simple vista muchas veces no se puede distinguir el tipo de minutia y es fácil comprobar, analizando distintos sistemas automáticos de extracción, que son pequeños detalles los que llevan a que una minutia se detecte como de un tipo o de otro. En la figura 3.18 se puede comprobar como el ruido puede llevar a detectar una bifurcación en lugar de un final de cresta, y como incluso la misma minutia se ve de forma distinta en función de la resolución de la imagen.



(a) (b)

Figura 3.18 Ampliacióna distintas escalas de un final de cresta.

Como comprobación adicional se ha realizado la extracción de minutias con el programa comercial FingerCell ver. 1.1 de Neurotechnologia Ltd. [NEU], empleado actualmente en sistemas de control de acceso por huella dactilar. Se trata de un sistema basado en técnicas de filtrado y binarización, que realiza una segmentación previa de la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

imagen y que no distingue entre tipos de minutia. La figura 3.19 muestra los resultados obtenidos en las huellas anteriores, presentándose el resumen en la tabla 3.3.

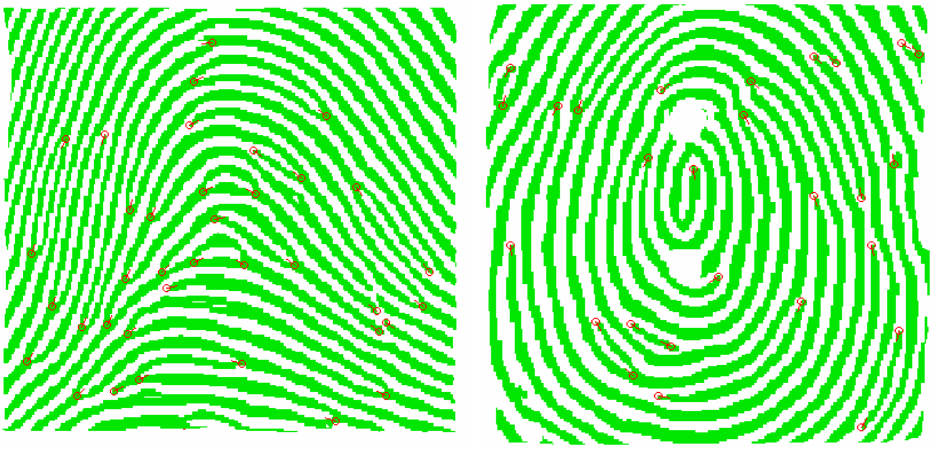


Figura 3.19 Minutiae obtenido mediante FingerCell.

IMAGEN	MINUTIAS EXISTENTES	FingerCell			
		N	D	F	X
1	44	37	7	0	-
2	31	27	4	0	-
3	28	20	9	1	-
4	21	21	5	5	-
N = Número de minutias		**D= Número de minutias perdidas**			
F= Número de minutias falsas		**X= Número de cambios de tipo**			

Tabla 3.3 Resumen de resultados con FingerCell en diferentes huellas

Comparando los resultados de la extracción mediante el algoritmo implementado y este programa comercial no puede concluirse que uno sea mejor que el otro, sólo que son distintos; ello no hace sino reforzar la impresión de que las diferencias se deben a pequeños detalles que provocan las pequeñas variaciones entre dos algoritmos de extracción, siendo los cambios, en la mayoría de los casos, de menor cuantía a los existentes entre dos impresiones distintas de la misma huella. En capítulos posteriores, y empleando huellas no filtradas previamente, se analizarán con más detalle las posibles causas de algunas de las diferencias de funcionamiento.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

4 Estimación de dirección

Como se ha venido explicando en los capítulos anteriores, una buena estimación de la orientación local de las crestas papilares es imprescindible para poder realizar correctamente la extracción del minutiae de la huella. La bibliografía propone diferentes métodos, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. En este capítulo se van a analizar algunos de ellos, pero no sólo desde el punto de vista de la obtención de un correcto mapa de direcciones, si no que también se van a estudiar el coste computacional, los requerimientos para su implementación en hardware, y las posibilidades de su adecuación a las necesidades de precisión de una aplicación particular.

En un principio se presentan de forma genérica algunos métodos, basados mayoritariamente en un principio común, y después se analizan de forma específica tres de ellos para justificar su elección o no, de acuerdo a la aplicación final. En este punto, se van a tener en cuenta, en el momento de calcular tamaños de máscaras y comparar los distintos métodos, ciertas particularidades del algoritmo empleado para el seguimiento de crestas.

Uno de los objetivos propuestos es el evitar este tipo de cálculos con elevado coste computacional; por ello, si bien las operaciones matemáticas en los algoritmos empleados en éste capítulo se hacen en coma flotante, la comparación de los métodos se realiza después de efectuar una discretización de la dirección obtenida a un número finito de orientaciones prefijadas.

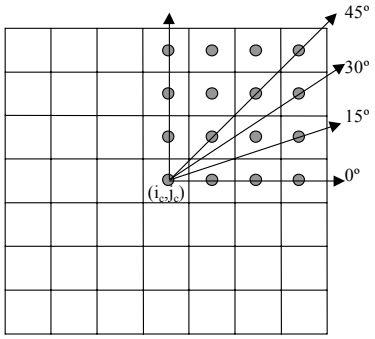


Figura 4.1 Discretización de ángulos para desplazamientos de 3 píxeles (ventanas de 7x7)

La posibilidad de realizar ésta discretización a un número finito de direcciones se justifica plenamente por el hecho de estar trabajando con imágenes digitales. Por un

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

lado, se sabe que los operadores tipo gradiente sufren un efecto de sesgado en la orientación debido a la discretización [KIT-89][OGO-78]. Por otra parte, el algoritmo propuesto por Dario Maio [MAI-97] realiza el seguimiento de la cresta, buscando máximos locales, mediante desplazamientos de 3 píxeles (α=3) entre iteraciones sucesivas. Como puede apreciarse en la figura 4.1, y se ha justificado en el capítulo 3, la resolución inherente a la discretización no supera los 15º, con lo que va a ser suficiente el empleo de sólo 12 direcciones distintas (24 orientaciones).

4.1 La imagen direccional

Sea [x,y] un punto genérico en una imagen dactilar. La orientación local de la huella en [x,y] es el ángulo φ_{xy} que las crestas, dentro de una pequeña vecindad con centro en [x,y], forman con el eje horizontal. Puesto que las crestas carecen de orientación, φ_{xy} es una dirección no orientada en el intervalo [0º, 180º[.

La mayor parte de métodos de extracción de características y procesado de huellas no calculan la orientación de las crestas en todos los puntos, sino que realizan una estimación en un conjunto discreto de localizaciones de la imagen, hasta obtener la llamada imagen direccional **D** [GRA-69]. Como se ha introducido en el capítulo 2, se trata de una matriz en la que los elementos codifican la orientación local de las crestas de la huella. La imagen se divide en celdas, y cada elemento φ_{ij}, representa la orientación media de las crestas en la celda [i,j], con centro en el píxel $[x_i,y_j]$.

La variación de la intensidad de los píxeles del dactilograma es mínima en la dirección de la cresta y máxima en la dirección perpendicular, que va alternando entre crestas y valles. Así, la dirección φ_{ij} de las crestas que cruzan una región de la huella centrada en $[x_i,y_j]$ va a ser ortogonal a la dirección de máxima pendiente, que puede encontrarse fácilmente calculando la derivada en ese punto $[x_i,y_j]$.

El método de derivación más empleado en el procesado de imágenes es el gradiente y, por lo tanto, el cálculo de gradientes en el dactilograma es la forma más natural de obtener la orientación local. Dada la función I(x,y) que representa la intensidad de los píxeles de la imagen, el gradiente G[I(x,y)] en el punto $[x_i,y_i]$ de la imagen **I**, es un vector bidimensional $[G_x(x,y)\ G_y(x,y)]^T$, cuyas componentes $G_x(x,y)$ y $G_y(x,y)$ son, respectivamente, las derivadas respecto de las direcciones x e y de I(x,y) en $[x_i,y_j]$:

$$G[I(x,y)] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial I(x,y)}{\partial x} \\ \dfrac{\partial I(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

La noción de gradiente se explica mejor en el caso continuo, pero ahora se van a aplicar máscaras para la estimación del gradiente en imágenes discretizadas, en las que el vector gradiente apunta a la dirección en la que se dan más saltos de intensidad, siendo la longitud del vector proporcional a la altura de dichos saltos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Este método, aunque simple y eficiente, tiene ciertos inconvenientes. En primer lugar, la utilización de la clásica máscara de Sobel [GON-92] para obtener las componentes $G_x(x,y)$ y $G_y(x,y)$ del gradiente, y el cálculo de φ_{ij} como el arcotangente de la relación $G_y(x,y)$ / $G_x(x,y)$, presenta problemas debido a la no linealidad y discontinuidad alrededor de los 90º. En segundo lugar, la estimación en un punto representa una aproximación a una escala tan reducida que, además de ser muy sensible al ruido en la imagen, no siempre coincide con la orientación de las estructuras de crestas y valles, que son las que debe representar la imagen direccional.

La solución, para obtener una estimación de la situación a un mayor nivel de granularidad, pasa por realizar un promediado de los gradientes dentro de una ventana que abarque un número más o menos grande de píxeles vecinos. Sin embargo, los gradientes no pueden promediarse directamente, puesto que dos vectores gradiente opuestos se cancelarían mutuamente, aunque en realidad, al no estar orientadas las crestas, indican la misma dirección local (la media entre 5º y 175º no es 90º sino 0º); a parte del hecho de no poderse determinar si la media entre las direcciones ortogonales 0º y 90º es 45º o 135º. En el fondo, se trata de realizar una media "módulo π".

Kass y Witkin [KAS-87] resuelven el problema anterior de una forma simple pero elegante, permitiendo promediar los gradientes locales para realizar la estimación de direcciones. Se trata de doblar el valor de los ángulos de los vectores antes de realizar la media. Al doblar los ángulos, los vectores gradiente opuestos apuntan en la misma dirección y, por tanto, se van a reforzar mutuamente, mientras que los gradientes perpendiculares van a cancelarse. Una vez realizado el promedio, los vectores gradiente se convierten de nuevo a su representación original, y se elige la dirección perpendicular al vector gradiente como la orientación local de la cresta.

Ravishankar Rao [RAO-90] presenta una versión del algoritmo, empleada posteriormente por Bazen y Gerez [BAZ-00] que, además de doblar los ángulos de los vectores gradiente, eleva al cuadrado su módulo, tratando los vectores gradiente como si fuesen números complejos. El efecto es, en el momento de realizar la media, el de ponderar más las orientaciones cuanto más marcadas sean, es decir cuanto mayor sea el módulo del vector gradiente.

En la literatura se proponen otras formas de estimar la imagen direccional que evitan los problemas del promediado de gradientes y su no linearidad [KAW-84] [STO-69] [MEH-93]. Donahue y Roklin [DON-93], proponen un operador tipo gradiente para extraer una estimación de la dirección en una ventana de 2 por 2 píxeles, que se promedia en una ventana local para controlar los efectos del ruido. Este método se estudia con detalle en este capítulo, puesto que es el empleado por Maio en su algoritmo [MAI-97].

También existen métodos que no se basan en el cálculo de gradientes para la estimación de direcciones. En este trabajo se analiza el propuesto por Mehtre [MEH-87] [MEH-89], que evalúa la orientación local de las cresta basándose en la alineación de píxeles en un número prefijado de orientaciones de referencia. Como se verá en el análisis efectuado, también en este caso, las estimaciones deben promediarse estadísticamente dentro de una región de píxeles vecinos para obtener medidas menos vulnerables a errores en la imagen. A estas soluciones se les achaca el inconveniente de la poca resolución, debido al empleo de un número pequeño de orientaciones prefijado;

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

sin embargo, debido a la naturaleza discreta de la imagen, tampoco es cierto que, con los métodos basados en el gradiente, puedan obtenerse resoluciones mucho mayores.

A menudo, debido a la continuidad y a la suavidad de formas de una imagen dactilar, los cambios bruscos en la orientación dentro de la imagen direccional pueden asociarse a estimaciones erróneas debidos a ruido en la imagen. Kass y Witkin [KAS-87] proponen también el uso de los mismos gradientes elevados al cuadrado para obtener una estimación de lo marcada que es la orientación. Esta medida, bautizada como coherencia, estima hasta qué punto los vectores gradiente tienen la misma orientación. Si son paralelos, la coherencia es 1, mientras que si los vectores se distribuyen por igual en todas las direcciones, la coherencia es 0.

4.2 Método de Rao.

El primer método que se va a analizar es el propuesto por Ravishankar Rao [RAO-90], uno de los más citados en la bibliografía. En su libro Rao se centra en la obtención del mapa de direcciones de imágenes que presentan una textura visual que recuerda el movimiento de un fluido, como una superficie de madera. Se trata de texturas caracterizadas por presentar, de forma local, una selectividad en su orientación, aunque ésta puede variar arbitrariamente en el conjunto de la imagen. A cada punto de la imagen se le asocia una orientación local dominante, así como una medida local de la coherencia, o grado de anisotropía del patrón de orientación. Según Rao, una forma de visualizar texturas orientadas es pensar en la representación de la imagen como una serie de crestas, cuya orientación e intensidad puede variar continuamente; es evidente la similitud de ese tipo de imágenes con la de una huella dactilar.

Este capítulo se fija en la estimación de orientaciones, dejando en segundo término la medida de la coherencia, por lo que los resultados no van a diferir de los que se obtendrían de emplear el método de Kass y Witkin [KAS-87], puesto que la contribución de Rao se encamina a la medida de la coherencia.

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Gx

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Gy

Figura 4.2 Máscaras de Sobel para el cálculo del gradiente.

Se empieza aplicando las máscaras de Sobel (figura 4.2) para determinar los gradientes de la imagen en un sistema de ejes cartesianos X e Y. El vector gradiente,

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

dado por $[G_x\ G_y]^T$, se convierte a coordenadas polares, pasando a estar representado como $[\rho\ \varphi]^T$, con el propósito de doblar su ángulo y elevar su módulo al cuadrado.

$$\begin{bmatrix}\rho\\ \varphi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sqrt{G_x^2+G_y^2}\\ tg^{-1}\dfrac{G_y}{G_x}\end{bmatrix}$$

El vector gradiente puede volver a representarse en el sistema cartesiano mediante la transformación inversa:

$$\begin{bmatrix}G_x\\ G_y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\rho\cdot\cos\varphi\\ \rho\cdot\sin\varphi\end{bmatrix}$$

Empleando algunas identidades trigonométricas se obtiene una expresión para los vectores gradiente al cuadrado en función de las componentes cartesianas:

$$\begin{bmatrix}G_{s,x}\\ G_{s,y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\rho^2\cdot\cos 2\varphi\\ \rho^2\cdot\sin 2\varphi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\rho^2(\cos^2\varphi-\sin^2\varphi)\\ \rho^2(2\sin\varphi\cos\varphi)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G_x^2-G_y^2\\ 2G_xG_y\end{bmatrix}$$

Se trata del mismo resultado que podría haberse obtenido tratando el vector gradiente como si fuese un número complejo:

$$G_{s,x}+jG_{s,y}=(G_x+jG_y)^2=(G_x^2-G_y^2)+j(2G_xG_y)$$

Una vez elevados al cuadrado, los gradientes pueden promediarse dentro de una ventana W, de forma que la media de cuadrados vendrá dada por:

$$\begin{bmatrix}\overline{G_{s,x}}\\ \overline{G_{s,y}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\sum_W G_{s,x}\\ \sum_W G_{s,y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G_{xx}-G_{yy}\\ 2G_{xy}\end{bmatrix}$$

donde

$$G_{xx}=\sum_W G_x^2$$
$$G_{yy}=\sum_W G_y^2$$
$$G_{xy}=\sum_W G_xG_y$$

son estimaciones de la varianza y la covarianza de G_x y G_y, promediadas dentro de la ventana W. Así, la dirección promedio de los vector gradiente, que es ortogonal a la dirección de las crestas, se calcula como:

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) & si\ \overline{G_{s,x}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) + \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) - \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} < 0 \end{cases}$$

La estimación de la coherencia vendrá dada por:

$$Coh = \frac{\left| \sum_{W} (G_{s,x}, G_{s,y}) \right|}{\sum_{W} \left| (G_{s,x}, G_{s,y}) \right|}$$

Si todos los vectores gradiente elevados al cuadrado apuntan en la misma dirección, la suma del módulo de los vectores será igual a la suma de los vectores, resultando en una coherencia de 1. Si, por otro lado, los vectores gradiente al cuadrado están uniformemente distribuidos en todas las direcciones, el módulo del vector suma será igual a 0, con lo que la coherencia será también 0.

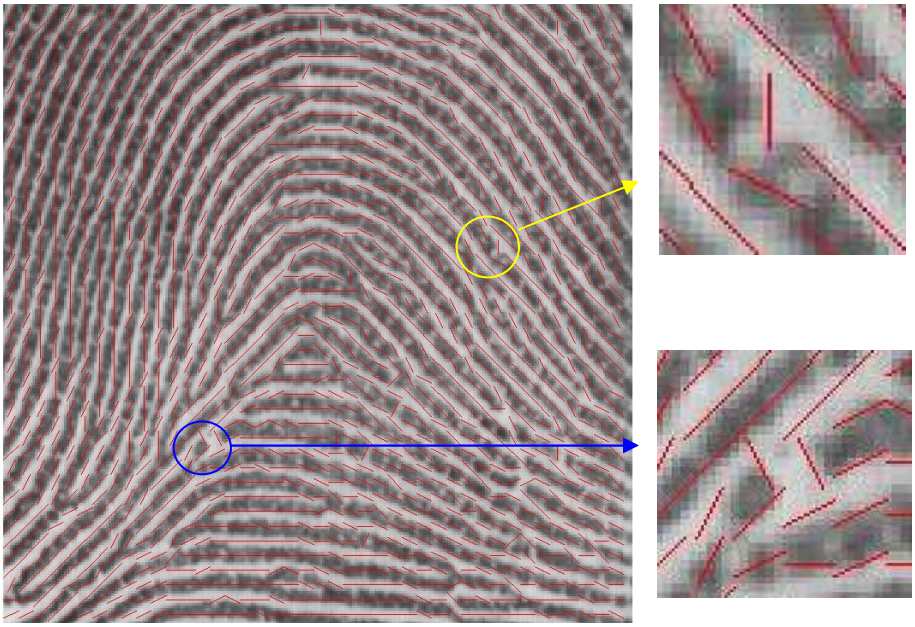


Figura 4.3 Problemas en el cálculo del mapa de direcciones.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La descripción del método no hace ninguna suposición relativa al tamaño de la ventana W empleada para realizar el promedio, pero es evidente que el tamaño de la ventana guarda relación directa con la escala a la que se está analizando el flujo de las crestas papilares. La figura 4.3 muestra algunos aspectos críticos en la elección del tamaño de la ventana de muestreo. En el centro del círculo azul hay dos estimaciones de dirección que nos dan una orientación perpendicular a la cresta; el corte que se observa en la cresta tiene un tamaño lo suficientemente grande como para estimar una orientación errónea, si bien se trata de la dirección correcta a nivel local. En este caso se da el agravante de que posiblemente se va a detectar un final de cresta y se le va a asignar una dirección incorrecta. Este problema, debido al uso de ventanas excesivamente pequeñas, se aprecia también en los casos, como el del círculo amarillo, en los que la ventana abarca un poro de la cresta papilar; si el poro es de gran tamaño respecto del número de píxeles de la cresta abarcados por la ventana, la dirección se estimará de forma errónea.

No existe un valor exacto que optimice el tamaño de la ventana de estimación; en general, cuanto menor sea la escala empleada, mejor será la estimación de la dirección local, pero también será mayor la vulnerabilidad a errores en la imagen de la huella o a los propios poros de la cresta papilar; por otro lado, cuanto mayor sea el tamaño de la ventana, mayor será la inmunidad al ruido, pero se realizará un efecto de filtro paso bajo, que dificultará el seguimiento de las crestas en las zonas en la que éstas presenten cambios destacados. Precisamente son estas zonas en las que cambia el flujo normal de la cresta las que corresponden a la localización del minutiae; con el agravante de que el efecto de realizar un mal seguimiento de las zonas con mayor curvatura será la detección de minutias falsas.

Anil K. Jain propone [JAI-97] una implementación del método de Rao para el cálculo de orientaciones que, mediante la evaluación de cierto “nivel de consistencia”, ajusta de forma dinámica el tamaño de la ventana, y por lo tanto el nivel de granularidad, a las características locales de la imagen. El método presenta el grave inconveniente del aumento del coste computacional, pero no deja de ser interesante puesto que las características de la huella varían enormemente de unas zonas a otras. Nuestra aproximación, con el objeto de buscar un bajo coste computacional, va a mantener fijo el tamaño de la ventana, optimizándolo de forma genérica en función del análisis realizado en este capítulo. En cierto modo, es lo mismo que analiza Maio en su artículo, en el que emplea un tamaño fijo para la ventana de estimación de orientación, aunque se comenta la parametrización del algoritmo en función de la anchura media de las crestas y de la separación entre ellas (típicamente se da el mismo valor a ambos parámetros, siendo variable entre unos 5 y 12 píxeles).

Con el objeto de analizar distitos métodos para la estimación de direcciones, evaluar sus prestaciones y ver sus respectivas necesidades computacionales, se empieza aplicando el algoritmo de extracción a una misma huella pero con distintos tamaños de ventana, para establecer las dimensiones óptimas a emplear durante la extracción del minutiae y evaluar entonces el coste computacional y las posibilidades de discretización.

A continuación se muestran algunos resultados. Se han realizado pruebas con ventanas de entre 5x5 y 14x14 píxeles.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Si se observan las direcciones obtenidas, para distintos tamaños de la ventana, superpuestas sobre la imagen de la huella, se aprecia que para ventanas pequeñas, como en el caso de la figura 4.4, se obtienen direcciones muy variables. El ruido hace que las orientaciones obtenidas presenten variaciones de cierta importancia entre puntos muy cercanos. También se puede ver que este tamaño de ventana es demasiado pequeño para incluir tanto crestas como valles en una misma medida, lo que dificulta la obtención de la dirección correcta. Es muy difícil determinar la dirección en una zona ampliada de 5x5 píxeles con muy poca variación de nivel de gris en su interior. El efecto del ruido también será importante, dado que al procesar un número de puntos relativamente bajo, no va a poderse compensar el efecto del error que producen los que presenten ruido.

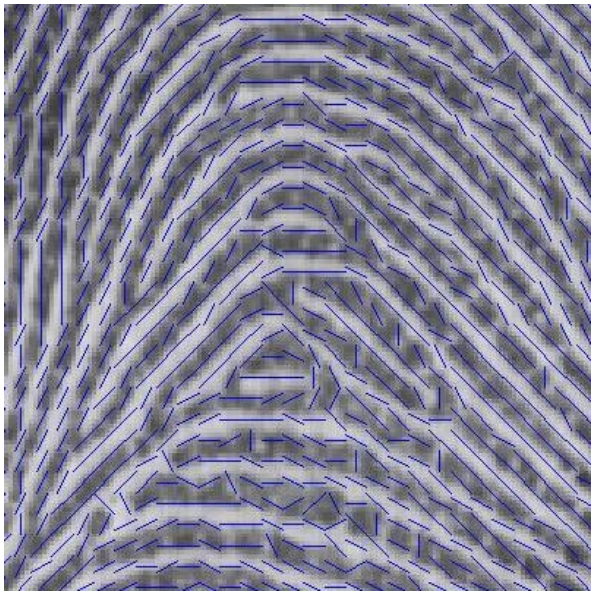


Figura 4.4 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 5x5 píxeles.

Por otro lado, las ventanas más grandes (14x14 píxeles) detectan mucho mejor la dirección de las crestas, pero se observa una pérdida de detalles en zonas de elevada curvatura. La pérdida de resolución en estas zonas puede ser crítica, puesto que, habitualmente, va a concentrar un número elevado de minutias. La figura 4.5 muestra el resultado de aplicar el método de RAO en una ventana de 14x14 píxeles.

Los mejores resultados se obtienen empleando un tamaño medio (máscaras alrededor de 10x10 píxeles); se trata, como en cualquier proceso de filtrado, de aplicar el umbral adecuado para obtener el nivel de detalle deseado. La figura 4.6 muestra el resultado para una ventana de 10x10 píxeles. Como puede apreciarse, tanto en este caso como en el anterior, correspondiente a la ventana de 14x14 píxeles, no se producen los problemas mostrados en la figura 4.3. La posible pérdida de detalle que se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6, o la dificultad de seguir los cambios de dirección más bruscos, pueden paliarse solapando las ventanas, de modo que el hecho de hacerlas mayores no implique un menor número de estimaciones; de hecho, durante el seguimiento, la dirección va a

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

calcularse de nuevo en cada iteración, centrando la ventana de estimación en el punto de interés.

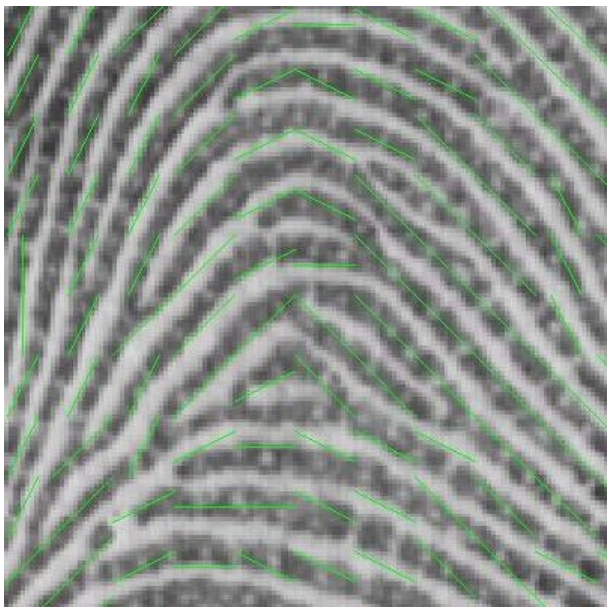


Figura 4.5 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 14x14 píxeles.

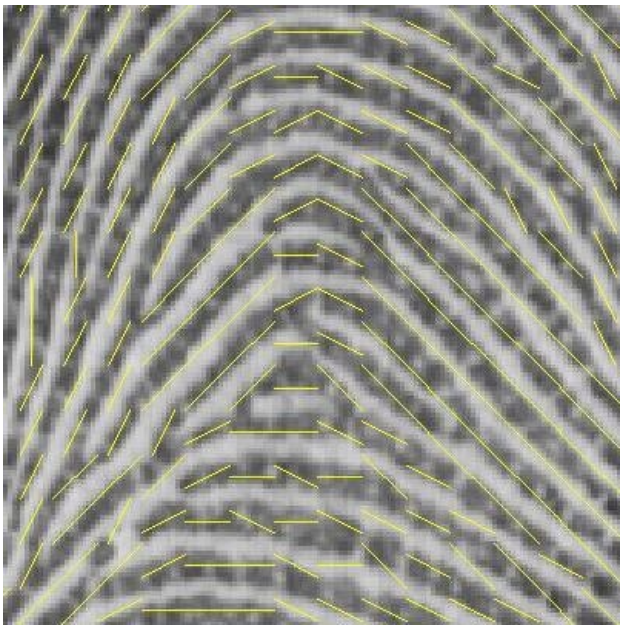


Figura 4.6 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 10x10 píxeles.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En la figura 4.7 se representa la superposición de las orientaciones obtenidas empleando distintos tamaños de ventana, para así poder comparar mejor las distintas estimaciones. Los cálculos se han realizado en los puntos centrales de una rejilla imaginaria superpuesta a la huella; cada tamaño de máscara se ha representado con una recta de un color distinto, de forma que su dirección coincida con la de la dirección estimada (discretizada a 12 posibles valores) y su longitud corresponda al tamaño de la ventana. Con la intención de facilitar la comparación, en unos casos se dibujan las líneas desplazadas, para poder verlas todas aún coincidiendo sus direcciones, mientras que en otros puntos se superponen para apreciar fácilmente las diferencias en las respectivas estimaciones.

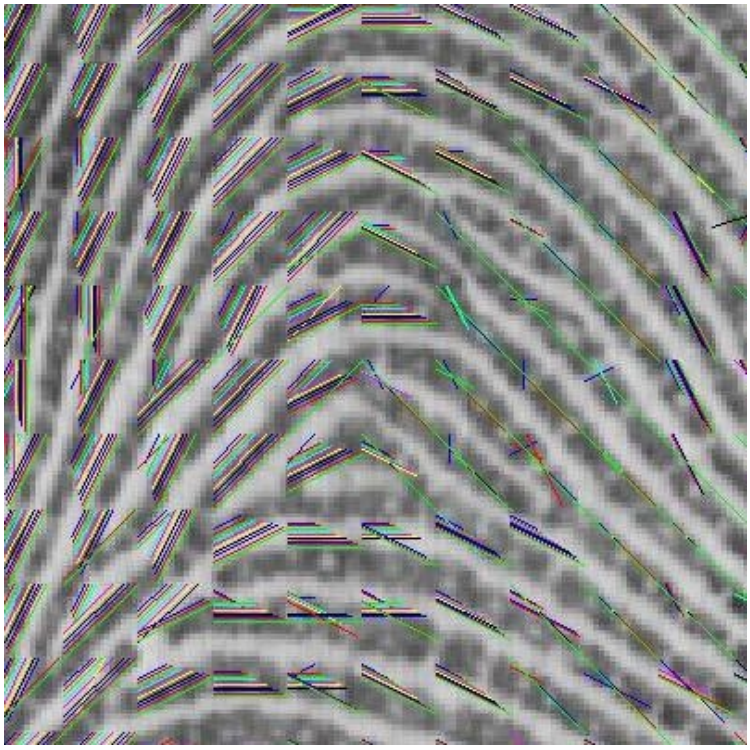


Figura 4.7 Superposición de las representaciones obtenidas con las distintas máscaras.

Como puede apreciarse, los tamaños de ventana más pequeños presentan mayores variaciones, debido a los efectos de pequeñas alteraciones en la imagen. Obviamente, las ventanas de mayor tamaño, por su efecto de filtro paso bajo, presentan una mayor inmunidad al ruido y determinan mejor la dirección, pero se tiene el riesgo de perder información en zonas de mucha variación.

El hecho de tener pequeñas irregularidades que alteren la estimación va a ser especialmente importante si la dirección estimada se va a asociar a una zona mayor, como seria el caso de preestimación de direcciones, aplicación de filtros con máscaras mayores que la ventana de estimación o de segmentación de imágenes por análisis de la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

coherencia de las orientaciones. En el fondo, se trata de emplear ventanas de estimación de tamaño similar a la medida de los filtros a emplear posteriormente y, en cualquier caso, no emplear ventanas excesivamente pequeñas en las que un único píxel erróneo representa un porcentaje elevado del número total de píxeles a emplear en la estimación. En el caso del algoritmo de Maio sería conveniente que, si se emplea un desplazamiento de μ píxeles, la estimación de la dirección se realice en una ventana próxima a los $2\mu+1$ píxeles de lado, es decir en la ventana que forman los píxeles situados a una distancia menor o igual a μ desde el punto donde se realiza la estimación. De esta forma, si se produce una desviación local por ruido, la siguiente estimación puede recuperar el sentido correcto (la figura 4.3 presenta muchos cambios de dirección, aunque desde un punto de vista local se están dando las direcciones correctas.

Para apreciar mejor el efecto del ruido y de las irregularidades de la huella en el cálculo de la dirección, se ha realizado la estimación de direcciones en cada uno de los puntos de la imagen. Las figuras 4.8 a 4.10 presentan los resultados en una zona pequeña del centro de la huella, representando con un color distinto las distintas orientaciones obtenidas. En esta zona central, la huella presenta cambios de dirección, pero puesto que las crestas papilares presentan variaciones suaves, no debería existir una gran diferencia entre dos puntos próximos, de forma que cabría esperar zonas uniformes de colores que siguen la dirección de la cresta.

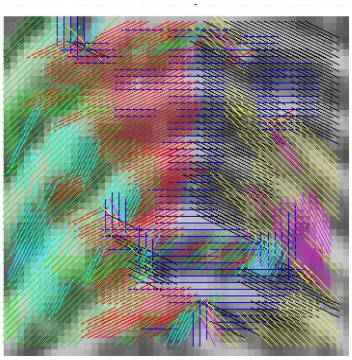


Figura 4.8 Con una ventana de 5x5 píxeles hay grandes variaciones, incluso errores.

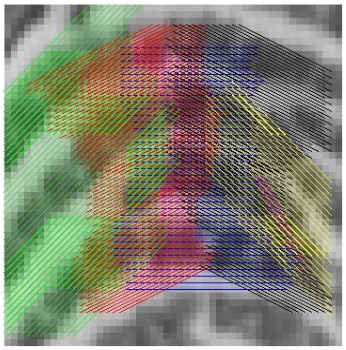


Figura 4.9 Con una ventana de 14x14 píxeles se pierden detalles.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

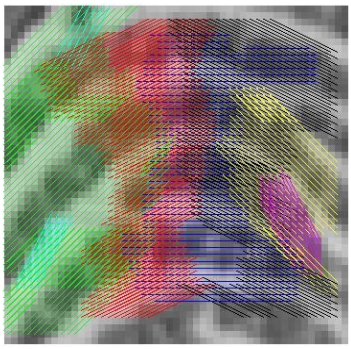


Figura 4.10 La ventana de 10x10 muestra uniformidad sin perder detalles

Aunque a simple vista puede parecer que los efectos de emplear una ventana excesivamente grande (figura 4.9) no son graves, lo cierto es que, en algunos casos, estos errores pueden facilitar el salto a crestas adyacentes o generando, en el caso del algoritmo de Maio, falsos errores en el seguimiento de la cresta por un exceso de curvatura. Además, a igualdad de condiciones interesa emplear ventanas menores, puesto que se van a reducir las necesidades de cálculo asociadas.

Se concluye que, empleando el médodo de estimación de direcciones de RAO, los mejores resultados se obtienen para ventanas cercanas a los 10 píxeles de lado. Puesto que a menudo es aconsejable centrar la ventana en el punto de interés, se deberá trabajar con tamaños de 9x9 u 11x11 píxeles. Los estudios realizados recomiendan la de 11x11, si bien las diferencias son poco importantes y no debe descartarse el empleo de máscaras de 9x9 píxeles si se desea priorizar la reducción de la carga computacional. Sería recomendable realizar estudios pormenorizados adaptados a sistemas completos en función de los sensores concretos que se empleen y de sus resoluciones.

4.3 Método de Donahue y Rokhlin.

Para estimar la dirección tangencial de la cresta papilar, Maio y Maltoni emplean el método presentado por Donahue y Rokhlin [DON-93]. El método utiliza un operador gradiente para obtener una estimación de la dirección en una ventana de NxN píxeles centrada en el punto de interés.

Para Donahue y Rokhlin, el dactilograma se considera una representación bidimensional, en forma de curvas de nivel, de una superficie tridimensional. La primera derivada de la función que representa dichas curvas de nivel será, en el punto de interés, el vector tangente a la cresta, es decir su orientación. En una imagen digitalizada, los valores del dactilograma sólo se conocen en un conjunto discreto de puntos, por lo que las orientaciones, derivadas de las curvas de nivel, sólo van a poderse aproximar. En lugar de calcular la derivada en el punto de interés (i_0,j_0), Donahue y Rokhlin estiman un valor promediado dentro de una ventana rectangular centrada en (i_0,j_0) mediante minimización de mínimos cuadrados. Puesto que los efectos del ruido aleatorio se minimizan al promediar, el método va a añadir tolerancia al ruido.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

El tamaño óptimo de la ventana va a depender del tamaño relativo de las características de interés, en relación al tamaño del píxel, y del nivel de ruido [DON-93], existiendo, en general, un compromiso entre la tolerancia al ruido (ventana grande) y precisión (ventana pequeña). En [MAI-97] no se especifica el tamaño de ventana empleado, indicándose sólo el elevado coste computacional que representa el empleo de ventanas locales de 19 píxeles de lado. En este capítulo se analiza el efecto del tamaño de la ventana y su efecto concreto sobre el seguimiento de crestas en imágenes de huella dactilar, con el fin de elegir el tamaño óptimo y poder estimar la complejidad computacional asociada.

Sea (i_0,j_0) el píxel en el que se desea estimar la dirección φ_0. Para cada píxel (i_h,j_k) perteneciente a la ventana en la que va a promediarse la dirección, una región cuadrada de α píxeles de lado y centrada en el píxel (i_0,j_0), se define un vector n_{hk} ortogonal a la superficie S(i,j). El vector tangente en cada píxel (i_h,j_k) pertenece al plano ij y es ortogonal al correspondiente vector n_{hk}. Y el vector tangente promedio **t**, que representa la dirección φ_0, es el vector unidad, situado sobre el plano ij y que es el 'más ortogonal' a todos los vectores n_{hk} calculados.

En la figura 4.11 se representa una superficie **S** que contiene una cresta en la dirección j, junto con los vectores n_{hk}, ortogonales a la superficie (se representan los vectores de la fila h=5 en una ventana con α=9 píxeles de lado) y el vector tangente promedio **t**.

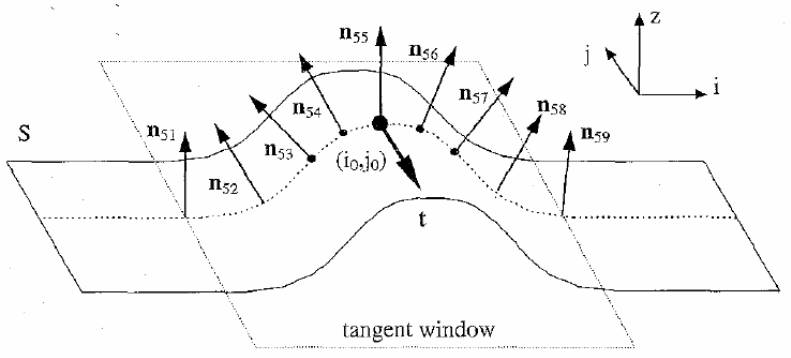


Figura 4.11: El vector tangente t muestra a dirección de la cresta.

La forma de calcular el vector t es:

- Para cada píxel (i_h,j_k) dentro de la ventana en la que se va a estimar la dirección se localizan sus 4 píxeles adyacentes tal y como se muestra en la figura 4.12: (i_{h+1},j_{k+1}), (i_{h-1},j_{k+1}), (i_{h-1},j_{k-1}) y (i_{h+1},j_{k-1}), y se definen sus respectivos niveles de gris como: a_1=gris(i_{h+1},j_{k+1}), a_2=gris (i_{h-1},j_{k+1}), a_3=gris (i_{h-1},j_{k-1}) y a_4=gris (i_{h+1},j_{k-1}).
- Para cada (i_h,j_k) se calcula, por el método de mínimos cuadrados, el vector $n_{hk}=[a_{hk},b_{hk},1]$ normal a la superficie determinada por (a_1,a_2,a_3,a_4). Las componentes de dicho vector son [DON-93]:

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$a_{hk} = \frac{-a_1 + a_2 + a_3 - a_4}{4},\ b_{hk} = \frac{-a_1 - a_2 + a_3 + a_4}{4}$$

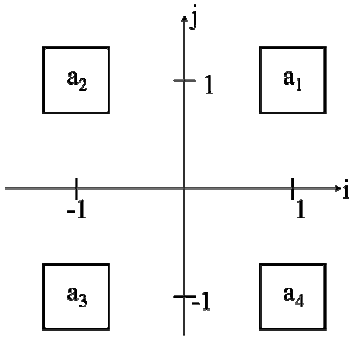


Figura 4.12 Sistema de coordenadas local con centro en el píxel (i_h,j_k) .

El valor de la componente en c_{hk} correspondiente al eje z es irrelevante para el cálculo del vector **t**, que se encuentra en el plano ij, por lo que el método normaliza su valor a 1 y evita su cálculo. Así, la magnitud del vector n_{hk} depende de su ángulo respecto del plano ij. Si es paralelo al eje z su módulo toma el valor 1, a partir de este mínimo, la magnitud va aumentando y el ángulo con el plano ij va decreciendo.

Obviamente, se puede elegir una vecindad mayor, con lo que se aumenta la tolerancia al ruido y se mejora la estimación de la dirección. De todos modos, la tolerancia al ruido no es un problema, puesto que el ruido aleatorio ya se filtra al realizar la media en toda la ventana. Por lo que se refiere a la estimación de la dirección, hay un compromiso, que se va a analizar más adelante, entre el coste computacional y la precisión. En cualquier caso, se sabe que las orientaciones estimadas mediante operadores gradiente como éste tienen cierto sesgo debido a la discretización, por lo que hay un grado de resolución del que no va a poder pasarse.

- Una vez calculados todos los vectores n_{hk}, h=1,..α, k=1,..α, en la ventana de estimación, se busca el vector tangente promedio **t**, como el vector unidad sobre el plano ij, que es "más ortogonal" a todos los n_{hk}. Sean $v_{hk}=(a_{hk}, b_{hk})$, h=1,..α, k=1,..α, los vectores obtenidos al suprimir la componente z de los correspondientes vectores n_{hk}, y sea $t=(t_1, t_2)$. Entonces, debe determinarse por el método de mínimos cuadrados:

$$\min \sum_{\substack{h=1..\alpha \\ k=1..\alpha}} \left|\langle v_{hk}, t\rangle\right|^2 \text{ tal que } \|t\| = 1$$

Donde <·,·> representa el producto escalar de los dos vectores.

- Sin entrar en los detalles matemáticos, que pueden encontarse en [DON-93]:

$$A = \sum_{\substack{h=1..\alpha \\ k=1..\alpha}} (a_{hk})^2,\ B = \sum_{\substack{h=1..\alpha \\ k=1..\alpha}} (b_{hk})^2,\ C = \sum_{\substack{h=1..\alpha \\ k=1..\alpha}} a_{hk} b_{hk}$$

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$t = \begin{cases} \left[1, \frac{B-A}{2C} \cdot \mathrm{sgn}(C) \cdot \sqrt{\left(\frac{B-A}{2C}\right)^2 + 1}\right] & si \quad C \neq 0 \\ [1,0] \quad si \quad C = 0, A \leq B \\ [0,1] \quad si \quad C = 0, A > B \end{cases}$$

Finalmente, la dirección φ_0 se calcula como:

$$\varphi_0 = \begin{cases} tg^{-1}\left(\frac{t_2}{t_1}\right) & si \quad t_1 \neq 0 \\ \frac{\pi}{2} & si \quad t_1 = 0 \end{cases}$$

Éste método incluye una raíz cuadrada en los cálculos, por lo que la complejidad de cálculo añadida lo hace, a priori, menos atractivo para nuestros propósitos que el método anterior. Por lo demás, nos fijamos en que todas las divisiones son por 4, y por lo tanto muy fáciles de realizar en binario, aunque a menudo las divisiones pueden eliminarse ya que sólo provocarán un cambio de escala, manteniéndose las relaciones. Por lo que se refiere al cálculo de un arco tangente, ésta función ya estaba presente en el método anterior.

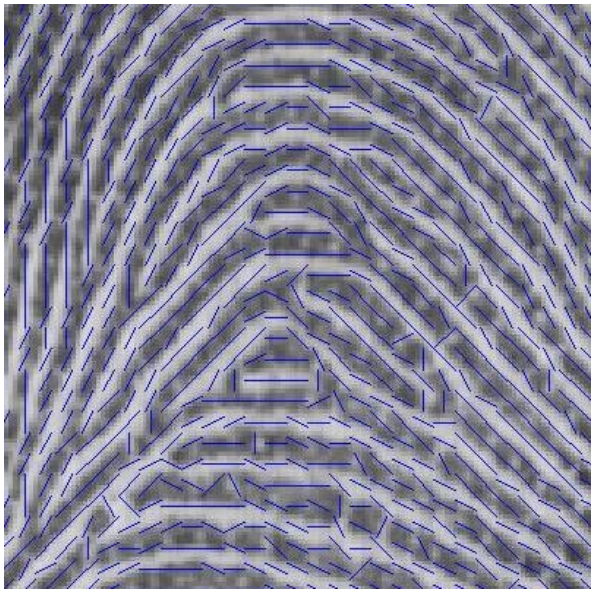


Figura 4.13 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 5x5 píxeles.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Las figuras 4.13 a 4.15 muestran los mapas de direcciones obtenidos para distintos tamaños de la ventana de estimación. Como puede comprobarse, no hay diferencias significativas entre este método y el anterior. También en este caso son las ventanas de tamaños cercanos a 10x10 píxeles las que proporcionan los resultados más satisfactorios.

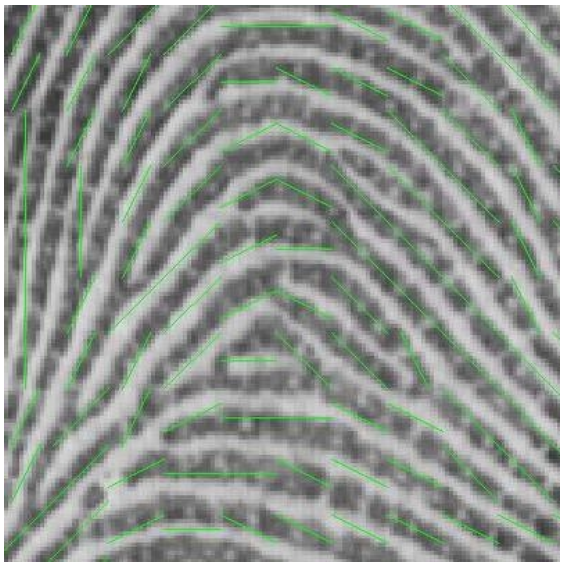


Figura 4.14 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 14x14 píxeles.

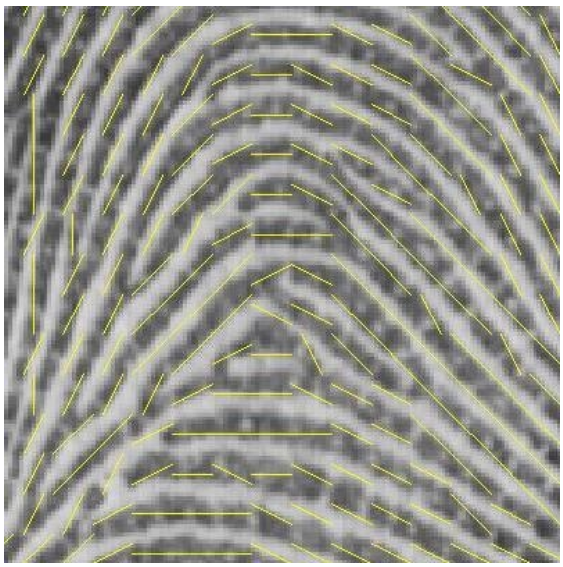


Figura 4.15 Representación del mapa de direcciones obtenido aplicando ventanas de 10x10 píxeles.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Como ya se ha hecho para el método de Rao, también ahora se ha hecho una representación por colores de los resultados de la estimación de la dirección en todos los puntos de la imagen. Si el método presenta suficiente inmunidad al ruido no deberían existir excesivas diferencias en los valores obtenidos para las estimaciones en puntos vecinos. Los resultados se muestran en las figuras 4.16 a 4.18.

Figura 4.16 Con una ventana de 5x5 píxeles hay grandes variaciones, incluso errores.

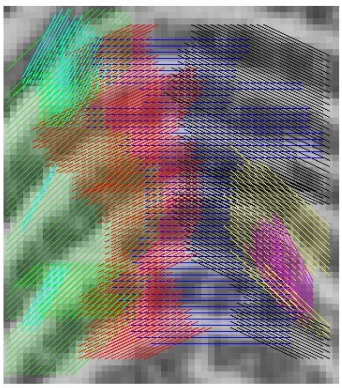


Figura 4.17 Con una ventana de 14x14 píxeles se pierden detalles.

Podemos ver que el método presenta unos resultados muy parecidos al anterior, con perdidas de detalle para ventanas grandes y mucha sensibilidad al ruido en ventanas pequeñas. También aquí la ventana de 10x10 píxeles parece ser la óptima. Para algunos de los tamaños de ventana empleados, el método de Rao parece tener una mayor inmunidad al ruido, siendo el método de Donahue más sensible a los defectos de la imagen dactilar. Parece probable que esto sea debido al hecho que, mientras que Rao realiza la media de gradientes encontrados mediante máscaras de 3x3 píxeles, el método de Donahue promedia los resultados obtenidos empleando máscaras de 2x2 píxeles que, en principio, van a presentar una mayor sensibilidad a la presencia de píxeles ruidosos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

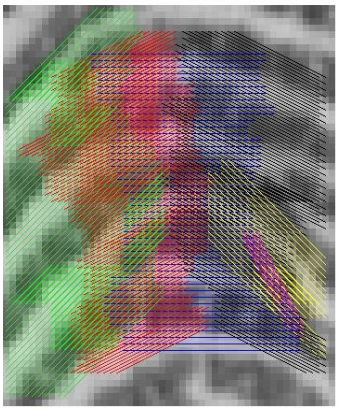


Figura 4.18 La ventana de 10x10 muestra uniformidad sin perder detalles

Se puede concluir que este método, pese a su mayor carga computacional, presenta unos resultados prácticamente idénticos al anterior. La carga computacional puede reducirse tabulando la raíz cuadrada, pero puesto que posteriormente el algoritmo debe calcular una función arco tangente, la tabla debe almacenar la respuesta con una precisión elevada para evitar una excesiva propagación del error.

4.4 Método de los cortes (‘slits’)

Se analiza a continuación el método propuesto en [WIL-93] y empleado posteriormente por Halici y Ongun en [HAL-96]. Se trata de un método de estimación de direcciones bastante sencillo, variante simplificada del propuesto por Mehtre en [MEH-93] para analizar la calidad de las impresiones dactilares [RAT-03]. Se basa en sumar los niveles de gris de los píxeles alrededor del punto donde queremos estimar la dirección, acumulando los valores de los píxeles en las diferentes direcciones que deseemos considerar. La dirección de la cresta (valle) vendrá determinada por aquella en la que la suma sea máxima (mínima), por corresponder a una presencia mayoritaria de píxeles negros (blancos). Las direcciones que no sigan las crestas o valles, tendrán tantos píxeles blancos como negros y darán valores intermedios en sus sumas. El método obliga a aplicar un criterio para determinar si la dirección que se busca es la máxima o la mínima. Si la suma es de puntos mayoritariamente claros debe suponerse que se está sobre un valle y debe minimizarse la suma, mientras que en el caso contrario se está situado sobre una cresta y debe buscarse el valor máximo.

Podemos utilizar distintos tamaños de ventana y, para cada ventana tomar un número limitado de direcciones (menos cuanto menor sea la ventana). Se han realizado pruebas con ventanas de tamaño impar para dejar un píxel central; y se ha trabajado, dependiendo del tamaño de la ventana, con 8 o 12 direcciones distintas.

La primera prueba realizada es la propuesta por Stock i Swanger [STO-69]. Se trata de emplear una ventana de 9x9 píxeles con un total de 8 direcciones. La figura 4.19 muestra la máscara empleada; a partir del punto central, en el que se desea evaluar la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

dirección, se seleccionan los píxeles a emplear en cada una de las 8 direcciones de interés (identificadas con los números 1 a 8 de la figura). Como se puede apreciar, se aprovechan los píxeles a distancia 2 y 4 del píxel central (hay 16 píxeles a distancia 2, correspondiendo 2 de ellos a cada dirección, y 32 píxeles a distancia 4, de los que se emplean los 16 que se encuentran sobre los 8 cortes correspondientes).

Hay 8 cortes con 4 píxeles cada uno de ellos. Para cada corte i=1,..,8 se define una suma S_i como la suma de las intensidades de los píxeles que tienen el mismo número de corte i. El píxel central no se considera ya que, como está incluido en todos los cortes, afecta a todas las direcciones por un igual y no altera la posición de los máximos y los mínimos.

7		8		1		2		3
6		7	8	1	2	3		4
		6				4		
5		5		C		5		5
		4				6		
4		3	2	1	8	7		6
3		2		1		8		7

Figura 4.19 Ventana de 9x9 píxeles con 8 cortes direccionales

Como ya se ha comentado, la máscara no emplea los puntos intermedios puesto que no están completamente alineados con la dirección a evaluar. Esto hace que el número de píxeles a tratar en este caso sea muy bajo, con el evidente ahorro computacional, sólo utilizamos 32 puntos en una ventana de 9x9. Además, las operaciones a realizar son mucho más sencillas que en los dos métodos anteriores, puesto que en este caso sólo hay sumas y comparaciones, sin necesidad de operaciones complejas como la raíz o el arco tangente. Para que pueda realizarse la estimación queda una operación adicional; se trata de determinar si el píxel central C, con nivel de gris S, pertenece a una cresta, en cuyo caso debe maximizarse la suma, o si, por el contrario, pertenece a un valle y debe buscarse el valor mínimo. Así, la dirección asignada vendrá dada por:

$$dirección(C) = \begin{cases} dirección(S_{\max}) \quad si \quad 4S + S_{\max} + S_{\min} > \frac{3}{8}\sum_{i=0}^{8} S_i \\ dirección(S_{\max}) \quad si \quad 4S + S_{\max} + S_{\min} \leq \frac{3}{8}\sum_{i=0}^{8} S_i \end{cases}$$

Como puede apreciarse, la carga computacional asociada a este nuevo cálculo tampoco es excesiva, se trata de dos productos, siendo la multiplicación por 4 asimilable

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

a un desplazamiento de bits. En conclusión, se trata del método con menor coste computacional, por lo que es muy atractivo para los objetivos planteados.

El problema radica en los resultados obtenidos; las estimaciones de dirección proporcionadas por este método no son tan buenas, ya que a menudo se detectan errores en las direcciones resultantes (cerca del 20% en una imagen de buena calidad). El motivo es la poca información, en cuanto a número de píxeles procesados, que utiliza la máscara de estimación, lo que la hace muy vulnerable al ruido. En imágenes de muy alta calidad sí que se obtienen buenos resultados, pero no siempre se va a poder disponer de ellas.

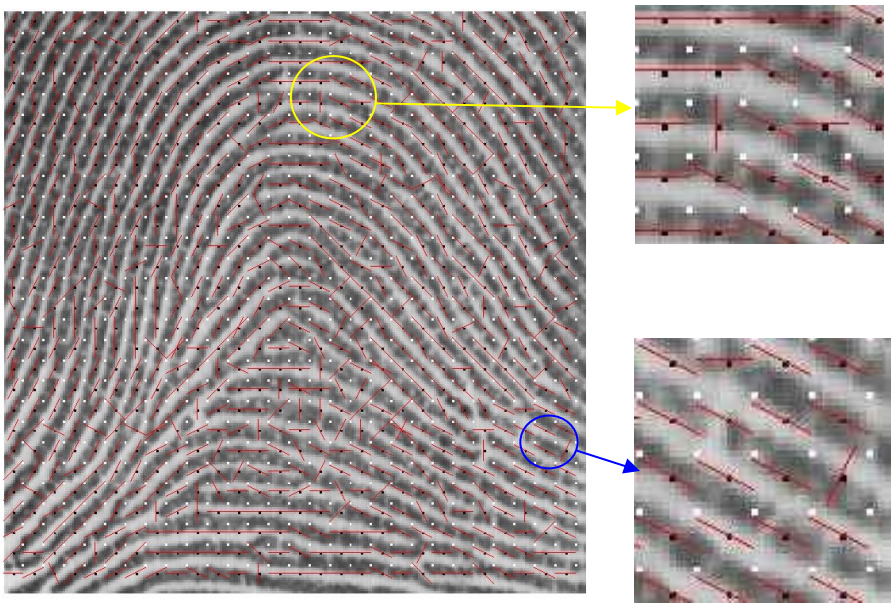


Figura 4.20 Errores en la estimación de direcciones.

En la figura 4.20 se puede observar un número apreciable de estimaciones erróneas, de las que se han ampliado un par de casos a modo de ejemplo. Sin embargo, pueden hacerse algunas consideraciones antes de descartar este método de estimación. En primer lugar se aprecia que un gran número de errores se producen en zonas en las que el píxel que se está estimando, correspondiente al punto central C de la máscara, está situado en zonas de grises suaves, frontera entre valles y crestas. En segundo lugar, se destaca el hecho de que, en un gran número de casos, la dirección estimada erróneamente es perpendicuar a la dirección correcta. Todo ello lleva a considerar la posibilidad de que el criterio para determinar si se está en una cresta o un valle, es decir si se debe buscar el máximo o el mínimo, no funciona al 100%. Para apreciar mejor este hecho, en la figura se ha marcado con un punto negro el píxel central de la ventana, y con un punto blanco su esquina superior izquierda, delimitándose así la zona empleada para cada estimación.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

A pesar de que los resultados obtenidos no son excesivamente satisfactorios se han realizado más pruebas con éste método, puesto que el algoritmo representa un gran ahorro computacional. Además, a pesar del alto porcentaje de errores en la estimación, el algoritmo de seguimiento se ha mostrado lo suficientemente robusto como para no alterar el minutiae detectado, posiblemente por el hecho de que, al estar navegando sobre las crestas, el número de estimaciones realizadas en zonas frontera es relativamente bajo.

Como primer paso se añaden puntos a cada corte; de esta forma se va a disminuir la sensibilidad al ruido. La figura 4.21 es una representación simplificada de la nueva máscara de estimación; en realidad los puntos situados en las diagonales que se encuentran junto al punto central C, sombreados en la figura, se emplean para el cálculo de tres de los cortes (por ejemplo, el punto situado arriba y a la derecha de C se emplea para el cálculo de los cortes 2, 3 i 4).

7		8		1		2		3
	7	8		1		2	3	
6	6	7	8	1	2	3	4	4
		6	7	1	3	4		
5	5	5	5	C	5	5	5	5
		4	3	1	7	6		
4	4	3	2	1	8	7	6	6
	3	2		1		8	7	
3		2		1		8		7

Figura 4.21 Nueva máscara de estimación.

Como consecuencia de la modificación en la forma de calcular los sumatorios, debe fijarse un nuevo criterio para determinar si debe buscarse un máximo o un mínimo. Este criterio se basa en dos ecuaciones: la primera considera que el punto en el que se estima la dirección es negro si supera la media de los puntos empleados en el cálculo:

$$4S > \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} S_i$$

La segunda ecuación considera que estamos sobre un píxel negro si la suma del máximo y del mínimo es mayor que la media de los cortes:

$$S_{\min} + S_{\max} > \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{8} S_i$$

Se trata de adaptar estas desigualdades a la máscara actual en la que se acumulan 8 píxeles por corte en lugar de 4. Así, el nuevo criterio para decidir buscar un máximo o un mínimo será:

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$dirección(C) = \begin{cases} dirección(S_{\max}) & si \quad 8S + S_{\max} + S_{\min} > \frac{3}{8}\sum_{i=0}^{8} S_i \\ dirección(S_{\max}) & si \quad 8S + S_{\max} + S_{\min} \leq \frac{3}{8}\sum_{i=0}^{8} S_i \end{cases}$$

Con la nueva máscara el mapa de direcciones obtenido es el mostrado en la figura 4.22.

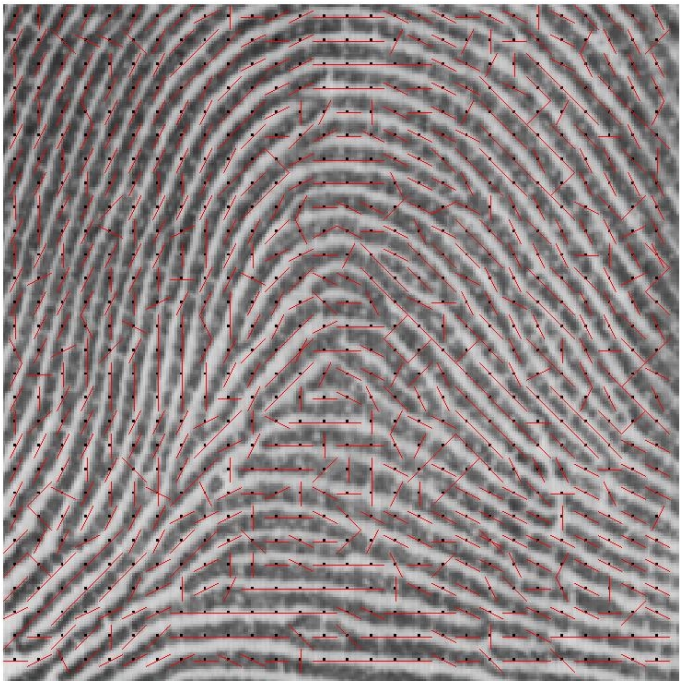


Figura 4.22 Mapa de direcciones con máscara de 9x9 píxeles modificada.

En la imagen no se aprecia una mejora sustancial, lo que indica que no se trata de un problema debido a un exceso de píxeles ruidosos – realmente la imagen empleada es de buena calidad -, sino que el problema radica en los puntos en los que se están realizando las estimaciones de dirección. Se confirma que el método necesita que el punto C pertenezca claramente a una cresta o a un valle, de forma que las sumas se decanten hacia los extremos en el máximo o el mínimo.

Para poder confirmar este hecho, se han tomado muestras en los puntos que eran máximos o mínimos locales en ventanas de 3x3 píxeles, marcados en la figura con puntos blancos; de esta forma se sitúan los puntos C, a los que se va a aplicar la máscara, en lo alto de las crestas o en el fondo de los valles. El resultado se muestra en la figura 4.23, en la que se han representado en distinto color los máximos y los mínimos. Se observa claramente una gran mejoría en la estimación de direcciones,

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

aunque todavía se mantienen errores notables. Los mejores resultados se dan en las zonas claras, ya que la presencia de poros engaña al algoritmo en las zonas más oscuras, las correspondientes a las crestas, no siendo buenas, en general, las estimaciones realizadas sobre puntos grises. La mayoría de los errores se ven en color azul, que indicaría búsqueda de mínimos, y están situados sobre crestas, en las que deberían buscarse máximos. Este es el efecto de los poros, que falsean el criterio de selección y fuerzan al algoritmo a buscar un mínimo en lugar de un máximo. Puesto que las zonas valle suelen estar más limpias de ruido - en ellas no hay poros - no presentan tantos errores. Por esta razón sería interesante considerar la posibilidad de realizar el seguimiento mediante el algoritmo de Maio en los valles en lugar de hacerlo en las crestas o, lo que sería lo mismo, emplear la imagen negada; con ello se obtendría el mismo minutiae pero con los tipos intercambiados; los finales se detectarían como bifurcaciones y viceversa.

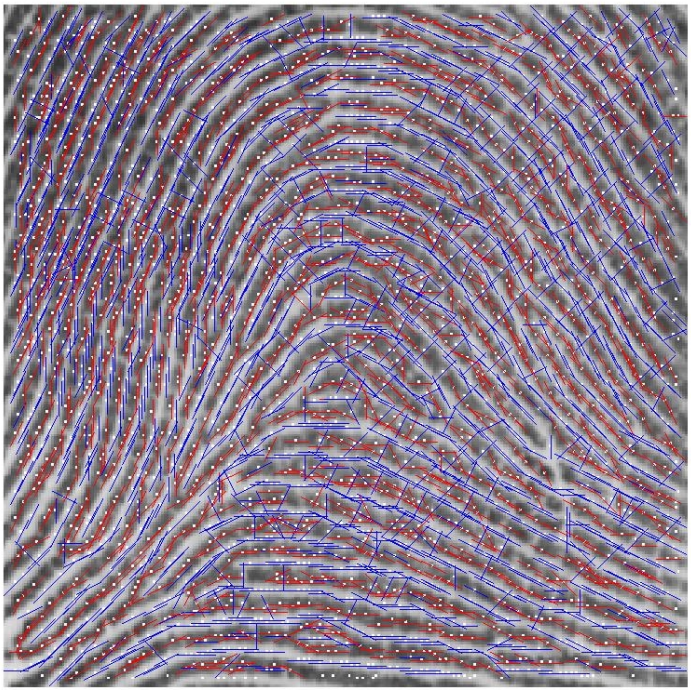


Figura 4.23 Representación de las estimaciones empleando máximos y mínimos locales.

Es evidente que no se puede emplear la técnica anterior y emplear los máximos locales dentro de una ventana, ya que no se puede garantizar que habrá suficientes puntos y lo bastante dispersos que sean máximos o mínimos locales; sin embargo, sí que se pueden plantear nuevas estrategias para mejorar el grado de acierto. Puesto que hay alrededor de un 20% de estimaciones erróneas, se puede pensar en realizar distintas evaluaciones dentro de una vecindad y después hacer una votación o media de resultados. De hecho, se trata de la misma estrategia que emplean los dos métodos anteriores y, en principio, la carga computacional de éste método es lo suficientemente baja como para pensar en una estrategia de este tipo manteniendo la eficiencia del

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

método. Además, la influencia del ruido sobre las medidas es especialmente importante sobre el punto central; éste es el punto sobre el que recae la decisión de si se debe buscar un máximo o un mínimo, por lo que si se trata de un punto ruidoso, el criterio será erróneo y la estimación totalmente equivocada. En la figura se observa que las peores aproximaciones se dan en puntos claros situados en el interior de les crestas, calculándose una dirección perpendicular a la real al elegirse mal el criterio por culpa del ruido del punto C.

Así, se hacen estimaciones en diferentes puntos y se mira la distribución para localizar el resultado mayoritario; se han realizado estimaciones cada 3 píxeles, utilizando la ventana de 9x9 con 8 direcciones. La figura 4.24 muestra las direcciones obtenidas, indicándose el píxel analizado mediante un punto negro superpuesto a la imagen de la huella.

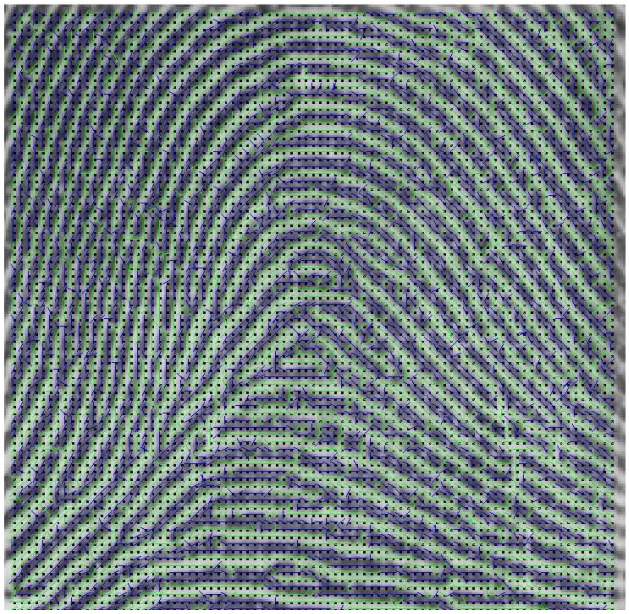


Figura 4.24 Representación de las direcciones cada 3 píxeles.

Una vez que se dispone de las estimaciones en todos los puntos, se cogen ventanas de 9 estimaciones (3x3) y se elige como dirección de la región, aquella que se repita más veces. La figura 4.25 muestra el resultado después de iterar el proceso para cada uno de los puntos a estimar. Con objeto de tener una aproximación visual al resultado de la votación, se representa la dirección elegida con un color distinto en función del número de coincidencias que ha habido en cada votación. Si la dirección coincide en 8 o 9 de las estimaciones de la ventana, se muestra esa orientación en color rojo. A medida que disminuye el número de coincidencias, la dirección se representa en colores cada vez más fríos. El color negro y, especialmente, el blanco indican muy pocas coincidencias. En la figura se aprecia que estos son los casos con una mayor tasa de error. Puede verse que existen zonas muy buenas, así como otras muy malas; en general no hay problemas mientras la estimación se realiza sobre las crestas o en el

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

fondo de los valles; pero al hacer estimaciones en les fronteras entre valles i crestas ya aparecen peores resultados.

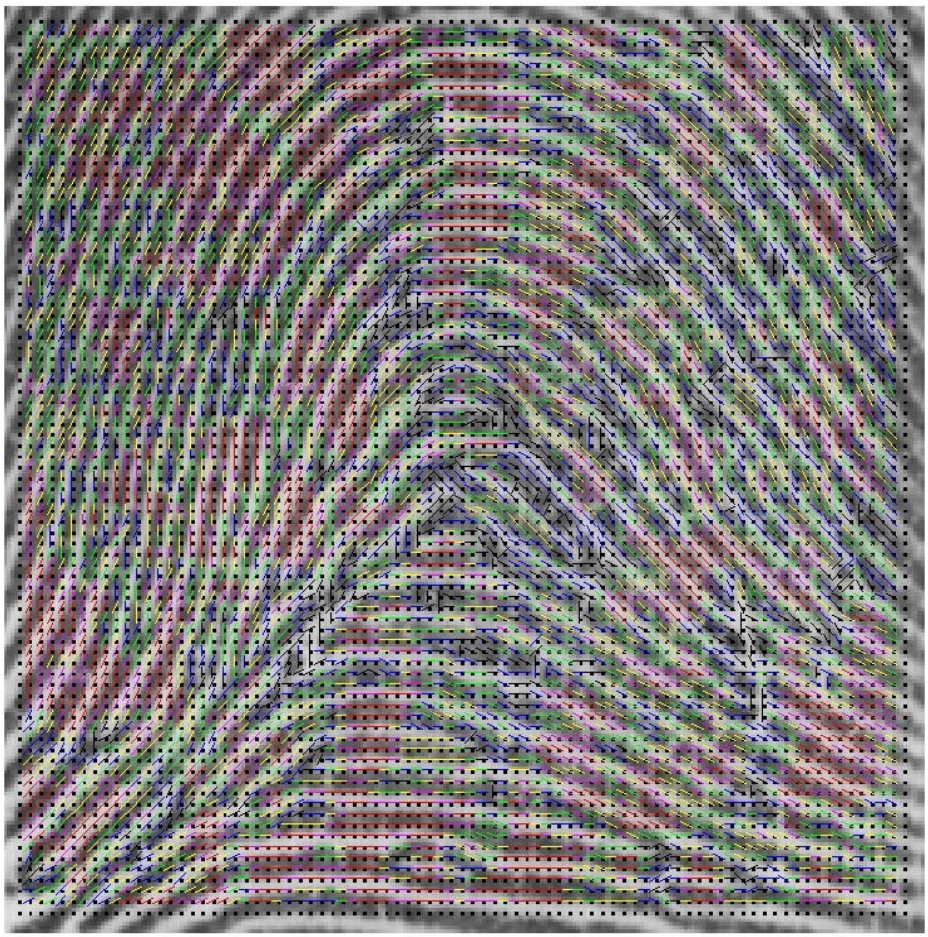


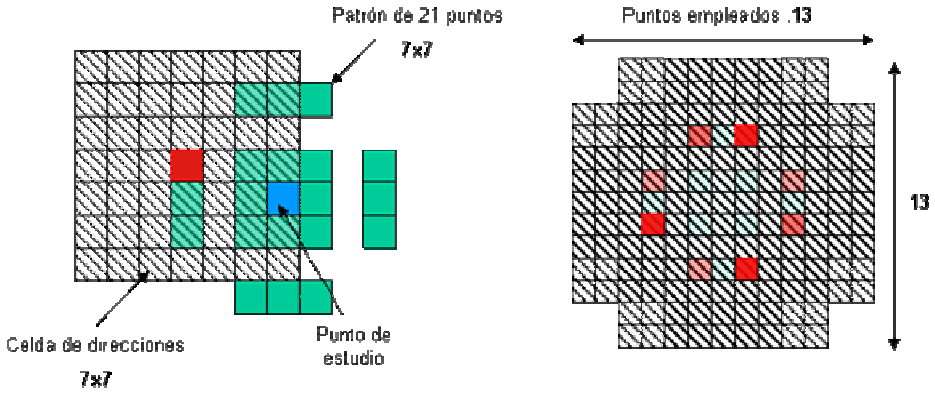
Figura 4.25 Representación de las direcciones obtenidas por votación de mayoría.

En general el resultado mejora mucho, aunque todavía existen errores. Además, con esta estrategia, aparecen nuevos inconvenientes: por un lado se pierde la ventaja del menor coste computacional, puesto que se ha multiplicado por 9 el número de estimaciones; por otro lado, se emplean puntos muy distantes en la estimación (el tamaño efectivo de la ventana, por el hecho de realizar medias, pasa a ser de 27x27 píxeles, con lo que se pierde fiabilidad en la estimación de direcciones locales.

Se han estudiado nuevas alternativas, analizando los histogramas de las direcciones obtenidas por el método de los cortes dentro de una vecindad del punto de interés. La idea es la de aproximarse a los resultados del método de Rao mediante el empleo de estrategias similares (ponderación de gradientes locales, alrededor de un

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

punto central, de forma que aumente la inmunidad al ruido). De esta forma se ha llegado a resultados comparables a los obtenidos por los tradicionales métodos de estimación por gradientes, pero a costa de promediar en un patrón de 21 puntos (figura 4.26 (a)) y con un tamaño de ventana efectivo de 13x13 píxeles (figura 4.26 (b))



(a) (b)

Figura 4.26 Máscaras empleadas para mejorar la calidad de las estimaciones por cortes.

Todo ello comporta unos requisitos de memoria adicionales, para poder realizar las votaciones. No es preciso guardar todos los resultados intermedios, pero el control no será trivial si se tiene en cuenta que, al cambiar de fila, se necesitan valores calculados con considerable anterioridad. Así pues, va a ser necesario disponer de cierta cantidad de memoria de soporte siempre que se quiera emplear una estrategia de este tipo.

En definitiva con este método, a costa de ponderar estimaciones vecinas con el consiguiente aumento del coste computacional, se pueden llegar a obtener estimaciones con un grado de acierto similar al obtenido empleando el algoritmo de Rao. Por lo que hace referencia a las malas estimaciones en las zonas grises situadas entre crestas y valles, la variación propuesta por Mehtre [MEH-93] mejora los resultados, pero pagándose también el precio de un mayor número de operaciones a realizar. Por todo ello, va a ser necesario realizar una correcta evaluación de las necesidades de cálculo de cada método, para así poder ponderar correctamente sus ventajas y sus inconvenientes. Debe analizarse si la gestión de las votaciones y los aumentos tanto en el tamaño de la máscara como en el número de estimaciones, va a penalizar en exceso el algoritmo hasta hacerlo computacionalmente tanto o más costoso que el método de Rao.

4.5 Estimación del coste computacional

Se van a comparar los dos métodos en igualdad de condiciones, y considerando que los algoritmos van a ser implementados en hardware. En los dos casos se hace una estimación del coste en operaciones para una ventana de NxN píxeles y con el resultado

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

discretizado a D direcciones. No se van a considerar los productos y divisiones por números que sean potencias de 2, por realizarse en hardware a coste cero. El número de direcciones sólo se considera en el método de los cortes, ya que en el de Rao no tiene excesivo sentido puesto que sólo va a afectar al tamaño de la tabla empleada, memorizada en una ROM, pero sin implicaciones en cuanto a número de cálculos.

4.5.1 Método de RAO:

Para calcular el gradiente (Gx o Gy, en una ventana de 3x3 píxeles) en un píxel se necesitan 5 sumas (se suponen los enteros codificados en complemento a 2 y por tanto no se distingue entre las operaciones de suma y resta). También hay un par de productos, pero no se consideran puesto que se realizarán vía hardware al ser siempre por 2.

El método Rao acumula en una ventana los siguientes valores:

$$Acum1 = Acum1 + 2Gx * Gy$$

$$Acum2 = Acum2 + Gx*Gx - Gy*Gy$$

Una vez procesados todos los píxeles de la ventana, se realiza la división entre Acum1 y Acum2 como paso previo a la obtención del arcotangente a partir de una tabla. Como se verá posteriormente, la división también formará parte de la operación tabulada, y no va a realizarse la operación como tal sinó que se verá reducida a una serie de desplazamientos. Así, sólo debe tenerse en cuenta la precisión deseada, que no es excesiva puesto que para el seguimiento los ángulos se discretizan en saltos de 15 grados.

Así, en cada iteración, se realizarán tres productos y tres sumas para actualizar los acumuladores más las 10 sumas necesarias para calcular los gradientes G_x y G_y. Por lo que el coste para una ventana de NxN será de:

$(13 \cdot N^2)$ sumas y $(3 \cdot N^2)$ productos

4.5.2 Método de los cortes:

En este caso el tamaño de la ventana es tan importante como el número de puntos que tiene cada corte. En un corte de una ventana de 9x9 hay 8 píxeles (4 a cada lado del punto central), por lo que se precisan N-2 sumas para calcular su peso. Puesto que hay D direcciones (cortes), se van a realizar D*(N-2) sumas.

Por otro lado, debe evaluarse la fórmula siguiente para saber si se está buscando un máximo o un mínimo:

$$4 \cdot C + S\max + S\min > \frac{3}{D}\sum_{i=1}^{D} S_i$$

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

lo que conlleva la realización adicional de D+1 sumas (3/D con D=12 es una división por una potencia de 2 que no se considera, mientras que si D=8 queda un producto por 3 que podría realizarse como un desplazamiento y una suma adicional).

Después, 1 comparación para determinar si se debe buscar un máximo o un mínimo y 2*D comparaciones más para encontrar el máximo (o el mínimo). En total, para una ventana de NxN i D direcciones:

$$D\cdot(N-1)+1 \text{ sumas y } (2D+1) \text{ comparaciones}$$

El ahorro computacional es significativo, pero debe tenerse en cuenta que las estimaciones obtenidas en estas condiciones sólo son buenas si las imágenes son de elevada calidad (o han sido previamente filtradas para mejorarlas). Como se ha analizado en el apartado anterior, para mejorar las estimaciones en imágenes que no hayan sido sometidas a ningún tratamiento previo de mejora, deben hacerse promedios que aumenten la inmunidad al ruido. Si se consideran promedios en ventanas de 3x3, se puede aceptar que el coste computacional del método se multiplica por 10:

$$10\cdot D\cdot(N-1)+10 \text{ sumas y } 10\cdot(2D+1) \text{ comparaciones}$$

mientras que si se llega a ponderar con el patrón de 21 puntos el número de operaciones pasa a ser de:

$$21\cdot D\cdot(N-1)+21 \text{ sumas y } 21\cdot(2D+1) \text{ comparaciones}$$

más las operaciones necesarias para poder realizar la votación entre las estimaciones.

4.5.3 Elección de un método:

Anteriormente se ha comprobado que las máscaras con las que se obtenían mejores resultados eran las cercanas a 10 píxeles. Puesto que la mayoría de pruebas se han realizado con cortes en ventanas de 9 píxeles de lado (por simetría respecto a un píxel central), empezaremos analizando el caso de ventanas de 9x9 píxeles y 12 direcciones.

El coste para una estimación mediante el método de Rao en una ventana de 9x9 píxeles es de:

1053 sumas y 244 productos

y por el método de los cortes:

97 sumas y 25 comparacione

Si se considera que las comparaciones a realizar tendrán el peso de una resta se puede estimar el coste total por:

122 sumas

El ahorro es significativo, especialmente por lo que se refiere al número de productos que son las operaciones que pesan más. Si se supone que el coste de un producto es 8 veces superior al de una suma, se puede aproximar que empleando el

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

método de Rao se necesitarán 3005 sumes, mientras que en el caso de emplear el método de los cortes sólo 122. Casi 25 veces menos. Sin embargo, el método sólo puede emplearse para imágenes de muy alta calidad, mientras que para imágenes normales se realizarán promedios de hasta 21 estimaciones, con lo que la teórica ventaja quedará compensada casi completamente.

Los cálculos anteriores permiten comparar los distintos métodos en una implementación software del algoritmo. Sin embargo, de cara a un codiseño hardware-software, hay otros factores importantes a considerar. El diseño de un coprocesador específico se justifica por las necesidades de una identificación positiva en tiempo real, de forma que no basta con minimizar el número de operaciones, sino que también debe optimizarse el tiempo de ejecución. Al modificar el método de los cortes, para mejorar la estimación, se ha aumentado el tamaño de la ventana a utilizar, hasta el punto de necesitarse un número de píxeles mayor que con el método de Rao para obtener resultados de calidades similares.

El coste computacional del método de Rao se debe, en gran parte, a la presencia de un número elevado de productos. Pero estas multiplicaciones no necesitan accesos específicos a memoria, puesto que se basan en resultados de operaciones anteriores. De este modo, aunque tengan un coste desde el punto de vista de área, no lo van a representar en la misma proporción desde el punto de vista del tiempo de ejecución. Teniendo en mente una implementación pipeline (ver el capítulo siguiente), que realice los productos al mismo tiempo que las sumas (un producto cada cuatro sumas), se pueden reconsiderar los cálculos.

El coste de RAO pasa a ser de tan solo $13N^2$ *sumas*, mientras que el de los cortes, si consideramos las comparaciones como sumas y no consideramos los productos (para compensar el retardo que nos supone en RAO esperar los resultados de Gx y Gy para operar los productos) podemos considerarlo solo como D(N-1)+1+2D+1 o, lo que es lo mismo, D(N+1)+2.

Incluso para ventanas de 11x11 píxeles, el número de operaciones empleando Rao no es más de 11 veces el usado para estimar mediante el método de los cortes; por lo que, si se acepta la necesidad de promediar con los resultados de los píxeles vecinos (entre 15 y 20 medidas adicionales), acaba siendo mejor emplear el método de Rao.

Además, al aumentar el tamaño efectivo de la ventana a 13x13 píxeles, el número de accesos a memoria será bastante mayor que antes y será el nuevo cuello de botella de cara a la optimización de un coprocesador para el método de los cortes. Así, se concluye que el método de promedio de gradientes de Rao es el más adecuado a las necesidades del sistema de identificación dactilar; se van a emplear, para imágenes de calidad mediana, ventanas de 9x9 píxeles; y se van a discretizar los ángulos a 12 valores. Como se verá más adelante, va a ser interesante aumentar la precisión angular a la hora de identificar el minutiae; con el método que va a implementarse va a ser muy sencillo hacerlo, mientras que aumentar la precisión con el método de los cortes siempre obliga a modificar el tamaño de la ventana de estimación y a aumentar el número de operaciones a realizar por corte.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

4.6 Otras consideraciones

Una vez decidido el método a usar, se realizan una serie de pruebas para comprobar el resultado de sustituir, en el algoritmo de Maio, el método original de Donahue por el de Rao, y analizar el efecto que ello tiene sobre el seguimiento de las crestas. Se trata de comprobar sobre una huella, lo que ya se ha analizado previamente de forma local (de hecho, en este apartado se valida el conjunto de modificaciones propuesto y no sólo el cambio del método de cálculo de la orientación).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

5 Diseño

Se aborda ahora el codiseño hardware – software de un sistema para la extracción del minutiae de una huella dactilar. En una primera etapa se va a validar la versión del algoritmo que incluye las modificaciones propuestas; asimismo se van a analizar las restricciones adicionales que pueden imponer las etapas de segmentación y emparejado.

A continuación se darán algunos detalles de la implementación software, en lenguaje de programación C, del algoritmo completo, así como de su compilación para diversos microprocesadores y de los tiempos de ejecución estimados.

Finalmente se estudiará el perfil de ejecución del algoritmo, analizando las funciones críticas y proponiendo una distribución de tareas que facilite el desarrollo de coprocesadores específicos para la ejecución de las tareas críticas y que permita un diseño final capaz de realizar una extracción de características en tiempo real.

5.1 Validación del algoritmo.

En los dos capítulos anteriores se han presentado una serie de modificaciones de la versión original del algoritmo de seguimiento de crestas; ahora debe procederse a su validación conjunta y a comprobar su efecto real sobre el seguimiento de una huella. Ya se ha justificado cada uno de los cambios propuestos desde un punto de vista local, y se ha verificado que su efecto es mínimo; ahora se trata de confirmar la correcta detección del minutiae de una huella empleando una versión del algoritmo que incorpore todas las modificaciones a la vez. Son de esperar pequeños desplazamientos en las posiciones del minutiae y alguna variación en la orientación de cada minutia, pero debe comprobarse que las variaciones sean mínimas; de hecho, habrá más variación entre el minutiae de dos impresiones distintas de la misma huella que entre las dos versiones del algoritmo.

La principal modificación es la que afecta a la estimación de la orientación, de forma que se va a comprobar que el seguimiento se realiza de forma correcta, y que el algoritmo no se pierde en exceso por culpa de un cálculo erróneo de las orientaciones. El resto de cambios modifican algunos cálculos que podrían afectar a la localización del máximo dentro del corte transversal de una cresta, por lo que se va a verificar que el algoritmo funciona de la forma prevista, es decir: uniendo puntos que son máximos locales a lo largo de una dirección.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Se realizará también un pequeño estudio de los algoritmos de segmentación, previa a las extracción, así como de los requisitos de los algoritmos de emparejado. Por lo que se refiere a la segmentación, se va a analizar la posibilidad de realizarla en base a la imagen direccional, de forma que se comparta la rutina de estimación de direcciones con el algoritmo de extracción del minutiae. Además, al disponerse en este caso de la imagen direccional, se va a comprobar el efecto de emplear la preestimación de direcciones para interpolar las orientaciones locales de las crestas; el inconveniente está en el seguimiento de zonas con cambios fuertes de orientación, pero el ahorro computacional puede ser considerable. En cuanto a los algoritmos de emparejado, se van a estudiar sus características puesto que deben tenerse en cuenta de cara a fijar la resolución mínima con la que debe extraerse el minutiae.

Por último, al final del capítulo, se analiza el perfil de ejecución de la versión software del algoritmo definitivo, de cara a obtener los puntos críticos en su ejecución y fijar la partición hardware / software más adecuada para el diseño de un coprocesador que permita optimizar el tiempo de ejecución y realizar una extracción en tiempo real del minutiae de la huella.

5.1.1 Seguimiento con el algoritmo modificado.

Una vez modificadas las rutinas correspondientes se realiza el seguimiento de la imagen, con objeto de comprobar si hay mucha variación respecto del método original.

Antes de mostrar los resultados deben dejarse claros ciertos aspectos. En primer lugar hay que tener en cuenta que son muchos los factores que determinan en qué momento debe dejarse de seguir una cresta y, por tanto, no puede atribuirse cada parada a una estimación errónea. De la misma forma, una estimación poco precisa puede pasar desapercibida si el seguimiento no se detiene. Se trata de ver que no hay variaciones sustanciales, y que el conjunto del algoritmo es lo suficientemente robusto como para seguir las crestas corrigiendo algunos posibles errores de estimación de la orientación.

También se debe hacer notar que un cambio en un punto del seguimiento va a afectar al modo en cómo continúan el resto de iteraciones, por lo que muchas de las diferencias van a deberse a pequeños cambios anteriores, de forma que se pueden atribuir al azar algunos efectos presentes en un algoritmo y no en el otro. Así, la comparación va a ser difícil y, para no pecar de un exceso de subjetividad, se realizará un análisis de los puntos en los que se detecten cambios para ver si éstos son justificables. Una ejecución paso a paso del algoritmo puede explicar algunas diferencias que sin un análisis detallado se considerarían errores. Así, dos finales de cresta que aparecen en una extracción, separados por sólo 5 píxeles, no se detectan en la otra, por haberse filtrado al estar separados, en la otra ejecución del algoritmo, por tan solo 4; en este caso es evidente que no se puede considerar errónea una ejecución que difiere de otra en tal solo un píxel.

Cualquier método de extracción, incluso la realizada manualmente por un experto, depende de pequeños detalles para detectar o no algunas minutias o para generar o no minutias falsas; como acaba de verse, un pequeño desplazamiento de un

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

píxel en la localización de un final de cresta puede provocar que se filtre o no, o incluso que pase a detectarse como una bifurcación. Por ello, interesa más una visión conjunta, que confirme el correcto seguimiento de la huella, que el detalle del número de minutias falsas introducidas o de minutias no detectadas; y ello tanto si se realiza la estimación local de direcciones punto a punto, como si se interpola la preestimación de la imagen direccional. Asimismo, son muchas las razones que pueden provocar el final en el seguimiento de una cresta, pero el método es lo suficientemente robusto como para permitir diversas pérdidas y reencontrar la cresta posteriormente mientras realiza el seguimiento de otra sección de la misma. Por tanto, no va a ser grave que ocurra esto, ni aún cuando sea debido a una mala estimación de la dirección, aunque debe intentarse optimizar el algoritmo y minimizar las pérdidas, puesto que el cambio de contexto, asociado a reiniciar el seguimiento en otro punto, va a comportar un incremento en el tiempo de ejecución.

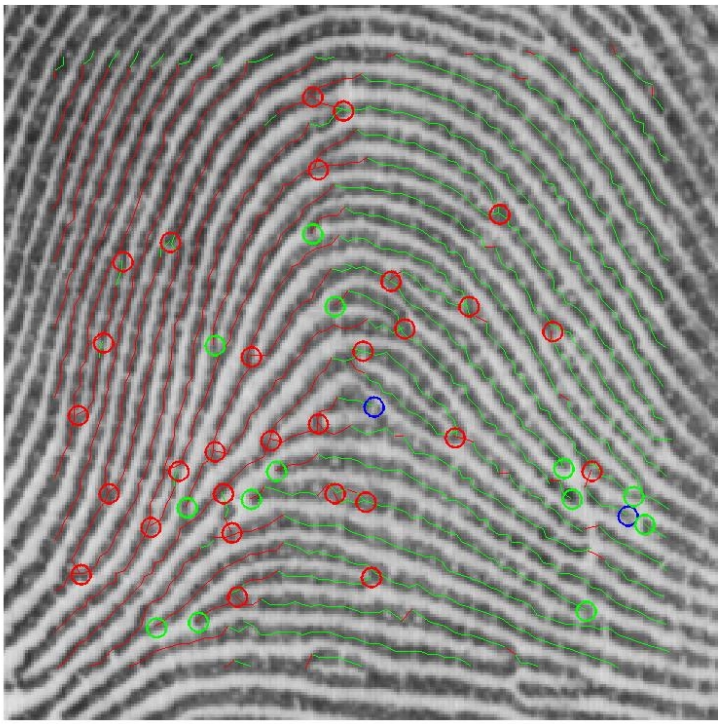


Figura 5.1 Seguimiento de crestas mediante el algoritmo de Maio.

La figura 5.2 muestra el resultado de aplicar la versión modificada del algoritmo a la misma imagen a la que se había realizado previamente el seguimiento de crestas mediante el algoritmo original (figura 5.1).

En las figuras se muestra, de cara a poder evaluar mejor la causa de las posibles diferencias, un detalle de la forma en que se ha realizado el seguimiento, así como el resultado obtenido. Los círculos representan las minutias detectadas, representándose en rojo las que corresponden a bifurcaciones, y en verde o azul, dependiendo del motivo

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

que haya conducido a terminar el seguimiento, las de tipo final de cresta. Las líneas rojas y verdes muestran el seguimiento que se ha realizado en cada cresta. Cada vez que hay un cambio de color indica que el seguimiento se ha detenido; en el análisis debe tenerse en cuenta que la imagen se recorre en un orden prefijado y que, a partir de un punto inicial, se empieza en una dirección y, una vez se detiene, se reemprende en el mismo punto inicial en dirección contraria. Es habitual que el seguimiento de muchas crestas empiece por el centro, puesto que coincide con su parte superior, y que el cambio de color corresponda a dicho punto inicial y no a una interrupción.

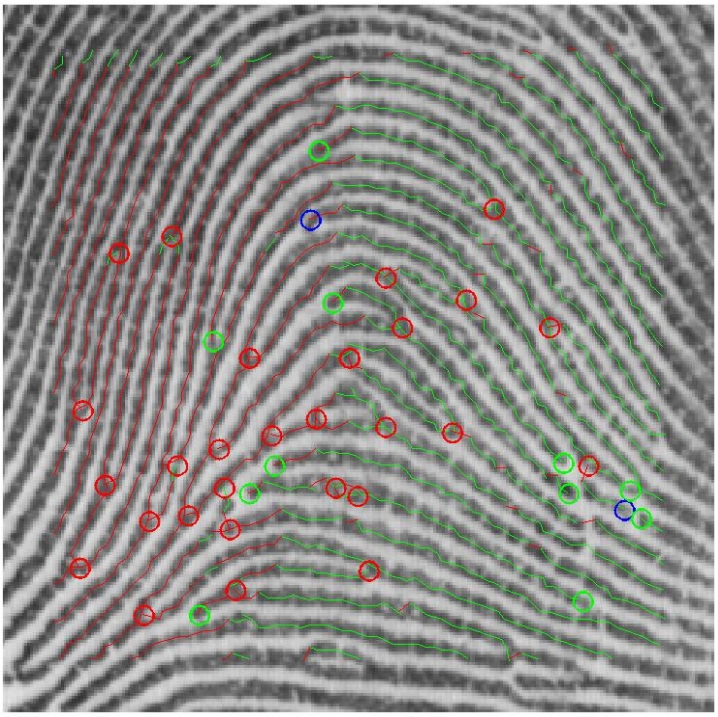


Figura 5.2 Seguimiento de crestas mediante el algoritmo modificado.

También pueden presentarse cambios en las zonas próximas a los bordes de la imagen, debido a tolerancias del propio algoritmo. No son de extrañar cambios de dirección (color) con tramos de seguimiento de poca longitud. En las bifurcaciones siempre aparecerá alguna transición, puesto que el algoritmo, en una primera iteración, se decantará por una de las ramas, detectándose la bifurcación por una intersección posterior.

Así, se puede apreciar un comportamiento correcto de las dos versiones del algoritmo, que sólo se pierden en algunos puntos por efecto de los poros o de cambios bruscos de dirección, que van a ser detectados como finales de cresta según el criterio de detención por curvatura excesiva. Parece que la versión modificada, que emplea el método de Rao, se ha perdido en la zona superior derecha un poco más que el método original, pero en las otras zonas es al revés, y la mayoría de detenciones en el

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

seguimiento se producen en los mismos puntos, lo que lleva a pensar que no se trata de un problema debido a las modificaciones efectuadas en el algoritmo.

5.1.2 Seguimiento con preestimación.

En el seguimiento de las crestas se están realizando medidas de orientación cada 3 píxeles aproximadamente; a cada iteración se centra la ventana en el nuevo punto y se realiza una nueva estimación de la dirección a seguir. El resultado no debería ser muy distinto entre puntos próximos, y se podría pensar en distribuir la imagen en una cuadrícula y realizar estimaciones centradas en cada cuadro. Según el tamaño de cada célula y en función de la máscara de estimación empleada, la ventana se puede solapar o no con las células vecinas. Si se guardan las direcciones obtenidas en memoria, se puede evitar hacer la estimación durante el seguimiento y coger en cada momento el valor de la célula más cercana al píxel que se esté evaluando.

La memoria que se necesita para guardar esta información es bastante menor que la que se utiliza para guardar la imagen. Si se emplea una rejilla del mismo tamaño que la ventana de estimación, resulta que sólo hace falta guardar una dirección por cada ventana, por lo que, si ésta es de 10x10 píxeles, sólo se precisa guardar una dirección por cada 100 píxeles de la imagen. Además, no va a necesitarse un byte para cada dirección, puesto que, después de discretizar, se pueden codificar 16 direcciones distintas con 4 bits, dividiéndose nuevamente por dos las necesidades de memoria. Finalmente, entre las dos reducciones, para la imagen direccional se precisa una memoria 200 veces menor que para la imagen.

Mediante preestimación va a disminuir el número de veces que se ejecuta la rutina de cálculo de la orientación (mediante el algoritmo de Maio se tienen valores medios de unas 6000 estimaciones por huella) con la consiguiente disminución en el tiempo total de extracción del minutiae; incluso aumentando la calidad de la estimación (por ejemplo utilizando una máscara de 13x13 píxeles), y considerando la lógica de control adicional, todavía se obtiene una reducción más que interesante, de alrededor de un orden de magnitud en el número total de operaciones a ejecutar.

Como contrapartida no se está evaluando la dirección en el preciso punto de interés e, incluso en el caso de emplear técnicas de interpolación, pueden obtenerse resultados poco fiables cuando se están procesando zonas de gran variación (por ejemplo alrededor de un punto delta). Además, la lógica asociada a dicha interpolación va a tener un coste adicional, tanto mayor cuanto mayor sea su fiabilidad. Así, va a ser necesario buscar el punto de equilibrio entre calidad de la estimación y la carga computacional asociada, de cara a decidir si hacer o no la preestimación. Si reduciendo el tamaño de la ventana no hay variaciones notables respecto a un seguimiento con preestimación, puede ser más interesante no realizarla y centrar las ventanas en cada punto.

Como en el punto anterior, se realizan ahora comparaciones entre los resultados obtenidos con y sin preestimación para los dos algoritmos de cálculo de orientación. La figura 5.3 muestra el resultado se seguimiento al añadir preestimación al algoritmo original.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

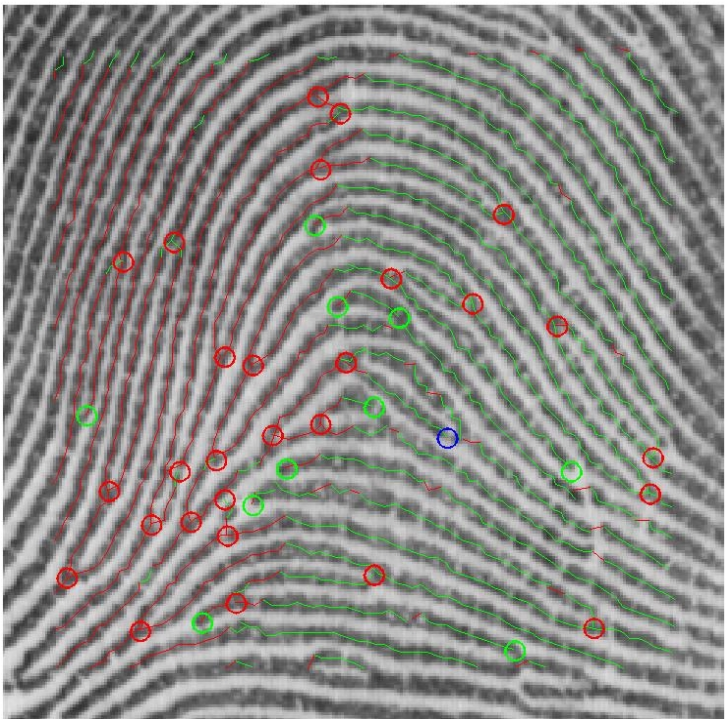


Figura 5.3 Seguimiento mediante el algoritmo original de Maio con preestimación.

Si se compara este resultado con el de la figura 5.1 se aprecia una gran similitud. Incluso aparecen zonas en las que ahora el algoritmo no se detiene mientras que antes sí que se perdía la cresta. En todo caso, las pequeñas variaciones pueden achacarse a la casualidad y concluirse que el seguimiento se ha detenido, básicamente, en los mismos sitios, con lo que la preestimación no lleva a resultados muy distintos.

El tamaño de la rejilla empleada para determinar las ventanas de preestimación ha sido el mismo que el de la máscara de estimación de la orientación, de forma que ya podía preverse que no habría grandes diferencias; en todo caso las habría en las zonas centrales en las que se concentran los mayores cambios en las pendientes de las crestas. La ventana empleada, de 11x11 píxeles, es similar al tamaño de los círculos que marcan las minutias, con lo que inspeccionando la imagen ya se puede pensar en la poca variación que va a existir entre distintos puntos de la zona abarcada por la circunferencia en relación al valor en el mismo centro.

Si se emplea preestimación junto con el algoritmo de Rao se obtienen los resultados de la figura 5.4.

También en este caso se aprecia una ligera mejoría respecto del algoritmo sin preestimación, pero sin existir grandes variaciones entre las distintas opciones. Tampoco en este caso se puede decir que las variaciones sean atribuibles al método sino al azar. En general el seguimiento se detiene por razones diversas, básicamente la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

presencia de poros y de zonas ruidosas, pero en ningún caso por motivos atribuibles a estimaciones de orientación erróneas. Así se puede pensar que el cambio en la forma de estimar la orientación no presentará diferencias sustanciales respecto del caso original.

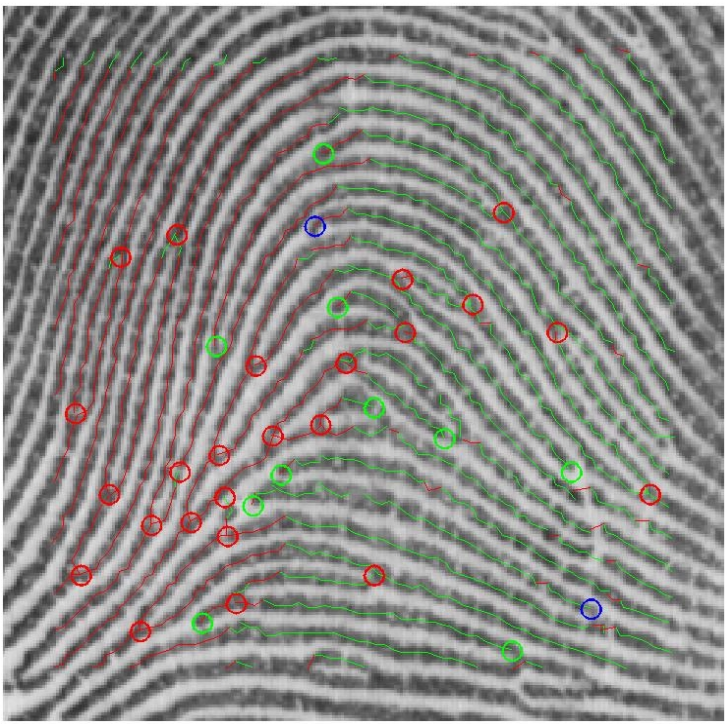


Figura 5.4 Seguimiento mediante el algoritmo original de Rao con preestimación.

5.1.3 Consideraciones adicionales

Antes de empezar el co-diseño hardware /software del sistema se van a analizar las necesidades particulares asociadas a otros procesos ligados a la identificación automática: la segmentación y el emparejado.

Mediante la segmentación se van a filtrar las partes de la imagen que, por su baja calidad y/o su elevado nivel de ruido, no son tanto una fuente de información sino más bien la causa de la introducción de falsas minutias que acaban generando errores en la identificación. Se trata de una etapa del proceso que, de un modo u otro, está presente en todos los métodos automáticos de identificación (en [MAI-97] se hace referencia a una segmentación manual de las zonas ruidosas previa a la extracción).

Por lo que respecta al emparejado de huellas, este trabajo no lo incluye, pero el algoritmo a emplear depende del tipo de representación utilizado y puede estar muy ligado al proceso de extracción. A causa del ruido y de la distorsión introducida durante

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

la captura de la huella, así como de la propia inexactitud del algoritmo de extracción, el minutiae que se va a asociar a una impresión dactilar va a tener errores en forma de minutias perdidas, añadidas o las que podríamos llamar ruidosas.

El objeto del emparejado es la correcta identificación, que se ve dificultada por los errores introducidos durante las fases de captura y extracción. Los algoritmos de emparejado se parametrizan para permitir cierta tolerancia a los efectos de traslación, rotación y deformación asociados a la adquisición de las huellas; sin embargo, la elección de estos parámetros también se verá condicionada por efecto de los errores en la extracción. En este apartado se van a analizar las características típicas de los algoritmos de emparejado por minutiae, de forma que se fijen algunas condiciones de contorno a cumplir por el algoritmo de extracción.

5.1.3.1 Segmentación.

Aunque son diversas las soluciones que pueden consultarse en la bibliografía para resolver el problema de la segmentación [HAR-85], la mayor parte de ellas pueden clasificarse en dos grandes grupos: los métodos basados en el análisis de la varianza de la imagen [PAL-93] [RAT-95] y aquellos que segmentan a partir de la información de la imagen direccional [MEH-87], [JAI-97], [BAZ-00].

Las dos variantes presentan resultados interesantes, y a menudo se combinan para mejorar los resultados [MEH-89]; en cualquier caso, se trata de soluciones que consideran la segmentación desde un punto de vista genérico, de forma aislada del resto de etapas del proceso de identificación. Lo que se pretende ahora, sin embargo, es la integración de la segmentación dentro del proceso, aprovechando al máximo las similitudes con otras etapas para optimizar los recursos disponibles. Desde este punto de vista, se descartan los métodos basados en la varianza, puesto que significan una carga computacional completamente nueva, y se escogen los métodos basados en el análisis de las orientaciones locales como los más adecuados.

Una primera forma de abordar la segmentación a partir de la imagen direccional es la presentada por Mehtre [MEH-87], que analiza el histograma de las direcciones obtenidas para cada uno de los píxeles dentro de una ventana como la forma de identificar si la región pertenece al fondo o al primer plano; las regiones no clasificables identificarían las zonas ruidosas. Esta alternativa, de bajo coste computacional, sería la empleada si se utilizase el método de los cortes para obtener la imagen direccional; sin embargo, precisa de ciertos recursos computacionales por lo que se refiere a la lógica asociada a la toma de decisiones y necesitaría asimismo de una imagen direccional calculada prácticamente para todos los píxeles de la imagen.

En otros casos se trata de asociar a las orientaciones del mapa de direcciones un valor numérico que mida la uniformidad de los vectores gradiente asociados a cada uno de los píxeles de la ventana. De esta forma se puede tener una idea del grado de acierto que pueden presentar las estimaciones de las orientaciones de las crestas de la huella respecto de su dirección real [JAI-97a].

La solución adoptada es la presentada por Kass y Witkin [KAS-87] y empleada por Bazen [BAZ-00], que deriva de la obtención de la ‘coherencia’, una medida de la fiabilidad asociada a las estimaciones de orientación mediante el algoritmo de Rao. De

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

esta forma, el algoritmo que emplee dicha dirección, en función de ciertas condiciones de contorno adicionales, puede decidir si utilizar como correcta una estimación etiquetada como poco fiable o si realizar alguna corrección adicional.

Imaginemos, por ejemplo, que realizamos un seguimiento mediante el algoritmo de Maio y que nos encontramos en una zona muy cambiante, una delta o un punto cercano al núcleo. Al hacer una estimación de la dirección empleando una ventana grande se obtendrá un resultado que, a causa de las variaciones de las crestas en la zona tratada, no será muy bueno; si se dispusiera de algún parámetro indicativo de la calidad de la estimación, se podría repetir el cálculo utilizando una ventana de estimación menor con el objeto de obtener un mayor grado de fiabilidad.

Así, si la estimación de dirección en un punto es poco fiable, se puede sustituir la orientación por la correspondiente a algún píxel vecino. Si esta segunda medida tampoco resulta ser fiable se podría suponer que se está estudiando una zona muy ruidosa de la imagen y etiquetarse como tal para, a partir de ese momento, dejar de considerarla en el proceso de extracción de minutias, es decir, realizar una segmentación en función de la calidad de les estimaciones de dirección.

Este valor puede emplearse para segmentar la imagen, puesto que las zonas de la huella con buena calidad presentan coherencias próximas a 1, mientras que en las zonas más ruidosas el valor obtenido toma valores próximos a 0. En otros casos, la coherencia puede emplearse como parámetro de calidad para ajustar el tamaño de las ventanas de estimación de forma dinámica; en estos casos se supone que un valor de coherencia bajo va a corresponder a las zonas de la imagen con una mayor curvatura de las crestas papilares; en estos casos, para corregir el error asociado, se ajusta dinámicamente el tamaño de las ventanas de estimación a las necesidades locales de la imagen, para así poder asegurar un valor mínimo de coherencia [RAT-95], [JAI-97], [JAI-97a].

Asumida como imprescindible la segmentación previa para minimizar el número de falsas minutias, y puesto que se ha elegido el método de Rao (con una ventana de 11x11 píxeles) como el más adecuado para el cálculo de la orientación de las crestas (de acuerdo a las necesidades típicas de extracción del minutiae de una imagen de huella dactilar de calidad media), se va a considerar la segmentación por el método de la coherencia de los gradientes como el más adecuado para optimizar los recursos disponibles. Esta etapa de segmentación va a llevar asociada la obtención de la imagen direccional, que va a compartir la rutina de estimación de la orientación con el algoritmo de extracción; dicha imagen podrá, opcionalmente, ser empleada para disponer de una preestimación de las orientaciones.

La coherencia se define como la relación entre el módulo de la suma de los gradientes G_x y G_y elevados al cuadrado, de cada uno de los píxeles de la ventana, y la suma de los módulos de los gradientes G_x y G_y al cuadrado. A partir del vector gradiente $[G_x\ G_y]^T$, calculado en un píxel de la imagen se obtiene que (ver apartado 4.2):

$$\begin{bmatrix} \overline{G_{s,x}} \\ \overline{G_{s,y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_W G_{s,x} \\ \sum_W G_{s,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} - G_{yy} \\ 2G_{xy} \end{bmatrix}$$

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

donde

$$G_{xx} = \sum_W G_x^2$$
$$G_{yy} = \sum_W G_y^2$$
$$G_{xy} = \sum_W G_x G_y$$

de forma que la coherencia se expresa como:

$$Coh = \frac{\left|\sum_W (G_{s,x}, G_{s,y})\right|}{\sum_W \left|(G_{s,x}, G_{s,y})\right|} = \frac{\sqrt{(G_{xx} - G_{yy})^2 + 4 \cdot G_{xy}^2}}{G_{xx} + G_{yy}}$$

Si los vectores de los gradientes elevados al cuadrado tienen la misma dirección, entonces la suma de los módulos de los vectores va a ser igual al módulo de la suma de los vectores, obteniéndose un valor de la coherencia igual a 1. Por otro lado, si los gradientes están distribuidos uniformemente en todas las direcciones, entonces la suma de los vectores va a ser igual a 0. Es decir, la coherencia va a variar entre 1 para las zonas de mayor calidad, y 0 para las zonas que únicamente contengan ruido.

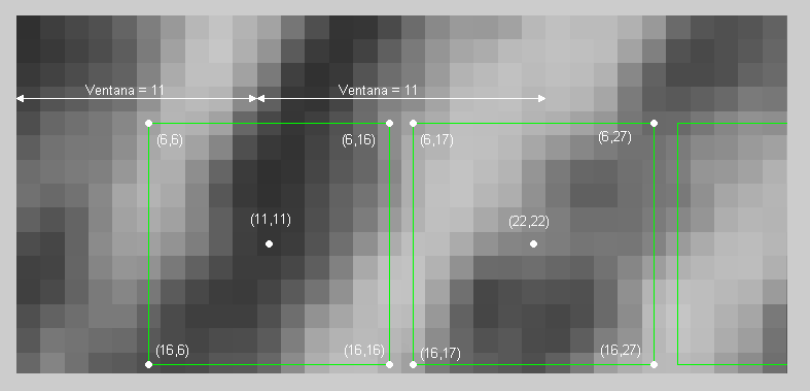


Figura 5.5 Seguimiento mediante el algoritmo original de Maio con preestimación.

La imagen se divide en ventanas, como puede verse en la figura 5.5, y se asigna a todos los píxeles de cada ventana los valores de orientación y coherencia calculados para el correspondiente píxel central. Por un lado, los valores de orientación se han mostrado efectivos para realizar un seguimiento con preestimación de acuerdo al apartado 5.1.2. Por otra parte, se ha desarrollado un algoritmo de segmentación basado en las coherencias calculadas que funciona correctamente en imágenes de calidad media.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

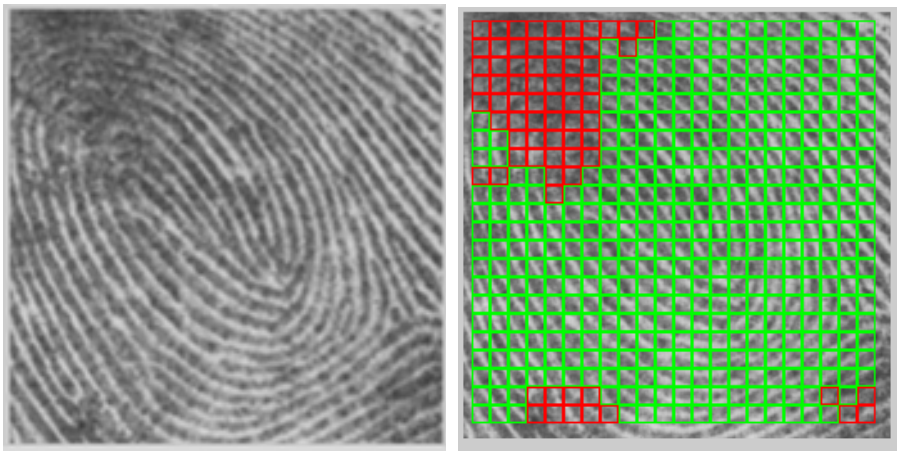


Figura 5.6 Zonas segmentadas en una imagen ruidosa.

Para realizar dicha segmentación se han elegido dos umbrales que definen tres niveles de calidad: mala ($0 \leq$ coherencia < 0.4), buena ($0.6 \leq$ coherencia ≤ 1) e intermedia ($0.4 \leq$ coherencia < 0.6). Una vez clasificadas las ventanas en función de su nivel de calidad, se decide cuales se segmentan y cuales no en función de su calidad y de la de sus vecinas, en un proceso de filtrado en dos etapas. El resultado es el etiquetado de ciertas regiones de la imagen como no adecuadas para la extracción del minutiae (marcadas en rojo en la figura 5.6).

Debe hacerse notar que este trabajo no incluye el diseño específico para la etapa de segmentación; lo único que se ha pretendido es dejar constancia de su efectividad cuando se emplea para la estimación de orientaciones el mismo algoritmo de Rao que se emplea en el proceso de extracción. De esta forma se podrían compartir recursos en las dos etapas; sólo debería modificarse el coprocesador diseñado para la etapa de extracción de forma que calculase los valores asociados de coherencia con objeto de utilizarlos en una fase previa de segmentación.

5.1.3.2 Emparejado.

En el capítulo 2 se han comentado diferentes alternativas para el emparejado de huellas, sin embargo se deben considerar sólo aquellas técnicas que se basan en comparación de minutiae. El método que se ha analizado con más detalle es una variación del propuesto por Mital y Teoh [MIT-97].

El método realiza un emparejado estructural en dos fases; en la primera etapa se estudian las características locales, en las que cada una de las minutias, tanto de la muestra como del patrón, se caracteriza en relación a sus vecinas más próximas. En general, para caracterizar una minutia, serán suficientes las 8 o 10 minutias vecinas más cercanas, pudiéndose limitar la distancia máxima a considerar como vecindad. Como se indica en la figura 5.7, a cada minutia m_i se le asocian sus j vecinas más próximas y se caracteriza cada pareja por su separación y por los ángulos relativos α y β.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

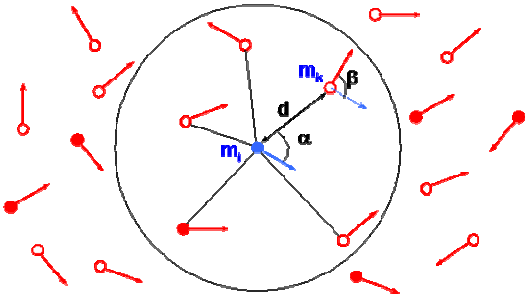


Figura 5.7 Caracterización local de una minutia.

La comparación entre las estructuras locales de la muestra y del patrón se va a emplear para seleccionar la que será la minutia central y realizar el alineamiento entre las dos huellas. En una segunda fase, una vez fijadas las minutias centrales de las dos representaciones dactilares, se procede a realizar la correlación por características globales; se caracterizan todas las minutias con relación a la central mediante los tres parámetros anteriores y de la comparación con el patrón se determina el número de coincidencias para determinar si se trata o no de dos imágenes de la misma huella.

Como se deduce, las distancias y los ángulos se calculan de forma relativa para cada pareja de minutias, por lo que de cara a la efectividad del método va a ser determinante la fiabilidad con la que se disponga de la posición y de la orientación de las minutias de la huella. Por lo que se refiere a las coordenadas no se dispone de margen; sin embargo, sí que se deberá cuidar al máximo la precisión asociada al cálculo de las direcciones de las crestas. Así será imprescindible, para una buena caracterización que permita la posterior identificación, utilizar un algoritmo fiable de cálculo de orientaciones (el método de Rao será más adecuado que el de los cortes) y que proporcione una resolución suficiente; de esta forma se va a adecuar el algoritmo final de Rao para disponer de una precisión mayor, puesto que la discretización a 12 orientaciones, si bien se ha mostrado adecuada para la fase de seguimiento, no será suficiente para una identificación fiable.

5.2 Codificación.

En este apartado se detallan la estructura y el funcionamiento de la versión definitiva del algoritmo. En primer lugar se justifica la validez del código implementado, mientras que después se presenta la estructura del código y se detallan sus funciones principales. El programa se ha descompuesto en subrutinas, aportándose así claridad y permitendose la optimización por separado de cada una de las funciones. Además, de esta forma se puede analizar fácilmente el perfil de ejecución del algoritmo y encontrar los procesos críticos de cara a la minimización del tiempo de ejecución. Esta detección de los cuellos de botella es imprescindible para una correcta partición del algoritmo, separando las funciones que se van a seguir realizando por software de aquellas tareas para las que se va a implementar un coprocesador específico para realizarlas vía hardware.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En algunos casos, la conveniencia de realizar funciones separadas se vuelve necesidad al tratarse de funciones que se emplean en distintas partes del algoritmo, como es el caso de la función Punto_siguiente(), que va a llamarse también durante el proceso de creación de las secciones transversales, o la función Tg_dir(), que también se ejecuta desde el bucle principal.

5.2.1 Validación.

La bondad del código de ha comprobado validando el minutiae extraído en el mismo conjunto de huellas empleado por Maio y Maltoni en su artículo [BIAS]. Se trata de un conjunto formado por 7 imágenes elegidas de la base de datos de huellas dactilares del NIST [WAT-92], 4 huellas de un conjunto de muestras del FBI y 3 huellas adquiridas mediante un dispositivo optoelectrónico. La tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos y los compara con los presentados en [MAI-97] indicando, para cada huella, el número de minutias no detectadas (d), las no existentes (f) y las intercambiadas de tipo (x).

		original			modificado		
huella	minutiae	d	f	x	d	f	x
1	33	0	2	7	0	2	5
2	29	3	1	4	0	2	3
3	28	1	2	4	1	3	4
4	37	3	0	4	4	1	4
5	22	0	0	3	0	3	2
6	23	0	0	4	0	2	2
7	31	2	1	2	1	2	3
8	31	1	0	3	2	0	1
9	21	1	10	1	0	11	2
10	22	1	0	4	1	2	4
11	32	3	5	4	3	6	5
12	33	3	8	2	2	6	5
13	20	0	0	4	2	1	4
14	37	0	5	6	3	3	4

Tabla 5.1 Comparación entre algoritmos.
(la segunda columna indica el número de minutias reales detectado manualmente)

Como ya se ha venido analizando en los capítulos anteriores, las huellas dactilares suelen tener alrededor de 30 minutias y es normal que los sistemas automáticos de identificación cometan errores en su extracción. La legislación, que difiere de un país a otro, establece que una coincidencia de entre 11 y 14 minutias es suficiente para validar legalmente una identidad. Las diferencias con los resultados presentados por Maio y Maltoni son escasas y, en los dos casos se está dentro de los márgenes aceptables en los sistemas automáticos de identificación.

Analizando detalladamente los resultados del conjunto de 14 imágenes se observa que el número de minutias perdidas es bajo, y muy similar en los dos casos (19 frente a 18 minutias perdidas de las 399 minutias totales); se comprueba también que el

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

número de minutias intercambiadas de tipo es muy parecido (48 frente a 52) y, en muchos casos, poco relevante puesto que es habitual que los sistemas de emparejado no tengan en cuenta el tipo de minutia. Finalmente, la versión del algoritmo presentada aquí tiene un número más alto de minutias falsas, lo que no es tanto un inconveniente para la correcta identificación, sino una dificultad añadida que ralentiza el procesado automático; de todos modos, debe tenerse en cuenta que en nuestro caso la segmentación se ha realizado mediante un proceso software automático mientras que los resultados de Maio y Maltoni incorporan una segmentación realizada de forma manual y subjetiva (y por lo tanto no incorporable al sistema automático de identificación).

5.2.2 Extracción.

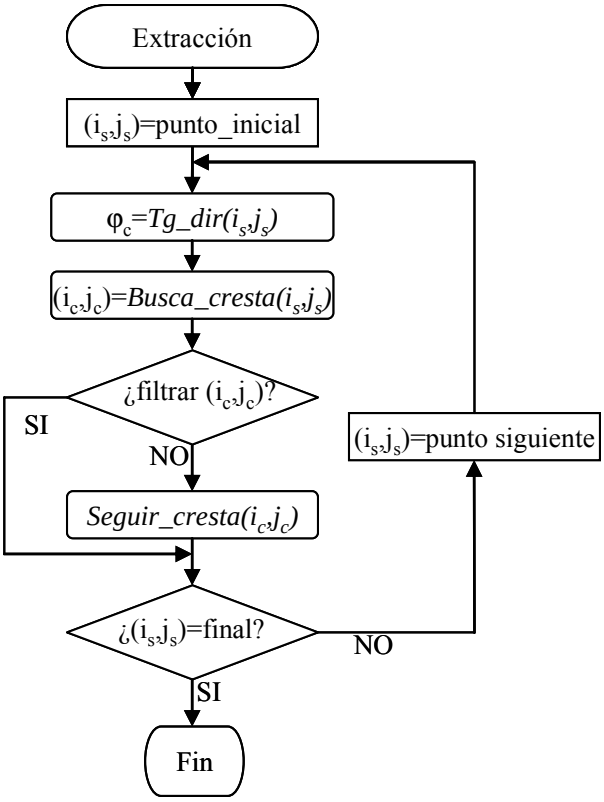


Figura 5.8 Diagrama de flujo del bucle principal.

Se trata de recorrer la totalidad de la imagen dactilar siguiendo un esquema que permita realizar la extracción de todas las crestas de la huella; en definitiva, se trata de ir ejecutando la rutina de seguimiento de crestas con los valores iniciales adecuados, de forma que se pueda asegurar que no queda ninguna línea por recorrer. La solución adoptada superpone una rejilla ficticia a la imagen, de forma que todos los nodos de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

dicha red son los puntos iniciales del seguimiento. A partir de dichos nodos, y antes de llamar a la función Seguir_cresta(), el algoritmo busca la cresta más cercana y verifica que no se trate de una zona segmentada.

El bucle anterior asegura que se recorren todas las crestas, pero también debe tenerse la certeza de seguirlas una única vez. Con este objeto se emplea una imagen auxiliar **T**, que etiqueta las crestas ya analizadas. Dicha imagen se usa al principio de la rutina seguir_cresta, para no reseguir crestas ya analizadas, y también durante el seguimiento propiamente dicho, para poder verificar la intersección con otras crestas y localizar las bifurcaciones.

5.2.3 Seguimiento de crestas.

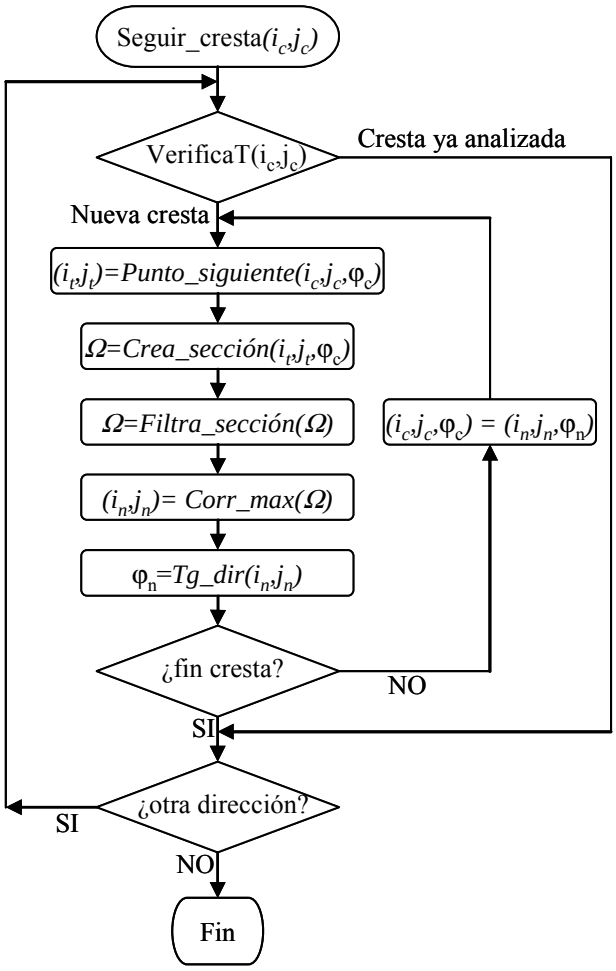


Figura 5.9 Diagrama de flujo de la función de seguimiento de crestas.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La función Seguir_cresta() implementa el proceso descrito en el capítulo 3, mediante el cual se avanza sobre máximos consecutivos de la imagen; el proceso se realiza mediante llamadas a distintas funciones que, como se verá más adelante, serán las que conllevan un mayor coste computacional y las que son candidatas a ser implementadas mediante hardware. Al final del bucle el algoritmo mira si se cumple alguno de los criterios de parada; realmente el diagrama de flujo de la figura 5.9 resume, en una sola operación, un número elevado de líneas de código en las que se buscan finales de cresta, se mira si se ha salido de la zona de interés de la huella y se consulta la imagen auxiliar T para localizar posibles bifurcaciones. El bucle se sigue dos veces, en direcciones opuestas, puesto que el punto inicial podría encontrarse en la zona central de la cresta

5.2.4 Cálculo de la orientación

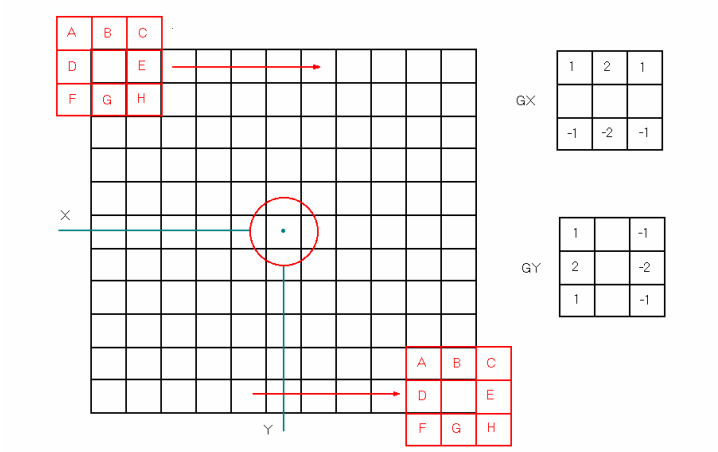


Figura 5.10 Cálculo de los gradientes G_x y G_y en una ventana W.

De acuerdo con lo visto en el capítulo anterior la orientación de la cresta, según el método de Rao aplicado a una ventana W de n por n píxeles (ver figura 5.10), vendrá dada por:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) & si\ \overline{G_{s,x}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) + \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) - \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} < 0 \end{cases}$$

donde:

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$\overline{G_{s,x}} = \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2$$
$$\overline{G_{s,y}} = 2\sum_W G_x G_y$$

De esta forma la función encargada de calcular la orientación va a iterar, dentro de la ventana de estimación, calculando los gradientes G_x y G_y y empleándolos para obtener los valores de las componentes del vector promedio de cuadrados ($\overline{G_{s,x}}$, $\overline{G_{s,y}}$). En este punto sólo falta calcular el arco tangente del cociente, que va a obtenerse de forma tabulada después de normalizar los valores de $\overline{G_{s,x}}$ y de $\overline{G_{s,y}}$. La normalización se describirá en detalle al explicar la implementación hardware realizada; en el fondo se trata de ir dividiendo por dos (mediante desplazamientos de 1 bit) los valores de $\overline{G_{s,x}}$ y de $\overline{G_{s,y}}$ para localizar sus 4 bits más significativos y emplearlos entonces para direccionar una tabla de 256 posiciones.

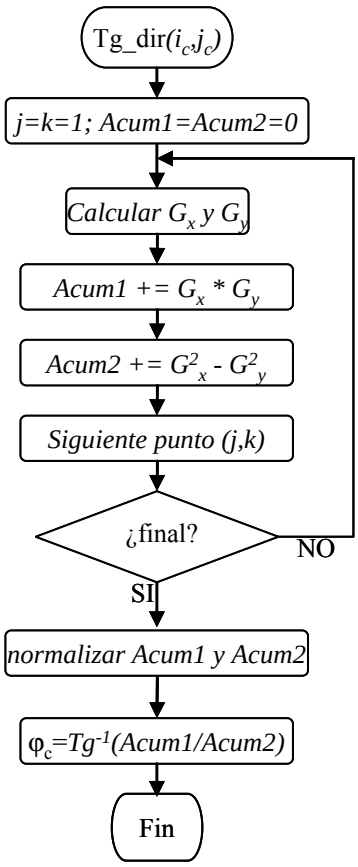


Figura 5.11 Diagrama de flujo de la función de estimación de orientación.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Debe hacerse notar que Acum1 almacena la mitad del valor de la ecuación correspondiente; al final del bucle, y mediante un desplazamiento, se realiza la multiplicación por 2. Otro aspecto importante de cara a minimizar el coste computacional del algoritmo está en aprovechar el tamaño de las imágenes (256 x 256 píxeles) para evitar productos en el momento de indexar posiciones de memoria (se emplea un byte para la fila y otro para la columna, obteniéndose la dirección de 16 bits sin ninguna operación adicional).

5.2.5 Desplazamiento de μ puntos.

La función Punto_siguiente() calcula los desplazamientos a efectuar en cada uno de los ejes cartesianos (filas y columnas), para poder avanzar por la imagen a partir de unos parámetros polares (dirección y número de píxeles). Con objeto de minimizar el coste computacional asociado se han tabulado los posibles valores a retornar.

La función diseñada aprovecha las propiedades de los ángulos suplementarios y opuestos para minimizar el tamaño de la tabla necesaria, almacenándose así un único cuadrante. Además, teniendo en cuenta las propiedades de los ángulos complementarios se puede emplear la misma tabla para obtener los desplazamientos en los dos ejes. Por lo tanto, al trabajar sólo con 12 posibles direcciones, se ha empleado una única tabla de 7x7 valores, que es suficiente para obtener los desplazamientos, de entre 1 y 7 píxeles, en cada uno de los ejes.

Las características de la implementación definitiva van a determinar la elección final entre el empleo de una tabla mayor (o incluso una para cada coordenada), o pagar el precio de incluir un par de comparaciones en el código para minimizar las necesidades de la memoria asociada a la tabla.

5.2.6 Obtención de la sección transversal Ω.

Maio y Maltoni proponen el algoritmo de Bresenham [BRE-65] para obtener la sección transversal Ω. Se trata de un método de probada eficiencia, pero precisa de los puntos inicial y final de la sección a obtener. En el caso que nos ocupa, sin embargo, no se dispone de dichos puntos, sino que se conocen la longitud y la orientación de la sección deseada, así como el punto central; ello obliga a emplear las funciones seno y coseno y a multiplicar por la longitud para calcular los puntos inicial y final y poder emplear el citado algoritmo de Bresenham.

La solución adoptada ha sido, una vez más, la de tabular los posibles casos. Las secciones deseadas son de 15 puntos, por lo que se calculan los primeros 7 píxeles mediante desplazamientos en una dirección a partir del punto central y posteriormente se obtienen el resto de puntos por simetría. Parte de las combinaciones eran necesarias para obtener los desplazamientos durante el avance por las crestas; por esta razón la función anterior (Punto_siguiente) puede retornar cualquiera de todos los posibles

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

desplazamientos de entre 1 y 7 píxeles para cada una de las 12 posibles direcciones y cada uno de los dos sentidos.

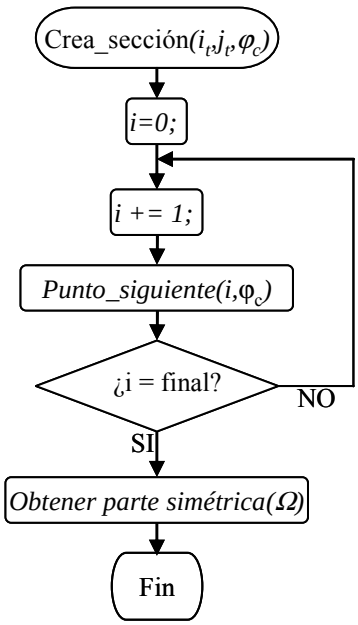


Figura 5.12 Diagrama de flujo para la obtención de la sección Ω.

5.2.7 Filtrado de la sección y localización del máximo.

En su trabajo, Maio y Maltoni disponían una etapa de filtrado y correlación con la máscara gausiana, previa a la rutina de localización del máximo. En nuestro caso se ha separado la etapa de filtrado, en la que el coste se debe más al acceso a los píxeles de la imagen que al propio procesado, mientras que se han unido las otras dos en una única función que simultanea la convolución con la localización del máximo.

La primera parte se apoya en la rutina Punto_siguiente() para combinar la sección de interés con las secciones paralelas anterior y posterior (ver figura 5.13). En esta fase se evita el promediado, evitándose una división que no afecta a la localización del máximo.

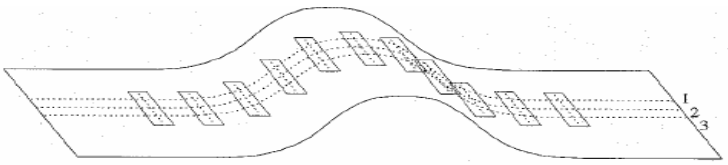


Figura 5.13: Representación de las secciones paralelas propuestas: 1= Ω+1, 2= Ω, 3= Ω-1.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La fase siguiente realiza, mediante desplazamientos y sumas, la convolución con la máscara gausiana modificada, a la vez que se realizan las comparaciones para localizar un máximo local; de este modo en muchos casos se evita la realización completa de la convolución, con el consiguiente ahorro de tiempo de procesado.

5.2.8 Criterios de parada

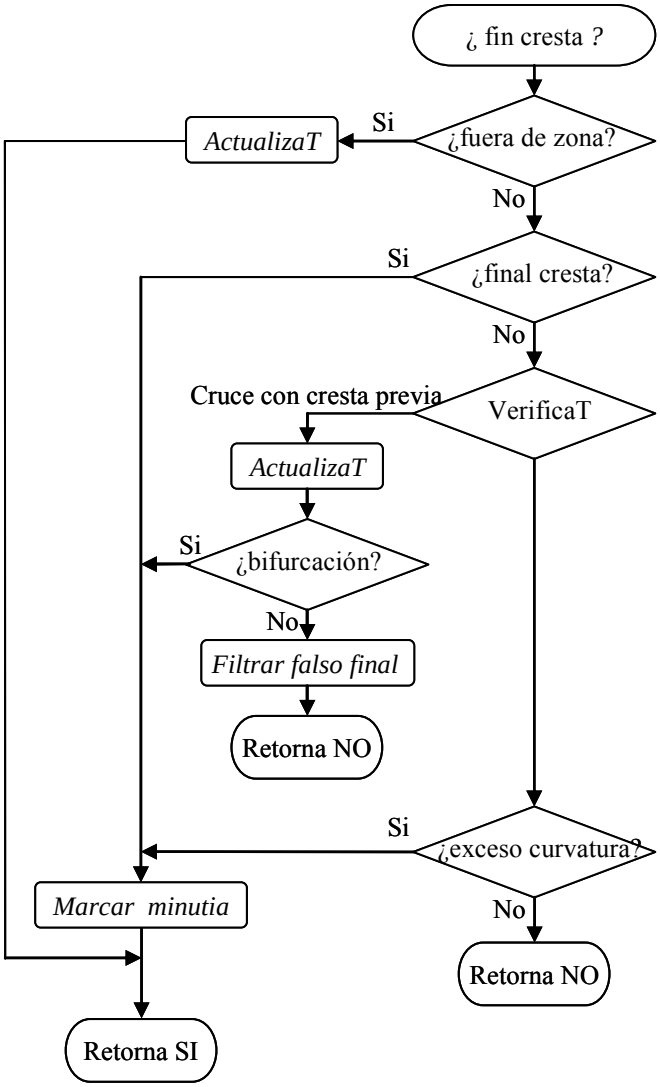


Figura 5.14: Comprobación de criterios de parada .

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

En la parte final de la función de seguimiento de crestas se realizan una serie de comprobaciones para verificar las condiciones que llevarían a finalizar el seguimiento de la cresta en cuestión. En primer lugar se verifica la salida de la zona de interés (los márgenes de la imagen no se analizan por ser zonas habitualmente muy ruidosas) o la entrada en una zona que ha sido marcada como de baja calidad en la fase de segmentación.

A partir de ese punto se verifican los distintos criterios de localización de minutias; el orden que se sigue en las distintas comprobaciones se ha determinado de forma empírica como el más adecuado para la correcta detección del tipo de minutia. Cuando se encuentra una bifurcación, o una salida de la zona de interés, el último segmento recorrido debe marcarse como tal en la imagen auxiliar T, no siendo así en caso de detectarse un final (en este caso la minutia no está en el último píxel sino en el inmediatamente anterior). Como se ve en la figura, en el caso de encontrar una cresta seguida previamente se comprueba si se ha encontrado una bifurcación, o si se ha retomado una cresta anterior, en cuyo caso se debe filtrar un píxel marcado con anterioridad como posible minutia de tipo final de cresta.

5.3 Perfil de ejecución y particionado.

El objetivo, una vez comprobada la efectividad del algoritmo para la extracción del minutiae de la huella, es poder realizar la identificación en tiempo real en sistemas basados en microprocesadores de bajo coste. Para ello va a resultar imprescindible la realización de algunas de las tareas mediante un hardware específico, con lo que la cuestión pasa por detectar los cuellos de botella del algoritmo.

La tabla 5.2 muestra los resultados experimentales de la ejecución del programa en dos plataformas de prototipado distintas. La primera columna corresponde a la ejecución en el núcleo configurable MicroBlaze de Xilinx, un procesador con un juego de instrucciones reducido (RISC), optimizado para ser implementado sobre dispositivos FPGA de Xilinx [MIC]. El núcleo configurable ha sido implementado sobre un dispositivo Xilinx Virtex II XC2V1000-4FG456C (incorporado en la plataforma de prototipado RC200 de Celoxica). La segunda columna corresponde a una implementación sobre una placa Virtex II Pro FF672 de Memec design Inc., que incorpora un dispositivo XC2VP4 de Xilinx con un PPC405, una implementación de 32 bits de la arquitectura PowerPC.

	Tiempo de ejecución (s)	
	μBlaze (50 MHz)	PowerPC (100 MHz)
total	5.58	2.59
Bucle fig. 5.9	5.01	2.37

Tabla 5.2 Resultados experimentales de la ejecución del algoritmo

La versión software, como puede apreciarse de los tiempos presentados en la tabla 5.2, precisa de unos tiempos de ejecución que están claramente por encima de las

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

necesidades de un procesado en tiempo real. Sin embargo, también se observa que prácticamente el 90 % de ese tiempo corresponde a la ejecución de las 5 subrutinas llamadas de forma consecutiva en núcleo central del diagrama de flujo de la figura 5.9 (Punto_siguiente, Crea_sección, Filtra_sección, Corr_max y Tg_dir). De esta forma se afianza la idea de que, mediante un coprocesador específico que se encargue de la ejecución de unas pocas líneas del código, podrá conseguirse el objetivo de procesado en tiempo real.

Como paso previo a la división de tareas entre hardware y software, se ha obtenido el perfil de ejecución del algoritmo, para poder identificar cuales son las rutinas a las que se dedica más tiempo durante la extracción del minutiae. Con esta información se han podido optimizar algunas partes del código de cara a disminuir el tiempo de ejecución total.

La tabla 5.3 resume el resultado, mostrando que sólo 6 funciones concentran más del 93 % del tiempo de ejecución, destacando la función Tg_dir, que estima la orientación en un punto, que concentra más del 75 % del tiempo de procesado. El nombre de la función está en la primera columna de la tabla, la segunda indica el número de llamadas a dicha función durante la extracción de características en una huella de prueba, y la tercera columna representa el porcentaje del tiempo de procesado total que se ha empleado en la ejecución de dicha función. Las diferencias observadas en relación a los datos de tiempos presentados en la tabla 5.2 se deben a que algunas de las funciones se llaman también desde otras partes del algoritmo, fuera del bucle principal. De este modo se justifica que, si bien el tiempo de ejecución de la parte central del bucle estaba por debajo del 85 % del total, desde el punto de vista del número total de ejecuciones de estas funciones, se está por encima del 90 %.

	Llamadas	%
Tg_dir()	6576	77.8
Corr_max()	1927	4.5
Crea_sección()	6247	4.2
Punto_siguiente()	53641	3.0
ActualizaT()	1569	2.3
Filtra_sección()	1927	1.9
others…	-	6.3

Tabla 5.3 Porcentaje de tiempo de ejcución empleado en las principales funciones del algoritmo

Aunque, como se ha dicho en el apartado anterior, existen pequeñas variantes en la implementación que pueden modificar ligeramente éste perfil de ejecución, las variaciones serán mínimas, por lo que las líneas directrices del coprocesador específico quedan bastante claras.

En primer lugar se destaca la necesidad de diseñar un coprocesador para la estimación de la dirección; a esta función le corresponde cerca del 80 % del tiempo de ejecución, por lo que su realización en hardware es imprescindible para cumplir con los objetivos marcados. Sin embargo, observando el tiempo empleado en las funciones centrales del bucle (Tabla 5.2), se puede intuir la conveniencia de un coprocesador único para toda la secuencia de operaciones, en lugar de utilizar coprocesadores

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

separados. A partir de este punto se presentan distintas opciones, pero todas ellas implican la realización hardware de las principales funciones del algoritmo, puesto que será la única forma de permitir una estimación en tiempo real.

Analizando los datos de la tabla 5.3 relativos al número de llamadas a cada función, se detectan otros aspectos importantes. Por una parte se ve una función no especialmente compleja que acumula el 3 % del tiempo de ejecución debido al gran número de veces que se ejecuta. Éste gran número de llamadas se origina por llamarse varias veces durante la ejecución de las funciones Crea_seccion() y Filtra_seccion(), por lo que el objetivo será incluirla en la realización hardware de dichas funciones; de otro modo no seria posible la obtención de un coprocesador eficiente. Otro aspecto que llama la atención es la gran diferencia en cuanto al número de veces que se ejecutan las funciones Tg_dir() y Crea_seccion() por un lado, y Filtra_seccion() y Corr_max() por otro; el análisis del código muestra como Filtra_seccion() y Corr_max() se ejecutan sólo en el bucle principal, mientras que Tg_dir() y Crea_seccion() se ejecutan, junto con las otras dos, en el mismo bucle pero también fuera del mismo, cada vez que se analiza un nuevo píxel, candidato a ser el punto inicial de una nueva búsqueda de cresta, para ver si ha sido marcado previamente como ya analizado (Tg_dir() se llama alguna vez más en un punto concreto del seguimiento).

Con todas estas consideraciones se decide diseñar un coprocesador específico para la estimación de la orientación y otro coprocesador que procese las 5 funciones del bucle principal del diagrama de flujo de la figura 5.9, correspondientes a 5 de las 6 funciones detalladas en la tabla 5.3 y representando el 91 % del total del tiempo de ejecución del algoritmo. En función de las prestaciones de ambos coprocesadores se diseñará la versión definitiva del software, adecuado a las nuevas opciones de coprocesado.

La función ActualizaT() representa el 2.3 % del tiempo de ejecución, sin embargo no se incluye en el coprocesador por no ejecutarse en todas las iteraciones del bucle. Además, el elevado tiempo dedicado a ella se debe más al hecho de realizar un considerable número de escrituras en memoria que no a una elevada complejidad numérica o a un gran número de ejecuciones.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

6 Coprocesador Hardware

En este capítulo se presenta el diseño del coprocesador específico. En primer lugar se realiza un coprocesador dedicado únicamente al bloque de estimación de direcciones, dejándose para más adelante un segundo coprocesador que aglutine todas las funciones del bucle principal del algoritmo de seguimiento de crestas. Aunque se trata de un diseño genérico, se han empleado algunas estructuras orientadas a una implementación en una FPGA de Xilinx, puesto que el objetivo era optimizar el tiempo de respuesta de un diseño hardware – software basado en el procesador microblaze.

Se añade un apartado con las simulaciones, se muestran los resultados obtenidos y se comentan las posibles mejoras o modificaciones a tener en cuenta en el caso de buscar implementaciones alternativas.

6.1 Módulo de estimación de direcciones.

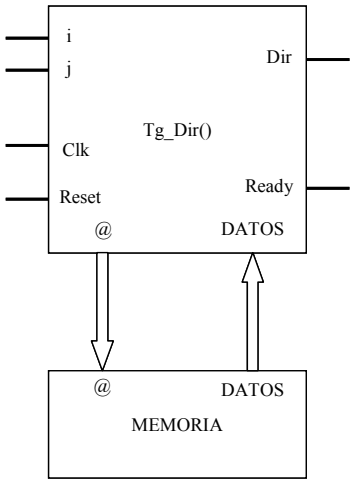


Figura 6.1 Esquema del circuito de estimación de direcciones.

El circuito debe realizar una estimación de la dirección sobre una imagen guardada en memoria. Se reciben como entradas las coordenadas del punto central de la ventana sobre la que se desea realizar la estimación así como una señal de activación de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

la conversión (entradas *i*, *j* y *Reset* de la figura 6.1), además de una línea de reloj; como salida se obtiene la dirección estimada (Dir), en forma de un valor discreto de 4 bits. El valor presentado a la salida se considera válido a partir del instante en que se activa la señal de salida *Ready*.

La dirección se estima mediante el algoritmo de Rao sobre una ventana de 9 píxeles de lado, siendo el coprocesador el encargado de ir generando la secuencia de direcciones de memoria necesaria para obtener los datos de la imagen (accediendo adecuadamente a los buses de datos y direcciones). El diseño propuesto no realiza ninguna verificación de que la ventana empleada quede situada completamente dentro de la imagen (el método precisa de un margen de 5 píxeles alrededor del punto en el que se desea la estimación); en el caso de no disponerse del margen suficiente se accederá a posiciones de memoria que no corresponden a la imagen, con el consiguiente error de estimación pero sin ningún efecto grave puesto que el algoritmo accede a la memoria sólo para lectura.

```
Rao(i,j)
{
Acum1:=0; Acum2:=0;
for s=i-n/2:i+n/2
    for t=j-n/2:j+n/2
        Acum1=Acum1+(2*Gx(s,t)*Gy(s,t));
        Acum2=Acum2+((Gx(s,t)^2)-(Gy(s,t)^2));
    end
end
φ=atan2(Acum1,Acum2)/2;
```

Figura 6.2 Algoritmo de Rao.

Como se puede apreciar en la versión software del algoritmo (figura 6.2), el circuito debe calcular, para cada punto de la ventana de 9x9 píxeles, los gradientes de la imagen en las dos direcciones: G_x y G_y. Para calcular estos gradientes se precisa, en cada punto, una ventana auxiliar de 3x3 píxeles (con lo que la ventana necesaria para estimar la dirección es realmente de 11x11 píxeles).

La forma de recorrer la imagen para realizar la estimación se muestra en la figura 6.3; se trata de pasar por todos los puntos de la ventana, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. En la figura se han identificado los puntos de la máscara, con las letras de la A a la H, con objeto de localizarlos en el momento de justificar el acceso a ellos durante la ejecución del algoritmo. Los píxeles en los que se va a calcular el gradiente se indicarán por sus coordenadas absolutas, mientras que con las letras identificativas dentro de la máscara se indicará la posición relativa del píxel involucrado en el cálculo del gradiente. En la figura también se muestra la forma que adoptan las máscaras G_x y G_y. Como se verá más adelante, el diseño del coprocesador tiene en consideración que los puntos A, C, F y H se utilizan en las dos máscaras de cálculo de gradientes (G_x y G_y), mientras que los puntos que están ponderados por dos se emplean sólo en una de ellas: B y G en el cálculo de G_x y D y E para obtener G_y.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

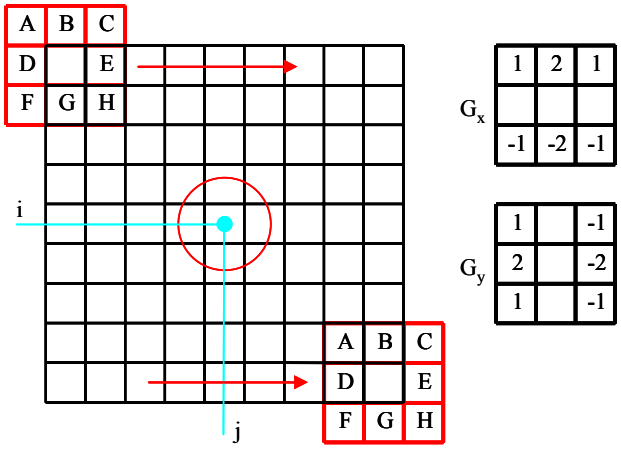


Figura 6.3 Cálculo de los gradientes G_x y G_y para estimar la orientación en una ventana W.

La figura 6.4 describe, en forma de diagrama de bloques, el funcionamiento del circuito de cálculo de la orientación. La unidad de control es el núcleo central, encargado de gestionar el sistema habilitando los diferentes bloques y sincronizando la transferencia de datos entre registros. Debe hacerse notar que las señales de reloj y de reset son comunes a todos los bloques de la figura aunque, para simplificar el esquema, se muestran conectadas sólo a la unidad de control.

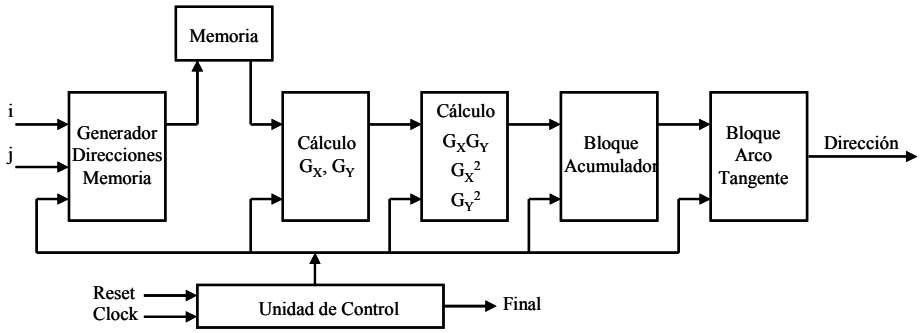


Figura 6.4 Cálculo de los gradientes G_x y G_y para estimar la orientación en una ventana W.

Los otros bloques del coprocesador se representan en forma de pipeline, obteniéndose la dirección estimada a la salida del último de ellos. En primer lugar se dispone del subcircuito que, a partir de las coordenadas i y j del punto central de la ventana, se encarga de generar, en el orden adecuado, la secuencia de direcciones de memoria necesarias para acceder al valor de los píxeles que intervienen en la estimación. Los datos procedentes de la memoria donde está almacenada la imagen (el bloque de memoria no forma parte del coprocesador) son la entrada del siguiente bloque, encargado del cálculo de los gradientes G_x y G_y en cada uno de los puntos de la ventana. Los resultados, de acuerdo al algoritmo anteriormente descrito, deben elevarse a cuadrado y multiplicarse entre ellos, para lo que se dispone de un tercer bloque de

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

cálculo. La siguiente etapa se encarga de acumular el producto de gradientes y su cuadrado. La función arcotangente se encuentra tabulada en una memoria ROM, de forma que el último bloque, a partir de los datos acumulados en la etapa anterior, se encarga de acceder a la posición adecuada y enviar la correspondiente dirección a la salida del sistema.

6.1.1 Generador de direcciones de memoria.

La estructura del circuito prevé un bloque encargado de proporcionar, en la secuencia adecuada, los valores de los píxeles involucrados en el cálculo de los gradientes, de forma que las etapas siguientes puedan estimar correctamente la dirección de la cresta. Se prevé que futuras revisiones del bloque implementen algún tipo de memoria intermedia (caché) que permita minimizar el número de accesos a la memoria principal donde se encuentra almacenada la imagen; de momento, el generador de direcciones es el bloque que, a partir de los puntos i y j correspondientes al centro de la ventana, suministra las direcciones de memoria para todos los accesos a los datos. Así, dado el orden de filas y columnas, y teniendo en cuenta las subventanas de los gradientes, se deben generar las direcciones de memoria asociadas a los puntos A, B, .., H correspondientes al cálculo de los gradientes del primer punto de la ventana. La secuencia se repite para el resto de píxeles hasta llegar al extremo inferior derecho de la ventana W (ver la figura 6.3).

El bloque siguiente calcula los gradientes en las dos direcciones como:

$$G_x = A + 2B + C - F - 2G - H$$
$$G_y = A + 2D + F - C - 2E - H$$

mientras que el bloque multiplicador, a partir de G_x y de G_y, va a calcular los productos $G_x \cdot G_x$, $G_x \cdot G_y$ y $G_y \cdot G_y$. Puesto que interesa, para minimizar los recursos necesarios, utilizar el mismo multiplicador para realizar los productos anteriores, y teniendo también en cuenta la posibilidad de realizar algunas operaciones en común, el orden de acceso a los datos no es el normal: A, B, C, D, E, F, G, H. sino que se ha elegido un orden distinto a fin de anticipar al máximo la obtención del resultado G_x a costa de diferir el cálculo de G_y; de este modo la siguiente etapa de la cadena va a disponer lo antes posible del dato que necesita para empezar a procesar. El detalle se analizará en los siguientes apartados, de momento basta con decir que el orden real de los accesos es: A, H, C, F, B, G, D, E, y que este es el orden en que el bloque de direccionamiento va a acceder a la memoria.

La figura 6.5 (en la que por simplicidad no se han incluido las señales de reloj y reset) muestra un esquema simplificado del bloque generador de direcciones. Se trata de generar dos vectores POSX i POSY que unidos formaran la dirección de memoria del dato al que se quiere acceder. Como puede apreciarse, el diseño está formado por dos bloques parecidos que funcionan en paralelo. El sistema presenta tres contadores. Dos de ellos, etiquetados en la figura como contador X y contador Y, almacenan las

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

posiciones relativas (dentro de la ventana de 9x9 píxeles) de la fila y de la columna del punto que se está procesando para determinar su gradiente.

Puesto que deben realizarse los accesos a los 8 píxeles vecinos (de A hasta H) antes de avanzar al punto siguiente, la frecuencia de habilitación del contador X es 8 veces inferior a la de los contadores ΔX y ΔY. Del mismo modo, la habilitación del contador Y se realizará a una frecuencia inferior a la del contador X, puesto que el contador de fila se debe mantener inhibido hasta que se llega al final de columna (contador X). La Unidad de Control se encarga de gestionar de forma correcta todas estas señales de habilitación.

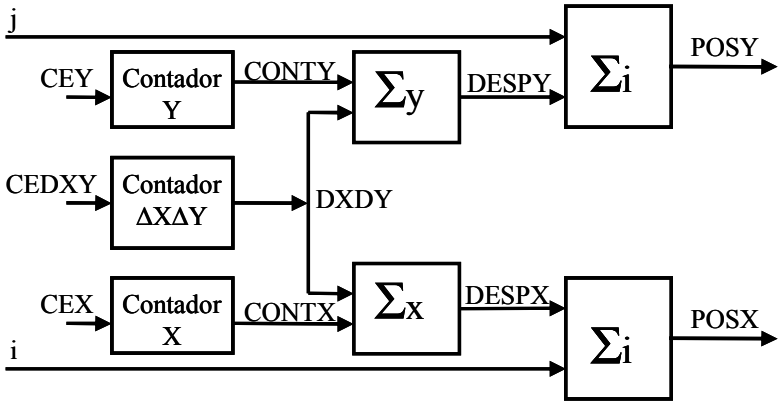


Figura 6.5 Diagrama de bloques del generador de direcciones .

Por otro lado, puesto que se necesita acceder a los 8 puntos que rodean al píxel de interés, se debería disponer de dos contadores que proporcionasen el desplazamiento de +1, 0 o -1 píxeles en cada uno de los dos ejes a partir de las coordenadas del punto central, según se deba acceder a los puntos A,B,C,… Los dos contadores deben sincronizarse para generar a la vez el incremento correspondiente a cada uno de los dos ejes y obtener el acceso a la posición de memoria del píxel A,B, C,… necesario en cada momento. Debido a la obligada sincronización entre los dos, y al hecho de que se desea poder gestionar el orden de acceso a los 8 vecinos, se diseña una máquina de estados, etiquetada como contador ΔXΔY, que genera de forma simultánea los dos desplazamientos.

El conjunto permite recorrer todos los puntos de la ventana de izquierda a derecha y de arriba abajo, optimizando en cada posición la secuencia de acceso a los 8 píxeles vecinos con objeto de facilitar el acceso a los datos que el bloque siguiente necesita para calcular los valores de G_x y G_y.

Los contadores se encargan de proporcionar el valor del desplazamiento que se debe añadir a las coordenadas del píxel en el que se calcula el gradiente para obtener las coordenadas relativas de los 8 vecinos respecto del centro de la ventana. Finalmente, para disponer de la dirección absoluta de la posición de memoria en la que se encuentra el dato de interés, se debe sumar éste desplazamiento a la posición i, j correspondiente al píxel central (y que son los valores de entrada al sistema).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La dirección se calcula en el punto central de la ventana, por lo tanto los contadores X e Y generaran valores en el rango de -4 a +4, obteniéndose así las coordenadas de todos los puntos de la ventana W de 9x9 píxeles. Para estos valores se empleará una codificación en complemento a dos de 4 bits. Por otro lado, para los incrementos ΔX y ΔY (de -1 a +1) basta con un bit de módulo y otro de signo.

De cara a una posible implementación en un circuito a medida se ha realizado un diseño modificado que permite sustituir los sumadores completos por unos circuitos específicos más sencillos. El contador inicial de posición se ha diseñado para apuntar a un punto anterior, tanto en la coordenada X como en la Y (contando de -5 a +3 en lugar de hacerlo de -4 a +4), de forma que los incrementos a aplicar por ΔX i ΔY sean siempre positivos (0,+1 o +2). Así, aunque se continúan necesitando sumadores de 4 bits, la complejidad de éstos puede ser menor por ser siempre 0 los dos bits de más peso de uno de los sumandos.

Finalmente debe sumarse el resultado obtenido al valor de las entradas i, j. En este caso se debe implementar un sumador de 8 bits, para sumar a las coordenadas del punto central el resultado de los sumadores anteriores después de realizar una extensión del bit de signo para pasar de 4 a 8 bits. El valor de las entradas i, j siempre será positivo, y el resultado POSX, POSY también, siempre que se hayan respetado los márgenes de seguridad de 6 píxeles para asegurar que la ventana de 13x13, centrada en el punto de interés, se mantenga dentro de los límites de la imagen.

En el diseño se han dispuesto primero los sumadores que tienen ΔX y ΔY como entradas por una cuestión de optimización de área; de este modo los dos primeros sumadores son de 4 bits. A efectos de retardo no hay ninguna implicación puesto que el peor caso posible continúa siendo el mismo.

Así, el circuito dispone de dos contadores X e Y, que funcionan en el rango de -5 a +3, repitiendo el ciclo de forma continuada. Por otro lado, los contadores ΔX y ΔY funcionan en el margen de 0 a 2, y cuentan a una frecuencia 8 veces superior a la de los anteriores para proporcionar los 8 puntos de la sub-ventana, necesarios para el cálculo de los gradientes que se deben promediar para todos los puntos de la ventana mayor de 9x9 píxeles.

CONTADORES X i Y	
Valor decimal	Valor binario
-5	1011
-4	1100
-3	1101
-2	1110
-1	1111
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011

CONTADORES ΔX i ΔY	
Valor decimal	Valor binaroi
0	00
1	01
2	10

Tabla 6.1 Posibles valores de salida de los contadores.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La tabla 6.1 muestra los posibles valores generados por cada uno de los contadores. En el caso de los contadores X e Y se trata de una secuencia de longitud 11 que se repite cíclicamente, encadenándose los dos para acceder a las 121 posibles posiciones. Por lo que se refiere a los contadores ΔX y ΔY, debe tenerse en cuenta que no debe generarse la combinación ΔX = ΔY = 1, que accedería al punto central, por lo que entre los dos contadores se generan sólo 8 de las 9 combinaciones posibles (las correspondientes a los puntos A, B, C, D, E, F, G i H).

PUNTO DE ACCESO	CONTADOR ΔX ΔY	
	ΔX	ΔY
A	00	00
H	10	10
C	10	00
F	00	10
B	01	00
G	01	10
D	00	01
E	10	01

Tabla 6.2 Secuencia del generador de direcciones.

De hecho, el control separado de los dos contadores no es sencillo por lo que se ha adoptado la solución de realizar un único circuito que se comporta generando la secuencia de 4 bits que se muestra en la tabla 6.2. Estos 4 bits se gestionan como dos salidas independientes de 2 bits cada una y se emplean como entradas en los correspondientes sumadores.

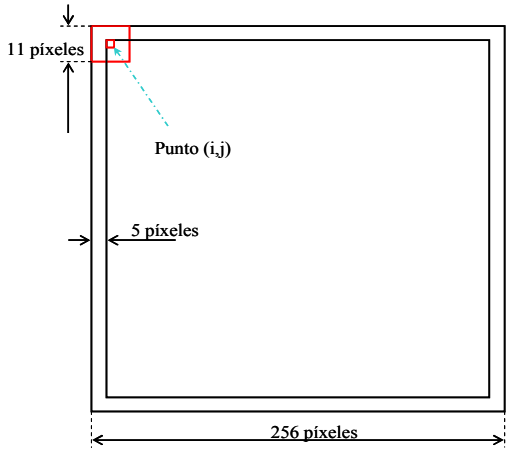


Figura 6.6 Situación de la ventana de estimación.

Como puede observarse, la secuencia se ha dispuesto de forma que el orden de acceso a los 8 píxeles necesarios para estimar el gradiente no coincide con la que, en

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

principio, seria natural. Como se ha dicho anteriormente, y se justificará en los apartados siguientes, el objeto es optimizar el orden en que se va a disponer de los datos necesarios en las etapas posteriores del pipeline. A continuación se propone un ejemplo que ayuda a comprender el comportamiento del bloque generador de direcciones. Se trata de estimar la orientación en la esquina superior izquierda de una imagen de 256 x 256 píxeles. Las coordenadas del píxel en el que se va a realizar la estimación son las necesarias para poder centrar en él la ventana de 11 x 11 píxeles sin salir de la imagen (ver figura 6.6).

Puesto que las filas y columnas de la imagen se numeran de la 0 a la 255, al punto a estimar le corresponden las coordenadas (5,5), la ventana de 9 x 9 píxeles va de la (1,1) a la (9,9), y la ventana de 11 x 11 que incorpora las subventanas de cálculo de los gradientes va de la coordenada (0,0) a la (10,10). De este modo las subventanas se van solapando, como se muestra en la figura 6.7, donde se aprecian en rojo los píxeles necesarios para calcular los gradientes en el punto (1,1) y en verde los empleados para calcular el gradiente en el punto (1,2).

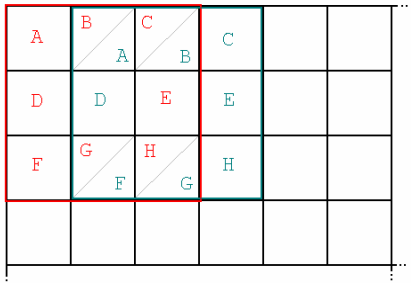


Figura 6.7 Representación de los accesos a los 2 primeros puntos.

El orden de los accesos fija la forma de acceder a los datos, tal y como se muestra en la figura 6.8. En los bordes exteriores de la figura se muestra la numeración correspondiente a las filas y columnas de la imagen, mientras que el número del interior indica el orden de acceso a los datos, pudiéndose observar que, debido al cálculo de gradientes en puntos adyacentes y al solapamiento de ventanas, se accede varias veces a un mismo píxel.

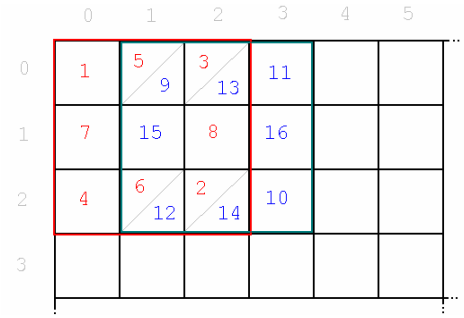


Figura 6.8 Representación del orden de acceso a los píxeles de la imagen.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Así, los sucesivos valores (POSX,POSY) generados a la salida del bloque de direccionamiento son (0,0), (2,2), (2,0), (0,2), (1,0), (1,2), (0,1) y (2,1) para el cálculo de los gradientes en el primer punto. A continuación se generan las coordenadas (1,0), (3,2), (3,0), (1,2), (2,0), (2,2), (1,1) y (3,1), empleadas para el segundo punto, y así sucesivamente.

X	Y	CONT Y	CONT X	CONTΔXΔY ΔX/ΔY			POSX	POSY	PUNT RESULTAT	ORDRE
5	5	-5	-5	00 00	0	0	0	0	(0,0)	1
				10 10	2	2	2	2	(2,2)	2
				10 00	2	0	2	0	(2,0)	3
				00 10	0	2	0	2	(0,2)	4
				01 00	1	0	1	0	(1,0)	5
				01 10	1	2	1	2	(1,2)	6
				00 01	0	1	0	1	(0,1)	7
				10 01	2	1	2	1	(2,1)	8
			-4	00 00	0	0	1	0	(1,0)	9
				10 10	2	2	3	2	(3,2)	10
				10 00	2	0	3	0	(3,0)	11
				00 10	0	2	1	2	(1,2)	12
				01 00	1	0	2	0	(2,0)	13
				01 10	1	2	2	2	(2,2)	14
				00 01	0	1	1	1	(1,1)	15
				10 01	2	1	3	1	(3,1)	16
			-3	00 00	0	0	2	0	(2,0)	17
				10 10	2	2	4	2	(4,2)	18

Tabla 6.3 Evolución de los contadores y secuencia de direcciones generada.

Los contadores X e Y se actualizan cada vez que se avanza para calcular los gradientes en el píxel siguiente. Puesto que sólo se presenta la evolución para los dos primeros puntos, el contador X adquirirá los valores -5 y -4, mientras que el contador Y se mantendrá en el valor -5. La tabla 6.3 muestra la evolución del conjunto; en ella se mantienen fijos los valores de las coordenadas del punto en el que se realiza la estimación: X = Y = 5.

POSX es la suma de i+CONTX+ΔX, i POSY la suma de j+CONTY+ΔY. Tal como se ve en el esquema del bloque (figura 6.5). Se puede ver que se obtienen los valores indicados sobre la figura 6.8

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

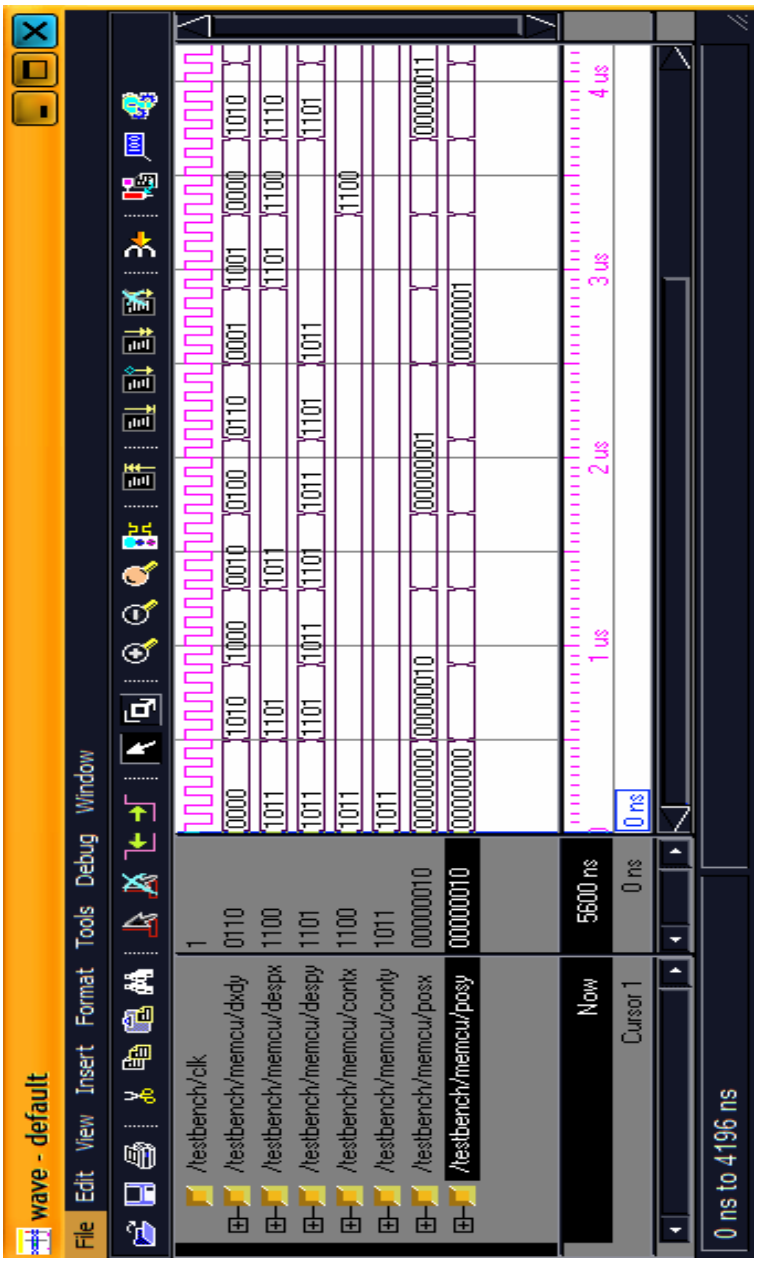


Figura 6.9 Cronograma de la simulación del generador de direcciones.

La descripción VHDL de los distintos bloques se ha simulado con ModelSim para certificar su el correcto funcionamiento. En la figura 6.9 se puede apreciar la correcta evolución de los contadores para generar la adecuada secuencia de direcciones, que se comprueba idéntica a la descrita en la tabla 6.3.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

6.1.2 Bloque de cálculo de gradientes

El bloque anterior va a permitir disponer de los datos de la imagen en el orden adecuado para proceder al cálculo de los gradientes. Para cada punto de la ventana W de 11 x 11 píxeles, como se muestra en la figura 5.2, se van a calcular los valores:

$$G_x = A + 2B + C - F - 2G - H$$
$$G_y = A + 2D + F - C - 2E - H$$

Las ecuaciones anteriores justifican la elección del orden de acceso a los datos como: A, H, C, F, B, G, D, E. El objetivo es el de acelerar la obtención de los datos necesarios para el cálculo de G_x, para facilitar que la siguiente etapa del pipeline pueda empezar a computar el producto $G_x \cdot G_x$ lo antes posible.

La figura 6.10 muestra el esquema del diseño final, con 1 sumador, 1 multiplexor y 4 registros. El dato que llega de memoria se almacena temporalmente en el registro D_{in}, para, según corresponda, sumarse o restarse al resultado parcial acumulado en los registros G_x y G_y. Finalmente se dispone de un registro de salida donde se almacenan los valores finales de G_x y G_y una vez calculados. Este registro es la entrada del siguiente bloque, responsable de realizar los productos de los gradientes calculados y mantiene estable su valor el número de ciclos necesario para que el bloque multiplicador tenga tiempo de completar las operaciones correspondientes.

Se ha descartado la posibilidad de aprovechar algunos cálculos comunes a los dos gradientes, anticipando las operaciones compartidas por ambos (A-H y C-F), puesto que se complicaba el diseño del control y sin obtenerse ningún beneficio adicional.

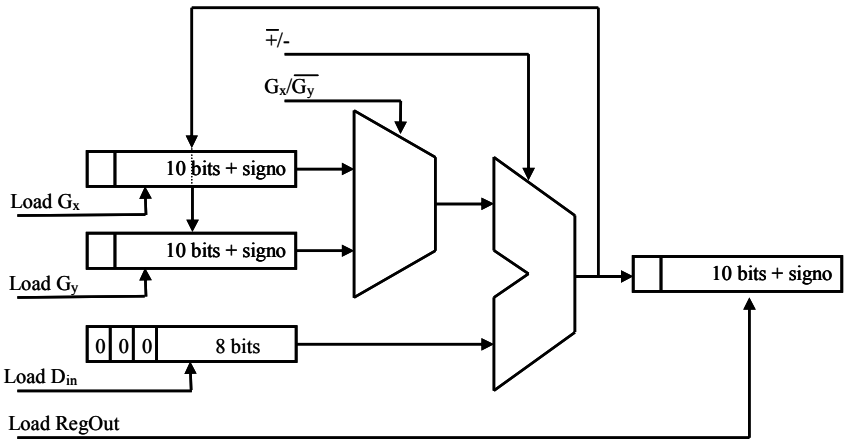


Figura 6.10 Diagrama del módulo de cálculo de los gradientes .

Así, puesto que los datos de entrada procedentes de memoria se aprovechan tanto para realizar el cálculo de G_x como el de G_y, se realizarán dos operaciones con cada uno de ellos. Puesto que los valores que aparecen multiplicados por dos sólo afectan a uno de los dos gradientes, en lugar de sumarlos desplazados o multiplicarlos por dos, se ha

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

optado por sumarlos dos veces. Puesto que el tiempo de llegada de los datos es el mismo pata todos los casos, y viene condicionado por el tiempo de acceso de la memoria, también aquí se pueden realizar dos operaciones, ya que se va a disponer del mismo tiempo para operar que en el caso de tenerse que realizar una operación para G_x y otra para G_y. Así pues, en lugar de un producto por 2, se realizarán 2 sumas para G_x y otras 2 para G_y, sin que ello suponga ningún retardo adicional. De hecho, si se realizase una suma desplazada un bit para realizar la suma y el producto por 2 en una única operación, el circuito tendría que quedarse después un tiempo sin operar en espera del siguiente dato.

Puesto que se van a realizar sumas y restas, el diseño va a considerar que los valores se codifican en complemento a 2; sin embargo, debe tenerse en cuenta que los datos de entrada representan el nivel de gris del píxel, codificado como un valor entero positivo de 8 bits. Para determinar el tamaño del resto de registros deben estudiarse los casos más desfavorables. Por el lado positivo el peor caso se dará cuando todos los datos que se sumen representen 255 y los que se resten estén a 0. En este caso el resultado puede representar un número 4 veces mayor (1+2+1), por lo que se precisa que los registros tengan 2 bits más para representar todo el rango de variación. En el caso negativo la situación es la misma, pero debe considerarse el bit de signo adicional, por lo que el tamaño de los registros debe ser de 11 bits (10 más el de signo) como se indica en la figura 6.10, representándose los valores en complemento a 2.

El multiplexor va a permitir que, empleando un único sumador, los registros G_x y G_y actúen como sendos acumuladores, en los que se va sumando o restando el valor de los datos del registro de memoria según corresponda. Finalmente, una vez realizadas todas las operaciones, se actualiza el registro de salida con el valor calculado para el gradiente. Como se ha dicho, el orden de los accesos está pensado para anticipar el cálculo del valor de G_x y separarlo al máximo del segundo resultado G_y, con objeto de dar tiempo al módulo siguiente para realizar la multiplicación y optimizar el rendimiento (‘throughput’) del conjunto. La operación correspondiente al último de los 8 puntos de la ventana actualiza el registro de salida con el valor de G_y, de forma que inmediatamente se reinicia el valor de los registros G_x y G_y para proceder al cálculo de los gradientes del siguiente punto.

La unidad de control se encarga de generar todas las señales de sincronización, seleccionando en cada momento el registro con el que se opera, la operación que se hace, en que momento se actualiza el resultado y cual es el registro de destino. En el diseño presentado siempre se actualiza el mismo registro que se emplea para operar, puesto que está trabajando a modo de acumulador, aunque podría cambiarse de filosofía en algún diseño concreto que buscase, por ejemplo, una optimización del consumo.

La figura 6.11 muestra la simulación del módulo de cálculo de gradientes, mientras que la figura 6.12 corresponde a un diagrama temporal simplificado de las operaciones que realiza el bloque (por simplicidad, la frecuencia de reloj de esta figura es la mitad del real). Se han representado los bits de control (para sumar o restar y para acceder a los registros adecuados: G_x o G_y), así como los datos obtenidos de memoria y los valores de los registros involucrados (se ha representado en mayúsculas la operación que se está realizando en el registro y en minúsculas, durante los ciclos en los que se trabaja con el otro registro, el resultado que se lleva acumulado).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

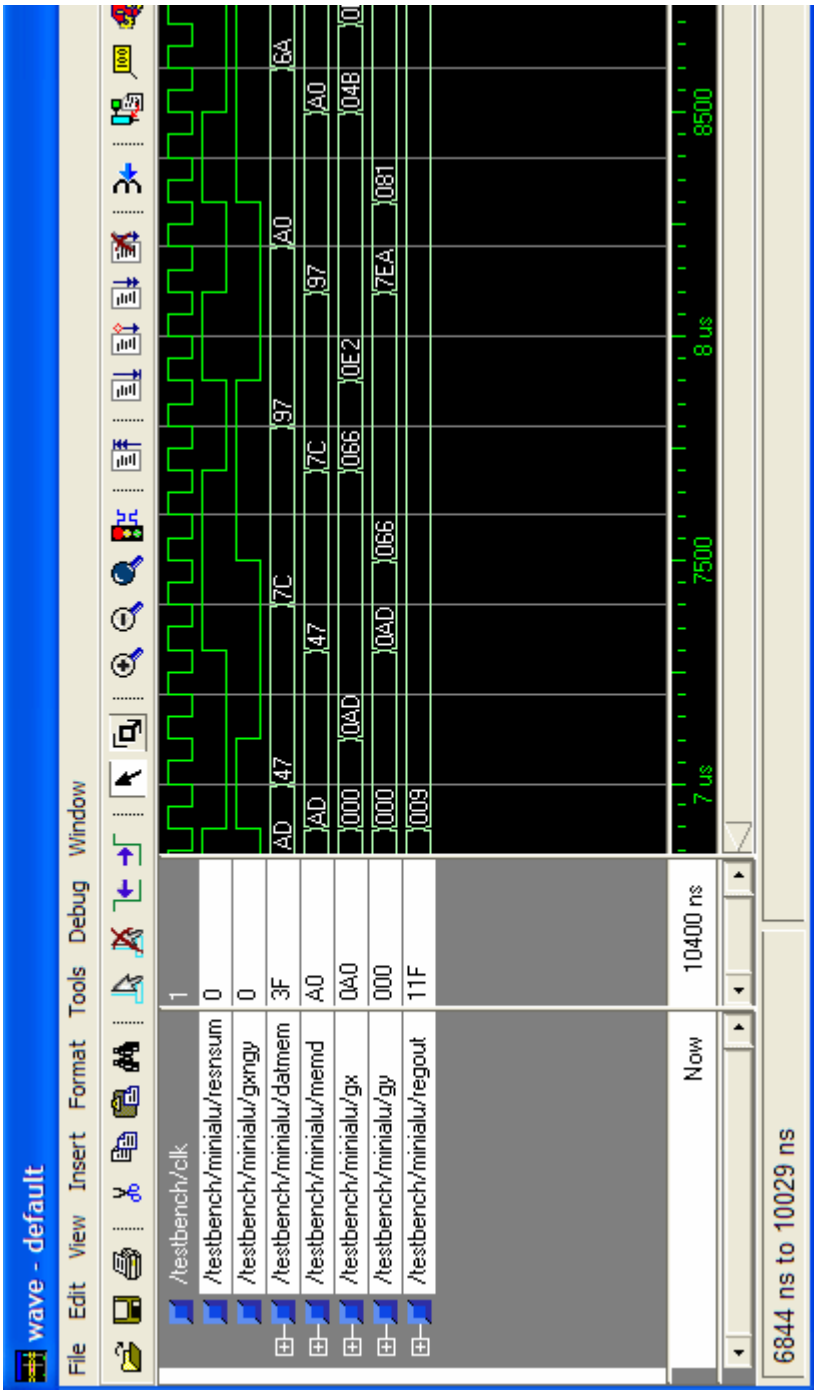


Figura 6.11 Simulación del módulo de cálculo de los gradientes .

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

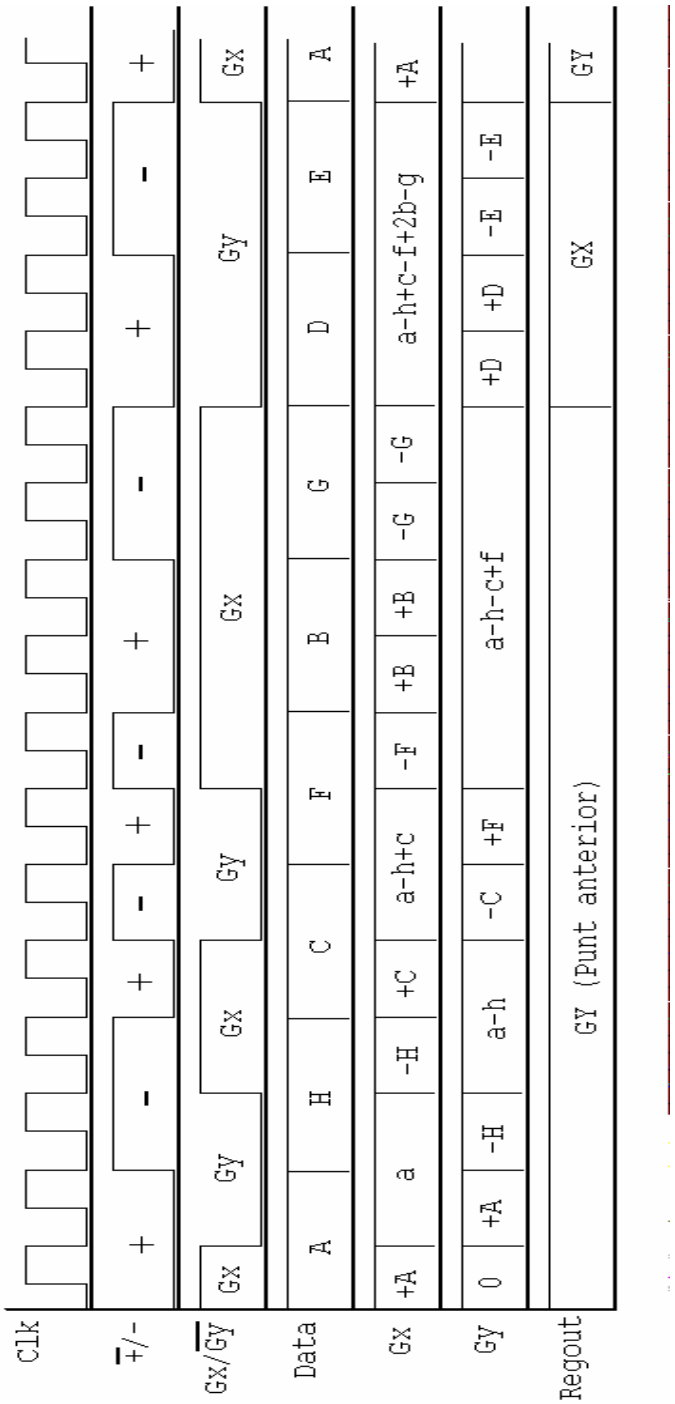


Figura 6.12 Cronograma del módulo de cálculo de G_x y G_y .

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

6.1.3 Bloque multiplicador

La siguiente etapa del módulo de estimación de direcciones se encarga de realizar los productos $G_x \cdot G_x$, $G_x \cdot G_y$ y $G_y \cdot G_y$, partiendo de los valores de G_x y G_y calculados en el bloque anterior. El diseño se realiza para formar parte del pipeline, de forma que los tres productos puedan realizarse en el mismo tiempo que emplea el bloque anterior para realizar las estimaciones de G_x y de G_y. Como se verá más adelante, el cuello de botella actual se halla en el acceso a memoria, de forma que el diseño realizado permite realizar los productos mediante sumas sucesivas en un registro de desplazamiento.

Todos los bloques del coprocesador están pensados para conseguir que el tiempo de las operaciones sea igual o inferior que el tiempo de los accesos a memoria. De esta forma el tiempo de la operación será el tiempo necesario para leer todos los datos de memoria (tantas veces como sea necesario) de forma que el conjunto constituya un verdadero pipeline. El diseño se ha realizado considerando que los accesos a memoria se realizan cada 4 ciclos de reloj, lo que permite cierto margen de seguridad y prevé un controlador y una memoria que no posibiliten un acceso más rápido. En función de los resultados finales de la implementación se decidirán posibles modificaciones, de forma que si la máxima frecuencia de funcionamiento del coprocesador no es lo suficientemente elevada el diseño deberá modificarse para acceder a los datos de memoria en sólo dos o tres ciclos, con lo que deberá cambiarse la estructura del multiplicador para realizar los productos en un número inferior de ciclos de reloj.

En la situación prevista, de 4 ciclos de reloj por cada lectura de memoria, el tiempo de acceso a los valores de los 8 píxeles necesarios para realizar el cálculo de los gradientes (puntos A a H) es de 32 ciclos. Por lo tanto, si se quiere que el sistema no añada nuevos retardos y se comporte como un verdadero pipeline, los tres productos deben realizarse dentro de estos 32 ciclos, lo que lleva a un máximo de 10 ciclos por producto. Así, puesto que se opera con números de 10 bits, se dispone de ciclos suficientes para realizar el producto mediante sumas sucesivas.

En el diseño realizado es importante el orden de ejecución de los productos, de cara a sincronizar la entrada de datos y reducir así el empleo de registros auxiliares. Como se ha visto, el acceso a los datos realizado en el bloque anterior se ha elegido con objeto de anticipar al máximo la obtención del valor de G_x; en cuanto este dato está disponible el bloque multiplicador puede empezar el cálculo de $G_x \cdot G_x$. El producto $G_x \cdot G_y$ se realiza en segundo lugar, puesto que necesita de los dos valores de entrada, y se deja para el final el cálculo de $G_y \cdot G_y$.

En la figura 6.13 se muestra un diagrama simplificado del multiplicador. No se representan las señales de reset global ni algunas de las señales de habilitación de los registros, con objeto de simplificar la comprensión del funcionamiento.

La entrada del circuito multiplicador es el registro de salida del bloque anterior, aunque se ha incluido en este esquema para facilitar el estudio del bloque. Su valor es el del último gradiente calculado (G_x durante cierto intervalo de tiempo y G_y después), codificado en complemento a 2 de 11 bits.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Se ha optado por operar siempre con números positivos de 10 bits, tratando por separado los bits de signo. El resultado de elevar al cuadrado siempre será positivo, por lo que sólo hay que calcular el signo del producto cruzado; para ello basta con almacenar el signo del gradiente G_x en un registro auxiliar y compararlo después con el signo del gradiente G_y. La unidad de control sabe en cada momento qué producto se está calculando, y sólo activa el signo si se está calculando $G_x \cdot G_y$, si no se asigna 0 como corresponde a los números positivos. La gestión del signo tampoco se indica en la figura.

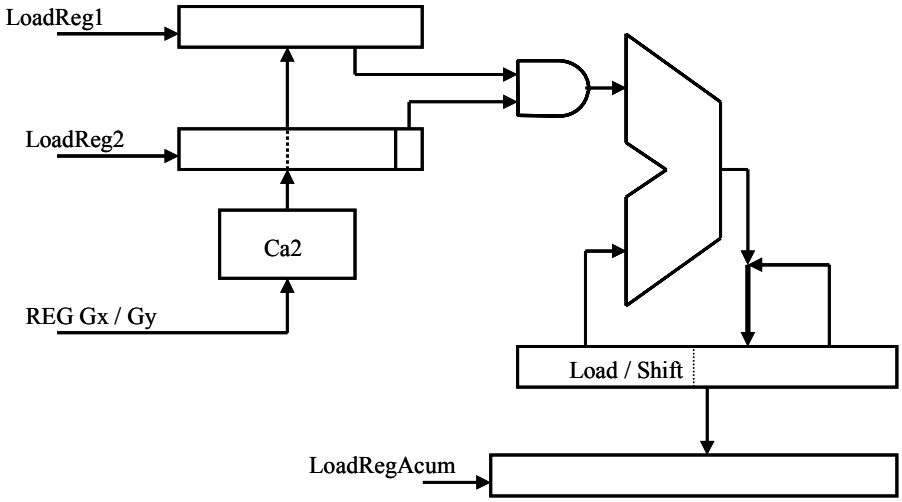


Figura 6.13 Esquema del módulo multiplicador .

Una vez está disponible el valor de G_x a la salida del bloque anterior, se realiza el complemento a 2, se actualiza el contenido de los dos registros Reg1 y Reg2, y se empieza a operar para calcular $G_x \cdot G_x$. El registro Reg2 es un registro de desplazamiento del que se coge el último bit para realizar la operación lógica AND con cada uno de los bits del registro Reg1. El resultado se suma al registro acumulador temporal, que se actualiza y se desplaza una posición. Una ver realizadas todas las sumas el resultado se almacena en el registro de salida, que se mantiene estable mientras el bloque calcula el producto siguiente, de forma que el bloque posterior del pipeline pueda operar correctamente.

Mientras este bloque procesa el producto $G_x \cdot G_x$, la etapa anterior ha obtenido el valor de G_y, cuyo módulo se almacena en el registro Reg2, una vez que éste ha finalizado el tratamiento de los 10 bits. En el siguiente ciclo ya puede empezar el cálculo del producto $G_x \cdot G_y$, puesto que el valor de G_x ya estaba previamente almacenado en Reg1 como dato del producto anterior. Como se ponía de manifiesto en el cronograma de la figura 6.12, el valor de G_y está en el registro de salida durante la mayor parte del tiempo; de esta forma el diseño permite que, una vez realizado el producto $G_x \cdot G_y$, el registro de entrada todavía conserve almacenado el valor de G_y, para que puedan actualizarse los dos registros Reg1 y Reg2 para poder realizar el tercer producto: $G_y \cdot G_y$.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Así, el resultado del cálculo del producto se almacena en el registro de entrada de la siguiente etapa cada 10 ciclos de reloj. Primero $G_x \cdot G_x$, después $G_x \cdot G_y$ y, finalmente, $G_y \cdot G_y$. Este es el valor absoluto del producto, y se acompaña de un bit de signo.

La forma de operar para obtener los productos se basa en el proceso manual, que se modifica ligeramente para minimizar el tamaño del sumador utilizado. El esquema de la figura 6.14 muestra un ejemplo de funcionamiento con 4 bits (el comportamiento es el mismo con los 10 bits del caso real). Como se ve, a cada iteración se acumula y se desplaza a la derecha.

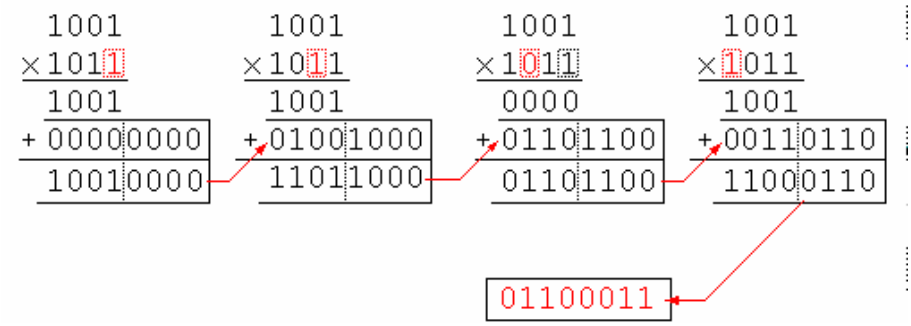


Figura 6.14 Ejemplo de realización de un producto.

El primer número se correspondería con el del registro Reg1 y el segundo con el almacenado en Reg2, en el que se ha resaltado el bit que estaría activo (quedaría en la posición de menos peso) en cada desplazamiento del registro. Debajo se indica el resultado del producto de Reg1 por el bit activo de Reg2. Enmarcados en las dos líneas siguientes se presentan dos números más, que corresponden a los valores almacenados en el registro LoadShift, que está actuando de acumulador, antes y después de realizarse la correspondiente suma. Como se puede apreciar, una vez realizada la suma del valor anterior con el producto parcial, se actualiza el resultado sobre los bits de más peso de dicho registro a la vez que se realiza un desplazamiento. En realidad se puede considerar que la parte alta del registro actúa como un cerrojo, mientras que la parte baja actúa como un registro de desplazamiento. En la figura se representa mediante una flecha resaltada el momento en el que se realiza el desplazamiento. El resultado, una vez realizado el último producto, se almacena en otro registro que sirve de entrada al siguiente bloque.

La unidad de control del conjunto se encarga de habilitar en todo momento los registros adecuados, de realizar los desplazamientos y de gestionar el bit de signo. En la figura 6.15 se muestran los resultados de la simulación, con la obtención de los tres productos $G_x \cdot G_x$, $G_x \cdot G_y$ y $G_y \cdot G_y$. Las entradas son valores en complemento a 2, mientras que como salida se obtiene el módulo del resultado. El signo no se obtiene como tal si no que se sustituye por un bit que indica al bloque siguiente si debe realizar una operación de suma o resta (siempre se genera el signo negativo para $G_y \cdot G_y$ puesto que este producto, según la fórmula del algoritmo de Rao, siempre debe restarse. La simulación de la figura corresponde a los 32 ciclos, pero se ha ampliado una parte para detallar mejor el funcionamiento del bloque.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

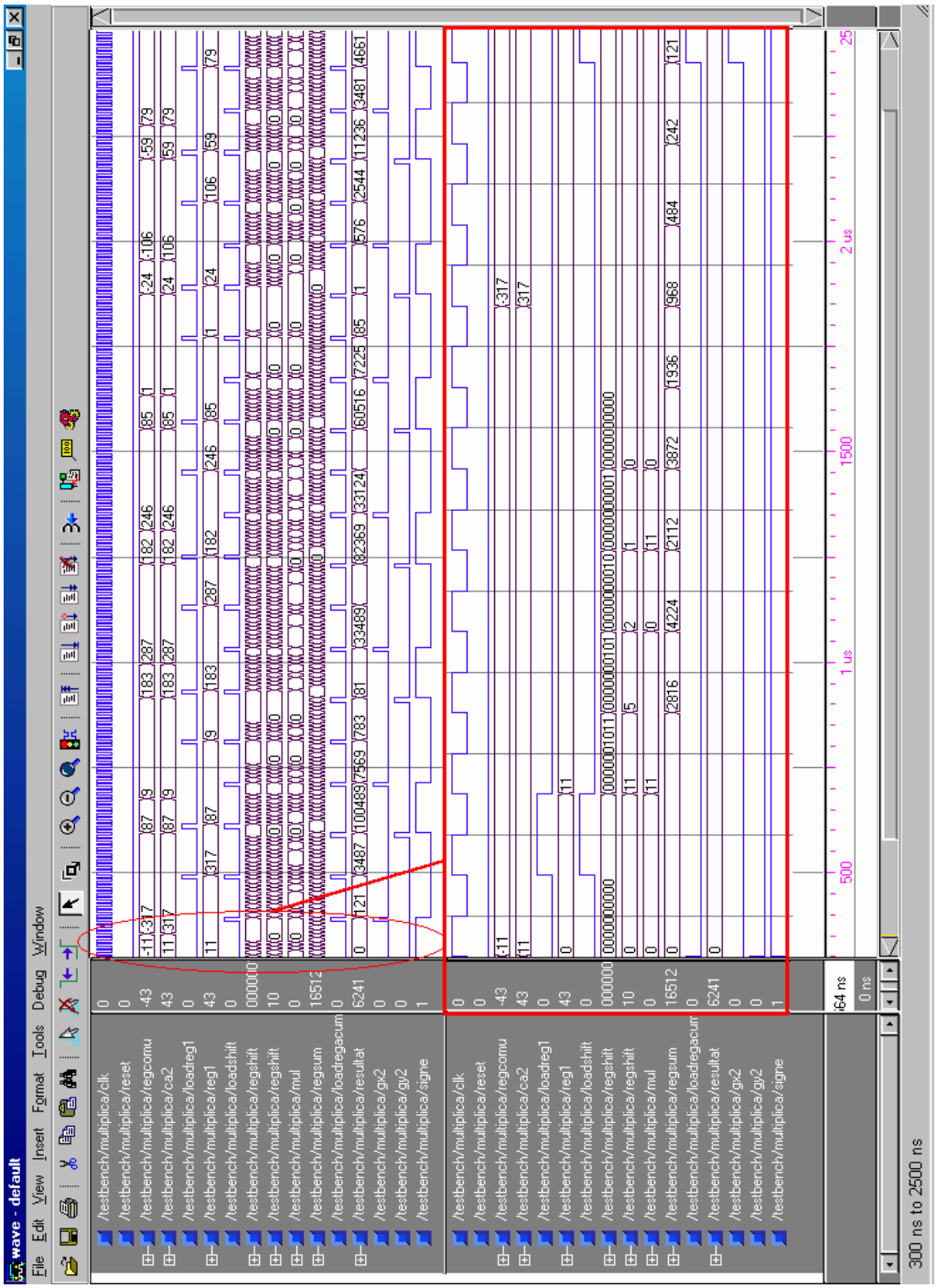


Figura 6.15 Simulación del bloque multiplicador.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Los primeros valores de entrada en la ventana de simulación de la figura son -11 y después -317. Corresponden, respectivamente, a los valores de los gradientes G_x y G_y calculados por el bloque previo. En la parte superior, que no está ampliada, se pueden observar varias cosas. Por un lado, el módulo de los valores de entrada se carga en los dos registros multiplicadores y, finalmente, el producto se guarda en el registro resultado que contiene, sucesivamente, los productos $G_x \cdot G_x$, $G_x \cdot G_y$ y $G_y \cdot G_y$. Por otro lado se observa el signo de salida, la simulación presenta diferentes combinaciones de signos en los conjuntos G_x, G_y que van llegando. Primero los dos negativos, después los dos positivos y en el último caso uno positivo y el otro negativo. Como se ha dicho, la salida signo es siempre negativa en el caso de $G_y \cdot G_y$, puesto que se trata de un cuadrado que siempre debe restarse en el siguiente bloque. En el producto final se puede ver que el bit también se activa en el producto $G_x \cdot G_y$ ya que se multiplican gradientes de signos opuestos.

De la zona ampliada se debe destacar como se cargan los registros reg1 i regshift y como este último se va desplazando para realizar la and lógica de su último bit con el valor del registro reg1, obteniéndose el producto sobre la señal mul. Se ha representado el registro regshift dos veces, una codificado en decimal y la otra en formato binario, para que se pueda ver mejor su evolución al realizarse los desplazamientos (‘shift’). El registro regsum, tal y como se ha detallado anteriormente, está formado por un registro que suma en sus bits de más peso y desplaza en los de menos. Si se mira en la simulación, se ve como el resultado del producto se va desplazando a la derecha y como se acaba obteniendo el valor 121 correspondiente al resultado. Finalmente se puede observar que el resultado de elevar al cuadrado se almacena en el registro regsum y que ya se dispone del valor de G_y a punto para ser cargado en el registro regshift y empezar la operación del producto $G_x \cdot G_x$.

Destacar, una vez más, la importancia del orden de realización de los productos. Puesto que sólo se dispone de un registro de entrada en el que se van presentando los gradientes, el primer producto que se debe realizar es siempre $G_x \cdot G_x$. El valor G_y, que va a reemplazar al valor anterior, va a llegar mientras se realiza el cálculo. Puesto que todavía se dispone de G_x en el registro reg1 (no en regshift puesto que se ha desplazado) G_y se debe cargar en el registro regshift y empezar la obtención de $G_x \cdot G_y$. Cuando finaliza este producto todavía se dispone de G_y en el registro de entrada, por lo que se cargan de nuevo un los dos registros con G_y para operar $G_y \cdot G_y$.

Las señales gx2 y gy2 las genera la unidad de control con objeto de indicar al bloque qué producto está realizando en cada instante y se pueda generar correctamente el bit de signo de salida. Si la señal gx2 está activa se está calculando $G_x \cdot G_x$, con lo que el bit de signo es cero, mientras que si está activa la señal gy2 el signo debe ser negativo. Si las dos señales están a cero, significa que se está operando $G_x \cdot G_y$, con lo que la salida signo será función de los signos de los dos gradientes de entrada G_x y G_y, siendo la función xor la encargada de generar el bit de salida.

6.1.4 Bloque acumulador

El bloque acumulador parte de los productos obtenidos en el bloque anterior y los acumula en unos registros, sumando o restando según corresponda. En la figura

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

siguiente se muestra el esquema simplificado que, como puede apreciarse, presenta una estructura y un funcionamiento similares a la del bloque de cálculo de gradientes.

Con el multiplexor se selecciona cual de los dos acumuladores se debe utilizar en función del producto que se haya realizado en el bloque anterior. De acuerdo con el algoritmo de Rao, los gradientes al cuadrado se suman/restan al acumulador 2, mientras que el producto cruzado afecta al acumulador 1. La unidad de control genera la señal de control para el multiplexor en función del producto que esté disponible en el registro de entrada.

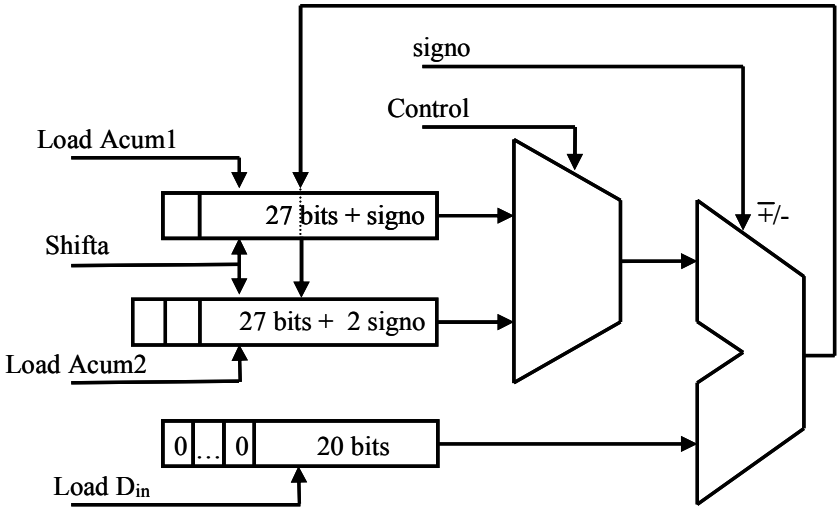


Figura 6.16 Esquema simplificado del bloque acumulador.

El tamaño de los registros del bloque se ha elegido para soportar el peor caso posible. Los valores de entrada son números de 20 bits más 1 de signo, que se acumulan dentro de una ventana de 9x9 píxeles. En el peor de los casos el resultado será 81 veces mayor que el máximo dato de entrada de 20 bits, por lo que se debe disponer de un registro acumulador de 27 bits más signo. El registro que acumula el producto G_xG_y debería ir multiplicado por dos; en lugar de esto lo que se hace es dividir por dos el otro. Para ello se desplaza su valor y se le añade un segundo bit de signo. El valor del arco tangente no va a cambiar, puesto que se mantiene la relación entre ellos y sólo se ha hecho un cambio de escala que, como se verá al estudiar el bloque de la tangente inversa, no afecta en absoluto a la precisión con la que se va a realizar el cálculo.

El módulo realiza sumas (restas) de números de 28 bits, lo que obliga a complementar con ceros el valor del registro de entrada. Aunque se trate de una suma de muchos bits, lo que ralentiza su ejecución, los productos llegan cada 10 ciclos de reloj, por lo que éste bloque dispone de un amplio margen de tiempo para realizar las operaciones.

La función tangente inversa se encuentra tabulada en una memoria ROM de 256 posiciones. La salida del módulo acumulador es la dirección de 8 bits correspondiente al

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

valor buscado. Estos 8 bits se obtienen a partir de los 4 bits de más peso de cada registro, redondeando el cuarto con el valor del quinto.

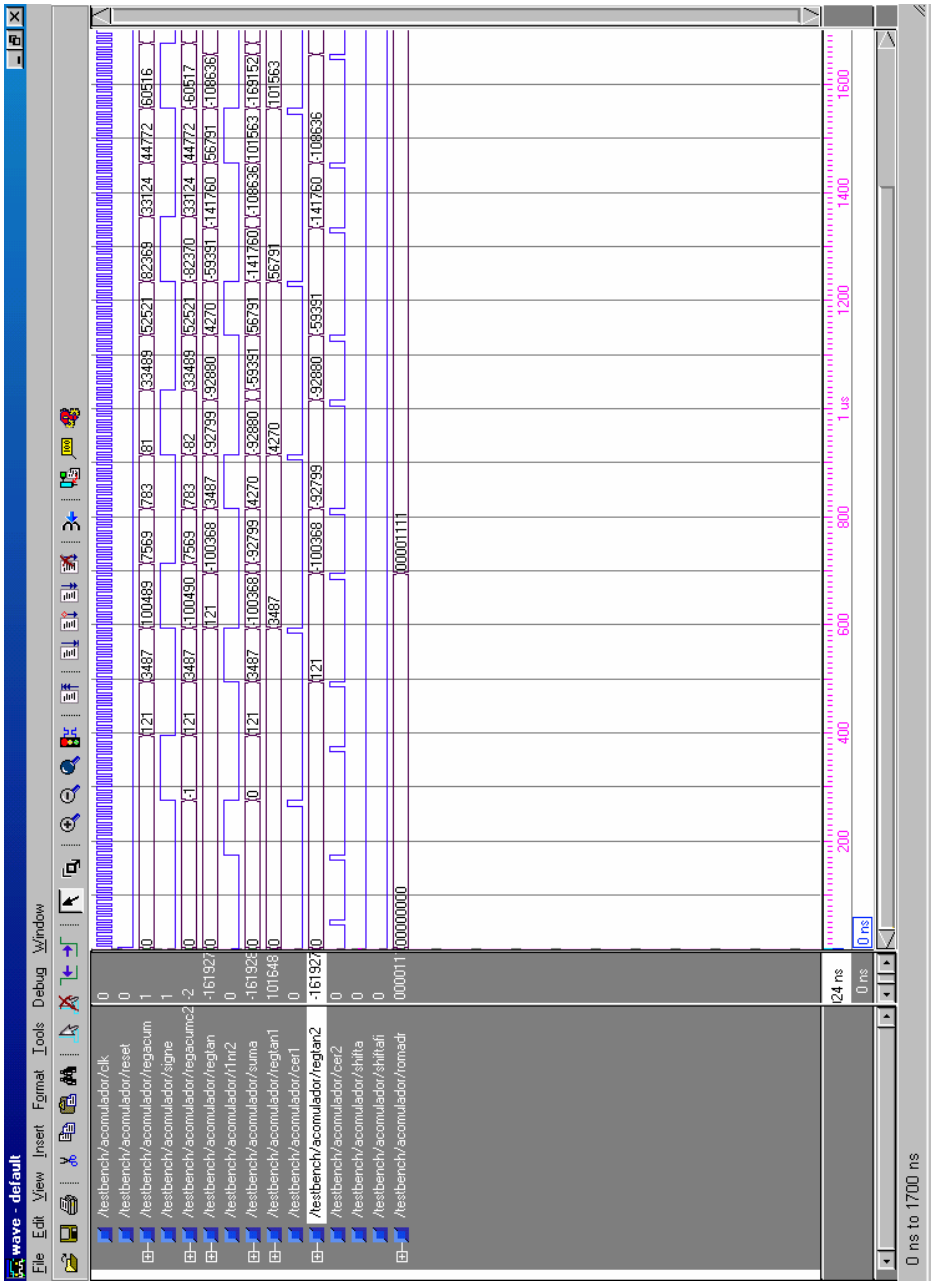


Figura 6.17 Simulación del bloque acumulador.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Como paso previo se va a realizar un desplazamiento en ambos registros, controlado por la señal de desplazamiento (Shift), con objeto de situar el bit más significativo de los registros a la izquierda. El desplazamiento acaba cuando cualquiera de los dos registros (o ambos a la vez) tienen el bit más significativo a la izquierda (junto al bit de signo). El desplazamiento se realiza siempre en los dos registros, suponiendo un cambio de escala que no va a alterar el valor del arco tangente a calcular en el siguiente bloque. El diseño se ha realizado para permitir estos dos modos de funcionamiento en los registros acumuladores: como un registre puro o como registro de desplazamiento. Una vez se han acumulado todos los gradientes y se debe calcular el arco tangente se activa el modo de desplazamiento (en este modo dejan de acumularse los valores que se reciban a la entrada) con objeto de, como se justifica en el siguiente apartado, obtener una la dirección de memoria de sólo 4 bits, cometiendo el mínimo error posible.

En la figura 6.17 se muestra la correspondiente simulación del funcionamiento del bloque. Los gradientes que se reciben a la entrada se acumulan en uno u otro registro en función de la señal de control r1nr2. El acumulador emplea el número de entrada directamente o realizando primero el complemento a 2 según la señal de entrada signo indique si debe realizarse una suma o una resta. Debe indicarse que la señal regacumc2 realmente contiene el complemento a 1, si la señal signo está activa, conectándose además dicha señal como carry de entrada del sumador para completar el complemento a 2. Mirando la simulación se observa como se van sumando y restando, respectivamente, el primer y el tercer valor de entrada sobre el registro regtan2, y como se suma o resta el segundo en el registre regtan1.

Una ver finalizada la función de acumulador, y puesto que ya se han tratado todos los puntos de la ventana, se activa la señal de desplazamiento (shifta) y se empiezan a desplazar hacia la izquierda los dos registros regtan1 y regtan2. El desplazamiento se termina cuando se sitúa un bit significativo junto al bit de signo. Se redondea al cuarto bit y se presenta el resultado de los dos conjuntos de 4 bits en la salida romadr, que es el valor a emplear para direccionar la ROM.

6.1.5 Bloque de la tangente inversa

Se aborda a continuación el diseño del bloque que va a proporcionar la dirección estimada en la ventana W de acuerdo a la descripción del método de Rao realizada en el capítulo 4. Se trata de tabular la siguiente función:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) & si\ \overline{G_{s,x}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) + \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} tg^{-1}(\overline{G_{s,y}} / \overline{G_{s,x}}) - \pi & si\ \overline{G_{s,x}} < 0, \overline{G_{s,y}} < 0 \end{cases}$$

partiendo del contenido de los registros de salida del bloque anterior: Acum1 y Acum2.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

$$\overline{G_{s,y}} = \sum_W G_x G_y \qquad = Acum1$$

$$\overline{G_{s,x}} = \sum_W G_x^2 - \sum_W G_y^2 = Acum2$$

Las características propias de la función tangente inversa, así como las características de nuestro diseño, empleando aritmética de números enteros, llevan a la tabulación en una memoria ROM de los valores de la función y a un diseño que evita el cálculo de la división (operación computacionalmente costosa). Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que hay que respetar unas cotas de error máximas, de acuerdo a la precisión requerida por el algoritmo de seguimiento.

En el capítulo 3 se había estimado un paso discreto de 15º como suficiente para realizar correctamente el seguimiento de una cresta, mientras que en los puntos 4 y 5 se ha comprobado la robustez del algoritmo a las estimaciones erróneas, inevitables debido a la presencia de poros en la huella o a defectos en la imagen capturada. Así, en el proceso de estimación de la dirección, se va a fijar un error máximo de ±15 º, lo que corresponde a avanzar o retroceder un paso discreto como máximo, asegurando que el error cometido en el cálculo discreto de la función tangente inversa no va a afectar a la siguiente iteración.

Realmente, al no ser lineal la función tangente, tampoco lo es el error máximo permitido. Como se puede apreciar en la figura 6.18, el error va a ser mayor para ángulos próximos a 0º (o a 90º) que para valores cercanos a 45º. Por lo tanto se debe asegurar un error máximo de unos ±11,4º para ángulos cercanos a 45º, mientras que el error puede aumentar hasta alrededor de ±18º para valores cercanos a 0º.

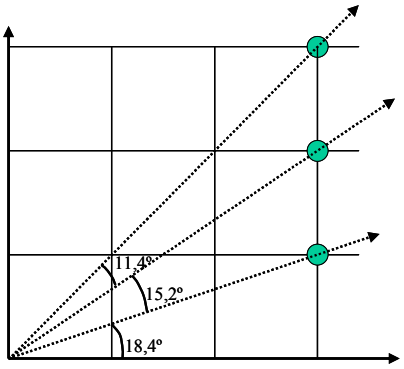


Figura 6.18 Valores angulares para desplazamientos de 3 píxeles en la dirección x.

El error total cometido al aproximar el arco tangente (función arctg) de un cociente por una versión discreta (que definimos como arctgd) que use unos valores aproximados de dicho cociente puede expresarse como:

$$e = arctgd\left(\frac{y+\Delta y}{x+\Delta x}\right) - arctg\left(\frac{y}{x}\right)$$

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Debe hacerse notar que este error corresponde al cálculo del arco tangente y no a la estimación realizada; puesto que el algoritmo de Rao divide por dos el ángulo, también va a dividirse por dos el error cometido en el cálculo del arco tangente dado por la anterior expresión. En la fórmula se engloban dos tipos de errores originados por operaciones distintas: la discretización angular a la salida (e_d), y a la aproximación de la división (e_a). Si se ponen por separado las dos fuentes de error se obtienen las siguientes expresiones:

$$e = e_d + e_a \quad donde \quad \begin{cases} e_d = arctgd\left(\dfrac{y+\Delta y}{x+\Delta x}\right) - arctg\left(\dfrac{y+\Delta y}{x+\Delta x}\right) \\ e_a = arctg\left(\dfrac{y+\Delta y}{x+\Delta x}\right) - arctg\left(\dfrac{y}{x}\right) \end{cases}$$

Los dos tipos de error se acumulan y van a conducir a restricciones adicionales para que la estimación de dirección permanezca dentro de las cotas fijadas, debiéndose fijar la cota máxima de error de cada uno de los dos tipos. El error de discretización está asociado al número de bits de salida con que se represente el ángulo correspondiente. Existe un error en la función tabulada al asociarse un único valor discreto a todo un abanico de posibles valores angulares; y ello de forma independiente a lo fiable que sea el método de estimación, del tamaño de la ventana empleado y la precisión con la que se calcule la división. En la figura 6.19 se muestra el caso en el que se codifican 16 direcciones entre 0º a 180º, lo que corresponde a un salto de 11,25º por dirección.

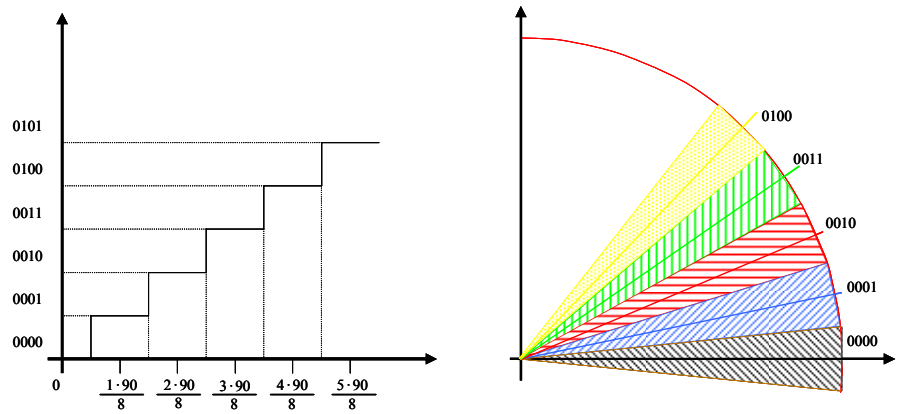


Figura 6.19 Codificación angular en 16 direcciones.

A este error se le debe añadir el producido por el cálculo aproximado de la división entre los valores Acum2 y Acum1. Al ser una operación previa a la obtención del arco tangente siempre existe la posibilidad, por pequeño que sea el error cometido, de tener un cambio de sector y pasar así al valor angular adyacente. En la figura 6.20 se muestra un ejemplo (con $\Delta x = 0$) en el que una pequeña variación Δy en el eje de ordenadas provoca un pequeño error $e = \varphi_a - \varphi$ que es suficiente para cambiar de sector, de forma que al discretizar se va a elegir la orientación 0011 en lugar de la 0010

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

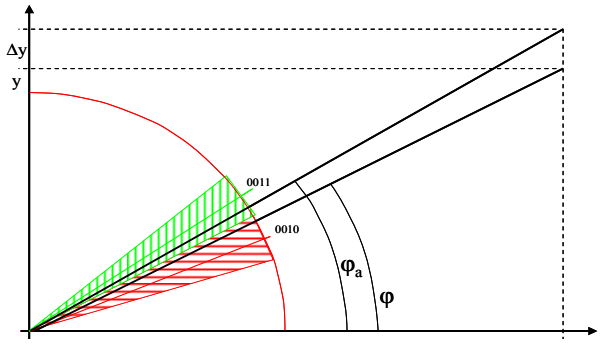


Figura 6.20 Representación del error de aproximación.

Mirando la figura se puede deducir la expresión del error total (e), en función de los valores de los errores de aproximación (e_a) i de discretización (e_d).

$$\begin{cases} si\ |e_a| < |e_d| & \Rightarrow \quad |e| < |e_a| + |e_d| \\ si\ |e_d| < |e_a| < 2|e_d| & \Rightarrow \quad |e| < 2|e_d| \end{cases}$$

De las expresiones anteriores (no se han puesto las correspondientes a los casos en los que el error de aproximación sea más del doble del error cometido por discretización), así como del máximo valor deseado, se van a establecer las condiciones que se deben cumplir para permanecer dentro de los límites admitidos. Como primera aproximación se discretizan los ángulos a 16 direcciones, aprovechando por completo los 4 bits que ya eran necesarios para representar las 12 orientaciones inicialmente previstas en el algoritmo de seguimiento. De este modo el error de discretización es de ±5,625º, con lo que, si el error de aproximación se mantiene dentro de márgenes similares, el error total estará por debajo de ±11,25º. Anteriormente se ha visto que el máximo permitido en el peor caso era de ±11,4º en las cercanías de los 45º, por lo que se ve que la disminución del número de bits lleva a niveles de error inaceptables. Además, como se verá en los siguientes apartados, el hecho de emplear un número de direcciones que es una potencia exacta de 2 facilita la implementación hardware de algunos circuitos. Más adelante se estudiará la posibilidad de ampliar la representación a 32 direcciones, y se analizará el efecto sobre el error.

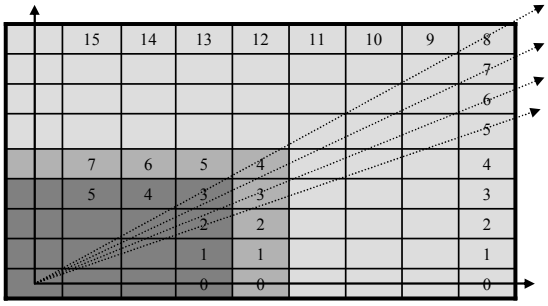


Figura 6.21 Posibles codificaciones de las direcciones.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La figura 6.21 representa las orientaciones del primer cuadrante correspondientes a emplear 12, 15 o 32 niveles discretos. En gris más oscuro se ve el caso correspondiente a 12 direcciones, con una precisión suficiente para desplazamientos máximos de 3 bits, y que puede asociarse a ventanas de 7x7 píxeles. El caso intermedio corresponde a una ventana de 9x9 píxeles (como las empleadas para estimar la orientación por Rao). Finalmente, el caso de 32 direcciones se puede asociar a ventanas de 17x17 píxeles, y presenta un nivel de resolución mayor del necesario para los pequeños desplazamientos con los que se va a trabajar, como puede comprobarse al ver cómo se concentran las líneas de las direcciones correspondientes a medida que se acercan al origen (muchas orientaciones coincidiendo en el mismo píxel).

Por lo que se refiere al error debido a la aproximación de la división, se han analizado distintas tablas en las que se calculaba la función tangente inversa empleando sólo algunos de los bits más significativos de Acum1 y de Acum2, para comprobar así los máximos errores que se van a originar. La idea del cálculo es empezar normalizando Acum1 y Acum2 mediante sucesivas divisiones por dos (desplazamientos a la izquierda de los módulos de las respectivas representaciones binarias) hasta que el bit de más peso (aparte del bit de signo) de cualquiera de los dos números sea significativo. Se emplean entonces los n primeros bits de ambos números para direccionar la tabla que contiene los valores discretos de la función arco tangente. Los respectivos bits de signo van a indicar el cuadrante del ángulo correspondiente, mientras que tres bits de módulo para cada uno de los dos valores van a bastar para aproximar la división con la resolución suficiente (realmente se empleará un bit adicional para redondear el valor del último bit empleado en lugar de, sencillamente, truncar los bits no utilizados).

En la tabla 6.4 se representan los ángulos que se obtienen trabajando con vectores de 3 bits de módulo (sólo se incluye la tabla del primer cuadrante, correspondiente al caso con los dos bits de signo a cero). Los errores máximos que se van a producir, en caso de truncar a estos 3 bits, vienen determinados por la diferencia existente entre los valores de los ángulos de celdas adyacentes.

111	90	81.87	74.05	66.80	60.26	54.46	49.40	45
110	90	80.54	71.57	63.43	56.31	50.19	45	40.60
101	90	78.69	68.20	59.04	51.34	45	39.81	35.54
100	90	75.96	63.44	53.13	45	38.66	33.69	29.74
011	90	71.57	56.31	45	36.87	30.96	26.57	23.20
010	90	63.43	45	33.69	26.57	21.80	18.43	15.95
001	90	45	26.57	18.43	14.04	11.31	9.46	8.13
000	X	0	0	0	0	0	0	0
	000	**001**	**010**	**011**	**100**	**101**	**110**	**111**

Tabla 6.4 Valores angulares empleando tres bits significativos.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Los errores serán inferiores a los que se deducen directamente de la tabla. Por un lado la versión final del algoritmo va a redondear en lugar de truncar y, por otra parte, la dirección estimada es la mitad del ángulo devuelto por la función arco tangente, por lo que la diferencia entre los ángulos de celdas adyacentes también se dividirá por dos. Asimismo debe tenerse en cuenta, a la hora de analizar la tabla anterior, que la zona marcada en gris, en la que se dan las mayores diferencias angulares, no va a darse nunca, puesto que corresponde a zonas en las que tanto el numerador como el denominador tienen menos de tres dígitos significativos, y ello sólo podría ocurrir en zonas muy ruidosas que serían previamente segmentadas.

Del análisis de las distintas tablas, y teniendo en cuenta el redondeo, se obtiene que, en el peor de los casos:

$$|e_a|_{Max} \leq \frac{1}{2}\left[arctg\left(\frac{1}{4}\right) - arctg\left(\frac{1,5}{3,5}\right)\right] = 4,6°$$

con lo que el error total se va a mantener por debajo de de ±11,25º, que era el máximo error que se admitía para ángulos cercanos a los 45º (para valores angulares cerca de 0º o de 90º el margen es todavía mayor):

$$|e|_{Max} \leq |e_a|_{Max} + |e_d|_{Max} = 10,2°$$

	-7	-6	5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	
7	6	6	6	5	5	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2	**7**
6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2	**6**
5	6	6	6	6	6	5	5	4	3	3	2	2	2	2	2	**5**
4	7	7	6	6	6	5	5	4	3	3	2	2	2	1	1	**4**
3	7	7	7	6	6	5	5	4	3	3	2	2	1	1	1	**3**
2	7	7	7	7	7	6	5	4	3	2	1	1	1	1	1	**2**
1	-8	-8	7	7	7	7	6	4	2	1	1	1	1	0	0	**1**
0	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
-1	-8	-8	-7	-7	-7	-7	-6	-4	-2	-1	-1	-1	-1	0	0	**-1**
-2	-7	-7	-7	-7	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-1	**-2**
-3	-7	-7	-7	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	-1	**-3**
-4	-7	-7	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-1	-1	**-4**
-5	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-2	**-5**
-6	-6	-6	-6	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-2	-2	**-6**
-7	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-2	**-7**
	-7	**-6**	**5**	**-4**	**-3**	**-2**	**-1**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	

Tabla 6.5 Valores codificados de los ángulos redondeando a tres bits significativos más el de signo.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

La tabla 6.5 muestra las direcciones codificadas en la memoria ROM de acuerdo a los criterios indicados. Las filas y columnas exteriores (en gris oscuro), indican los valores de Acum1 y de Acum2, redondeados a tres bits más signo, de los que se obtendrá directamente la dirección de memoria que almacena el valor discreto del arco tangente correspondiente dividido por dos (contenido de las celdas de la tabla).

El método de Rao acumula los gradientes calculados en los diferentes puntos de la ventana. Si las direcciones coinciden el valor acumulado va a ir aumentando, mientras que si los gradientes apuntan en direcciones opuestas se van a contrarrestar dando lugar a valores bajos en los acumuladores. Así, la zona central, marcada en gris claro, no se dará nunca ya que o bien corresponde a zonas segmentadas (si los gradientes apuntan en direcciones opuestas la coherencia será baja), o va a evitarse mediante el desplazamiento de bits.

El redondeo se efectúa sumando un 1 (+ 00001) al quinto bit de los números positivos o restándolo de los negativos (+ 11111). Nunca van a redondearse los valores extremos: -8 (1000) o +7 (0111) para no provocar cambios de signo. En estos casos el error será mayor, pero se mantendrá por debajo del umbral fijado debido a la no linealidad de la tangente inversa.

Si por alguna necesidad específica fuese necesario aumentar la precisión de este bloque se debe buscar un nuevo compromiso entre los dos tipos de errores. Por un lado, si se pasa a emplear 5 bits para la codificación de los ángulos, se dobla el número de direcciones y se divide por dos el error de discretización, que pasa a ser de 2,8º. Si por otra parte se aumentan las precisiones de Acum1 y de Acum2, se va a multiplicar por 4 el tamaño de la ROM pasando el error máximo a estar ligeramente por encima de los 2º. Combinando las dos posibilidades se puede fijar un error total máximo inferior a los 5º.

6.1.6 Unidad de control

Es el bloque encargado de sincronizar todos los anteriores, generando todas las señales de control necesarias para habilitar los registros adecuados a cada momento, generar las señales de reset y controlar las operaciones a realizar.

Su funcionamiento, basado en un contador de 5 bits, es extremadamente sencillo. Para cada punto de la ventana de 11x11 bits se accede a sus 8 píxeles vecinos y se realizan exactamente las mismas operaciones. Así, si cada ciclo tiene 8 accesos a memoria y cada acceso necesita 4 ciclos de reloj, tenemos ciclos de 32 estados. Se va a emplear un contador de 5 bits para codificar estos estados, y se va a mirar en cuales de ellos debe activarse cada una de las señales del sistema. La lógica combinacional que implementa estas funciones se optimiza pensando en funciones de menos de 5 variables, de cara a su implementación en una FPGA.

Este contador se implementa junto al que genera las direcciones de memoria, puesto que la unidad de control debe detectar el momento en que el contador correspondiente al eje Y llega a su final. A partir de ese punto, el circuito espera la llegada de los últimos datos y la correspondiente actualización de resultados antes de activar el desplazamiento de los registros acumuladores. Una vez finalizado el desplazamiento ya se dispone de la dirección de entrada a la memoria ROM y, por lo tanto, puede leerse a su salida el valor de la dirección estimada.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

6.2 Otros bloques

El objetivo final del diseño es la consecución de una identificación en tiempo real (menos de 300 ms). Como se ha visto, la ejecución por software del algoritmo completo en un PowerPC a 100 MHz requiere alrededor de dos segundos y medio, por lo que, según puede deducirse del perfil de ejecución del algoritmo (apartado 5.3), no va a ser suficiente con la realización hardware del cálculo de la orientación. Una primera estimación de la mejora obtenida con el coprocesador empleado para la función tg_dir() indica que el cálculo por hardware de la dirección necesita menos de 60 μs, mientras que por software se necesitaban alrededor de 1,3 s. De esta forma la extracción de características podría realizarse en unos 800 ms, por lo que va a ser necesario un coprocesador que implemente en hardware algunas operaciones adicionales.

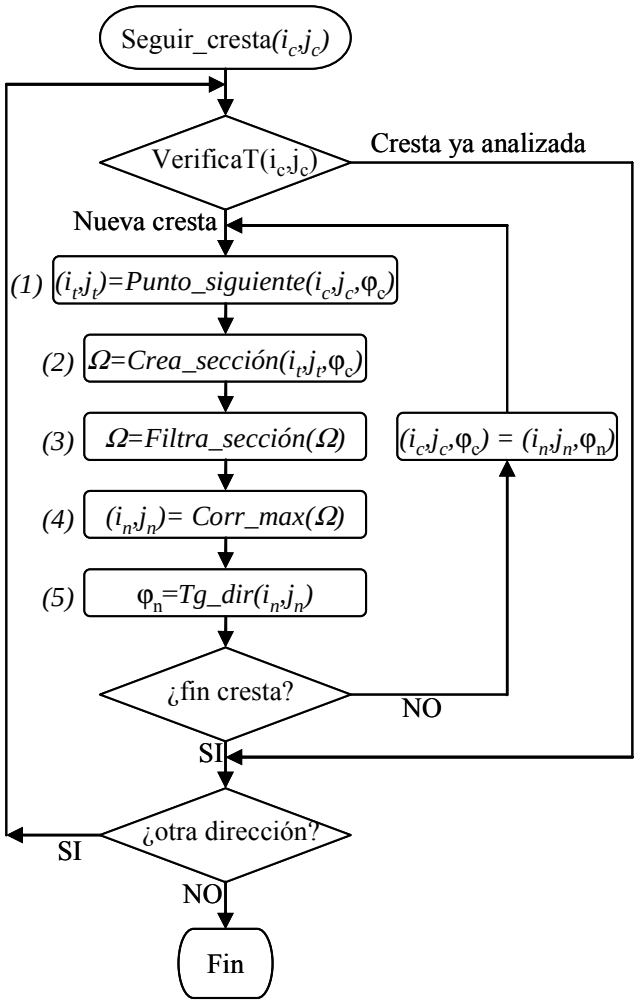


Figura 6.22 Diagrama de flujo de la función de seguimiento de crestas.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Se ha diseñado un coprocesador que implementa las funciones correspondientes a la parte central del bucle de seguimiento de crestas reproducido en la figura 6.22 y comentado anteriormente en el apartado 5.2.3.

Es importante hacer notar que, si bien estas funciones en conjunto representan más del 90 % del tiempo de ejecución total del algoritmo, la función tg_dir(), encargada de estimar las orientaciones, se ejecuta un número elevado de veces fuera del bucle central, y representa por si sola casi el 70 %.

Estudiando con detalle el funcionamiento del algoritmo sobre un pequeño conjunto de imágenes de muestra, se ha comprobado que el bucle central de la función de seguimiento de crestas se ejecuta sólo una pequeña parte de las veces que se inicia; en la mayor parte de las ocasiones la cresta más cercana al punto inicial escogido ya ha sido extraída anteriormente. Por ello, aunque una vez iniciado el bucle se ejecuten un número elevado de iteraciones, estadísticamente la función tg_dir() se ejecuta más de tres veces fuera del bucle por cada vez que se llama dentro de él.

Así, para poder reducir suficientemente el tiempo de ejecución, se diseña un coprocesador capaz de operar en dos modos distintos: ejecutando los pasos (1) a (5) de la figura 6.22, o bien realizando sólo el paso (5) correspondiente a la estimación de dirección.

La figura 6.23 representa el coprocesador diseñado. Como puede apreciarse el circuito consta de 6 etapas, coincidiendo la última de ellas con el circuito de estimación de dirección analizado en el apartado anterior. Cada una de las etapas implementa uno de los pasos del diagrama de flujo de la figura 6.22, excepto el paso (4) que se ha dividido en dos bloques separados.

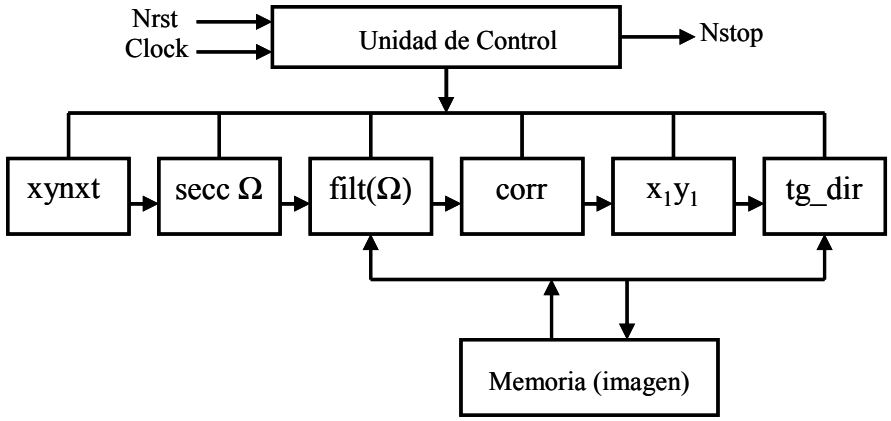


Figura 6.23 Esquema del coprocesador completo.

El coprocesador opera con una imagen en escala de grises (8 bits) de 256 x 256 píxeles almacenada en memoria ram. La versión hardware del algoritmo trabaja con valores predeterminados de los parámetros del algoritmo de Maio (μ=3 y σ=7); aunque inicialmente se había pensado en un hardware parametrizable finalmente se ha optado por fijar los parámetros en la etapa de diseño, puesto que sus valores dependen de la

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

resolución del sensor y van a permanecer constantes una vez se fijen las características de la etapa de adquisición de la huella.

A cada iteración el algoritmo avanza al siguiente punto de la cresta para después analizar las condiciones de parada. Así, el coprocesador va a encargarse de proporcionar por los puertos de salida x1,y1 y w1 los valores del siguiente punto de la cresta (i_n, j_n) y de su orientación φ_n, partiendo del punto inicial (i_c, j_c) y de la orientación en dicho punto φ_c (valores de entrada de los puertos x0,y0 y w0). El diseño del circuito permitiría un funcionamiento en pipeline si se utilizara para preestimar las orientaciones en una imagen completa; sin embargo la versión actual sólo se emplea dentro del algoritmo de seguimiento donde cada iteración se basa en el resultado de la anterior. Sin embargo debe recordarse, como se ha descrito en el apartado anterior de este capítulo que el bloque de estimación de direcciones si que funciona internamente como un verdadero pipeline. De forma similar, y de cara a la optimización de los recursos necesarios, también se estructura cierto tipo de pipeline en la relación entre el resto de bloques del coprocesador. La limitación principal de cara al diseño en pipeline, como ya ocurría en el caso del circuito de estimación de direcciones, está en los accesos a la memoria Ram en la que se encuentra almacenada la imagen, siendo por ello el bloque de filtrado el que va a marcar la temporización del conjunto.

A continuación se detalla el funcionamiento de una primera versión del circuito [CAÑ-06] y se comentan algunas posibles modificaciones futuras que, según la tecnología empleada podrían ser interesantes para optimizar el diseño. En cualquier caso, el circuito crítico es el correspondiente a la estimación de la dirección, siendo mucho menos importantes los efectos que puedan tener a nivel global, ya sea en tiempo de ejecución o en tamaño de circuito, las optimizaciones de los siguientes bloques.

6.2.1 Punto siguiente

La primera etapa (xynxt en la figura 6.23) se encarga de calcular el punto desplazado (i_t, j_t) a partir del valor de entrada (i_c, j_c) y de la orientación φ_c. El bloque se ha dividido en dos subcircuitos. El primero implementa la función Punto_siguiente(), que retorna el valor del desplazamiento a realizar en cada uno de los dos ejes a partir de los valores de ángulo (φ_c) y distancia (μ=3). El segundo circuito emplea los valores de salida del anterior para calcular las coordenadas del punto (i_t, j_t).

La estructura del circuito se elige para minimizar los recursos empleados, pero no es fácil la obtención de un diseño óptimo. Las primeras implementaciones del coprocesador [CAÑ-04] buscaban minimizar el tamaño de la tabla que almacena los desplazamientos en función de ángulo y distancia, empleando las propiedades trigonométricas de los ángulos complementario y suplementario; así, a costa de cierta lógica de control y de un mayor número de operaciones aritméticas y lógicas se puede trabajar sólo en un octante. Del mismo modo, y puesto que los desplazamientos en ambos ejes se obtienen de la misma tabla en ciclos de reloj distintos, el segundo circuito emplea un único sumador para las dos direcciones.

En la figura 6.24 [CAN-04] se muestra como, con un diseño así, el primer subcircuito emplea 5 ciclos de reloj en obtener los desplazamientos, mientras que en los

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

dos ciclos siguientes la segunda etapa se encarga de calcular (i_t, j_t) a partir de (i_c, j_c) y de las salidas del bloque anterior.

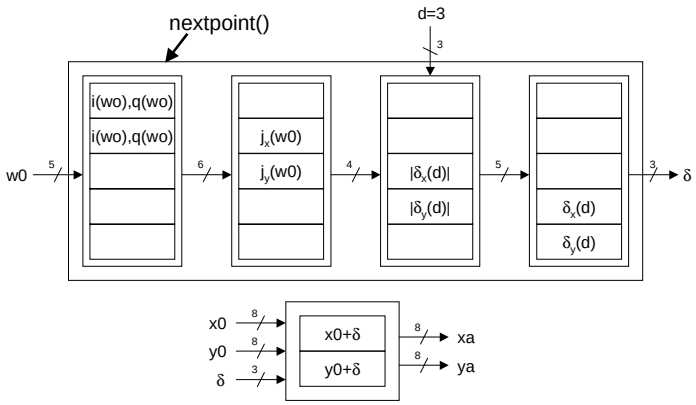


Figura 6.24 Programación de las operaciones del bloque xynxt si se minimiza el tamaño la tabla.

La justificación del diseño realizado se encontraba en que el bloque se emplea también para generar la sección Ω (apartado 6.2.2) y para realizar el siguiente filtrado (apartado 6.2.3); es en este contexto en el que, al iterarse en una sección de 15 píxeles de longitud, se realiza un diseño en pipeline que aumenta la productividad ('throughput') del conjunto.

Sin embargo, al tratarse de una función utilizada por otros bloques (en el apartado 5.3 se ha visto que a pesar de ser una función sencilla acumula el 3% del tiempo de ejecución debido a las muchas veces que se ejecuta) se ha comprobado la necesidad de diseñar una versión que se ejecute en menos ciclos de reloj.

Se ha optado por duplicar el tamaño de la tabla (se almacena un cuadrante completo) y de emplear una tabla separada para cada una de las dos coordenadas. De esta forma la única operación a realizar con los datos de entrada es la de comprobar el semieje de trabajo (bit de signo). Del mismo modo a la salida se obtiene el valor correcto del desplazamiento en cada eje (también con un posible cambio de signo según el cuadrante de la dirección de entrada). El conjunto presenta a la salida los desplazamientos necesarios en cada uno de los ejes, empleando un único ciclo de reloj en lugar de cinco (se supone la tabla en una pequeña tabla de verdad específica).

También se ha modificado el segundo circuito para que, a costa de emplear un sumador independiente para cada eje, se calculen simultáneamente los dos valores de salida: POSX y POSY (ver fig. 6.25).

La unidad de control del coprocesador (fig. 6.23) se encarga de proporcionar los datos adecuados a la entrada para optimizar el funcionamiento de los distintos bloques. Como se verá en el apartado 6.2.3, es la programación de las operaciones de los boques *filt(Ω)* y *corr* la que va a condicionar el flujo de datos el conjunto. El circuito que calcula el desplazamiento a realizar, se usa primero para calcular el siguiente punto de la iteración (dentro del bloque *xynxt*), que se corresponde con el punto central de la sección Ω; y a continuación se emplea para calcular, sucesivamente, los puntos

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

correspondientes a las dos secciones paralelas Ω^{+1} y Ω^{-1}. De esta forma, la función *filt(Ω)* ha ido disponiendo de las direcciones de memoria en las que se encuentran los datos que debe promediar.

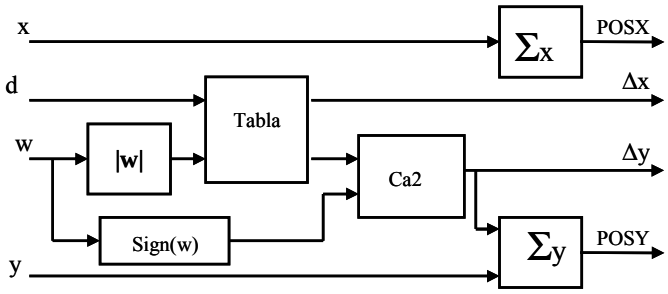


Figura 6.25 Esquema simplificado del bloque *xynxt*.

Puesto que en el diseño del coprocesador se ha supuesto que son necesarios 4 ciclos de reloj para cada acceso a memoria, se va a disponer de estos 4 ciclos para acceder a la función *xynxt* y obtener las coordenadas del siguiente punto de la imagen, tiempo más que suficiente para acceder a la tabla, calcular los desplazamientos y realizar la suma de las coordenadas (realmente, se ha previsto que el bloque procese los datos en 2 ciclos de reloj, de forma que los otros bloques que emplean los valores de salida POSX y POSY dispongan de los dos ciclos restantes para sus propias operaciones).

6.2.2 Obtención de la sección Ω

El siguiente bloque (secc Ω en la figura 6.23) implementa el punto (2) del diagrama de flujo de la figura 6.22. En el proceso de localización de la cresta, como ya se ha explicado en capítulos anteriores, se debe realizar una sección transversal de 15 píxeles de longitud, y éste es el bloque encargado de obtenerla cooperando de la forma adecuada con el bloque que implementa la función Punto_siguiente().

Puesto que el cálculo de la secuencia de puntos de la sección Ω se realiza mediante el bloque anterior, y como que la gestión de la temporización se realiza desde el bloque de control común a todo el coprocesador, el diseño del bloque queda reducido al cálculo de la dirección ortogonal y a la gestión de los registros encargados de almacenar las coordenadas de la sección (fig. 6.26).

Por un lado el circuito lee la dirección estimada de la cresta de la entrada w0, y presenta la dirección ortogonal por la salida Φ. Mientras tanto, aprovechando los ciclos de reloj que tiene disponibles y que se explicarán más adelante, el bloque de control va generando los valores de distancia necesarios (de -7 a +7 píxeles). El valor de la distancia junto con la dirección Φ son las entradas que permiten al bloque que implementa la función *nxtxy* calcular los valores de los desplazamientos a aplicar en cada eje cartesiano y para sumar las coordenadas del punto central a los desplazamientos anteriores, generando así las coordenadas de los 15 píxeles que constituyen la sección Ω.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

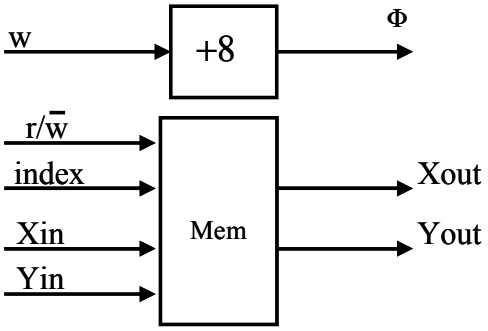


Figura 6.26 Esquema simplificado del bloque *seccΩ*.

Ésta secuencia de coordenadas se almacena en unos registros internos, cuyo comportamiento, como se indica en la figura, es equivalente al de una memoria RAM. La última etapa del procesador accederá a estos registros para poder obtener las coordenadas del píxel correspondiente a la siguiente iteración en el seguimiento de la cresta.

El diseño permite obtener y almacenar cada uno de los valores de la sección en los 4 ciclos de reloj de los que se dispone para ello: en los dos primeros se calcula el desplazamiento y se realiza la suma (como se ha indicado anteriormente, se emplea un sumador independiente para cada eje), empleándose los dos restantes para guardar las coordenadas absolutas del píxel en los registros internos.

6.2.3 Filtrado del corte transversal de la huella

Se trata del primer bloque que debe interactuar con los valores de la imagen almacenada en la memoria RAM (el otro es el bloque de estimación de direcciones); es por esta razón por la que se trata del bloque que fija la temporización y la programación de operaciones del conjunto (4 ciclos de reloj por cada acceso a memoria). Su misión, punto (3) del diagrama de flujo de la figura 6.22, es la de promediar el nivel de gris de los píxeles de la sección Ω con el de los píxeles que se encuentran en dos secciones paralelas separadas 1 píxel a un lado y otro de la anterior (Ω^{+1} y Ω^{-1}).

En su versión actual la unidad de control es la que se encarga de que el circuito vaya recibiendo, por sus puertos de entrada, los valores de las coordenadas de las tres secciones Ω^{+1}, Ω y Ω^{-1}, en lugar de ser el propio bloque *filt(Ω)* el encargado de acceder a los registros internos en los que el bloque anterior almacena las coordenadas de la sección Ω. A partir de estas coordenadas el bloque calcula las direcciones de la memoria RAM de la imagen en las que se localizan los valores de los píxeles a ponderar. Realmente se trata sencillamente de un acumulador, que suma grupos de tres datos y envía el resultado al siguiente bloque que se encargará de usarlo como dato de entrada para calcular la correlación con la función gausiana. El procesado se realiza dentro del pipeline, de forma que una vez sumados los tres datos y presentado el resultado el bloque está listo para operar con los tres valores siguientes.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

6.2.4 Correlación y localización del máximo

El punto (4) del diagrama de flujo de la figura 6.22 se divide en dos circuitos diferenciados. El primero de ellos (*corr* en la figura 6.23) se encarga de realizar la convolución con la máscara gausiana y localizar su valor máximo. El segundo localiza, dentro de la sección **Ω** las coordenadas del siguiente punto en la cresta (i_n, j_n) a partir del índice devuelto por la etapa anterior.

Como se ha dicho anteriormente, el diseño del conjunto se ha realizado para formar una estructura en 'pipeline' que minimice el número de ciclos necesarios para obtener el siguiente punto en la cresta. Como se ha visto, los accesos a memoria que realiza el bloque anterior han determinado la temporización del conjunto; ahora se justificará cómo el bloque actual va a fijar la secuencia en la que va a accederse a los datos.

Un primer análisis hace patente que el segundo de los circuitos del bloque va a quedar fuera de la planificación de operaciones, puesto que no va a empezar a actuar hasta que el primero de los dos circuitos presente a su salida el índice correspondiente de la sección **Ω** que identifica la posición del máximo (realmente se podría intentar ganar un par de ciclos de reloj accediendo previamente a las coordenadas del valor máximo de la iteración anterior; sin embargo se ha considerado que estos dos ciclos no justifican la circuitería de control asociada a controlar que el instante en que se accediera a los registros que almacenan la sección **Ω**, no coincidiese con un acceso de escritura realizado por el bloque que actualiza el valor de dicha sección).

De este modo, van a ser el cálculo de la correlación y la localización de su valor máximo los que determinen el orden de acceso a los datos. Como se ha venido indicando, se trata de localizar un máximo débil en el vector correlación a partir de su valor central; por esta razón se ha decidido que sea este valor de la correlación el primero en calcularse. A partir de este punto se obtienen de forma alternativa los valores a la izquierda y a la derecha mientras se va comprobando la localización del posible máximo débil, deteniéndose el proceso una vez localizado dicho valor. Debe hacerse notar que, como máximo, sólo se van a calcular los 9 valores centrales de la correlación (ya se hacia en la versión software), puesto que se supone que el máximo va a localizarse cerca del centro y que, en caso de alejarse más se debería a que el algoritmo está cambiando de cresta debido a algún error o zona ruidosa (si hay una bifurcación se detectará en el punto correspondiente del algoritmo).

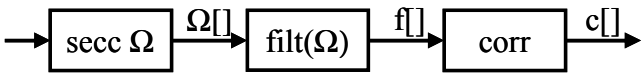


Figura 6.27 Vectores involucrados en el pipeline.

A continuación se va a justificar la secuencia en la que se irán obteniendo los datos con objeto de optimizar el tiempo de respuesta del circuito. En la figura 6.27 se representan de forma esquemática los bloques centrales del coprocesador; cada uno de estos bloques irá proporcionando los datos que forman los vectores que forman parte del cálculo y localización del máximo. En este punto se ha elegido una notación que clarifique la explicación siguiente, aún a costa de cierta pérdida de formalidad.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Así el vector Ω[], formado por los sucesivos valores de salida del bloque *secc Ω*, está formado por los 15 pares de coordenadas correspondientes a la sección Ω centrada en el píxel (i_t, j_t) y perpendicular a la orientación de la cresta:

$$\Omega[] = [\Omega_{-7}, \Omega_{-6}, \Omega_{-5}, \Omega_{-4}, \Omega_{-3}, \Omega_{-2}, \Omega_{-1}, \Omega_0, \Omega_{+1}, \Omega_{+2}, \Omega_{+3}, \Omega_{+4}, \Omega_{+5}, \Omega_{+6}, \Omega_{+7}]$$

La salida del bloque siguiente, etiquetada como f[], corresponde a los 15 valores promedio de los correspondientes píxeles de la sección Ω con las dos secciones paralelas Ω^{-1} y Ω^{+1}:

$$f[] = [f_{-7}, f_{-6}, f_{-5}, f_{-4}, f_{-3}, f_{-2}, f_{-1}, f_0, f_{+1}, f_{+2}, f_{+3}, f_{+4}, f_{+5}, f_{+6}, f_{+7}]$$

Finalmente, el bloque *corr* va entregando a su salida los valores resultado de la correlación del vector anterior con la función gausiana modificada. Dichos valores forman el vector c[], dentro del cual el siguiente bloque debe localizar la posición del máximo débil.

$$c[] = corr(\Omega[]) = [c_{-4}, c_{-3}, c_{-2}, c_{-1}, c_0, c_{+1}, c_{+2}, c_{+3}, c_{+4}]$$

Puesto que la búsqueda del máximo se realizará a partir de la posición central, será este valor central de la correlación c_0 el primero que se calculará en el bloque *corr*. Posteriormente se calcularán, de forma alternativa, los valores situados a la izquierda y a la derecha de este valor central. Asá, la secuencia de valores deseada a la salida del bloque que implementa la correlación será: $c_0, c_{-1}, c_{+1}, c_{-2}, c_{+2}, c_{-3}, c_{+3}, c_{-4}, c_{+4}$.

Si se analizan las ecuaciones correspondientes de los elementos del vector c[] en función de los elementos de vector $f[]=avg(\Omega[])$ se puede extraer la información necesaria para optimizar el flujo de datos (se presentan los valores de c_i en el orden en que se quieren obtener a la salida del bloque que implementa la correlación:

$$\begin{aligned}
c_0 &= f_{-3} + 2f_{-2} + 4f_{-1} + 8f_0 + 4f_{+1} + 2f_{+2} + f_{+3} \\
c_{-1} &= f_{-4} + 2f_{-3} + 4f_{-2} + 8f_{-1} + 4f_0 + 2f_{+1} + f_{+2} \\
c_{+1} &= f_{-2} + 2f_{-1} + 4f_0 + 8f_{+1} + 4f_{+2} + 2f_{+3} + f_{+4} \\
c_{-2} &= f_{-5} + 2f_{-4} + 4f_{-3} + 8f_{-2} + 4f_{-1} + 2f_0 + f_{+1} \\
c_{+2} &= f_{-1} + 2f_0 + 4f_{+1} + 8f_{+2} + 4f_{+3} + 2f_{+4} + f_{+5} \\
c_{-3} &= f_{-6} + 2f_{-5} + 4f_{-4} + 8f_{-3} + 4f_{-2} + 2f_{-1} + f_0 \\
c_{+3} &= f_0 + 2f_{+1} + 4f_{+2} + 8f_{+3} + 4f_{+4} + 2f_{+5} + f_{+6} \\
c_{-4} &= f_{-7} + 2f_{-6} + 4f_{-5} + 8f_{-4} + 4f_{-3} + 2f_{-2} + f_{-1} \\
c_{+4} &= f_{+1} + 2f_{+2} + 4f_{+3} + 8f_{+4} + 4f_{+5} + 2f_{+6} + f_{+7}
\end{aligned}$$

Como se ve, en primer lugar se deberá disponer de los valores que intervienen en el cálculo de c_0, es decir los valores desde f_{-3} hasta f_{+3} (posteriormente se verá en que orden se van a obtener). En la siguiente iteración se va a calcular el valor de c_{-1}, necesitándose para ello los valores ya conocidos anteriormente más el correspondiente a f_{-4}. Por tanto, será este valor f_{-4} el octavo a calcular por la etapa de filtrado. Del mismo

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

modo, los siguientes valores a calcular serán los que se necesiten en la correspondiente iteración y que no se hayan obtenido previamente: f_{+4}, f_{-5}, f_{+5}, f_{-6}, f_{+6}, f_{-7}, f_{+7}.

Completando hacia atrás la secuencia de valores se concluye que el orden más adecuado para la salida de datos de la etapa de filtrado es: f_0, f_{-1}, f_{+1}, f_{-2}, f_{+2}, f_{-3}, f_{+3}, f_{-4}, f_{+4}, f_{-5}, f_{+5}, f_{-6}, f_{+6}, f_{-7}, f_{+7}.

Si se analizan ahora las operaciones en las que se utiliza cada uno de estos valores, es decir en qué cálculos para la obtención del vector de correlaciones se van a emplear, se puede decidir la secuencia de operaciones a aplicar a cada uno de los valores de salida del bloque de filtrado. Empezando por el final, se observa que el valor f_{+7} sólo aparece en el cálculo de c_{+4}; del mismo modo que f_{-7} sólo aparece en el cálculo de c_{-4}. El valor anterior f_{+6} se emplea dos veces: en el cálculo de c_{+3} y en el cálculo de c_{+4} (en este caso ponderado por dos); y lo mismo ocurre con el valor f_{+6}. Iterando el proceso hasta el primer valor f_0 se completa la tabla 6.6, en la que se indican los cálculos en los que se emplea cada valor de salida del bloque de filtrado. Debe hacerse notar que las ponderaciones, al ser todas ellas potencias de 2 no implican la necesidad de multiplicadores sino que van a realizarse mediante registros de desplazamiento.

Salida de filt(Ω)	Correlaciones en las que se emplea (factor de ponderación)						
f_0	c_{-3} (x1)	c_{-2} (x2)	c_{-1} (x4)	c_0 (x8)	c_{+1} (x4)	c_{+2} (x2)	c_{+3} (x1)
f_{-1}	c_{+2} (x1)	c_{+1} (x2)	c_0 (x4)	c_{-1} (x8)	c_{-2} (x4)	c_{-3} (x2)	c_{-4} (x1)
f_{+1}	c_{-2} (x1)	c_{-1} (x2)	c_0 (x4)	c_{+1} (x8)	c_{+2} (x4)	c_{+3} (x2)	c_{+4} (x1)
f_{-2}	c_{+1} (x1)	c_0 (x2)	c_{-1} (x4)	c_{-2} (x8)	c_{-3} (x4)	c_{-4} (x2)	
f_{+2}	c_{-1} (x1)	c_0 (x2)	c_{+1} (x4)	c_{+2} (x8)	c_{+3} (x4)	c_{+4} (x2)	
f_{-3}	c_0 (x1)	c_{-1} (x2)	c_{-2} (x4)	c_{-3} (x8)	c_{-4} (x4)		
f_{+3}	c_0 (x1)	c_{+1} (x2)	c_{+2} (x4)	c_{+3} (x8)	c_{+4} (x4)		
f_{-4}	c_{-1} (x1)	c_{-2} (x2)	c_{-3} (x4)	c_{-4} (x8)			
f_{+4}	c_{+1} (x1)	c_{+2} (x2)	c_{+3} (x4)	c_{+4} (x8)			
f_{-5}	c_{-2} (x1)	c_{-3} (x2)	c_{-4} (x4)				
f_{+5}	c_{+2} (x1)	c_{+3} (x2)	c_{+4} (x4)				
f_{-6}	c_{-3} (x1)	c_{-4} (x2)					
f_{+6}	c_{+3} (x1)	c_{+4} (x2)					
f_{-7}	c_{-4} (x1)						
f_{+7}	c_{+4} (x1)						

Tabla 6.6 Cálculos en los que se emplea cada valor de salida del bloque de filtrado.

Así, mediante el diseño adecuado del circuito de control del coprocesador, se consigue un verdadero 'pipeline'. La tabla anterior resume la correcta secuencia de valores de salida del filtro: desde f_0 hasta f_{+7}. Para calcular cada uno de estos valores se realizan tres accesos a memoria, necesitándose 12 ciclos de reloj para su ejecución. Como se puede apreciar, aún en los casos más críticos va a ser suficiente con un sumador para ir actualizando los acumuladores de cada uno de los valores de correlación (se dispone de 12 ciclos para realizar un máximo de 7 sumas).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Después de 7 x 12 = 84 ciclos el bloque actualizará su salida con el valor central del vector de correlación c_0. A partir de ese instante la salida se actualizará, cada 12 ciclos de reloj, con los siguientes valores del vector: c_{-1}, c_{+1}, c_{-2}, c_{+2}, c_{-3}, c_{+3}, c_{-4}, c_{+4}; mientras la siguiente etapa del pipeline va localizando la posición del máximo. El bloque de filtrado va a necesitar 15 x 12 = 180 ciclos de reloj para generar los 15 valores del vector, sólo un ciclo después el siguiente bloque ya dispondrá del último de los valores del vector de correlación (el dato f_{+7} sólo se suma una vez), y en dos ciclos más finalizará la localización del máximo y se presentarán las correspondientes coordenadas a la salida del bloque. Si el máximo está en el punto central, el proceso puede terminar en un mínimo de 118 ciclos (los necesarios para obtener los 3 primeros valores de la correlación y verificar el máximo).

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

7 Conclusiones

Se resumen aquí las aportaciones de esta Tesis y los beneficios que de ella se derivan, tanto de los algoritmos desarrollados en software, como del hardware específico diseñado y optimizado para las necesidades de cálculo reales en función de la precisión deseada. Para finalizar se detallan algunos entornos de aplicación especialmente interesantes y se proponen futuras líneas de investigación que continúen los trabajos aquí presentados.

7.1 Análisis de la orientación local

Independientemente del método empleado para la identificación biométrica mediante huella dactilar, va a ser imprescindible una buena estimación de la orientación local de las crestas papilares para poder obtener unos resultados finales aceptables. Los puntos principales abordados son:

- **Estudio de alternativas para la obtención de la imagen direccional:** Se han considerado distintos métodos de estimación de direcciones y se ha realizado un análisis pormenorizado con el objetivo de compararlos tanto a nivel de resultados como de coste computacional. En el estudio se han tenido en cuenta las particularidades de las imágenes digitales y se han considerado las necesidades reales en función de las resoluciones de imagen disponibles. Se ha estudiado la influencia de los tamaños de ventana sobre los resultados y buscado un compromiso entre precisión a nivel local e inmunidad a los píxeles ruidosos. Y también se ha resuelto la forma de obtener una medida del nivel de ruido de cada zona concreta de la imagen.

- **Funciones específicas:** Se han desarrollado funciones específicas para las necesidades concretas asociadas a la identificación biométrica de huella dactilar. Destaca la realización de una función para el cálculo de la tangente inversa dimensionada y optimizada para el nivel de precisión necesario y adecuado a nuestro problema concreto. Los errores cometidos en la función tangente inversa se han estudiado y justificado con detalle, de forma que la precisión obtenida en la estimación es suficiente para la correcta extracción de las características de la huella.

- **Coprocesador para la estimación local de las direcciones de la huella:** A partir del estudio anterior se ha desarrollado un algoritmo específico para

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

calcular la función tangente inversa con un mínimo de recursos del sistema y se ha diseñado una versión hardware en VHDL de un coprocesador para la estimación de direcciones.

7.2 Obtención del minutiae

El aspecto más crítico de los sistemas automáticos de identificación dactilar, la detección del minutiae, se ha resuelto de forma eficiente e imaginativa, de forma que la solución presentada permite sistemas de identificación en tiempo real:

- **Optimización de un algoritmo de extracción de características:** Una vez conseguida la estimación de orientaciones sin necesidad de una carga computacional excesiva, se ha diseñado un algoritmo específico que no necesita ejecutar costosas operaciones de cñalculo en ninguna de sus etapas; por ello se han evitado las soluciones que se basaban en distintas etapas de filtrado y se ha buscado un enfoque basado directamente en la imagen en escala de gris.
- **Coprocesador para las tareas críticas:** Se ha desarrollado un algoritmo específico y se ha diseñado un segundo coprocesador para acelerar mediante hardware aquellas funciones del algoritmo que suponían un cuello de botella y ralentizaban el tiempo de ejecución.
- **Prototipo:** Se han obtenido resultados experimentales de la ejecución en dos plataformas distintas. Por un lado el procesador configurable μBlaze de Xilix, implementado sobre un dispositivo Spartan III; y por otra parte sobre una placa que incorpora un dispositivo XC2VP4 de Xilinx con un PPC405, una implementación de 32 bits de la arquitectura PowerPC.

7.3 Preestimación, segmentación y emparejado.

Con objeto de mejorar las prestaciones del sistema de identificación automático que se ha desarrollado, se añaden funciones adicionales:

- **Algoritmos de segmentación:** Se aprovecha el coprocesador de cálculo de direcciones para la realización de una etapa de segmentación, basada en una medida de la 'coherencia' de las estimaciones de la orientación, de las zonas ruidosas de la imagen. Las pruebas efectuadas sobre una base de datos de huellas han probado su eficacia, reduciéndose el número de falsas minutias detectadas.
- **Módulo de preestimación:** Se ha estudiado la conveniencia de disponer de un módulo de preestimación de direcciones, que aprovecharía los cálculos realizados en la anterior fase de segmentación. En este caso se ha desestimado su utilización hasta futuras implementaciones del sistema.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

- **Módulo de emparejado de huellas:** Se ha diseñado un algoritmo de emparejado de huellas que ha permitido validar los resultados del sistema de identificación sobre una base de datos pública. Este algoritmo está en fase de optimización previa a su implementación definitiva en hardware.

7.4 Trabajos futuros.

Se ha diseñado un sistema capaz de realizar, a partir de una imagen digitalizada en escala de grises, la correcta extracción de las características de la huella. A partir de ese punto se presentas distintos aspectos en los que trabajar en el futuro de cara a optimizar el diseño de un sistema autónomo plenamente operativo y competitivo:

- **Gestión de la memoria:** Se trata del siguiente paso en la optimización del sistema para mejorar su velocidad de respuesta. Sería conveniente dotar al sistema de una memoria imagen o 'cache' que evitara acceder varias veces a la misma posición durante el proceso de estimación de la dirección.
- **Imagen direccional:** Los estudios realizados para utilizar una preestimación de direcciones deben ampliarse con el objeto de optimizar el algoritmo. El correcto uso de las orientaciones preestimadas puede redundar en la mejora de los tiempos de respuesta debido a un menor número global de estimaciones de la orientación.
- **Uso de parámetros de calidad en el minutiae:** La información sobre la coherencia de la estimación de dirección se puede emplear para asociar a las minutias de la huella información adicional sobre la calidad de la imagen en esa zona o incluso para indicar un grado de fiabilidad sobre el tipo de minutia indicado.
- **Emparejado de huellas:** Se debe acabar la optimización del algoritmo de emparejado y diseñar una versión del mismo que permita, como se ha hecho con la etapa de extracción, la implementación de los coprocesadores necesarios para su operación en tiempo real en sistemas de bajo coste. Una nueva versión del algoritmo podría emplear los datos sobre coherencia

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

Bibliografía

[BAZ-00] A.M. Bazen,. S.H. Gerez, "Directional Field Computation for Fingerprints Based on the Principal Component Analysis of Local Gradients", ProRISC 2000 Workshop on Circuits, Systems and Signal Processing, Veldhoven, The Netherlands, (November 2000).

[BIAS] Biometric Information Autonomous Systems Research Group, http://bias.csr.unibo.it/ Università di Bolognia.

[BIG-87] J. Bigun, G.H. Grandlund, "Optimal Orientation Detection of Linear Symmetry",First International Conference on Computer Vision, IEEE Computer Society Press, pp. 433-438, 1987.

[BOL-03] R.M. Bolle et al., "Guide to Biometrics", Springer-Verlag, New-York 2003.

[BRE-65] J. Bresenham, IBM System J., vol. 4, no. 1, pp. 25-30, 1965.

[BWG] Biometric Working Group, http://www.cesg.gov.uk

[CAN-04] E. Cantó; N. Cañellas; "FPGA Implementation of the Ridge Line Following Algorithm", 14th International Conference, Field-Programmable Logic and Applications, FPL 2004, pp. 1087-1089, Antwerp. 2004.

[CAN-05] E. Cantó; N. Cañellas; et al., "Coprocesador para la Esqueletización de Huellas Dactilares", V Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones, pp. 103-108, Sep. 2005.

[CAÑ-03] N. Cañellas; et al., "Codiseño Hardware – Software de un Algoritmo de Matching Biométrico", III Jornadas sobre Computación Reconfigurable y Aplicaciones, pp. 399-406, Madrid. 2003

[CAÑ-03a] N. Cañellas; et al., "Planteamiento de una alternativa de solución al reto del proceso de matching sobre bases de datos grandes. Aplicación a los sistemas de identificaión personal basados en biometría de huella dactuilar", III Jornadas sobre Computación Reconfigurable y Aplicaciones, pp. 597-610, Madrid. 2003

[CAÑ-04] N. Cañellas et al., "Coprocessor of the ridge Line Following Fingerprint Algorithm", XIX Conference on Design of Circuits and Integrated Circuits, DCIS 2004, pp. 139-143, Bordeaux. 2004.

[CAÑ-04a] E. Cantó; N. Cañellas; et al., "Coprocesador de Extracción de Minutiae para Microblaze", IV Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones, Sep. 2004.

[CAÑ-05] N. Cañellas et al., "Hardware-Software Codesign of a Fingerprint Identification Algorithm", Audio and Video Based Biometric Person Authentication 5th International Conference, Proccedings of the AVBPA 2005, pp. 683-692, Jul. 2005, Rye Town, NY.

[CAÑ-05a] N. Cañellas et al., "Diseño de un Coprocesador Hardware para Segmentación de Huellas Dactilares", V Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones, pp. 173-178, Granada. 2005.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

[CAÑ-05b] N. Cañellas et al., "Hardware-Software Codesign of an Automatic Fingerprint Acquisition System", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2005, pp. 1123-1128, Croatia. 2005.

[CAÑ-06] N. Cañellas, "Low-cost and Real-time Automatic Fingerprint Identification Integrated System", IEEE Transactions on Information Forensics and Security", 2006 (submitted).

[CCB-02] The Common Criteria Biometric Evaluation Methodology Working Group, "Biometric Evaluation Methodology. Common Criteria for Information Technology Security Evaluation. Biometric Evaluation Methodology Supplement", Versión 1.0, Agosto 2002.

http://www.cesg.gov.uk/site/ast/biometrics/media/BEM_10.pdf

[CLA-94] R. Clarke, "Human Identification for Information Systems: Management Challenges and Public Issues", Info. Technol. People, vol 7, num. 4. pp 6-37. 1994.

[DAU-85] J.G. Daugman, "Uncertainty Relation for Resolution in Space, Spatial-Frequency, and Orientation Optimized by Two-dimensional Visual Cortical Filters", J. Opt. Soc. Am., vol 2, pp. 1160-1169, 1985.

[DON-93] M.J. Donahue, S.I.Rokhlin, "On the Use of Level Curves in Image Analysis", Image Understanding, vol. 57, no. 2, 1993.

[ESP-03] V. Espinosa, "Fingerprints Thinning Algorithm", IEEE AES Transactions on Aerospace and Electronics Systems Magazine, pp. 28-30 Vol 18, Sep. 2003.

[GRA-69] A. Grasseli, "On the Authomatic Classification of Fingerprints", Methodologies of Pattern Recognition, S. Watanabe Ed. 1969.

[HAL-96] Halici, U.; Ongun G. "Fingerprint Classification Through Self-Organized Feature Maps Modified to Treat Uncertainities" Proceedings of the IEEE, vol.84, no. 10, October 1996.

[HAR-85] R.M. Haralick et al., "Image Segmentation Techniques", Comput. Vision Graphics Image Process. 29, pp. 100-132, 1985.

[HAR-87] R.M. Haralick et al., "Image Analysis Using Mathematical Morphology", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9, 4, pp. 532-550, 1987.

[HEN-00] E. Henry, "Classification and Uses of Fingerprints", London 1900.

[HON-98] L. Hong, Y. Wan, A.K. Jain, "Fingerprint Image Enhancement: Algorithms and Performance Evaluation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, n. 8, pp. 777-789, 1998.

[HUN-93] D. Hung, "Enhancement and Feature Purification of Fingerprint Image", Pattern Recognition, 26, pp. 1661-1671, 1993.

[HRE-90] A. Hrechak, J. McHugh "Authomatic Fingerprint Recognition Using Structural Matching", Pattern Recognition, 23, pp. 893-904, 1990.

[IDE] Identix Inc., http://identix.com

[INF] Infineon Technologies Inc., http://www.infineon.com

[ISE-96] D. Isenor, S. Zaky, "Fingerprint Identification Using Graph Matching", Pattern Recognition, vol. 19, pp. 113-122, 1986

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

[JAI-91] A.K. Jain, F. Farrokhnia, "Unsupervised Texture Segmentation Using Gabor Filters", Pattern Recognition, vol. 24, num 12, pp. 1167-1186, 1991

[JAI-97] A. Jain, L. Hong, S. Pankanti, R. Bolle, "An Identity-Authentication System Using Fingerprints", Proc. of the IEEE, vol. 85, no. 9, pp. 1365-1388, 1999.

[JAI-97a] A. Jain, L. Hong, R. Bolle, "On-Line Fingerprint Verification", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 4, pp. 302-314, 1997.

[JAI-99] A. Jain, R. Bolle, S. Pankanti, "Biometrics, Personal Identification in Networked Society", Kluwer 1999.

[JAI-99a] A. Jain, S. Prabhakar, A. Ross, "Fingerprint Matching: Data Adquisition and Performance Evaluation", Tech. Report: MSU TR99-14, 1999.

[KAS-87] M. Kass, A. Witkin, "Analyzing Oriented Patterns", Comput. Vision, Graph. Image Processing, vol. 37, no. 4, pp. 362-385, 1987.

[KAW-84] M. Kawagoe, A. Tojo, "Fingerprint Pattern Classification", Pattern Recognition, vol. 17, no. 3, pp. 295-303, 1984.

[KIT-98] L.J. Kitchen, J.A. Malin, "The Effect of Spatial Discretization on the Magnitude and Directional Response of Simple Differential edge Operators on a Step Edge", Comput. Vision Graphics Image Process. 47, pp. 243-258, 1989.

[LCJ-99] L.C. Jain, et al., "Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition", CRC Press International Series on Computational Intelligence 1999.

[LEU-90] M.T. Leung, W.E. Engeler, P. Frank, "Fingerprint Image Processing Using Neural Network", Pro. Tenth Conf. Computer and Communication Systems, pp. 582-586, 1990.

[MAI-97] D. Maio, D. Maltoni, "Direct Gray-Scale Minutiae Detection In Fingerprints" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 19, No. 1. January 1997.

[MAL-03] D. Maltoni, et al. "Handbook of Fingerprint Recognition", Springer-Verlag, New York 2003.

[MEH-87] B.M. Mehtre et. al "Segmentation of Fingerprint Images Using The Directional Image", Pattern recognition, Vol 20, Num. 4, pp. 429-435, 1987.

[MEH-89] B.M. Mehtre, "Segmentation of Fingerprint Images: A Composite Method", Pattern recognition, Vol 22, Num. 4, pp. 381-385, 1989.

[MEH-93] B.M. Mehtre, "Fingerprint Image Analysis for Authomatic Identification", Machine Vision and Applications, 6(2-3), pp.124-139, 1993.

[MEH-93] B.M. Mehtre, "Fingerprint Image Analysis for Authomatic Identification", Machine Vision and Applications, 6(2-3), pp.124-139, 1993.

[MIT-97] D. P. Mital, E. K. Teoh, "An Automated Matching Technique for Fingerprint Identification" IEEE First International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, Vol 1, pp.142-147, 1997.

[MOA-86] B. Moayer, K.S. Fu, "A Tree System Approach for Fingerprint Pattern Recognition", IEEE Trans. Pattern Análisis and Machina Intelligence, 8(3), pp 376-388, 1986.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

[MOE-71] A. Moenssens, "Fingerprints Techniques", Chilton Book Company, London 1971.

[NEU] Neurotechnologija Ltd., http://www.neurotechnologija.com

[OBE] Groupe François-Charles Oberthur, http://oberthur.com

[OGO-78] F. O'Gorman. "Edge Detection Using Walsh Functions", Artif. Intell, 10, pp.215-223, 1978.

[OGR-89] L. O'Groman, J. Nickerson. "An Approach to Fingerprint Filter Design", Pattern Recognition, 22, pp.29-38, 1989.

[OLO-09] F. Olóriz, "Guía para Extender la Tarjeta de Identidad", 1909.

[PAL-93] N.R. Pal, S.K. Pal, "A Review on Image Segmentation Techniques", Pattern Recognition, Vol 26, Num 9, pp. 1277-1294, 1993.

[PUE-03] A.L. Puebla; "Identificación de individuos mediante comparación borrosa de elementos lingüísticos obtenidos a partir de impresiones dactilares", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 2003.

[RAO-90] A.R. Rao, "A Taxonomy for Texture Description and Identification", Springer-Verlag, New York, 1990.

[RAT-03] N.K. Ratha,R. Bolle, "Automatic Fingerprint Recognition Systems", Springer-Verlag, New York, 2003.

[RAT-95] N.K. Ratha, S.Y. Chen, A.K. Jain, "Adaptative Flow Orientation-Based Feature Extraction in Fingerprint Images", Pattern Recognition, vol. 28, num. 11, pp 1657-1672, 1995.

[RAT-96] N.K. Ratha, K. Karu, S.Y. Chen, A.K. Jain, "A Real-Time Matching System for Large Fingerprint Database", IEEE Trans. On PAMI, vol. 18, pp 799-813, 1996.

[SHE-94] B.G. Sherlock, D.M. Monro, K. Millard, "Fingerprint Enhancement by Direccional Fourier Filtering", IEE Proc. Vis. Image Signal Processing, 141, pp.87-94. 1994.

[STM] STMicroelectronics, http://www.eu.st.com

[STO-69] R.M. Stock, C.W. Swonger, "Development and Evaluation of a Reader of Fingerprint Minutiae", Cornell Aeronautical Laboratory, Technical Report CAL No. XM-2478-X-1: pp. 13-17, 1969.

[SZE-93] E.N. Szekely, V. Szekely, "Image Recognition Problems of Fingerprint Identification", Microprocessor and Microsystems, 17(4), 1993.

[TAP-05] M. Tapiador, et al., "Tecnologías Biométricas Aplicadas a la Seguridad", Ed. Ra-Ma, Madrid 2005.

[TRI-95] O. Trier, A.K. Jain, "Goal-Directed Evaluation of Binarization Methods", IEEE Transactions on Pattern Analysisand Machine Intelligence, vol. 17, num. 12, pp. 1191-1201, 1995.

[VER-87] M.R. Verma, A.K. Majumdar, B. Chattarjee, "Edge Detection in Fingerprints", Pattern Recognition, 20(5), pp. 513-523, 1987.

[WAT-92] C.I. Watson, C.L. Wilson, "Fingerprint Database", National Institute of Standards and Technology, Special Database 4, April 1992

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007

[WEB-92] D.M. Weber, "A Cost Effect Verification Algorithm for Commercial Application", Proc. 1992 South African Symposium on Communications and Signal Processing, pp. 99-104, 1992.

[WFL-91] W.F. Leung, et al., "Fingerprint Recognition Using Neural Netwok", Proc. IEEE Workshop Neural Network for Signal Processing, pp.226-235, 1991.

[WIL-93] G.L. Wilson et al., "Massively parallel neural network fingerprint classification system", NIST Tech. Rep., Advanced Syst. Div., Image Recognition Group, 1993

[WOO-97] J.D.Woodward, "Biometrics: Privacy's Foe or Privacy's Friend?", Proc. IEEE Special Issue on Automated Biometrics, vol. 85, num. 9, pp 1480-1492. 1997.

[XIA-91] Q. Xiao, H. Raafat, "Fingerprint Image Postprocessing: A Combined Statistical and Structural Approach", Pattern Recognition, 24(10), pp. 985-992, 1991.

[YAN-03] S. Yang et al., "A Compact and Eficient Fingerprint Verification System for Secure Embedded Devices", Proc. Of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Nov. 03.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
DISSENY DE HARDWARE ESPECIFIC PER A L'EXTRACCIÓ DE CARACTERÍSTIQUES I COMPARACIÓ D'EMPREMTES DACTILARS.
Nicolau Cañellas i Alberich
ISBN: 978-84-690-7605-7 / DL: T.1221-2007