



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS EN HUELLAS
DIGITALES DIRECTO DE LA ESCALA DE GRISES

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

LIC. VÍCTOR ERNESTO ALONSO PÉREZ

ASESOR: DR. MANUEL I. MARTÍN ORTÍZ

COASESOR: MC. RAFAEL DE LA ROSA FLORES

Junio 2007

Resumen

La mayoría de sistemas automáticos para la comparación de huellas digitales están basados sobre la igualación de minucias. Las minucias son combinaciones de puntos terminales y bifurcaciones de las líneas de crestas que constituye un patrón de huella digital. La detección automática de minucias es un proceso extremadamente crítico, especialmente en imágenes de baja calidad donde el ruido y deficiencias de contraste pueden originar minucias falsas u ocultar minucias reales. Varios métodos propuestos transforman la imagen de huella digital en imágenes binarias. Este trabajo se fundamenta en la técnica propuesta por Maio y Maltoni [12], la cual está basada en la extracción de minucias directo de la escala de grises, cuya idea básica se apoya en el seguimiento de las líneas de crestas en la imagen en niveles de gris, navegando según la orientación local del patrón de cresta. Adicionalmente, en lugar de seguir una sola cresta, el algoritmo sigue una cresta central y dos valles circunvecinos [18]. Asimismo, se propone un método a la aproximación [12], que consiste en realizar un ajuste Levenberg-Marquardt de mínimos cuadrados no lineal, basado en la forma de la gaussiana. Esta aproximación permite calcular el centro de la línea de cresta local (parámetros que no son determinados en el algoritmo original), y además no requiere una configuración a priori del tamaño del paso μ como en el algoritmo original de Maio y Maltoni.

Agradecimientos

A Dios

Por permitirme acabar éste ciclo de mi vida.

A mi Madre

Porque gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de mis
anhelos más grandes de mi vida.

A mi Hermano

Agradezco tus consejos y enseñanzas.

A mi Novia

Por todo el amor y el apoyo brindado.

A mi Asesor

Agradezco sus enseñanzas y por guiarme, y orientarme en la realización de
ésta Tesis. Gracias.

Al Jurado Revisor

Agradezco el apoyo a: MC. Rafael de la Rosa Flores, Dr. Lourdes Sandoval
Solís, Dr. Ivo Humberto Pineda Torres, Dr. Pedro García Juárez

Al Conacyt

Por el apoyo económico en la continuación de mis estudios.

A mis Compañeros

Quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr esta hermosa realidad.

Índice general

Introducción	xv
1. Tecnologías Biométricas	1
1.1. Introducción	1
1.2. Sistemas Biométricos	2
1.2.1. Visión Global de la Biometría	6
1.2.2. Comparación de Biométricos	6
1.2.3. Errores en Sistemas Biométricos de Huellas Digitales	10
1.3. Representación de Características	11
1.4. Empatamiento de Minucias	15
1.5. Extracción Directa en Escala de Grises	17
2. Análisis y Diseño	19
2.1. Introducción	19
2.2. Modelo de Casos de Uso	19

2.3. Casos de Uso del Sistema de Detección de Minucias	20
2.3.1. Descripción del Caso de Uso Administración de Cuentas	21
2.3.2. Descripción del Caso de Uso Registro de Datos	22
2.3.3. Descripción del Caso de Uso Examinador	22
2.4. Diagrama de Clases	24
2.5. Diagramas de Secuencia	27
3. Implementación	33
3.1. Introducción	33
3.2. Sistema Propuesto	33
3.2.1. Administración del Sistema	34
3.2.1.1. Descripción del Modelo Entidad Relación	34
3.2.1.2. Descripción del Módulo Registro	36
3.2.2. Segmentación	39
3.2.3. Normalización	41
3.2.4. Estimación de la Orientación en la Cresta Local	43
3.2.4.1. Regularización de la Dirección Local	47
3.2.5. Seguimiento de la Línea de Cresta	49
3.2.5.1. Determinación de la Sección y la Relación	53
3.2.5.2. Ajuste Gaussiano Levenberg-Marquardt	57
3.2.5.3. Criterios de Parada	58

3.2.5.4. Detección de Minucias	60
3.2.5.5. Determinación del Punto de Inicio	62
3.2.5.6. Procesamiento Obtenido	62
4. Resultados Experimentales	65
A. Conceptos	79
B. Detalles de la Instalación	83
C. Detalles de la Aplicación	85

Índice de figuras

1.1. Huella Digital.	2
1.2. Diagrama de Bloques.	3
1.3. Minucias de una Huella Digital.	13
1.4. Representación de Minucias.	13
1.5. Patrones de Huella Digital Ordinarias.	14
1.6. Puntos Singulares	15
2.1. Servicios del Sistema de Detección de Minucias.	21
2.2. Caso de Uso Examinador.	23
2.3. Diagrama de Clases.	26
2.4. Diagrama de Secuencia para el Acceso.	28
2.5. Diagrama de Secuencia para la Administración.	29
2.6. Diagrama de Secuencia de Registro.	30
2.7. Diagrama de Secuencia de Detección de Minucias.	31
3.1. Modelo E-R del Sistema Biométrico.	35

3.2. Diagrama Conceptual del Sistema Biométrico.	37
3.3. Interfaz para la Manipulación de Datos.	38
3.4. Interfaz para Consulta de Información.	38
3.5. Interfaz para Adquisición de Huellas Digitales.	39
3.6. Segmentación de Imagen de Huella Digital.	40
3.7. Imagen Normalizada	42
3.8. Bloque de 17x17 de una Bifurcación.	42
3.9. Huella Digital Desvanecida	45
3.10. Orientación Dominante en Imagen de Huella Digital.	46
3.11. Dirección Ortogonal a las Crestas de la Huella Digital.	47
3.12. Regularización de la Dirección Local.	49
3.13. Proyección de Forma de Onda.	50
3.14. Seguimiento de la Línea de Cresta.	51
3.15. Avance del Algoritmo de Seguimiento.	53
3.16. Sección Ω	54
3.17. Superficie Seccionada con Tres Planos Paralelos.	55
3.18. Silueta Gaussiana	56
3.19. Una Sección Filtrada.	57
3.20. Planos en la Imagen.	57
3.21. Modelo Gaussiano.	59

3.22. Curva Ajustada.	59
3.23. Aproximación Poligonal	60
3.24. Interfaz de Examinación de Minucias.	62
3.25. Bifurcación y Punto Terminal.	63
4.1. Arco	67
4.2. Arco Tendido	68
4.3. Bucle Izquierdo	69
4.4. Bucle Derecho	70
4.5. Espiral	71
A.1. Máscaras de Sobel.	80

Introducción

Introducción

El reconocimiento biométrico se refiere al uso de características físicas o conductuales (ej., huella dactilar, cara, iris, voz, etc.) únicas en el individuo para reconocer o autenticar su identidad. Es por eso que las organizaciones buscan mayor seguridad por medio de identificadores biométricos para el control de acceso de los usuarios en diferentes áreas, tales como: bancos y tarjetas de crédito, negocios, instalaciones, comercio electrónico y otras aplicaciones donde se requiere alta seguridad. Comúnmente, la tecnología de huella digital biométrica reemplaza la seguridad basada en password, ya que las huellas dactilares proporcionan un método único de identificación personal.

Grandes volúmenes de huellas digitales son coleccionados y almacenados cada día en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo forenses, control de acceso y registro de licencias de conducir, por ejemplo. La identificación de una persona requiere la comparación de su huella digital con muchas huellas digitales almacenadas en una base de datos. Esta base puede ser muy grande (ej., varios millones de huellas digitales - BD FBI) en muchas aplicaciones forenses y civiles. En tales casos, la identificación tiene típicamente tiempos de respuesta inaceptables. El proceso de identificación puede ser más rápido reduciendo el número de comparaciones que requieren ser realizadas. Algunas veces, información acerca de sexo, raza, edad, oficio, y otros datos

relacionados al individuo están disponibles y así al dividir la base de datos para realizar las búsquedas puede reducirse significativamente el tiempo; sin embargo, ésta información no siempre es accesible (ej., identificación criminal basado en huellas dactilares latentes) y, en el caso general, tiene que usarse información intrínseca para sacar muestras biométricas para una recuperación eficiente. Una estrategia común para lograr esto, es dividir la base de datos de huellas digitales dentro de un conjunto (basado en algunas clases predefinidas). Una huella digital al ser identificada sólo requiere ser comparada con las huellas digitales de un subconjunto único de la base de datos sobre su clase.

Huellas Digitales

Los humanos han usado las huellas digitales para la identificación personal durante mucho tiempo [7]. Las técnicas modernas de empatamiento de huella digital comenzaron a finales del siglo XVI. Henry Fauld, en 1880, fue el primero que hizo pensar científicamente en la individualidad y singularidad de huellas digitales. Al mismo tiempo, Herschel afirmó que él había practicado la identificación de huella digital aproximadamente 20 años. Éste descubrimiento estableció la fundación de identificación moderna de huella digital. A finales del siglo XIX, el Señor Francis Galton dirigió un estudio extenso de huellas digitales. Él introdujo las características de las minucias para la clasificación única de huella digital en 1888. El descubrimiento de singularidades de huellas digitales causó un declive inmediato en el uso prevaleciente de métodos antropométricos de identificación y llevó a la adopción de las huellas digitales como un método más eficaz de identificación. Un avance importante en la identificación basada en la huella digital fue hecho en 1899 por Edward Henry, que estableció el famoso “sistema Henry” de clasificación de huella digital: un método detallado de indexado de huellas digitales que facilita a los expertos humanos que realizan (manualmente) la identificación de la huella digital. A principios del siglo XX, la identificación de huella digital se

aceptó formalmente como un método de identificación personal válido para las agencias de aplicación de la ley y se convirtió en un procedimiento normal dentro de las técnicas forenses. Las agencias de identificación de huella digital fueron instituidas en el mundo y se establecieron bases de datos de huellas digitales delictivas. Con el advenimiento del escáner de huellas dactilares y de la disponibilidad de sensores baratos de huella digital, las huellas digitales son cada vez más usadas en el gobierno y en aplicaciones comerciales para la identificación positiva de personas.

Objetivos Generales y Específicos

a) Objetivo General:

- Realizar un sistema de detección de minucias en huellas digitales en escala de grises, a través de la investigación y prueba de diferentes algoritmos.

b) Objetivos Específicos:

- Estudiar el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas para la detección de minucias en imágenes de huella digital en niveles de gris.
 - Implementar el algoritmo de normalización para disminuir las variaciones de niveles de gris en la imagen de huella digital.
 - Estudiar el algoritmo de segmentación basado en la magnitud del gradiente.
 - Estimar y regularizar la orientación de crestas locales de la imagen de huella digital.
 - Aprender y aplicar el método de ajuste Levenberg-Marquardt al algoritmo de seguimiento de líneas de crestas.
 - Desarrollar una interface para adquisición de huella digital.
-

- Realizar una interface para el examen y detección de minucias en imágenes de huella digital en escala de gris.
- Generar un interface para la adquisición de datos personales.

Organización y Caracterización

A continuación se describe el contenido de los capítulos que conforman éste trabajo de Tesis:

- El capítulo uno está dedicado al estado del arte, es decir, se explican los avances en tecnología biométrica, específicamente en imágenes de huella digital. Además, se explica las ventajas de extraer características en imágenes de huella digital en escala de grises.
 - En el segundo capítulo se explica el análisis y diseño del sistema, administración del sistema, casos de uso, diagrama de clases, y finalmente los diagramas de secuencia.
 - El capítulo tres describe la interfaz para la adquisición de datos y huellas digitales y se describen las etapas de implementación para la detección de minucias: normalización, segmentación, cálculo de la dirección de la cresta local, regularización de direcciones, y por último se detalla el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas en la imagen de huella digital en escala de grises.
 - Y en el cuarto capítulo se documenta los resultados de la extracción de características, tiempos de procesamiento, y se describen los resultados experimentales con huellas digitales artificiales.
 - Finalmente, se encuentran las conclusiones de ésta Tesis y el trabajo a futuro vislumbrado.
-

Tecnologías Biométricas

1.1. Introducción

Varias tecnologías biométricas se han desarrollado y varias de ellas se han utilizado en diversas aplicaciones. Entre ellas: huella digital, cara, iris, manera de hablar, geometría de la mano; éstas son comúnmente las más usadas.

El reconocimiento de huella digital (figura 1.1) es un problema complejo de reconocimiento de patrones; el diseño de algoritmos capaces de extraer características sobresalientes y compararlas en una forma robusta no es fácil, especialmente en imágenes de huella digital de baja calidad. Hay una idea popular equivocada de que el reconocimiento automático de huella digital es un problema completamente resuelto, puesto que ésta fue una de las primeras aplicaciones de reconocimiento de patrones hace casi cincuenta años de forma automática. Por el contrario, el reconocimiento de la huella digital es todavía un problema desafiante e importante en el reconocimiento de patrones [11].



Figura 1.1: Huella Digital.

1.2. Sistemas Biométricos

Un sistema biométrico es esencialmente un sistema de reconocimiento de patrones que reconoce a una persona determinando la autenticidad de una característica fisiológica y/o conductual específica poseída por ella. En el contexto de las huellas digitales, éstas son un identificador biométrico que puede ser usado para reconocer personas, ya que son únicas para cada una, incluso en gemelos idénticos, y no cambian durante la vida de una persona. Además, un sistema biométrico puede ser llamado sistema de verificación o identificación, por ejemplo; sistemas de reconocimiento de huella digital [4]:

Sistema de Verificación. La autenticación se realiza cuando alguna persona envía una afirmación de su identidad, a través de un NIP (número de identificación personal), tarjeta de cinta magnética, nombre de inicio de sesión, tarjeta inteligente, etc., y esto conduce a una comparación (características biométricas) de uno a uno para determinar si la identidad enviada por el individuo es verdadera.

Sistema de Identificación. No recibe algún NIP. El reconocimiento

de algún individuo se realiza buscando en una base de datos de huellas para encontrar una coincidencia. Esto conduce a una comparación (características biométricas) de uno a muchos, para establecer la identidad del individuo.

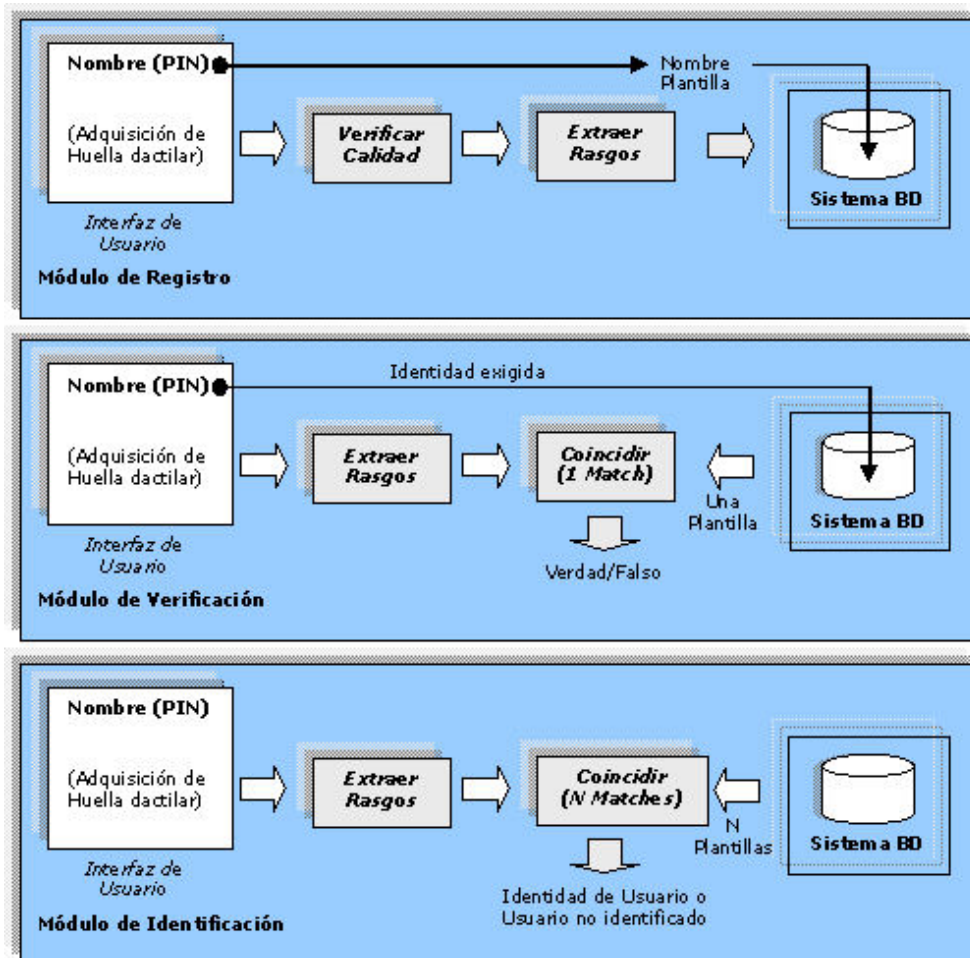


Figura 1.2: Diagrama de bloques de tareas de registro, verificación e identificación [11].

El diagrama de bloques [11] de un sistema de verificación e identificación (Figura 1.2) se describe a continuación:

Módulo de Registro, es responsable del registro de individuos en la

base de datos del sistema biométrico, durante la fase de registro, las características biométricas (ej., minucias de la huella digital) de un individuo son primero digitalizadas por medio de un lector biométrico para producir una representación digital de características sin tratar. Generalmente se realiza una verificación de calidad para asegurar que la muestra adquirida puede ser procesada fiablemente por las fases sucesivas. Para facilitar una correspondencia, la representación digital en crudo, usualmente es procesada por un extractor de características para generar una representación compacta pero costosa, llamada plantilla. Dependiendo de la aplicación, la plantilla puede ser almacenada en la base de datos central del sistema biométrico o ser grabada sobre una tarjeta magnética o una tarjeta inteligente expedida para el individuo.

Módulo de Verificación, es responsable de la verificación de individuos en un punto de acceso. Durante la fase de operación, el nombre de usuario o NIP (número de identificación personal) se introduce a través de un teclado (o teclado numérico); el lector biométrico captura las características del individuo para reconocerlas y convertirlas a un formato digital, que es procesado ampliamente por el extractor de características para producir una representación digital compacta. La representación resultante se mantiene para el comparador de características, la cual es comparada contra la plantilla de un único usuario (recuperación del sistema de BD basado sobre el NIP del usuario).

Módulo de Identificación, no se proporciona ningún NIP, y el sistema compara la representación de la entrada biométrica contra la plantilla de todos los usuarios en el sistema de base de datos; la salida es la identidad de un usuario registrado o un mensaje de alerta tal como 'usuario no identificado'. Debido a que la identificación en una base de datos grande es computacionalmente costosa, se emplean técnicas de clasificación e indexación para limitar el número de plantillas que tienen que ser comparadas contra la entrada.

Una aplicación puede operar en modo de reconocimiento positivo o negativo:

- **Positivo**, se establece si la persona es quien afirma ser (implícitamente o explícitamente). El propósito de un reconocimiento positivo es prevenir que múltiples personas utilicen la misma identidad. Por ejemplo, si alguna persona es autorizada para entrar a una cierta área segura, entonces el sistema concederá el acceso a esa única persona, de otro modo, lo rechazará.
- **Negativo**, se establece si la persona es quien niega ser (implícitamente o explícitamente). El propósito del reconocimiento negativo es para prevenir que una persona use múltiples identidades. Por ejemplo, si Alicia ya ha recibido algún beneficio, y ahora ella afirma ser Bety y le gustaría recibir los beneficios de Bety (esto es llamado “meterse por segunda vez”), el sistema establecerá que Bety no es quien dice ser. Si el sistema falla para igualar la entrada biométrica de Bety con una base de datos de personas quienes ya han recibido beneficios, entonces la aceptará (Alicia recibirá los beneficios de Bety), de otro modo la rechazará.

Note que aunque los métodos tradicionales de autenticación de usuarios tales como passwords, NIPs, claves, y fichas pueden funcionar para el reconocimiento positivo, mientras que el reconocimiento negativo solamente puede ser establecido a través de biométricos. Además, las aplicaciones de reconocimiento positivo pueden operar en ambos modos; verificación o identificación, pero las aplicaciones de reconocimiento negativo no pueden trabajar en modo de verificación: en realidad, el sistema tiene que buscar el archivo completo para proporcionar que la entrada dada no está presente.

1.2.1. Visión Global de la Biometría

Teóricamente, cualquier característica fisiológica ó de comportamiento humano puede ser usado para hacer una identificación personal de tal forma que se satisfagan los requisitos siguientes [1]:

- I. *Universalidad*, la cual significa que cada persona debe tener características.
- II. *Singularidad*, indica que dos personas no deben de tener lo mismo por lo que se refiere a las características.
- III. *Durabilidad*, la cual significa que las características deben ser invariantes con el tiempo.
- IV. *Coleccionable*, indica que las características pueden ser medidas cuantitativamente.
- V. *Desempeño*, se refiere a la exactitud de identificación logable, los requisitos del recurso para lograr una exactitud de identificación aceptable, y factores (por ejemplo, el medio ambiente laboral) que afectan la exactitud de identificación.
- VI. *Aceptabilidad*, la cual indica hasta que punto las personas están dispuestas a aceptar el sistema biométrico.
- VII. *Trampa*, se refiere a que tan fácil es engañar al sistema por técnicas fraudulentas.

1.2.2. Comparación de Biométricos

La biometría mide las características físicas o conductuales únicas del individuo para reconocer o autenticar su identidad. La biometría física común

incluye huellas digitales, mano o geometría de la palma; y retina, iris, o características faciales. Las características conductuales incluyen firma, voz, (que también tiene un componente físico), patrón de pulsación de teclas y andares [10]. De esta clase de biometría, las tecnologías para firma y voz son las más desarrolladas como se muestra en la tabla 1.1.

Comparación de Métodos Biométricos							
Características	Huella Digital	Geometría de la Mano	Retina	Iris	Cara	Firma	Voz
Facilidad de uso	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto
Error de Incidencia	Sequedad, suciedad, edad	Herida de la Mano, edad	Lentes	Iluminación pobre	Iluminación, edad, lentes, cabello	Cambio de Firmas	Ruido, frío, clima
Precisión	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto
Costo	*	*	*	*	*	*	*
Aceptación de uso	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Muy Alto	Alto
Nivel de seguridad requerido	Alto	Medio	Alto	Muy alto	Medio	Medio	Medio
Estabilidad a largo plazo	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio	Medio	Medio
* El número de factores complicados hace una simple comparación de costos poco práctica.							

Cuadro 1.1: Comparación de Identificadores Biométricos [10].

A continuación se presentan algunos tipos de biometría, y se concluye con la biometría de huellas digitales:

Geometría de mano. Involucra el análisis y medida de la forma de la mano. Este tipo de biometría ofrece un buen balance característico de funcionamiento y es relativamente fácil de usar. Puede ser que sea conveniente donde hay más usuarios o donde los usuarios tienen acceso al sistema infrecuentemente y tal vez, se disciplinan menos en su acercamiento al sistema.

El funcionamiento es flexible y la configuración se puede acomodar a una gama amplia de aplicaciones. Algunas organizaciones están usando lectores de geometría de mano en varios contextos, incluso en el

registro de tiempo y asistencia, dónde han demostrado popularidad. La geometría de la mano hace un primer paso obvio para muchos proyectos biométricos.

Retina. La biometría basada en retina implica el analizar la capa de vasos sanguíneos situados atrás del ojo. Esta técnica involucra utilizar una fuente de luz de baja intensidad a través de un acoplador óptico para escáner los únicos patrones de la retina. La digitalización de la retina puede ser bastante exacta, pero se requiere que el usuario mire en un receptáculo y enfoque un punto dado. Esto no es particularmente conveniente si se usan lentes o si se preocupan por tener contacto cercano con el dispositivo de lectura. Por estas razones, la digitalización retiniana no es aceptada con agrado por todos los usuarios, aunque la tecnología en si misma trabaje bien.

Iris. Un método biométrico basado en el iris, por otro lado, implica el análisis de características encontradas en el anillo coloreado del tejido fino que rodea la pupila. La exploración del iris, indudablemente es la biometría menos intrusa relacionado al ojo, usa un elemento bastante convencional de la cámara fotográfica y no requiere ningún contacto cercano entre el usuario y el lector. Además, tiene el potencial para el funcionamiento de comparación de plantillas superior a la media. La biometría de iris trabaja con lentes puestos y son uno de los pocos dispositivos que pueden trabajar bien en el modo de identificación. La facilidad de uso e integración del sistema no han sido tradicionalmente puntos fuertes con los dispositivos digitalizadores de iris, pero se pueden esperar mejoras en estas áreas como el surgimiento de nuevos productos.

Cara. El reconocimiento de la cara analiza características faciales. Requiere una cámara fotográfica digital para revelar una imagen facial del usuario para la autenticación. Es un desafío el desarrollo de técnicas de reconocimiento que toleren los efectos del envejecimiento, expresiones faciales, variaciones insignificantes, y variaciones en el pose de la cara con respecto a la cámara (rotaciones 2D y 3D). La industria del

casino ha capitalizado en esta tecnología para crear una base de datos facial de estafadores que son detectados rápidamente por el personal de seguridad.

Firma. La verificación de la firma analiza la manera en que un usuario firma su nombre. Las características de la firma tales como rapidez, velocidad, y presión son tan importantes como la forma estática de la firma acabada. Las firmas cambian durante el tiempo, e incluso en impresiones sucesivas. Además, los falsificadores profesionales pueden reproducir firmas para engañar al ojo inexperto. La verificación de la firma goza de una sinergia con los procesos existentes que no lo hace otra biometría. Las personas utilizan las firmas como un medio de comprobación de identidad relacionada con la transacción, y la mayoría no vería nada inusual en ampliar esto para abarcar la biométrica. Los dispositivos de verificación de firma son bastante exactos en el funcionamiento y se prestan obviamente a aplicaciones dónde una firma es un identificador aceptado. Sorprendentemente, pocas aplicaciones significantes de firma han surgido si se compara con otras metodologías biométricas.

Voz. La autenticación de voz no se basa en el reconocimiento de la voz, pero si en la autenticación de voz digital, dónde la tecnología compleja transforma la voz en texto. La biometría de voz tiene mayor potencial para el crecimiento, porque ya no requiere ningún nuevo hardware, la mayoría de las PCs contienen un micrófono. Sin embargo, la calidad pobre y ruido ambiental pueden afectar la comprobación. Además, el procedimiento de registro ha sido a menudo más complicado que con otro tipo de biometría, llevando la opinión de que la verificación de voz no es de fácil uso. Por consiguiente, el software de autenticación de voz necesita mejoras. La voz puede volverse una tecnología adicional para la tecnología de huella digital. Porque muchas personas ven la exploración del dedo como una forma superior de autenticación, la biometría de voz será considerada para reemplazar o reforzar los nombres de cuenta,

passwords, o NIPs.

Huellas Digitales. Un modelo fluido formado por crestas y valles en el aspecto del palmar de la mano es llamado impresión de palma de la mano (palmprint). La formación de una impresión de la palma de la mano depende de las condiciones iniciales del mesodermo embrionario del cual ellos desarrollan. El patrón sobre la pulpa de cada falange terminal es considerado como un modelo individual y normalmente es llamada huella digital.

Las huellas digitales son una de las tecnologías biométricas más maduras y son consideradas pruebas legítimas de evidencia en las cortes de la ley en diferentes partes del mundo. Las huellas digitales son, por consiguiente, usadas en las divisiones forenses mundiales para investigaciones delictivas. Recientemente, ha aumentado el número de aplicaciones civiles y comerciales, que están usando o consideran usar la identificación basada en huella digital, debido a que la tecnología de huella digital, ha demostrado mejor desempeño en la igualación de características que cualquier otra tecnología de biométrica existente [7].

1.2.3. Errores en Sistemas Biométricos de Huellas Digitales

La respuesta de un igualador (matcher) en un sistema de huella digital, es típicamente una puntuación de correspondencia (sin pérdida de generalidad, oscilando en el intervalo de $[0, 1]$) que cuantifica la similitud entre las representaciones de la plantilla de entrada y la base de datos. Si la puntuación está más cerca a 1, lo más cierto es que en el sistema las dos huellas digitales vienen del mismo dedo, si la puntuación está más cerca de 0, el nivel de confianza es muy bajo para que las dos huellas digitales vengan del mismo dedo. La decisión del sistema esta regulada por un umbral t : las parejas de huellas digitales que generan una puntuación mayor o igual a t , son deducidas como

parejas correspondientes (ej., pertenecen al mismo dedo); los pares de huellas digitales que generan puntuación más baja que t son inferidas como parejas no correspondientes (ej., pertenecen a diferentes dedos).

Un sistema de verificación comete dos tipos de errores: medición equivocada de información biométrica de dos dedos diferentes para ser del mismo dedo (llamada falsa correspondencia) y medición errónea de dos informaciones biométricas del mismo dedo para ser de dos dedos diferentes (llamada falsedad de no-correspondencia). Los dos tipos de errores anteriores son también llamados; porcentaje de falsa aceptación (FAR), es decir, probabilidad de que el sistema iguale huellas digitales que no son de la misma persona, y el porcentaje de falso rechazo (FRR), el cual es la probabilidad de que el sistema no iguale huellas digitales que se originan de la misma persona. (ERR), se define como el valor donde el FAR y el FRR son iguales, es decir, no acepta ni rechaza [11, 4]. En sistemas de reconocimiento positivo (ej., sistemas de control de acceso) una falsa correspondencia determina la falsa aceptación de un impostor, mientras que una no-correspondencia falsa causa el falso rechazo de un usuario genuino, por otro lado, en una aplicación de reconocimiento negativo (ej., previniendo que los usuarios obtengan beneficios bajo identidades falsas), una falsa correspondencia resulta en rechazar una petición genuina, mientras que en una falsedad de no-correspondencia resulta en aceptar erróneamente un intento de impostor.

1.3. Representación de Características

Los valores de la intensidad del píxel en la imagen de huella digital no son invariantes durante el tiempo de captura y se necesita determinar las características sobresalientes de la imagen de entrada así como el resto de invariantes para un individuo determinado. Así el problema de representación es determinar un espacio de medición (rasgos) en el cual, las imágenes de huella digital correspondientes al mismo dedo forman un grupo compacto y las que

corresponden a diferentes dedos ocupan diferentes porciones del espacio (variación baja dentro de la clase y variación alta fuera de la clase). Una buena representación de la clase debe tener las dos propiedades siguientes:

- **Sobresaliente**, significa que una representación debe contener información distintiva acerca de la huella digital.
- **Conveniente**, significa que la representación puede ser fácilmente extraída, almacenada en una forma compacta y es útil para realizar las comparaciones.

Las representaciones basadas en imágenes, están constituidas por la información de la intensidad del píxel (sin procesar), son prevalecientes entre los sistemas de reconocimiento que usan comparación óptica y basada en correlación. Sin embargo, la utilidad de los sistemas que usan tales esquemas de representación pueden ser limitados debido a factores como variaciones de brillantez, variaciones en la calidad de la imagen, cicatrices, y grandes distorsiones globales que se presentan en la imagen de huella digital.

La mayoría de los sistemas de reconocimiento de huella digital se basan en minucias. Éstas son discontinuidades locales cresta-valle. Las minucias pueden ser descritas como una combinación (ej., el lago, puede expresarse como dos bifurcaciones, y una cresta corta se puede considerar como un par de crestas terminales) de crestas terminales y bifurcaciones [9], Figura 1.3. El patrón de huella digital, exhibe diferentes tipos de características [8, 11, 15]:

- **A nivel global**, el flujo de línea de crestas delinean un patrón similar a uno de los que se muestran en la Figura 1.5. Puntos singulares, llamados punto core (centro o núcleo), o un punto delta, los cuales se caracterizan por su posición y tipo, véase la Figura 3.23. Un core se define como un punto en el campo de orientación, dónde la orientación en una vecindad local pequeña alrededor del punto presenta la tendencia semi-redonda.
-

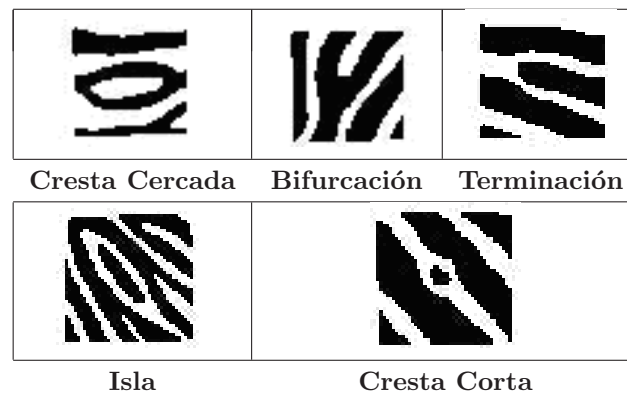


Figura 1.3: Minucias de una Huella Digital.

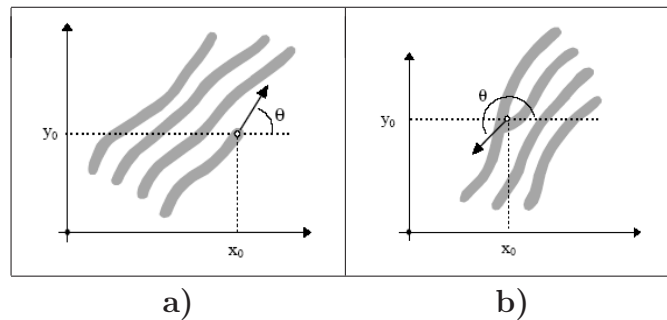


Figura 1.4: Representación de Minucias. La fig 1.4-a muestra una terminación de minucia; (x_0, y_0) son las coordenadas de la minucia; θ es el ángulo que la tangente de la minucia forma con la dirección horizontal. La 1.4-b está definida por medio de la terminación de la minucia que existe en la imagen complementaria en correspondencia con la bifurcación original.

Un delta se define como un punto en el campo de orientación, dónde una vecindad local pequeña alrededor del punto forma tres sectores y la orientación en cada sector presenta tendencia hiperbólica.

- **A nivel local**, un total de 150 características de crestas locales diferentes, llamadas detalles diminutos. Las características de cresta más prominentes, son llamadas minucias, véase Figura 1.3, éstas son discontinuidades locales en el modelo crestas-valles. Las crestas son representadas por líneas negras y los valles por líneas blancas. Una cresta

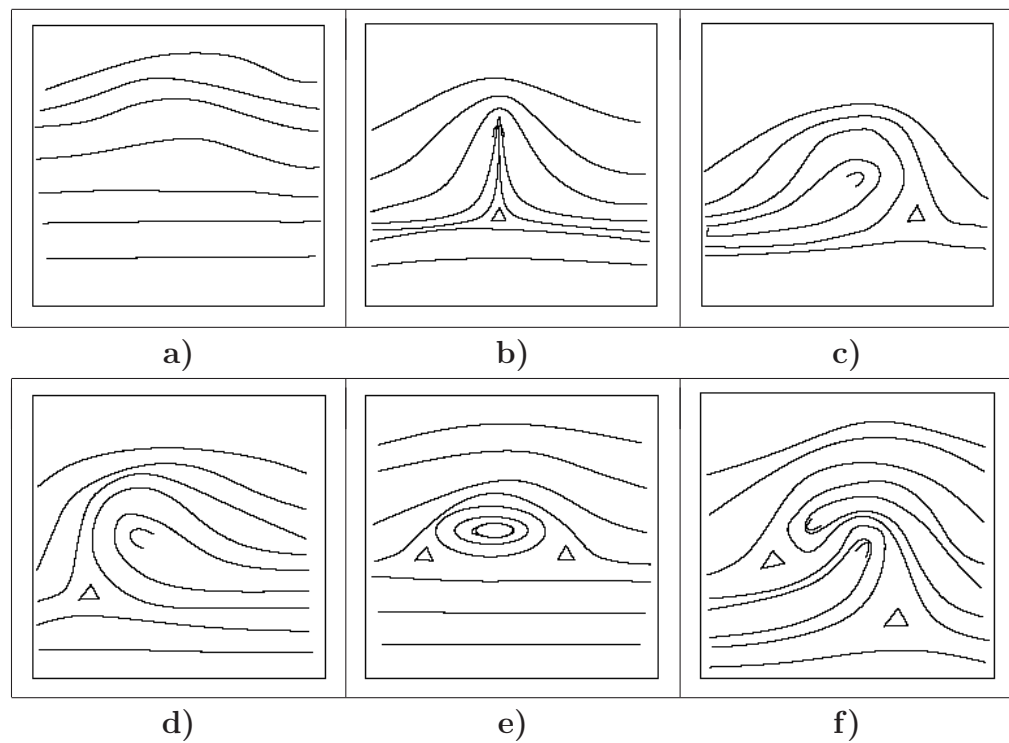


Figura 1.5: Patrones de huella digital ordinarias [15]: a) Arco; b) Arco tendido; c) Bucle izquierdo; d) Bucle Derecho; e) Espira; y f) Doble bucle.

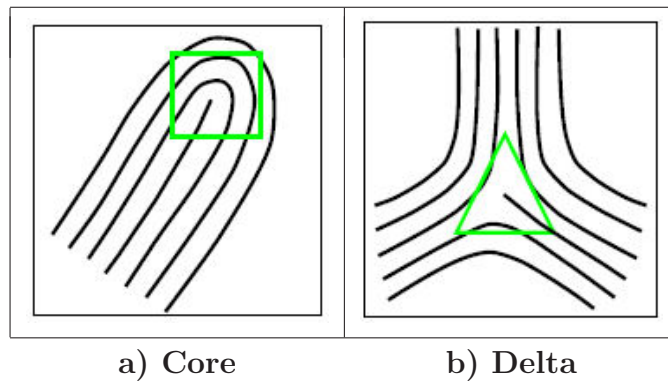


Figura 1.6: Puntos Singulares [11].

terminal se define como el punto de cresta donde una cresta termina abruptamente. Una bifurcación de cresta se define como el punto de la cresta donde una cresta bifurca o diverge dentro de crestas ramificadas. Cada uno de los dos tipos de minucias básicas, tiene tres atributos, es decir, la coordenada x , la coordenada y , y la dirección de la cresta local θ , como se muestra en la Figura 1.4.

1.4. Empatamiento de Minucias

Un algoritmo de correspondencia compara dos huellas digitales y regresa un grado de similitud (sin pérdida de similitud, una puntuación entre 0 y 1) o una decisión binaria (empatado/no empatado). Solamente pocos algoritmos operan directamente sobre imágenes de huella digital en escala de grises; la mayoría de ellos requieren una representación intermedia de la huella digital que se deriva a través de una etapa de extracción de rasgos. Fiablemente el empatamiento de imágenes de huellas digitales es un problema extremadamente difícil, principalmente debido a la gran variabilidad en impresiones de huella digital del mismo dedo (ej., grandes variaciones intra-clase). Los principales factores responsables para las variaciones intra-clase son: desplazamiento, rotación, traslape parcial, distorsión no lineal, presión

variable, cambios en la condición de la piel, ruido, y errores de extracción de características. Además, las impresiones de huellas digitales del mismo dedo algunas veces parecen bastante diferentes cuando por el contrario las huellas digitales de diferentes dedos parecen muy similares. Los examinadores de huella digital, evalúan varios factores para verificar que dos huellas digitales son del mismo dedo: i) acuerdo de configuración del patrón global, el cual significa que dos huellas digitales deben de ser del mismo tipo, ii) concordancia cualitativa, la cual requiere que los detalles de minucias correspondientes deben ser idénticos, iii) factor cuantitativo, el cual especifica que por lo menos un cierto número (un mínimo de 12 según las directrices forenses en los Estados Unidos) de detalles de minucias correspondientes deben ser encontradas, y iv) los detalles de minucias correspondientes, que deben de ser idénticamente relacionados entre si. La comparación automática de huellas digitales no necesariamente sigue las mismas normas. En realidad, aunque la comparación automática de huellas digitales basados en minucias esta inspirado por el procedimiento manual, varias aproximaciones se han desarrollado en los últimos 40 años y muchas de ellas han sido explícitamente diseñadas para ser implementadas sobre computadora. A continuación se explica la categorización de aproximaciones de empatamiento de huellas digitales:

- Empatamiento basado en correlación: dos imágenes de huella digital son sobrepuestas y la correlación (al nivel de intensidad) entre píxeles correspondientes se calcula para alineaciones diferentes (ej., varios desplazamientos y rotaciones);
 - Empatamiento basado en minucias: las minucias son extraídas de las dos huellas digitales y almacenadas como conjunto de puntos en el plano de dos dimensiones. La correspondencia de minucias esencialmente consiste en encontrar la alineación entre la plantilla y el conjunto de minucias de entrada que resulta en el número máximo de pares de minucias.
 - Empatamiento basado en características de las crestas: la extracción
-

de minucias es dificultosa en imágenes digitales de muy baja calidad, mientras que otras características del patrón de crestas de la huella digital (ej., orientación y frecuencia local, forma de la cresta, información de la textura) se pueden extraer más fiablemente que las minucias, incluso aún cuando su particularidad es generalmente baja. Las aproximaciones correspondientes a ésta familia compara las huellas digitales en términos de características extraídas del patrón de crestas.

1.5. Extracción Directa en Escala de Grises

Con el objetivo de superar algunos de los problemas relacionados a la binarización y adelgazamiento de huella digital (ej., presencia de minucias espurias en el caso de bordes de crestas irregulares), algunos autores han propuesto métodos de extracción directa en escala de gris. Maio y Maltoni [12], han elegido la extracción de características directamente de la imagen en escala de gris sin binarización y adelgazamiento, por las siguientes razones:

- Mucha información (ej., ocultar minucias reales u originar minucias falsas) puede perderse durante el proceso de binarización.
- La binarización y adelgazamiento son consumo de tiempo.
- Las técnicas de binarización probadas son insatisfactorias cuando se aplican a imágenes de baja calidad.

La idea básica de este método es seguir la línea de crestas sobre la imagen de escala de grises, navegando de acuerdo a la imagen direccional de la huella digital. Un conjunto de puntos iniciales se determinan superponiendo una rejilla de malla-cuadrada sobre la imagen de escala de grises. Para cada punto inicial, el algoritmo guarda el seguimiento de línea de crestas hasta que terminan o intersecan con otra línea de crestas (detección de minucias). Se

adopta una estrategia de etiquetado para examinar sólo una vez cada línea de cresta y localizar las intersecciones entre las líneas de crestas.

Capítulo 2

Análisis y Diseño

2.1. Introducción

En este capítulo, se presentará el análisis y diseño del Sistema de Detección de Minucias, el cual incluye: modelo de casos de uso, diagrama de clases, diagramas de secuencia. Estos requisitos ayudarán a estructurar el sistema y a especificar los servicios que se deben proporcionar: Administración de cuentas, registro de datos, y examinador (extractor de minucias en huellas digitales).

2.2. Modelo de Casos de Uso

El modelo de casos de uso, es una especificación completa de todas las formas posibles de utilizar el sistema, el cual nos ayuda a delimitar el sistema, definiendo todo lo que debe hacer para sus usuarios. Un modelo de casos de uso es un modelo del sistema que contiene actores, casos de uso y sus relaciones. Además los casos de uso ayudan a encontrar las clases. Los actores se utilizan para interactuar con los casos de uso. Los actores se comunican mediante el envío y recepción de mensajes hacia y desde el sistema. Actores y casos de uso forman un modelo de casos de uso. Los actores pueden ser

otros sistemas o hardware externo. Un diagrama de casos de uso describe parte del modelo de casos de uso y muestra un conjunto de casos de uso y actores, relacionados entre sí. Una instancia de un actor es por lo tanto un usuario concreto que interactúa con el sistema. El modelo de casos de uso captura todos los requisitos funcionales del sistema. El modelo de análisis es una especificación detallada de los requisitos, y funciona como la primera aproximación del modelo de diseño. El modelo de análisis es un modelo conceptual, que ayuda a refinar los requisitos.

Con lo que refiere al diseño, la entrada esencial a éste modelo es el resultado del modelo de análisis. El modelo de diseño se realiza mediante los diagramas de interacción, que son objetos que se comunican entre sí para interactuar, es decir, muestran la secuencia de acciones de un caso de uso, este comienza cuando un actor invoca a un caso de uso a través del envío de mensajes al sistema. Algún objeto de diseño recibirá el mensaje del actor. Después el objeto de diseño llama a algún otro objeto, y de ésta manera los objetos implicados interactúan para realizar y llevar a cabo el caso de uso. Esta visión proporciona el comportamiento del sistema y muestra el flujo de control a través de muchos objetos. El diagrama de interacción puede ser de secuencia o de colaboración.

2.3. Casos de Uso del Sistema de Detección de Minucias

En ésta parte se muestra el modelo de casos de uso del Sistema de Detección de Minucias, tomando como actores principales: administrar, registrar y consultar; es decir, son los usuarios finales del sistema.

En la Figura 2.1 se muestran 3 casos de uso, los cuales representan los servicios que se podrán ofrecer a los usuarios que trabajen con el Sistema; administración de cuentas, registro de datos, y examinador; (Incluye: adquirir

imagen, verificador de calidad, y extractor de minucias) que navega en la imagen de huella digital detalladamente para la extracción de características. Estos servicios se proveerán dependiendo del tipo de cuenta que tenga el usuario final.

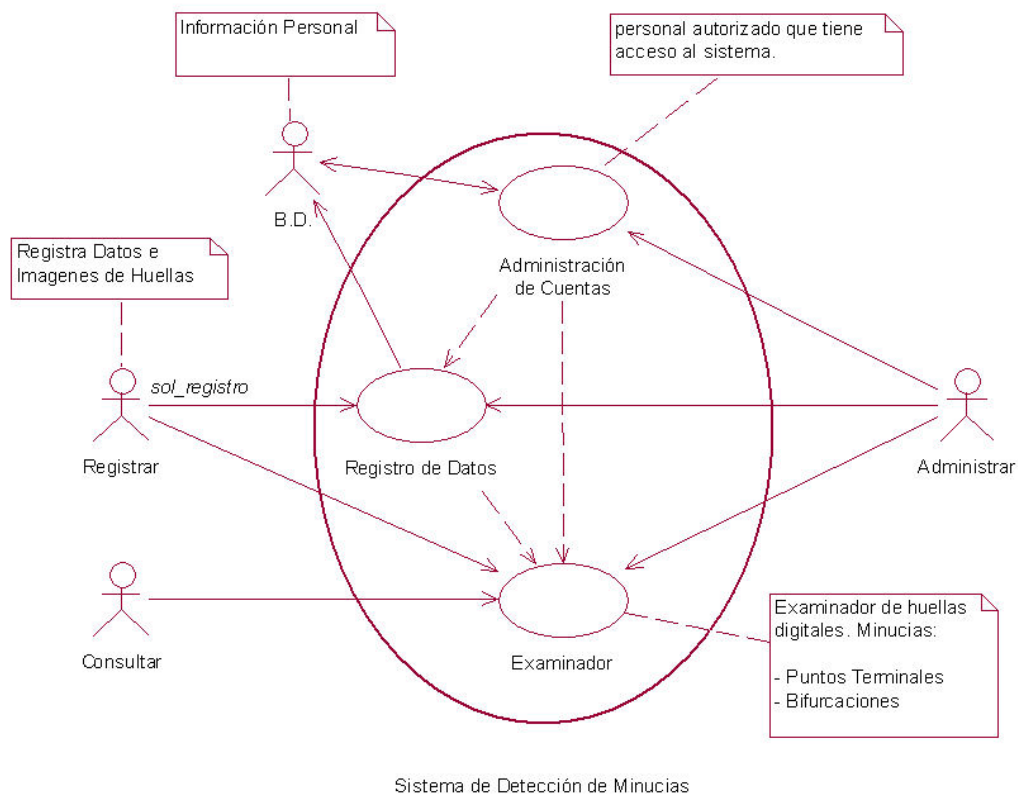


Figura 2.1: Servicios del Sistema de Detección de Minucias.

2.3.1. Descripción del Caso de Uso Administración de Cuentas

Éste servicio únicamente está dirigido para el Administrador, el cual realizará operaciones de; alta, baja, eliminación y actualización de usuarios, y

él asignara el tipo de cuenta, es decir, indicará la prerrogativa de un usuario terminal en particular. De esta manera los usuarios sólo podrán trabajar con los módulos que les corresponden. Además, siempre que ingrese un usuario al sistema para trabajar, se verificará previamente que el acceso sea únicamente para el personal autorizado.

2.3.2. Descripción del Caso de Uso Registro de Datos

Antes de que algún usuario en particular trabaje en este módulo, previamente deberá ser autorizado por el caso de uso administración de cuentas, por que existe una dependencia indicada con línea discontinua, y el registro lo podrá realizar tanto el Administrador como el Registrador, como se muestra en la Figura 2.1. Cuando se realiza un registro de alguna persona, se almacenarán sus datos personales y los rasgos de su huella dactilar.

2.3.3. Descripción del Caso de Uso Examinador

El caso de uso examinador contiene tres servicios: adquirir imagen, verificador de calidad y extractor de minucias. Existe una dependencia entre los tres casos de uso, ya que antes de extraer las minucias se debe comprobar la calidad de la imagen, y antes de verificar la calidad de la imagen se debe adquirir la imagen, véase la Figura 2.2. Por tanto, el verificador de calidad tiene una estrecha relación con el extractor de minucias, porque entre más clara (proceso de filtrado) la imagen más precisión habrá en la extracción.

De esta manera, el verificador de la calidad debe de asegurar que la calidad de la imagen de la huella digital sea buena, y por tanto, el extractor de información biométrica recuperará y almacenará minucias genuinas. La calidad en la imagen es importante, porque no hay ningún punto donde se use una plantilla con un número muy limitado de minucias genuinas para hacer una autenticación. Si una imagen de huella digital es de calidad pobre,

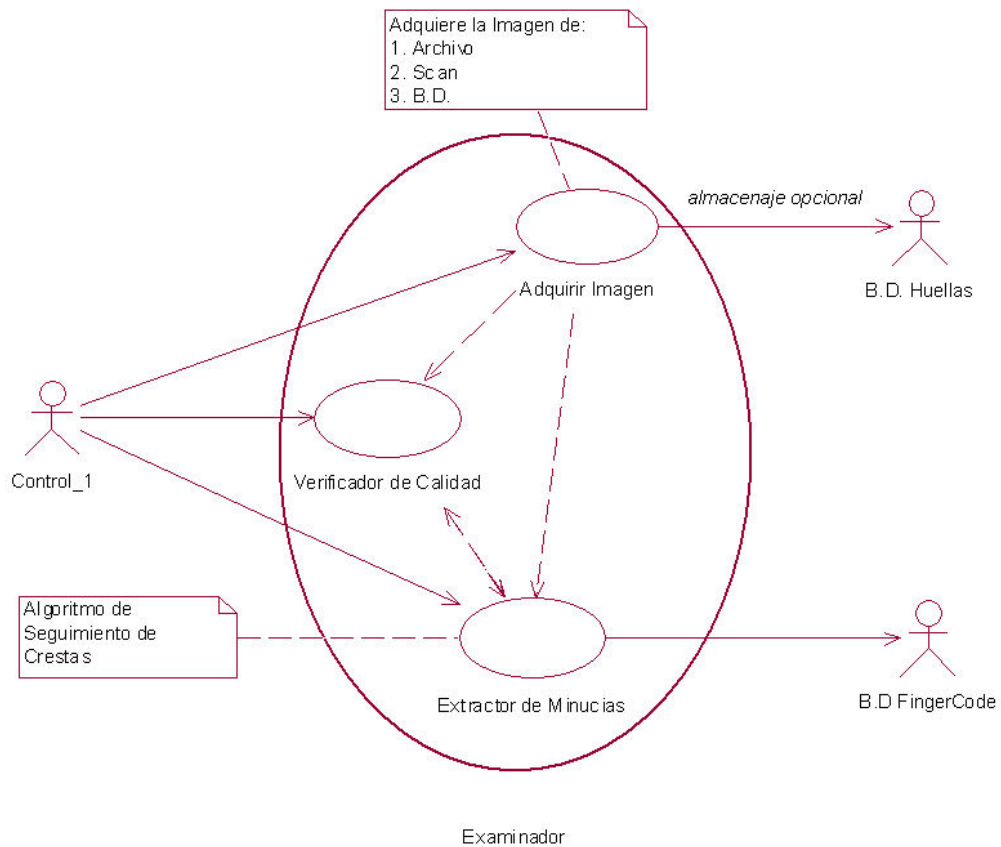


Figura 2.2: Caso de Uso Examinador.

se refuerza para mejorar la claridad de estructuras de cresta/valle y anular todas las regiones que no pueden recuperarse fiablemente.

La imagen de la huella digital reforzada se envía de nuevo al extractor de minucias, porque la calidad actual que verifica el algoritmo es muy baja, esto sólo se usa en el módulo de examinación.

Por otro lado, el extractor de características de huella digital, almacena la información biométrica o FingerCode (Vector de características) en la Base de Datos, véase Figura 2.2. Por ejemplo, en este trabajo el extractor de

minucias consiste principalmente de los siguientes componentes:

- I. Segmentar la imagen para extraer sólo crestas en regiones fiables.
- II. Normalizar la imagen de huella digital.
- III. Estimar el campo de orientación local.
- IV. Suavizar las direcciones locales.
- V. Extracción de crestas (navegar sobre la imagen de acuerdo a su dirección local).
- VI. Regularización de la silueta de la cresta local.
- VII. Ajuste en un modelo en forma de gaussiana para localizar el centro de la cresta.
- VIII. Buscar puntos terminales o bifurcaciones.
- IX. Calcular su dirección y posición.
- X. Almacenar en la base de datos el vector de características (coordenada x, y , y el ángulo θ de la minucia detectada).

De esta manera es como el Extractor de Minucias se encarga de la búsqueda de rasgos de una huella digital.

2.4. Diagrama de Clases

Un diagrama de clases de UML, se utiliza para documentar la estructura estática del sistema; esto es, qué clases existen y cómo están relacionadas entre sí. Cuando se desarrolla el modelo de clases inicial, antes de identificar los mensajes que pasan entre los objetos, se debe identificar el aspecto conceptual del modelo.

En el modelado con objetos, las estructuras estáticas son los objetos y las clases están compuestas de atributos y métodos. Las relaciones entre objetos y clases corresponden a las ligas y asociaciones, respectivamente. Las estructuras o propiedades de la clase se conocen como atributos y el comportamiento como operaciones.

La Figura 2.3 muestra el diagrama de clases de la arquitectura del sistema de reconocimiento de huella digital, la cual contiene las clases de interfaz, acceso, control de base de datos personal, administración de cuentas, registros, verificador de calidad, extractor de minucias, y control de base de datos de imágenes de huellas digitales. Además se muestran los tipos de base de datos; base de datos para los registros personales, base de datos de imágenes de huellas digitales, y base de datos para almacenar el vector de características.

Cuando algún usuario terminal desee entrar al sistema, antes que nada, debe identificarse con el sistema a través de su login y password. Una vez identificado, el usuario podrá operar el sistema, dentro de lo que le sea permitido. La clase interfaz se encarga de enviar los mensajes a la clase control_1, y ésta envía los mensajes a las demás clases, dependiendo de lo que haya seleccionado el usuario en la interfaz.

Por consiguiente, el control_1 verifica el tipo de servicio que tiene el usuario, y de acuerdo a su tipo de cuenta será el servicio autorizado.

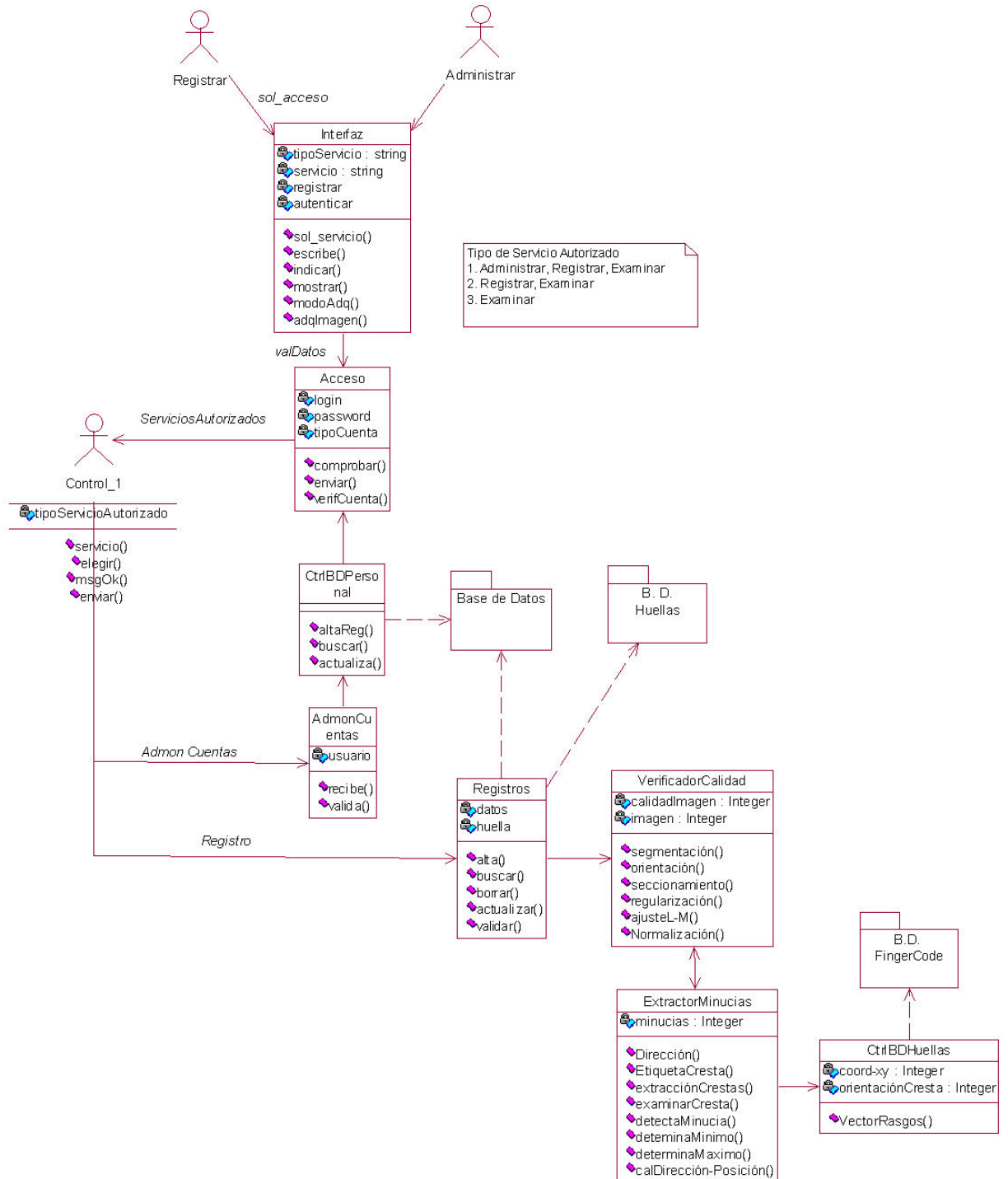


Figura 2.3: Arquitectura del Sistema de Detección de Minucias.

2.5. Diagramas de Secuencia

En este tipo de diagrama se muestran las interacciones entre objetos mediante la transferencia de mensajes entre ellos o subsistemas. Cuando un subsistema recibe un mensaje, significa que es un objeto de una clase del subsistema el que recibe el mensaje. Cuando un subsistema envía un mensaje, realmente es un objeto de una clase del subsistema el que lo envía. De esta manera se muestra la secuencia que llevan los objetos al enviar y recibir mensajes.

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de acceso al sistema, en la que algún usuario terminal, por ejemplo, un Registrador de datos y huellas, proporciona su login y password, y el sistema verifica en la base de datos su existencia y su tipo de cuenta. Para que el Administrador pueda realizar alguna operación en las cuentas de otros usuarios, por ejemplo, modificación, véase Figura 2.5, previamente se debe validar el acceso al sistema y posteriormente podrá realizar operaciones como: crear, eliminar, actualizar, etc.

Con lo que respecta al registro de datos, vea Figura 2.6, en el cual, primero se registran los datos de la persona, e inmediatamente se registra la huella de por lo menos un dedo de 10. Durante el registro de la huella dactilar se puede realizar el proceso de extracción de información biométrica. Finalmente, se exponen los pasos del algoritmo para la detección y almacenamiento de minucias, véase la Figura 2.7. En el capítulo 3 se explica más detalladamente el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas.

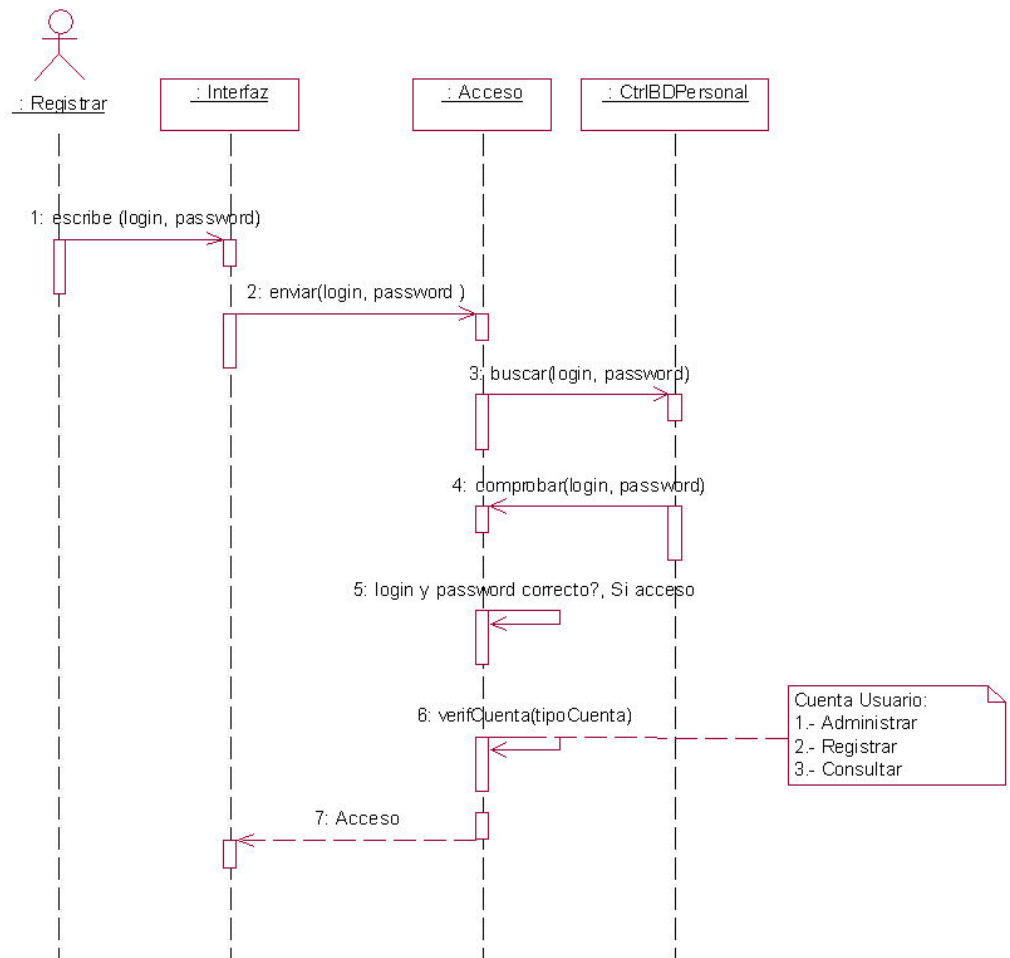


Figura 2.4: Acceso al Sistema.

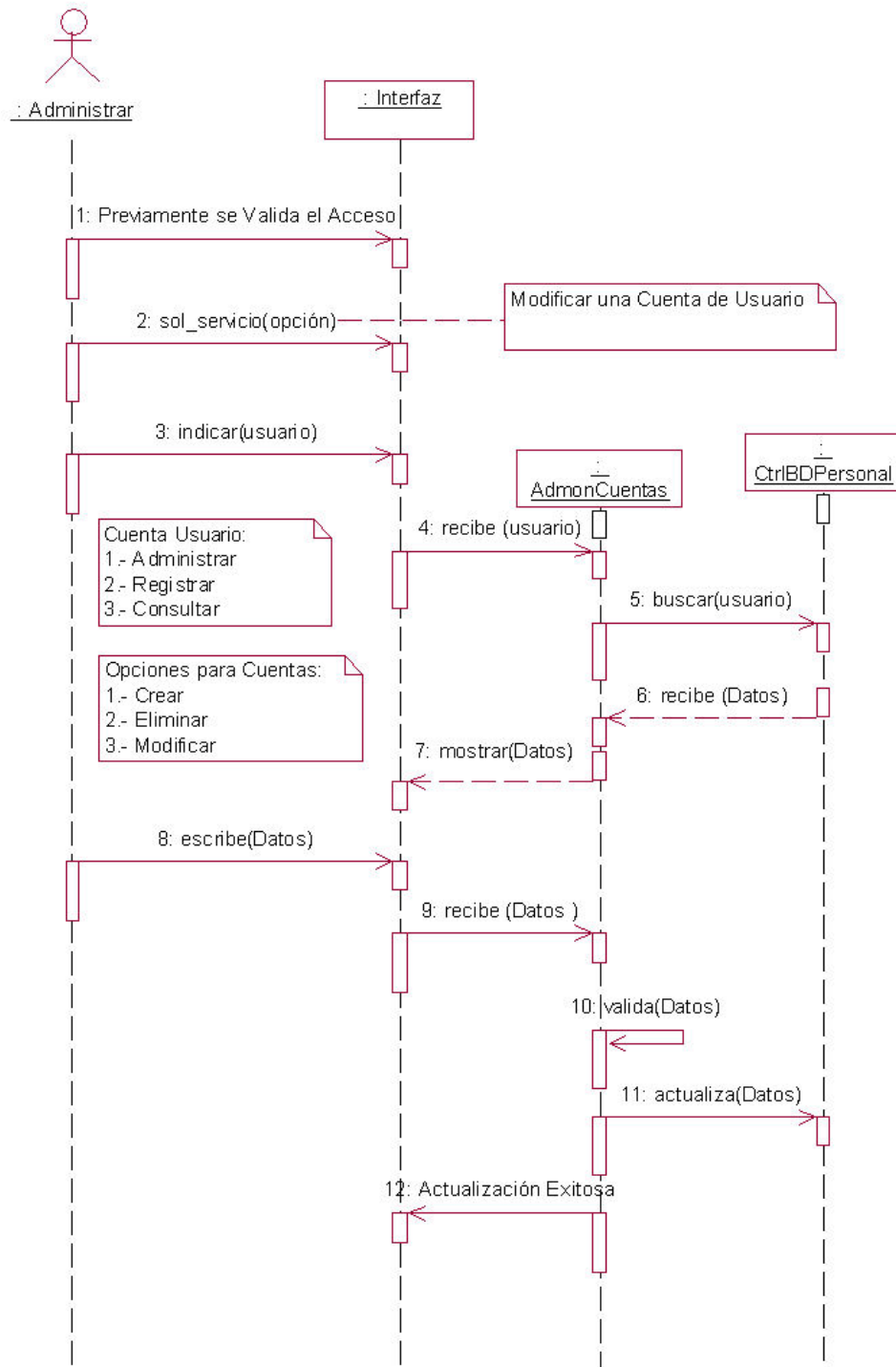


Figura 2.5: Administración de Cuentas.

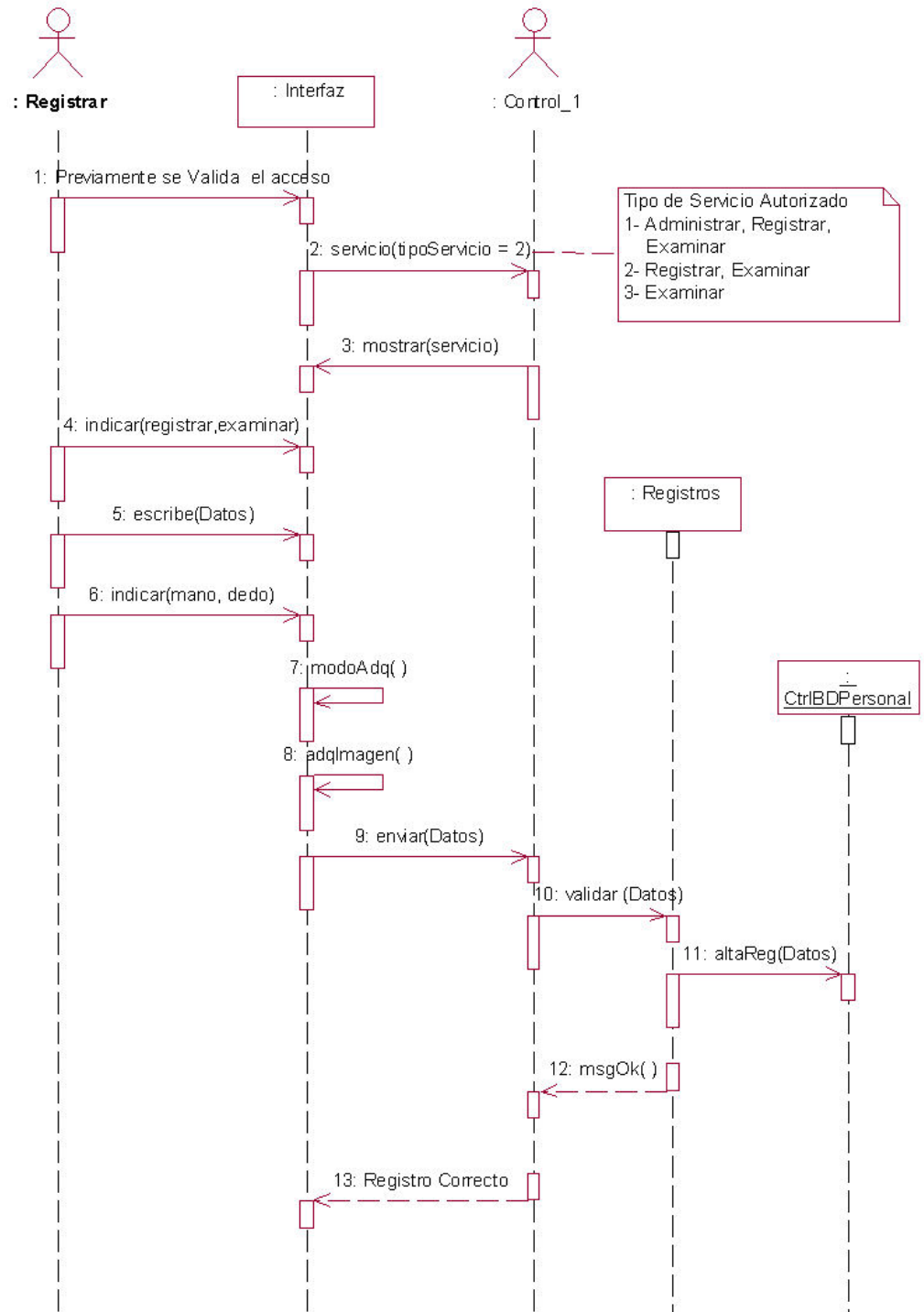


Figura 2.6: Registro de Datos y Huellas Digitales.

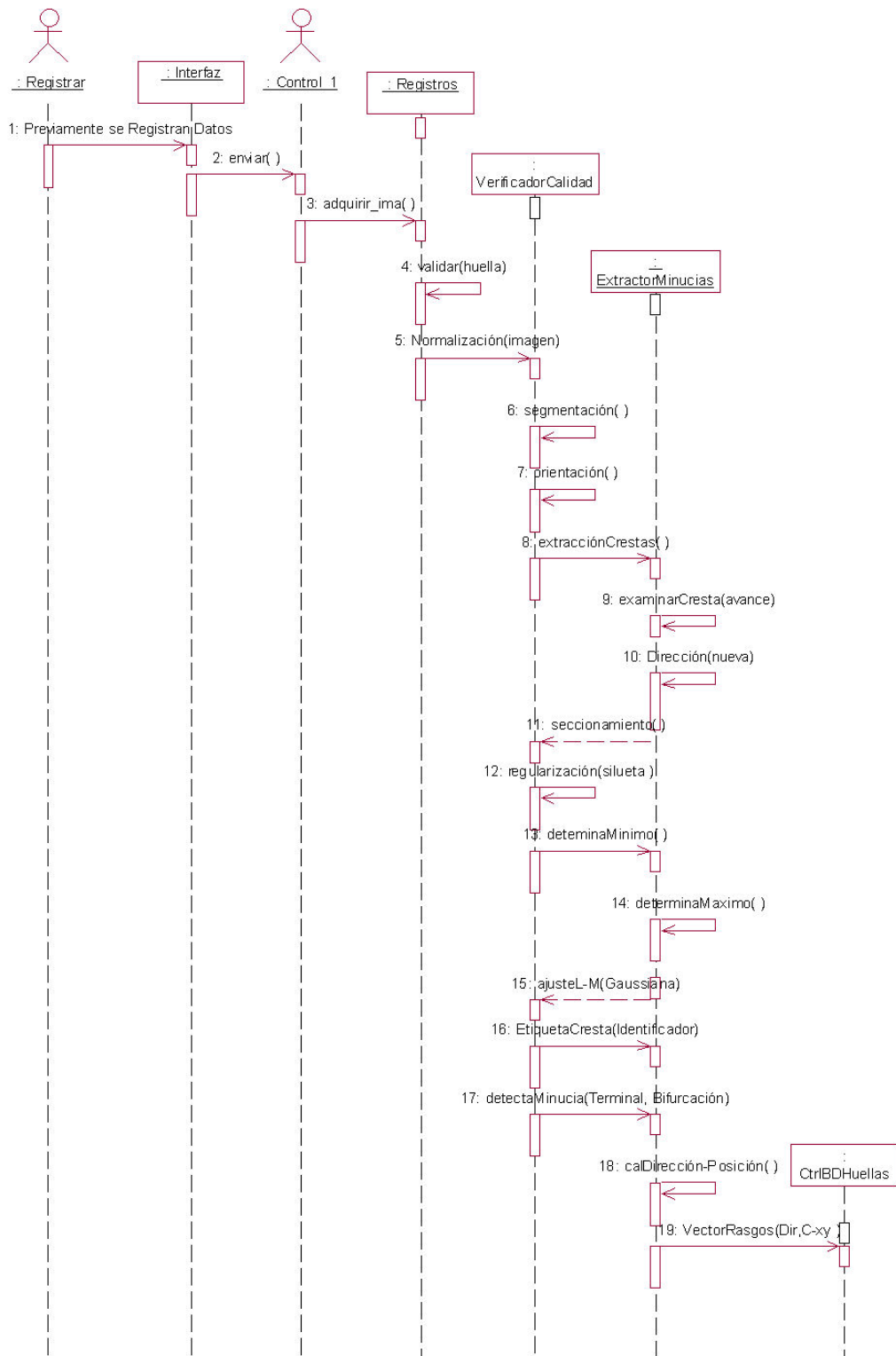


Figura 2.7: Extracción de Minucias.

Capítulo 3

Implementación

3.1. Introducción

En este capítulo, se explicará sobre la administración global de la aplicación, el registro de datos de algún individuo, y se describirá el modelo entidad-relación del sistema biométrico. Además, se describirán las fórmulas para la normalización, segmentación, cálculo de la orientación o imagen direccional, regularización de las direcciones locales, y ajuste gaussiano en la imagen de huella digital. Finalmente, se introduce el algoritmo para el seguimiento de las líneas de crestas en la imagen de huella digital en escala de grises.

3.2. Sistema Propuesto

En el sistema se almacenará los datos personales y huellas del individuo, véase Figura 3.3. Después, se realiza la segmentación para anular bloques o regiones con ruido. Posteriormente, se aplica un proceso de normalización a cada imagen. Después se calcula la orientación (a través de las máscaras de Sobel) de las crestas en cada bloque (ej., 17x17 píxeles) de la imagen de huella digital normalizada. Una vez calculadas la direcciones locales, se realiza un proceso de regularización o suavizado para mejorar las direcciones locales en

la imagen. Por otro lado, durante el seguimiento de la línea de cresta en la imagen de huella digital se realiza un proceso de regularización de la silueta en forma de onda en dirección ortogonal a las crestas, esto es importante en cada paso, para encontrar un mínimo local y sus máximos circunvecinos de manera fiable (crestas y valles) en cada bloque, y se realiza un ajuste con un método de mínimos cuadrados no lineal (ajuste Gaussiano Levenberg-Marquardt) para encontrar el centro y continuar con el seguimiento de la línea de cresta. Este algoritmo debe navegar sobre la imagen buscando crestas, y finaliza cuando se encuentre fuera del área de interés, cuando se termine la cresta, y/o encuentre alguna minucia en la huella.

3.2.1. Administración del Sistema

En este epígrafe, se explican las partes en la cual están integradas en el sistema biométrico; modelo entidad-relación para el sistema de base de datos, registro de datos personales, manipulación de los datos, y adquisición de huellas dactilares, etc.

3.2.1.1. Descripción del Modelo Entidad Relación

El Diagrama E-R, se fundamenta en la forma de percibir el mundo real como un conjunto de objetos llamados entidades y la relación que existe entre éstos objetos. Es necesario interpretar los requerimientos que necesita el sistema biométrico para representarlos en un diagrama entidad-relación, que permita comprender el flujo de información del sistema global. La identificación de entidades es una actividad que debe permitir coleccionar y almacenar información fundamental de un sistema, para su manipulación total y apoyo a la toma de decisiones. Por lo tanto, una entidad puede ser toda aquella información que se necesite almacenar. Cada entidad debe tener atributos, que no es más que una cualidad o característica que hace distinguir un objeto de otro. En éste documento, los atributos obligatorios se representarán en

negrita.

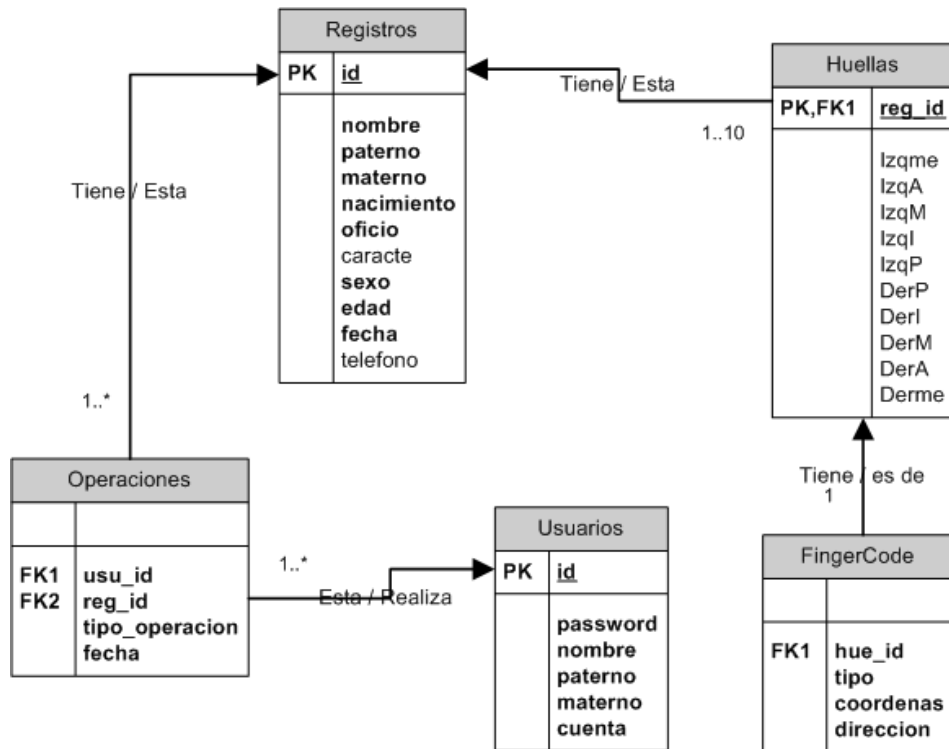


Figura 3.1: Modelo E-R del Sistema Biométrico.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama E-R y sus respectivos atributos. Existe una entidad llamada *Usuarios*, la cual sirve para dar acceso al personal al sistema biométrico, además cuenta con un atributo llamado *cuenta*, la cual indicará la prerrogativa de un usuario terminal en particular. De esta manera los usuarios sólo podrán trabajar con los módulos que les corresponden. Por lo tanto, siempre que ingrese un usuario al sistema para trabajar al sistema biométrico, se verificará previamente que sea únicamente personal autorizado. Cabe mencionar, que el Administrador del Sistema asignará el tipo de cuenta, asimismo realizará operaciones de: alta, baja, eliminación y actualización de usuarios. La entidad *Registros* se relaciona con la entidad *Operaciones*, y ésta última con la entidad *Usuarios*, es decir, cuando algún usuario realiza algún tipo de operación, por ejemplo un registro, éste tipo de operación se almacenará automáticamente en la entidad de *Operaciones*, y

además se guarda el id (el identificador *Id*, es la llave primaria de la entidad *Usuarios*, es decir, el seudónimo de un usuario en particular) del usuario que efectuó dicha operación, así se podrá conocer el usuario que lo registró. Por lo tanto, cada usuario puede efectuar una o más operaciones, y viceversa, cada operación debe estar realizada por un usuario. Y con respecto a los registros, cada registro puede tener una o más operaciones, y viceversa, cada operación debe estar en un registro. Por otro lado, la entidad *Registros* se utilizará para almacenar datos personales para consultas posteriores. La llave primaria se llama *Id*, con la cual se podrán consultar las huellas que se hayan adquirido del individuo. La entidad *Registros* está relacionada con la entidad *Huellas*, es decir, cada registro puede tener asignado de una a diez huellas, y viceversa, cada huella debe estar asignada a un registro. El atributo *reg_id* es ambos, llave primaria para su propia entidad y llave foránea para la entidad de *Registros*. La entidad *Huellas* almacenará el número de huellas que se adquirió durante el registro, por ejemplo, si se almacenó la huella digital del dedo meñique de ambas manos ¹, se almacenaría el No. Registro-0 y No. Registro-9 en Izqme y Derme respectivamente. Finalmente, se encuentra la entidad *FingerCode*, en la cual se almacenará el vector de características, esto es, las coordenadas, la dirección, el tipo de minucia (terminal o bifurcación), y a cual huella pertenece dicho vector. En la Figura 3.2, se especifican los módulos del sistema con sus respectivas tablas en la base de datos y con las operaciones permitidas en dichas tablas, para cada módulo.

3.2.1.2. Descripción del Módulo Registro

Una vez que un usuario en particular haya tenido acceso al sistema, por ejemplo un Registrador de datos personales, éste capturará la información personal como; nombre completo, fecha de nacimiento, edad, etc., asimismo, podrá realizar alguna operación de modificación, eliminación, véase la Figura

¹El número de dedos de ambas manos, es de 0 al 9, iniciando el conteo de la mano izquierda y dedo meñique.

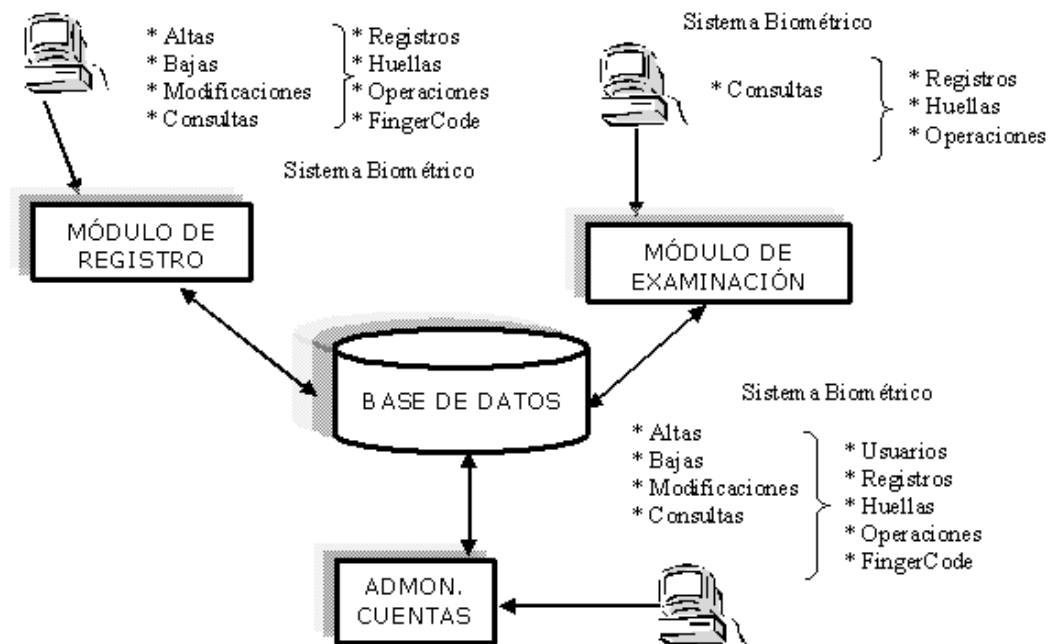


Figura 3.2: Diagrama Conceptual del Sistema Biométrico.

3.3, y alguna consulta como se muestra en la Figura 3.4. La consulta será por nombre o por apellido como es mostrado, y para indicar las huellas que se han adquirido para dicha persona, solo basta oprimir un click sobre el registro y se pintarán los dedos de verde, el cual indica que dedos ya están dados de alta o que dedos ya se adquirieron. Para visualizar la imagen de huella digital, basta oprimir un click sobre algún dedo pintado.

Cuando termine de capturar los datos, posteriormente se capturarán las imágenes de huella digital. Primero debe de oprimir un click sobre el dedo que desee capturar, después se mostrará otra ventana, vea Figura 3.5, en la cual se podrá adquirir una imagen, ya sea del digitalizador o desde archivo. En éste caso se obtuvo una imagen desde archivo, que posteriormente se utilizará para realizar algunos procesos como aplicarle filtros, segmentarla, calcular la orientación, extraer características, etc.

AFIS
Usuarios

Insertar | Modificar | Eliminar | Consultas

DATOS PERSONALES

*Id: 10

*Nombre: Maria Del Carmen

*A. Paterno: Cortes

*A. Materno: Perez

*F. Nacimiento: 23/05/1983 dd/mm/aaaa

Oficio: Profesionista

Edad: 23

Fecha: 01/08/2006 dd/mm/aaaa

Sexo:
 Femenino
 Masculino

Características:
 Tez Clara, Cabello Negro

HUELLAS DACTILARES

Cancelar Actualizar Cerrar

Figura 3.3: Interfaz para la Manipulación de Datos.

AFIS
Usuarios

Insertar | Modificar | Eliminar | Consultas

Consulta por Nombre

Nombre: alonso

identificador	nombre	Apellido Paterno	Apellido Materno
1	VICTOR	ALONSO	PEREZ
6	MARCO ANTONIO	ALONSO	PEREZ

Características:
 Tez morena, ojos negros, usa lentes

HUELLAS DACTILARES

Cerrar

Figura 3.4: Interfaz para Consulta de Información.



Figura 3.5: Interfaz para Adquisición de Huellas Digitales.

3.2.2. Segmentación

Separar el área de huella digital del fondo es de ayuda para evitar la extracción de características en áreas ruidosas de la huella digital y de fondo. Debido a que las imágenes de huellas digitales son patrones estriados, usando una técnica de umbralización global o local no permite que el área de la huella digital sea efectivamente aislada. De hecho, lo que realmente discrimina el frente y el fondo no es el promedio de las intensidades de la imagen sino la presencia de un patrón estriado y orientado en el frente, y de un patrón isotrópico (ej., el cual no tiene una orientación dominante) en el fondo. Si el fondo de la imagen siempre fuera uniforme y más clara que el área de huella digital, una simple aproximación basada sobre la intensidad local podría ser efectiva para discriminar frente y fondo; en la práctica, la presencia de ruido (tal como polvo, grasa en la superficie de los escáner de huella digital) requiere técnicas de segmentación más robustas. En [11] discriminan el frente y fondo usando la magnitud promedio del gradiente (apéndice A) en cada

bloque de la imagen; de hecho, porque el área de huella digital es rica en bordes debido a la alternación de cresta/valle, la respuesta del gradiente es alta en el área de huella digital y es pequeña en el fondo.

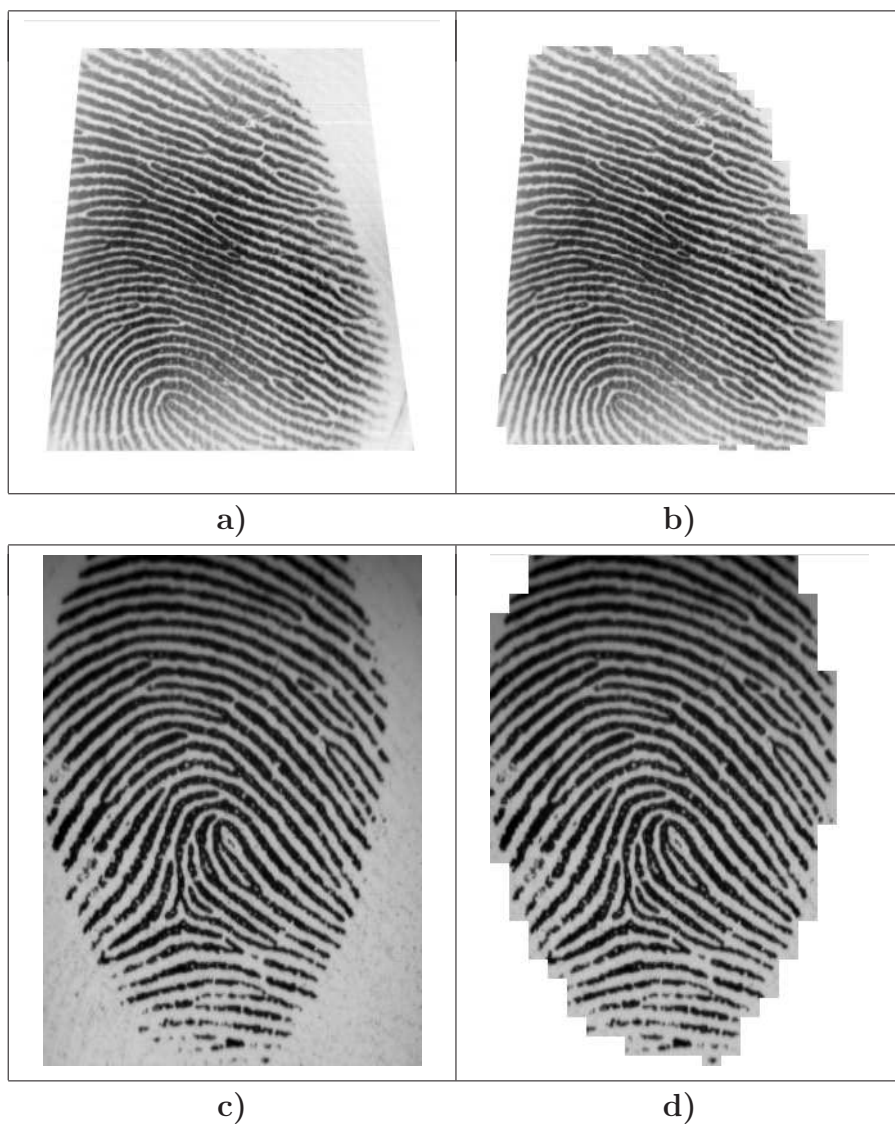


Figura 3.6: Imágenes de Huella Digital antes y después de la Segmentación, utilizando la fórmula 3.2; cada bloque es asociado al frente si cuyo Módulo Gradiente excede un Umbral dado.

3.2.3. Normalización

El principal propósito de la normalización es reducir las variaciones en valores de nivel de grises a lo largo de las crestas y valles. En particular, el método no rellena: pequeñas crestas rotas, huecos dentro de las crestas; o separa crestas que se tocan paralelamente.

Una imagen de huella digital entrante se normaliza de tal modo que tiene una media y varianza preespecífica. Sea $I(x, y)$ el valor que denota el nivel de gris en el píxel (x, y) , m y v denotan la media y varianza estimada de I , respectivamente, e $I'(x, y)$ el valor que denota el nivel de gris normalizado en el píxel (x, y) . La imagen normalizada está definida como sigue [13]:

$$I'[x, y] = \begin{cases} m_0 + \sqrt{(I[x, y] - m)^2 \cdot v_0/v} & \text{si } I[x, y] > m \\ m_0 - \sqrt{(I[x, y] - m)^2 \cdot v_0/v} & \text{de otro modo,} \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde m y v son la media y varianza de la imagen, y m_0 y v_0 son la media y varianza deseada después de la normalización. La media y la varianza de una imagen de huella digital de niveles de gris I , están definidas como:

$$m(\mathbf{I}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i, j)$$

$$v(\mathbf{I}) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) - m(I))^2$$

El proceso de normalización anterior es una operación de píxel a píxel (el valor de cada píxel solamente depende sobre su valor previo y algunos parámetros globales), y no cambia la claridad de las estructuras de crestas y valles.

Los niveles de gris (ej., 0 . . . 255, asociando los píxeles oscuros cerca de cero

y los píxeles brillosos cerca de 255) utilizados para $m_0 = 100$ y $v_0 = 100$, son elegidos para que las crestas no se aclaren demasiado, ni los valles se oscurezcan mucho. Si $m_0 < v_0$, las crestas y los valles oscurecerán demasiado, de lo contrario, si $m_0 > v_0$, la imagen se aclara mucho en los valles y crestas.

Las Tablas 3.1 y 3.2 muestran un ejemplo de los datos de una pequeña fracción de imagen de huella digital de ambos bloques; original y normalizado de la Figura 3.8. Finalmente, se muestra en la Figura 3.7 la normalización de una imagen completa utilizando la fórmula 3.1.

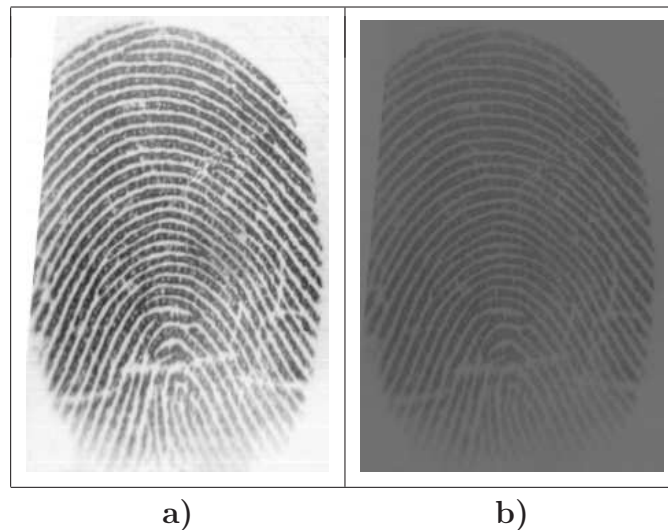


Figura 3.7: Ejemplo de una Imagen antes y después de Normalizar con el método descrito en [13], usando $m_0 = 100$ y $v_0 = 100$.

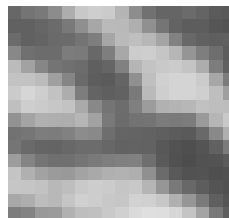


Figura 3.8: Bloque de 17x17 de una Bifurcación.

103	116	121	140	173	200	206	203	180	141	113	101	101	107	100	091	089
097	097	102	107	121	143	167	186	185	175	144	117	099	093	093	086	083
107	097	100	106	107	116	126	166	186	191	183	164	129	104	097	095	096
136	112	108	108	124	122	104	126	168	204	206	197	182	149	126	110	093
187	162	134	116	112	108	095	101	129	181	195	201	203	196	173	125	097
195	194	187	160	133	106	093	091	101	144	191	208	212	212	203	167	124
203	214	206	194	173	125	100	095	098	122	186	206	212	212	207	190	159
191	206	203	199	195	170	136	116	109	128	156	177	180	183	193	190	189
146	164	176	174	173	182	162	121	108	115	116	124	122	124	154	182	200
114	118	125	124	129	140	137	110	101	100	098	095	092	090	105	137	175
117	106	101	100	104	108	108	103	098	099	098	088	082	079	084	097	123
157	132	117	111	112	117	122	126	128	129	111	090	081	077	082	083	091
196	176	162	155	153	163	169	176	178	175	144	107	089	082	083	079	081
198	197	194	184	190	201	205	203	197	200	181	150	121	104	093	084	080
168	174	189	184	197	208	205	200	198	210	208	199	176	150	122	095	084
125	131	153	155	177	190	192	201	208	218	223	222	214	196	164	120	094
255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Cuadro 3.1: Bloque de 17x17 Original, correspondiente a la Figura 3.8.

090	093	094	098	105	110	111	111	106	098	092	090	090	091	090	088	087
089	089	090	091	094	088	103	107	107	105	099	093	089	088	088	087	086
091	089	090	091	091	098	095	103	107	108	107	103	096	090	089	089	089
097	092	091	091	095	094	090	095	104	111	111	110	106	100	095	092	088
107	102	097	093	092	091	089	090	096	106	109	110	111	109	105	095	089
109	109	107	102	096	091	088	088	090	099	108	112	113	113	111	103	095
111	113	111	109	105	095	090	089	089	094	107	111	113	113	112	108	102
108	111	111	110	109	104	097	093	091	095	101	105	106	107	109	108	108
099	103	105	105	105	106	102	094	091	093	093	095	094	095	101	106	110
093	093	095	095	096	098	097	092	090	090	089	089	088	088	091	097	105
093	091	090	090	090	091	091	090	089	089	089	087	086	085	086	089	094
101	096	093	092	092	093	094	095	095	096	092	088	086	086	086	086	088
109	105	102	101	100	103	104	105	106	105	091	091	087	086	086	085	086
110	110	109	107	108	110	111	111	110	110	106	100	094	090	088	086	086
104	105	108	107	110	112	111	110	110	112	112	110	105	100	094	089	086
095	096	100	101	105	108	108	110	112	114	115	115	113	109	103	094	088
121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121

Cuadro 3.2: Bloque de 17x17 Normalizado, correspondiente a la Figura 3.8.

3.2.4. Estimación de la Orientación en la Cresta Local

El campo de orientación de una imagen de huella digital representa la direccionalidad de las crestas en la imagen de la huella digital. Juega un papel muy importante en el análisis de imagen de huella digital. La imagen de huella digital típicamente es dividida en varios bloques no-traslapados (ej., 32 x 32 píxeles) y se asigna en el bloque una orientación representativa de crestas, al bloque basado en un análisis de gradientes en el bloque de escala de grises. La orientación del bloque podría ser determinada desde la orientación basada en gradientes de un píxel, es decir, promediando, votando, u optimizando.

Sea $[x, y]$ un píxel genérico en una imagen de huella digital. La orientación de la cresta local en $[x, y]$ es el ángulo θ_{xy} que las crestas de la huella digital, cruzan a través de una vecindad pequeña arbitraria centrada en $[x, y]$, que forman con el eje horizontal. Por que las crestas de la huella digital no están dirigidas $[x, y]$, θ_{xy} es una dirección no orientada quedando en $[0 \dots 180^\circ[$.

En lugar de calcular la orientación de la cresta local en cada píxel, la mayoría de los métodos de extracción de características y procesamiento de huella digital estiman la orientación local de la cresta en posiciones discretas (esto reduce el esfuerzo computacional y además permite que la estimación sea obtenida a través de interpolación). La *orientación de la imagen* de huella digital (también llamada imagen direccional), es una matriz \mathbf{D} cuyos elementos codifican la orientación local de las crestas de la huella digital. Cada elemento θ_{ij} , correspondiente al nodo $[i, j]$ de una rejilla de malla cuadrada localizada sobre el píxel $[x_i, y_j]$, denota la orientación promedio de las crestas de la huella digital en una vecindad de $[x_i, y_j]$, vea la Figura 3.9. Un valor adicional r_{ij} es asociado con cada elemento θ_{ij} para denotar la confiabilidad (o consistencia) de la orientación. El valor r_{ij} es bajo para regiones con ruido y seriamente corruptas, y es alto para regiones de buena calidad en la imagen de huella digital.

La aproximación más simple y más natural para extraer la orientación de la cresta local esta basada sobre el cálculo de gradientes en la imagen de huella digital. El gradiente $\nabla(x_i, y_j)$ en el punto $[x_i, y_j]$ de \mathbf{I} , es un vector de dos dimensiones $[\nabla_x(x_i, y_j), \nabla_y(x_i, y_j)]$, donde los componentes ∇_x y ∇_y son las derivadas de \mathbf{I} en $[x_i, y_j]$ con respecto a las direcciones x y y , respectivamente. Se conoce bien que el ángulo fase del gradiente denota la dirección del cambio máximo de la intensidad del píxel. Por lo tanto, la dirección θ_{ij} de un borde hipotético que cruza la región centrada $[x_i, y_j]$ es ortogonal al ángulo fase del gradiente en $[x_i, y_j]$.

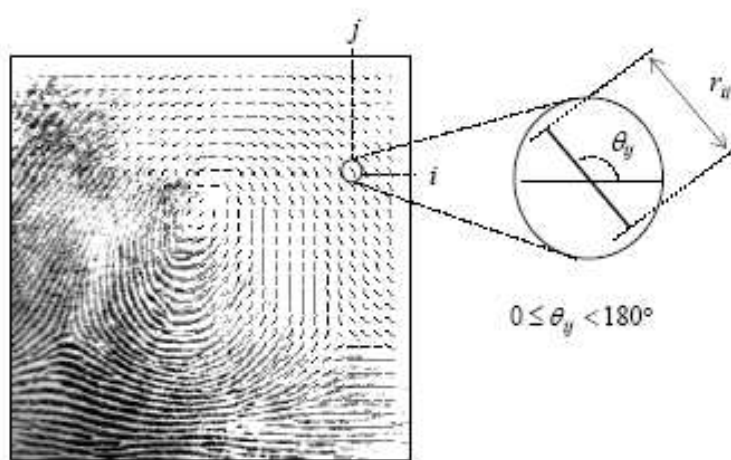


Figura 3.9: Una huella digital desvaída dentro de la orientación de la imagen calculada sobre una rejilla de malla-cuadrada de tamaño de 17x17. Cada elemento denota la orientación local de las crestas de la huella digital [11].

En [11, 14] calculan la orientación de la cresta dominante θ_{ij} combinando las estimaciones de gradientes múltiples dentro de una ventana de 17x17 centrada en $[x_i, y_j]$:

$$\theta_{ij} = 90^\circ + \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2G_{xy}}{G_{xx} - G_{yy}} \right), \quad (3.2)$$

$$G_{xy} = \sum_{h=-8}^8 \sum_{k=-8}^8 \nabla_x(x_i + h, y_j + k) \cdot \nabla_y(x_i + h, y_j + k),$$

$$G_{xx} = \sum_{h=-8}^8 \sum_{k=-8}^8 \nabla_x(x_i + h, y_j + k)^2,$$

$$G_{yy} = \sum_{h=-8}^8 \sum_{k=-8}^8 \nabla_y(x_i + h, y_j + k)^2,$$

Donde ∇_x y ∇_y son los componentes de gradiente en x y y calculados a través de las máscaras de Sobel (Apéndice A).

En la Figura 3.10, se muestran ejemplos de la orientación normal a las

crestas de dos imágenes de huella digital. La orientación es calculada con la ecuación 3.2. La Figura 3.11, muestra ejemplos de la dirección perpendicular a la orientación normal de las crestas.

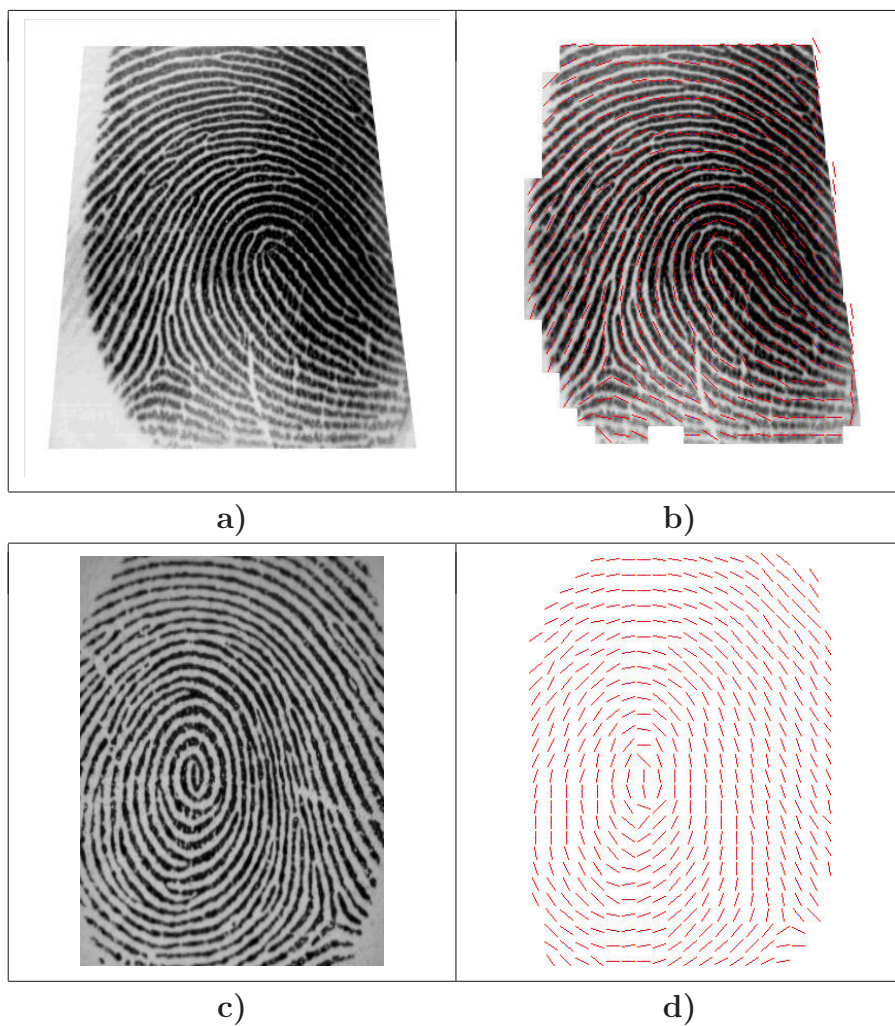


Figura 3.10: Dirección normal a las crestas; a) y b) una imagen de huella digital sobrepuesta sobre su orientación correspondiente sobre una rejilla de 15x15; c) una imagen de huella digital; d) orientación de la imagen de la huella digital de c).

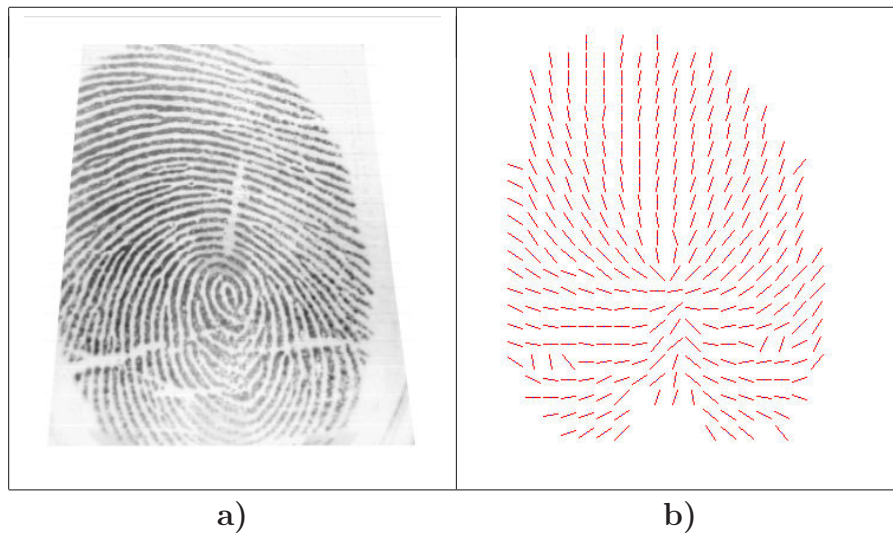


Figura 3.11: a) Una imagen de huella digital y b) dirección perpendicular a las crestas de a) en una rejilla de malla-cuadrada de tamaño 15x15.

3.2.4.1. Regularización de la Dirección Local

El método de cálculo de gradientes, aunque es simple y eficiente, tiene algunas desventajas. Primero, las clásicas máscaras de convolución de Prewitt o Sobel, para determinar los componentes ∇_x y ∇_y del gradiente, y calcular θ_{ij} como el arcotangente de la relación ∇_y/∇_x , presenta problemas debido a la no linealidad y discontinuidad alrededor de los 90° . Segundo, una única orientación estimada refleja la orientación cresta-valle en una escala demasiado fina y generalmente es muy sensible al ruido en la imagen de huella digital; por otro lado, simplemente no es posible promediar gradientes estimados debido a la circularidad de los ángulos: la orientación promedio entre 5° y 175° no es 90° (como un promedio aritmético sugerido) sino 0° . Además, el concepto de orientación promedio no siempre está bien definida; considere las dos orientaciones ortogonales 0° y 90° ; ¿Cuál es la orientación correcta 45° o 135° ?

Un cálculo robusto, basado sobre el promedio local de estimación de gradientes, propuesto por Kass and Witkin [19], la cual proponen una solución

simple pero elegante al problema anterior. Su idea básica es doblar los ángulos, para que cada elemento de \mathbf{D} sea codificado por el vector:

$$\mathbf{d}_{ij} = [r_{ij} \cdot \cos 2\theta_{ij}, r_{ij} \cdot \sin 2\theta_{ij}], \quad (3.3)$$

Donde $2\theta_{ij}$ se usa en lugar de θ_{ij} para reducir la circularidad de los ángulos. Promediando los ángulos en una ventana de $n \times n$, para obtener una estimación más robusta de $\bar{\mathbf{d}}$, simplemente se realiza por separado el promedio de dos componentes x y y :

$$\bar{\mathbf{d}} = \left[\frac{1}{n^2} \sum_{i,j} r_{ij} \cdot \cos 2\theta_{ij}, \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} r_{ij} \cdot \sin 2\theta_{ij} \right]. \quad (3.4)$$

Calculando el promedio entre dos orientaciones ortogonales con la ecuación 3.4 involucra la suma de dos vectores opuestos, por lo tanto la longitud del vector resultante es cero. Esto indica que el vector es menos significativo, independiente de su orientación [11].

De esta manera, la orientación calculada en imágenes de huella digital de baja calidad pueden contener varios elementos inestables debido a cortaduras, dobleces, y ruido en la imagen. En esta situación, el proceso de regularización o suavizado descrito anteriormente es de ayuda para mejorar la orientación local, véase la Figura 3.12.

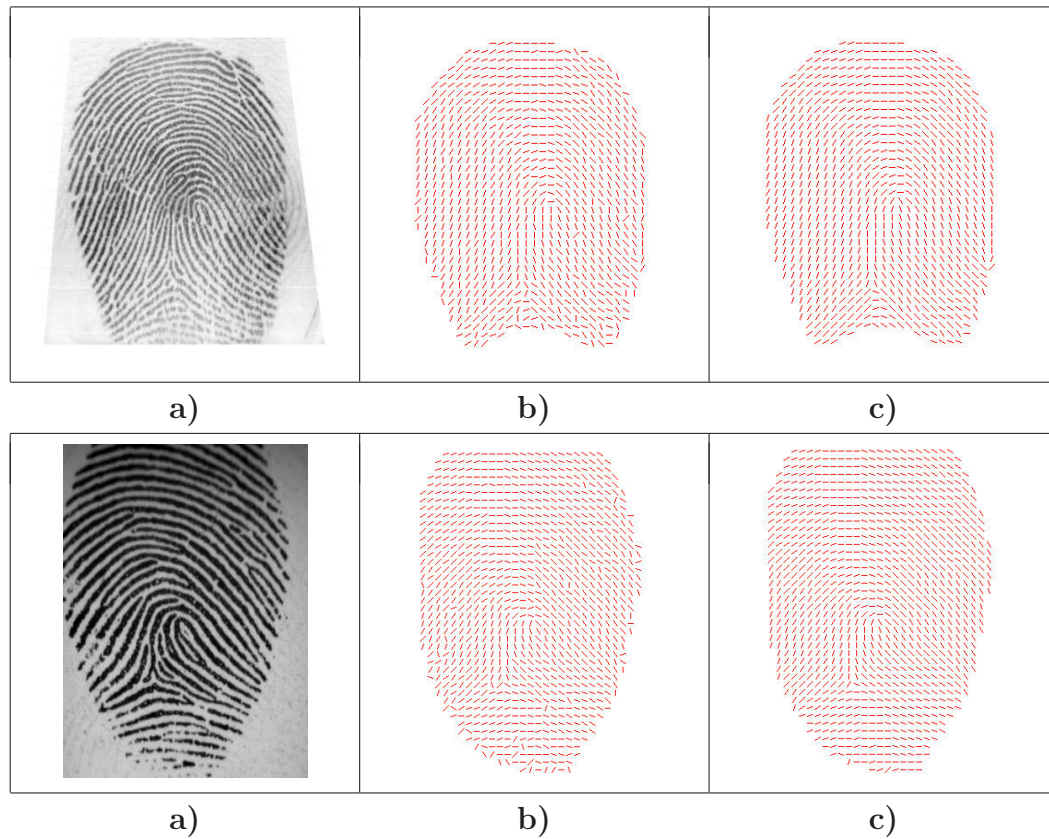


Figura 3.12: a) Imagen de huella digital; b) la orientación de la imagen de la huella digital en a) es calculada a través de la ecuación 3.2, sobre una rejilla de malla-cuadrada de 9×9 ; la orientación de varios elementos son claramente inconsistentes y es necesario un paso de regularización; c) la orientación de la imagen es el resultado del promedio local de cada elemento de b) en su ventana de 3×3 de acuerdo a la ecuación 3.4.

3.2.5. Seguimiento de la Línea de Cresta

Sea \mathbf{I} una imagen en escala de gris $a \times b$ con g niveles de gris, y sea $gray(i, j)$ el nivel de gris del píxel (i, j) de \mathbf{I} , $i = 1 \dots a$, $j = 1 \dots b$. Asociando los píxeles oscuros con niveles de gris cerca de cero, y los píxeles brillantes con niveles de gris cerca de $g - 1$, las líneas de crestas en la huella digital (aparece en oscuro en \mathbf{I}) corresponden a la superficie de las crestas, y los espacios entre

las líneas de crestas (aparece brillante en **I**) corresponden a la superficie de los valles, Figura 3.13.

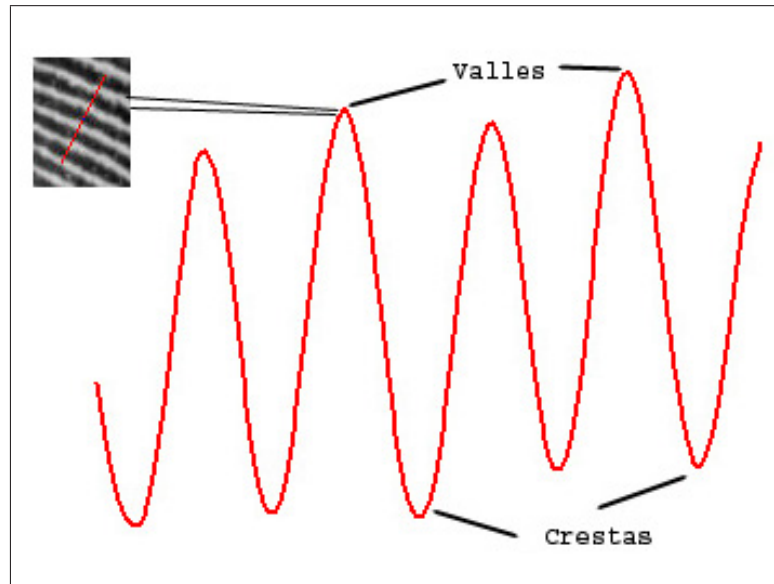


Figura 3.13: Proyección de forma de onda para crestas y valles respectivamente.

El algoritmo simultáneamente rastrea una cresta central y los dos valles circunvecinos, de acuerdo a la subdivisión 3.2.5.1. Para éste propósito, el algoritmo de extracción de línea de crestas localiza, en cada paso, un mínimo local central y dos máximos adyacentes en cada sección ortogonal a la dirección de la cresta. Conectando los mínimos consecutivos, se obtiene una aproximación poligonal de la línea de crestas, Figura 3.14 y 3.23.

Sea (i_n, j_n) un mínimo local, y los dos máximos adyacentes (i_l, j_l) y (i_r, j_r) más cercanos al mínimo (i_n, j_n) de la línea de crestas **I**, y sea φ_c la dirección tangente a la línea de cresta en (i_n, j_n) . Una versión de pseudo-código del algoritmo de seguimiento es el siguiente:

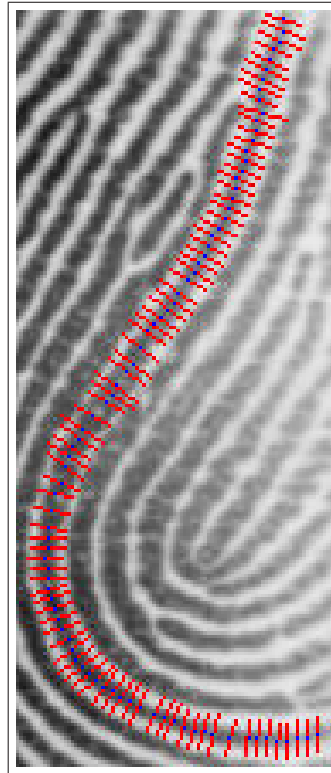


Figura 3.14: Algunos pasos del algoritmo de seguimiento de líneas de crestas.

```

Seguimiento de línea de Cresta  $(i_c, j_c, \varphi_c)$  {
  fin := false;
   $(i_t, j_t) := (i_c, j_c) + \mu$  píxeles a lo largo de la dirección  $\varphi_c$ ; // avance
  while (not (fin)) and (área de interes) { // parada
     $\Omega :=$  sección centrada en  $(i_t, j_t)$ 
    con dirección ortogonal  $\varphi_c + \pi/2$  y longitud  $2\sigma + 1$  píxeles;
     $(i_n, j_n), (i_l, j_l), (i_r, j_r) :=$  mínimo local y dos máximos más cercanos sobre  $\Omega$ ;
    almacenar polígono (T);
  end := checar el criterio de parada sobre  $(i_t, j_t), (i_n, j_n)$ 
   $(i_c, j_c) :=$  ajuste_lm  $(i_n, j_n), (i_l, j_l), (i_r, j_r)$ ;
  almacenar  $(i_c, j_c)$  //centro local
   $\varphi_c :=$  calcular la dirección tangente en  $(i_c, j_c)$ 
}
} // Realizar operaciones similares en dirección contraria  $\varphi_c + \pi$ 
Seguimiento de línea de Cresta  $(i_c, j_c, \varphi_c + \pi)$ ;

```

El algoritmo corre hasta que un criterio de parada sea verdadero, descrito en la subdivisión 3.2.5.3. Determinar el mínimo local de la sección Ω es importante en cada paso. En un principio, el mínimo se puede calcular por comparar ² los niveles de gris de los puntos correspondientes a Ω en dirección ortogonal a las crestas. En cada paso se calcula un punto (i_t, j_t) moviéndose μ píxeles de (i_c, j_c) a lo largo de la dirección φ_c , usando:

$$\begin{pmatrix} i_t \\ j_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_c \\ j_c \end{pmatrix} + \text{round} \left(\mu \cdot \begin{pmatrix} \sin(\varphi_c) \\ \cos(\varphi_c) \end{pmatrix} \right) \quad (3.5)$$

Entonces, se calcula la sección Ω , como el conjunto de puntos correspondientes a la sección segmento quedando sobre el plano-ij y teniendo el punto medio (i_t, j_t) , la dirección ortogonal a la línea de cresta φ_c y una longitud de $2\sigma + 1$ píxeles. Un punto nuevo (i_n, j_n) correspondiente a la línea de cresta, es elegido entre los mínimos locales del conjunto Ω . El punto (i_n, j_n) , se ajusta con el modelo Gaussiano Levenberg-Marquardt (descrito en la subdivisión 3.2.5.2) para convertirse en el punto actual o centro de la línea de cresta local (i_c, j_c) y se calcula la nueva dirección φ_c (Figura 3.15):

$$\varphi_c = \begin{cases} \varphi_c, & \text{si } |(\varphi_c - \varphi_{c-1})| \leq \pi/2 \\ \varphi_c - \pi, & \text{si } |(\varphi_c - \varphi_{c-1})| > \pi/2, \quad \varphi_c > 0 \\ \varphi_c + \pi, & \text{si } |(\varphi_c - \varphi_{c-1})| > \pi/2, \quad \varphi_c \leq 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Se garantiza que la línea de cresta se siga hacia la dirección de enfrente y no hacia atrás al lugar ya localizado. El paso μ es un valor que se adapta dinámicamente de acuerdo a la distancia promedio entre el mínimo central y los máximos laterales, y σ se obtiene de acuerdo al ancho de la línea de cresta local.

²Utilizando las rachas de inflexión.

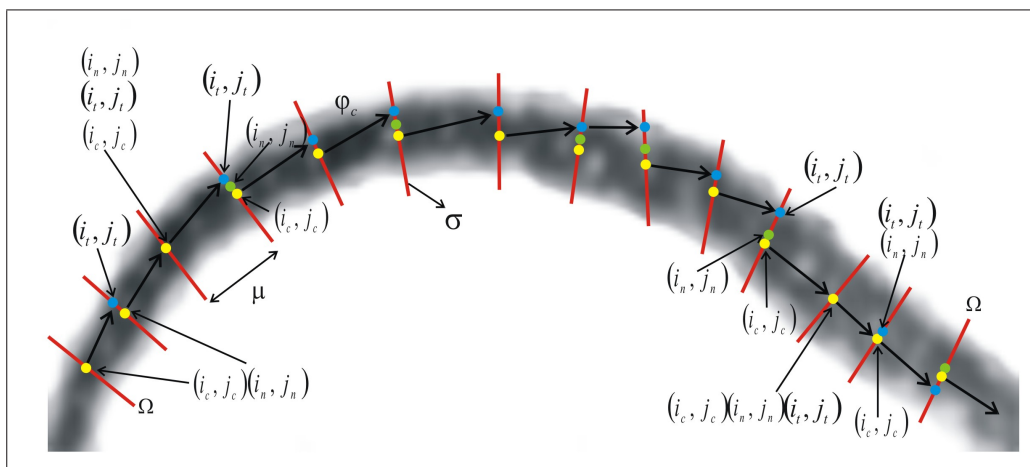


Figura 3.15: Avance del Algoritmo de Seguimiento de Línea de Cresta. Note que los puntos (i_n, j_n) , (i_t, j_t) y (i_c, j_c) pueden coincidir en la misma posición.

3.2.5.1. Determinación de la Sección y la Relación

La sección Ω es un plano cortante la cual es vertical a la dirección local en la imagen de huella digital en niveles de gris. La sección $\Omega((i_t, j_t), \phi, \sigma)$ centrada en (i_t, j_t) , con dirección ortogonal $\phi = \varphi_c + \pi/2$, y una longitud $2\sigma + 1$ píxeles, se define como:

$$\begin{aligned} \Omega &= \{\mathbf{I}(i, j) \mid (i, j) \in \text{segmento}((i_{\text{inicio}}, j_{\text{inicio}}), (i_{\text{final}}, j_{\text{final}})), \\ &\quad \text{Angulo}[(i_t, j_t)] = \phi, \text{ Distancia}[(i_t, j_t)] \leq \sigma\} \end{aligned} \quad (3.7)$$

El $\text{segmento}((i_{\text{inicio}}, j_{\text{inicio}}), (i_{\text{final}}, j_{\text{final}}))$, es el conjunto de puntos que pertenecen al segmento discreto cuyos extremos son $(i_{\text{inicio}}, j_{\text{inicio}})$ e $(i_{\text{final}}, j_{\text{final}})$. Ordenando los puntos de Ω , obtenemos: $(i_1, j_1) \equiv (i_{\text{inicio}}, j_{\text{inicio}}), (i_2, j_2), \dots, (i_m, j_m) \equiv (i_{\text{final}}, j_{\text{final}})$, $m \approx 2\sigma + 1$. Una representación gráfica de una sección es descrita en la Figura 3.16.

La detección del mínimo correspondiente no es simple; algunas veces, en la mitad de una cresta (donde un mínimo local debe existir) hay un máximo local el cual produce una silueta de un volcán típico. En lo siguiente, se describe la regularización de la silueta en la sección Ω , la cual hace que la

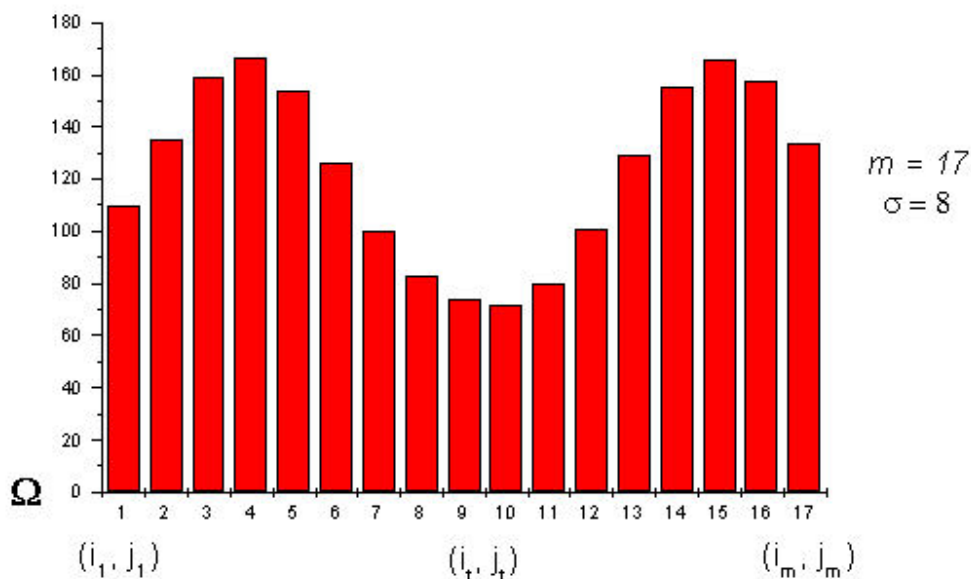


Figura 3.16: Una sección representada gráficamente por los niveles de gris $gray(i_k, j_k)$ de los píxeles (i_k, j_k) , $k = 1, \dots, m$ correspondientes a Ω .

determinación del mínimo local central y los dos valles adyacentes sean más confiables. Durante el seguimiento de la línea de cresta, cada vez que una nueva sección es determinada, se regulariza la silueta por medio de dos pasos [12]:

- **a1.** El primer paso está basado sobre un promedio local de los niveles de gris de los píxeles correspondientes a un número de secciones adyacentes paralelas. Éste puede ser obtenido seccionando la superficie con $2h + 1$ planos paralelos ($h \geq 0$), un píxel distante de otro, y calculando m promedios locales para determinar los nuevos niveles de gris. La sección producida por el plano $h + 1$ (el central) origina la sección Ω , pero el nivel de $\overline{gray}(i, j)$ de cada punto $(i, j) \in \Omega$ es calculado como el promedio de niveles de gris de los puntos correspondientes sobre las secciones $2h + 1$ (Figura 3.17).

- **a2.** El segundo paso está basado sobre una convolución con una máscara constante \mathbf{d} parecida a la silueta gaussiana (Figura 3.18). Sea $(i_1, j_1), \dots, (i_m, j_m)$ sean los puntos correspondientes a Ω y $\overline{gray}(i_1, j_1), \dots, \overline{gray}(i_m, j_m)$ sean los niveles de gris calculados en el paso (a1); sea $d_k, k = 1, \dots, 2p + 1, (p \geq 0, d_k \geq 0, \sum d_k = 1)$ sean los elementos de la máscara \mathbf{d} . Los nuevos niveles de gris $\overline{\overline{gray}}(i_{p+1}, j_{p+1}), \dots, \overline{\overline{gray}}(i_{m-p}, j_{m-p})$ son calculados:

$$\overline{\overline{gray}}(i_k, j_k) = \frac{1}{(2p + 1)} \sum_{v=-p}^{(p)} d_{p+1+v} \cdot \overline{gray}(i_{k+v}, j_{k+v}), \quad (3.8)$$

Donde $k = p + 1, \dots, m - (p)$

Este proceso puede ser concebido como una convolución de una porción pequeña de la imagen con una máscara de tres dimensiones obtenida por desplazamiento de la máscara \mathbf{d} de dos dimensiones por $2h + 1$ píxeles a lo largo de la dirección ortogonal a la dirección de la línea de cresta. La Figura 3.19 compara secciones antes y después de regularizar. La Figura 3.20 muestra un ejemplo de planos en la imagen.

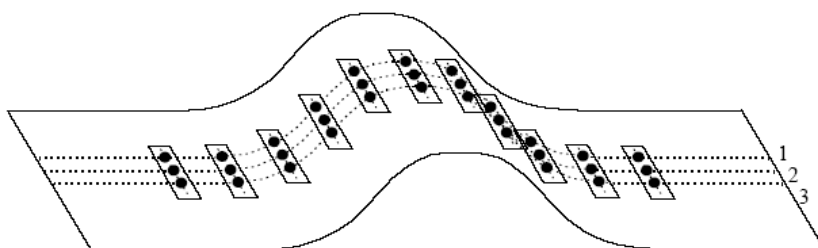


Figura 3.17: Superficie seccionada con tres planos paralelos ($h = 1$). La sección Ω esta determinada por el plano 2. El nivel de gris de cada punto correspondiente a Ω es calculado como el promedio de los niveles de gris de los tres puntos correspondientes sobre las secciones producidas por el plano 1, 2, y 3. [12].

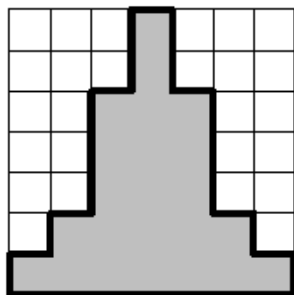


Figura 3.18: La máscara \mathbf{d} tiene una silueta Gaussiana simétrica [12]. La máscara adoptada: $p = 3$, $\mathbf{d} = [1/23, 2/23, 5/23, 7/23, 5/23, 2/23, 1/23]$.

Después del proceso de regularización, la relación <máximo local, mínimo local, máximo local> requeridos pueden ser fácilmente localizados por comparar los niveles de gris \overline{gray} . El mínimo y el máximo son determinados por la siguiente fórmula:

$$\overline{\Omega(i_k, j_k)} = \overline{gray}(i_{k+1}, j_{k+1}) - \overline{gray}(i_k, j_k), \quad (3.9)$$

Donde $k = p + 1, \dots, m - (p)$

Utilizando las rachas de inflexión y los valores obtenidos en $\overline{\Omega(i_k, j_k)}$, se emplean siguientes reglas:

$$\begin{aligned} \text{Mínimo} &= \begin{cases} - & - & + \\ - & - & 0 \end{cases} \\ \text{Máximo} &= \begin{cases} + & + & - \\ + & + & 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.10)$$

El proceso de regularización es muy importante para localizar correctamente los puntos mínimos y máximos, y para la detección de minucias. Si la regularización no se adoptara, el algoritmo de seguimiento de crestas podría

ser engañado por varios artefactos de ruido como pequeñas crestas rotas, pequeñas crestas unidas, y perfiles de volcán.

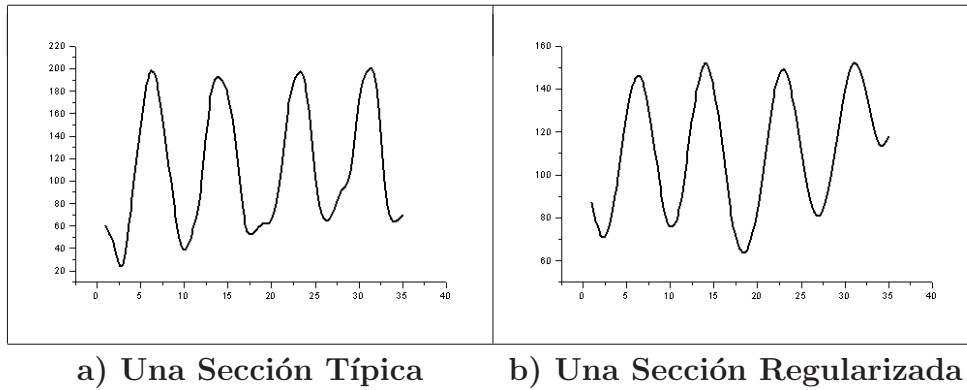


Figura 3.19: Una Sección Filtrada.

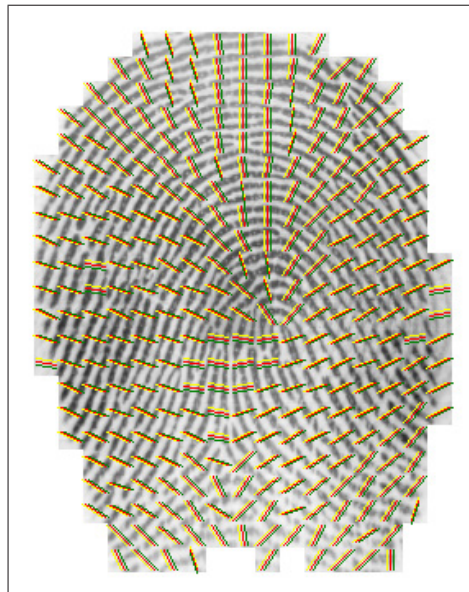


Figura 3.20: Planos en la Imagen. $h = 1$.

3.2.5.2. Ajuste Gaussiano Levenberg-Marquardt

Este método (Apéndice A) se ha convertido en el estándar de rutinas de mínimos cuadrados no-lineal [16]. En lo siguiente, se explica brevemente cómo

se ha utilizado este método para realizar el ajuste del modelo Gaussiano.

Sea $\bar{\bar{\Omega}}(a_1), \dots, \bar{\bar{\Omega}}(a_n)$ los niveles de gris regularizados, de acuerdo a la sección 3.2.5.1, y sea a_1, \dots, a_n los puntos correspondientes a $\bar{\bar{\Omega}}$, donde se encuentran los puntos que corresponden a un mínimo local ($\bar{\bar{\Omega}}[a + k]$) y sus máximos laterales ($\bar{\bar{\Omega}}[a], \bar{\bar{\Omega}}[a + n]$), como se muestra en la Figura 3.21. El modelo para ajustar la curva gaussiana es la siguiente:

$$y = y_0 + Ae^{-(x-xm)^2/b} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} y_0 &= (\bar{\bar{\Omega}}[a] + \bar{\bar{\Omega}}[a + n])/2 \\ A &= (\bar{\bar{\Omega}}[a + k] - \bar{\bar{\Omega}}[a]) \\ xm &= a + k \\ b &= \frac{k}{2} \end{aligned}$$

Donde y_0 es el promedio de niveles de gris de los puntos máximos adyacentes, A corresponde a la diferencia de niveles de gris entre la intensidad del mínimo local y el punto máximo adyacente, xm es el centro donde se encuentra un mínimo local, y b es el ancho de la gaussiana.

Por tanto, $ajuste[y_0, A, mx, b]$ son los parámetros o datos iniciales a ajustar. En la Figura A.1 se muestra un ejemplo del ajuste.

3.2.5.3. Criterios de Parada

Los criterios de parada (ej., eventos en los cuales el seguimiento de cresta se detiene) son:

Salir del área de línea de cresta. El nuevo punto (i_t, j_t) es externo a la línea de cresta, en la cual podría ser encontrada alguna minucia. Es decir, realizando la comparación de los niveles de gris correspondientes a la sección

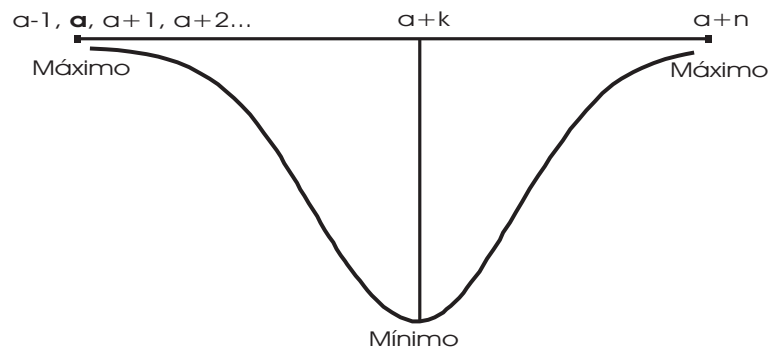


Figura 3.21: Modelo Gaussiano.

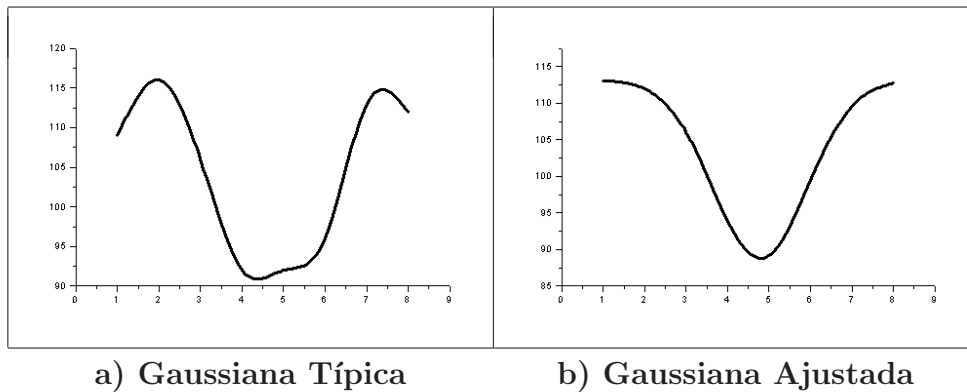


Figura 3.22: Ajuste Gaussiano con el Método de Levenberg-Marquardt.

Ω en dirección ortogonal φ_c , y $2\sigma+1$ píxeles, no se ha determinado un mínimo local y dos máximos adyacentes, de acuerdo a la regla 3.10.

Salir del área de interés. El nuevo punto (i_t, j_t) es exterior a la dimensión de interés de la imagen, es decir, el algoritmo se encuentra fuera del área de la huella digital, puesto que la imagen \mathbf{I} ha sido segmentada (separar el fondo del frente) el punto (i_t, j_t) podría ubicarse en bloques marcados como fondo de la imagen de huella digital.

Terminación. No hay mínimo local (i_n, j_n) , el algoritmo de seguimiento de la línea de cresta se detendrá por ambas razones; podría encontrarse algún punto terminal o podría haber alguna pequeña cresta rota. Algunas veces el

seguimiento de línea de cresta podría ser engañado por pequeñas crestas rotas inducido por algún tipo de ruido, etc. Antes de decretar alguna terminación, se adopta un esquema que intenta nuevamente el seguimiento con nuevos planos adyacentes al inicial.

Intersección. El punto (i_n, j_n) ha sido previamente etiquetado como correspondiente a otra línea de cresta. El punto (i_n, j_n) es nombrado punto intersección.

3.2.5.4. Detección de Minucias

Cuando una línea de cresta termina o se interseca con otra (originando una minucia) el algoritmo para y da las características (coordenadas y dirección) de la minucia encontrada. Ahora, el esquema debe extraer todas las líneas de cresta en la imagen, y consecuentemente detectar todas las minucias.

El principal problema se encuentra en la dificultad de examinar cada línea de cresta solamente una vez y localizar las intersecciones con la línea de cresta ya extraída. Para esto se utiliza una imagen auxiliar \mathbf{T} de la misma dimensión que \mathbf{I} . \mathbf{T} es inicializada con valores de píxeles a cero. Cada vez que una nueva línea de cresta se extrae de \mathbf{I} , los píxeles de \mathbf{T} correspondientes a la línea de cresta son etiquetados asignándole un identificador.

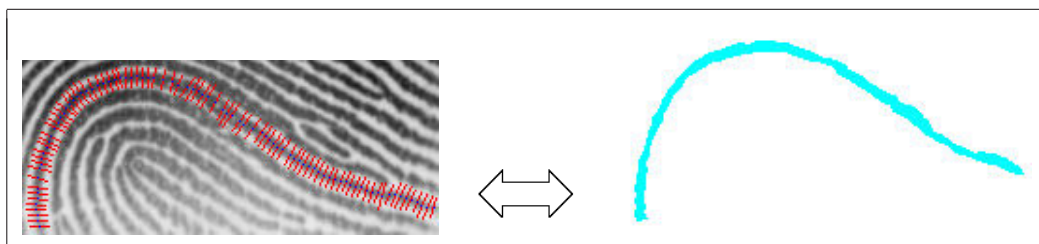


Figura 3.23: Una línea de cresta y su correspondiente grosor poligonal ε -píxeles.

Los píxeles de \mathbf{T} correspondientes a la línea de cresta son los píxeles correspondientes al polígono, ancho en ε -píxeles, en la cual se ligan los puntos

centrales consecutivos (i_c, j_c) y los puntos máximos adyacentes (i_l, j_l) , (i_r, j_r) , localizados por el algoritmo de seguimiento de línea de cresta sobre la línea de cresta, Figura 3.23.

Una vez que se ha calculado (i_t, j_t) , el algoritmo verifica sobre \mathbf{T} , que el píxel (i_t, j_t) no ha sido etiquetado, o equivalentemente que la línea de cresta no ha sido examinada (empezando de un punto de inicio diferente), véase la Figura 3.24. Si (i_t, j_t) no está etiquetado, el algoritmo continúa realizando la determinación y regularización de la sección, ajuste, y calculando la dirección tangente, como se describió en las subdivisiones anteriores. En este contexto los criterios de parada pueden ser interpretados como sigue:

- **Salir del área de interés.** No se han encontrado minucias.
 - **Terminación.** Se ha encontrado una minucia. Los dos máximos detectados (i_l, j_l) y (i_r, j_r) van juntos al mismo valle, esto es causado por la terminación de la cresta (bifurcación de valles). Por lo tanto, se ha detectado un máximo y dos mínimos circunvecinos.
 - **Intersección.** Una línea de crestas ya examinada ha sido intersecada. Durante el seguimiento de la línea de cresta, cada vez que se calcula un nuevo punto (i_t, j_t) , el algoritmo checa si el punto correspondiente en \mathbf{T} ya ha sido etiquetado. En este caso el punto (i_t, j_t) corresponde a dos líneas de crestas (ej., es un punto intersección).
 - **Curvatura excesiva.** La curvatura excesiva puede hacer perder una línea de cresta que actualmente se sigue, pero probablemente el algoritmo después descubrirá la línea de cresta.
-

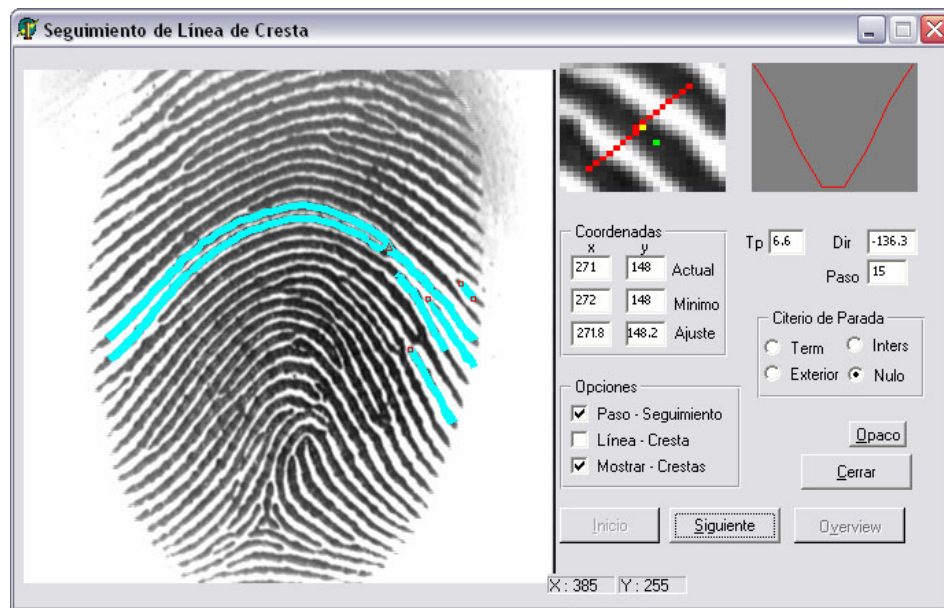


Figura 3.24: Interfaz que detecta las Minucias, los puntos Terminales se denotan con un cuadro, y las Bifurcaciones con un triángulo.

3.2.5.5. Determinación del Punto de Inicio

Iniciando de diferentes áreas en la huella digital, todas las minucias sobre la imagen de huella digital se pueden extraer. Los puntos iniciales son un conjunto de rejillas de malla-cuadrada en la imagen de huella digital. Durante el seguimiento, en cada rejilla se localizan todos los mínimos locales posibles, de tal forma que, por cada mínimo con sus dos máximos laterales encontrados, se inicie la extracción de toda la línea de cresta, y así sucesivamente hasta recorrer la imagen completa.

3.2.5.6. Procesamiento Obtenido

Una vez ejecutado el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas, la aplicación almacenará las coordenadas x y y , y el ángulo θ de la minucia detectada. La Figura 3.25, muestra un ejemplo de la detección de minucias y en la tabla

3.3 se representan las características extraídas de dicha figura.

El algoritmo de detección de minucias fue implementado sobre el programa de *Delphi 6*, en una PC Pentium 4, con un procesador a 2.8 GHz. El programa fue probado con imágenes sintéticas de tamaño 288×384 , obtenidas de la aplicación SFinGe [11].

Un esquema de implementación más eficiente, se pueden obtener precalculando la imagen direccional sobre una rejilla discreta (Figura 3.12) y entonces se puede extraer la dirección requerida φ_c en el punto de coordenada respectivo.

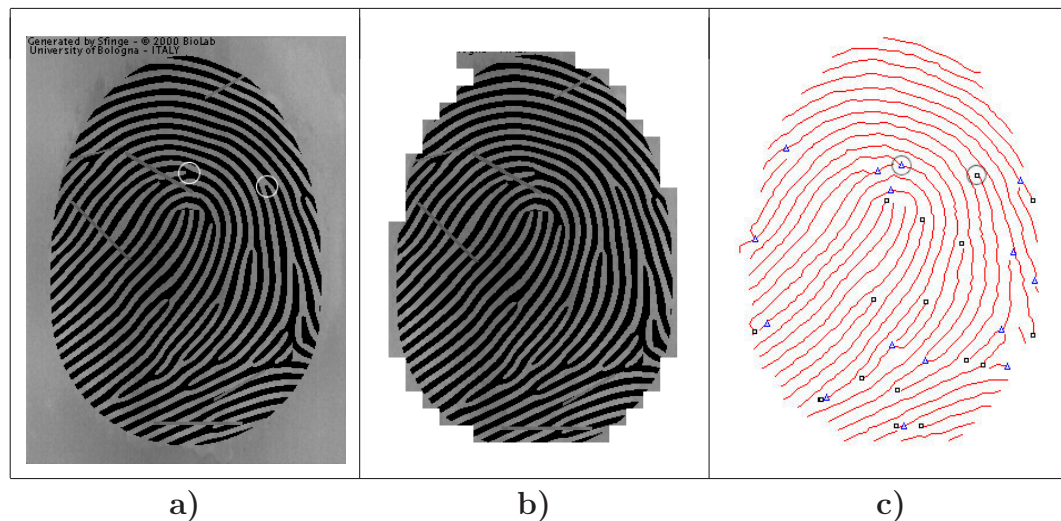


Figura 3.25: a) Imagen de huella digital; b) segmentación de la imagen de huella digital de a) en una ventana de tamaño de 15×15 ; y c) minucias obtenidas por el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas. Las bifurcaciones están denotadas con triángulos y los puntos terminales con cuadros. En a) y en b) se encierra con un círculo la minucia terminal, y la bifurcación de la cresta, en donde su coordenada, y su ángulo de inclinación se encuentran representadas en la tabla 3.3.

Tipo	Coordenada (x, y)	Dirección θ
T	(262,156)	2.7063
T	(262,269)	10.1951
T	(118,305)	-0.8399
T	(83,323)	-0.6006
T	(28,266)	-0.9921
T	(215,135)	(2.3213)
T	(148,315)	-0.4726
T	(139,156)	-1.4561
T	(169,172)	-8.3718
T	(202,192)	-11.5715
T	(172,241)	-1.8637
T	(128,239)	-1.1928
T	(206,290)	-0.7119
T	(220,294)	-0.5773
T	(84,323)	-0.5751
T	(147,345)	-0.3684
T	(168,345)	-0.3210

a)

Tipo	Coordenada (x, y)	Dirección θ
B	(28,188)	-1.4880
B	(171,290)	-0.6860
B	(54,112)	-0.8865
B	(151,126)	(0.1841)
B	(131,131)	-0.1267
B	(142,147)	-0.4493
B	(251,139)	2.2158
B	(263,223)	7.5447
B	(38,259)	-0.7843
B	(143,277)	-1.1199
B	(245,199)	5.1232
B	(235,264)	-4.0745
B	(240,295)	-0.1805
B	(88,321)	-0.6006
B	(153,345)	-0.3205

b)

Cuadro 3.3: Coordenada (x, y) y dirección θ obtenida por el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas. El algoritmo detectó en a) 17 puntos terminales (**T**) y en b) 15 bifurcaciones (**B**). Los datos sombreados en a) y en b), corresponden al punto terminal y bifurcación de la figura 3.25, en la que encuentran representadas con círculos, respectivamente.

Resultados Experimentales

Las características examinadas por el algoritmo de seguimiento de crestas son: los puntos terminales y las bifurcaciones. Los resultados están divididos por clases o patrones de huella digital; arco, arco tendido, bucle izquierdo, bucle derecho, y espiral. Las Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, describen los resultados obtenidos para cada uno de los patrones de huella digital. Los parámetros descritos en las tablas son los siguientes:

- I. **Correctas**, indica las minucias reales que se encuentran en la imagen original.
 - II. **Procesadas**, son las características detectadas por el algoritmo de seguimiento de crestas, y se dividen en **T** (puntos terminales) y **B** (Bifurcaciones).
 - III. **Perdidas**, determina el número de minucias que no fueron detectadas por el algoritmo.
 - IV. **Espurias**, indica el número de minucias que fueron detectadas por el algoritmo, y que no se encuentran en la imagen original.
 - V. **Cambiadas**, es el número de características que fueron intercambiadas, (ej., punto terminal en lugar de bifurcación y viceversa) por el algoritmo de seguimiento de crestas.
-

- VI. **Tiempo**, tiempo de procesamiento en segundos que tarda el algoritmo de seguimiento de líneas de crestas en examinar una imagen de huella digital completa.
-

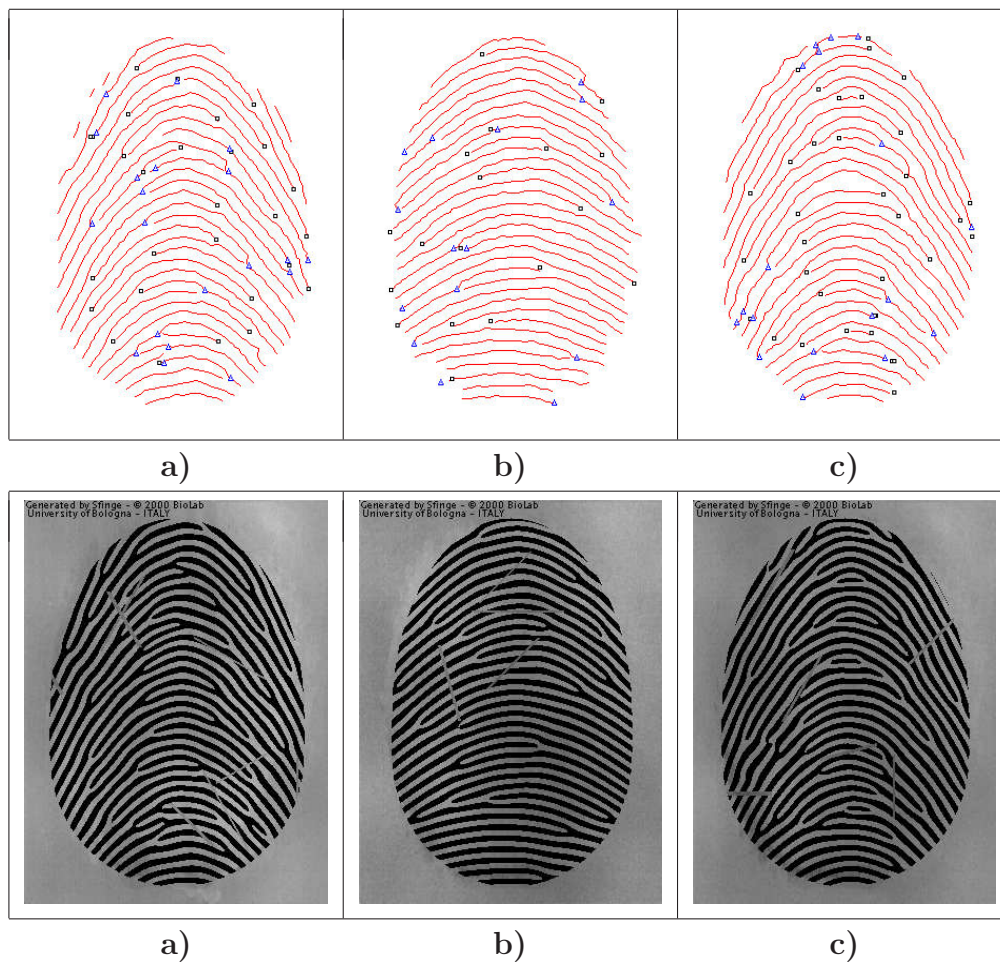


Figura 4.1: Patrones de huella digital de Arco en a), b) y c).

Huella Digital	Correctas	Procesadas		Perdidas	Espurias	Cambiadas	Tiempo
		T	B				
a)	43	29	20	1	12	9	13.45
b)	18	18	15	1	14	3	12.18
c)	38	35	18	2	16	8	13.67

Cuadro 4.1: Resultados de la extracción de minucias de tres imágenes de huella digital de tipo arco de la Figura 4.1.

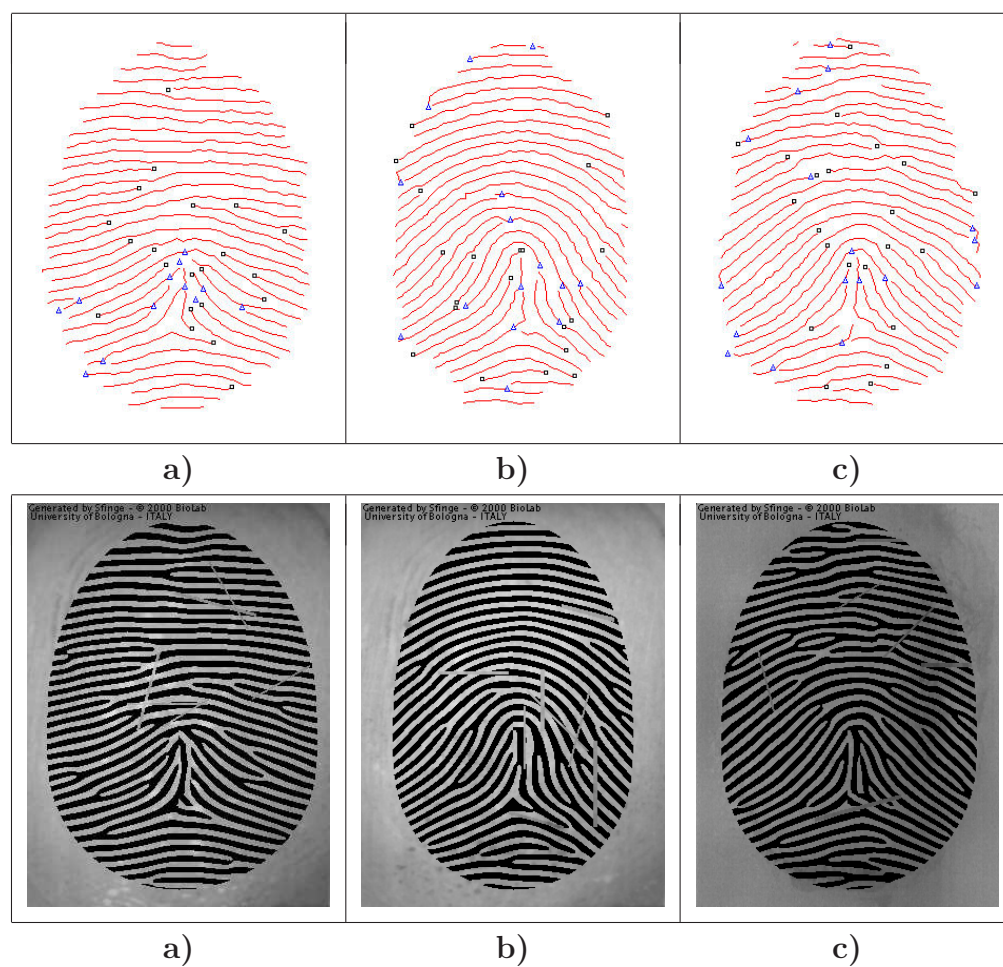


Figura 4.2: Patrones de huella digital de Arco Tendido en a), b) y c).

Huella Digital	Correctas	Procesadas		Perdidas	Espurias	Cambiadas	Tiempo
		T	B				
a)	26	21	12	1	3	7	10.41
b)	21	20	15	3	10	4	11.90
c)	39	23	17	5	9	6	12.03

Cuadro 4.2: Resultados de la extracción de minucias de tres imágenes de huella digital de clase de arco tendido de la Figura 4.2.

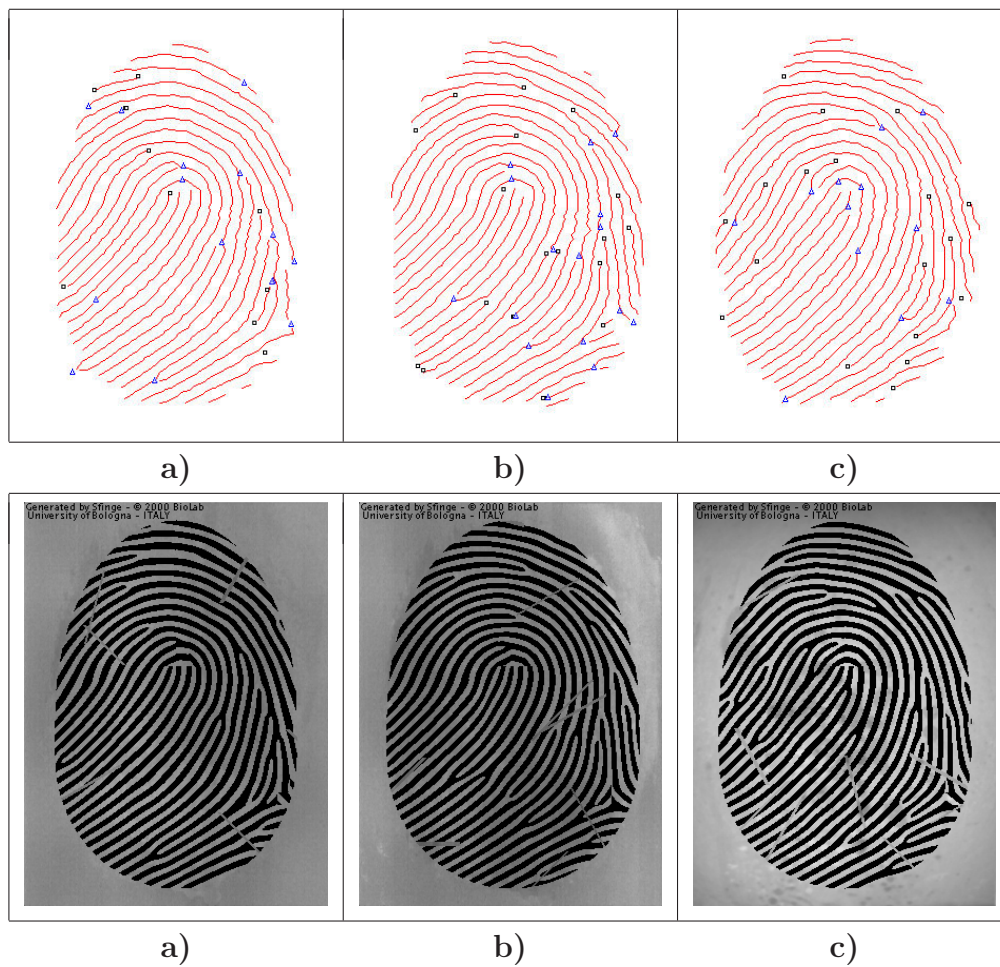


Figura 4.3: Patrones de huella digital de Bucle Izquierdo en a), b) y c).

Huella Digital	Correctas	Procesadas		Perdidas	Espurias	Cambiadas	Tiempo
		T	B				
a)	19	11	15	2	9	2	12.93
b)	23	20	16	2	11	1	14.26
c)	26	18	12	2	4	6	14.54

Cuadro 4.3: Resultados de la extracción de minucias de tres imágenes de huella digital con patrón de bucle izquierdo de la Figura 4.3.



Figura 4.4: Patrones de huella digital de Bucle Derecho en a), b) y c).

Huella Digital	Correctas	Procesadas		Perdidas	Espurias	Cambiadas	Tiempo
		T	B				
a)	23	16	17	0	10	4	13.42
b)	24	18	15	4	13	4	14.65
c)	23	15	21	3	14	4	14.91

Cuadro 4.4: Resultados de la extracción de minucias de tres imágenes de huella digital con patrón de bucle derecho de la Figura 4.4.

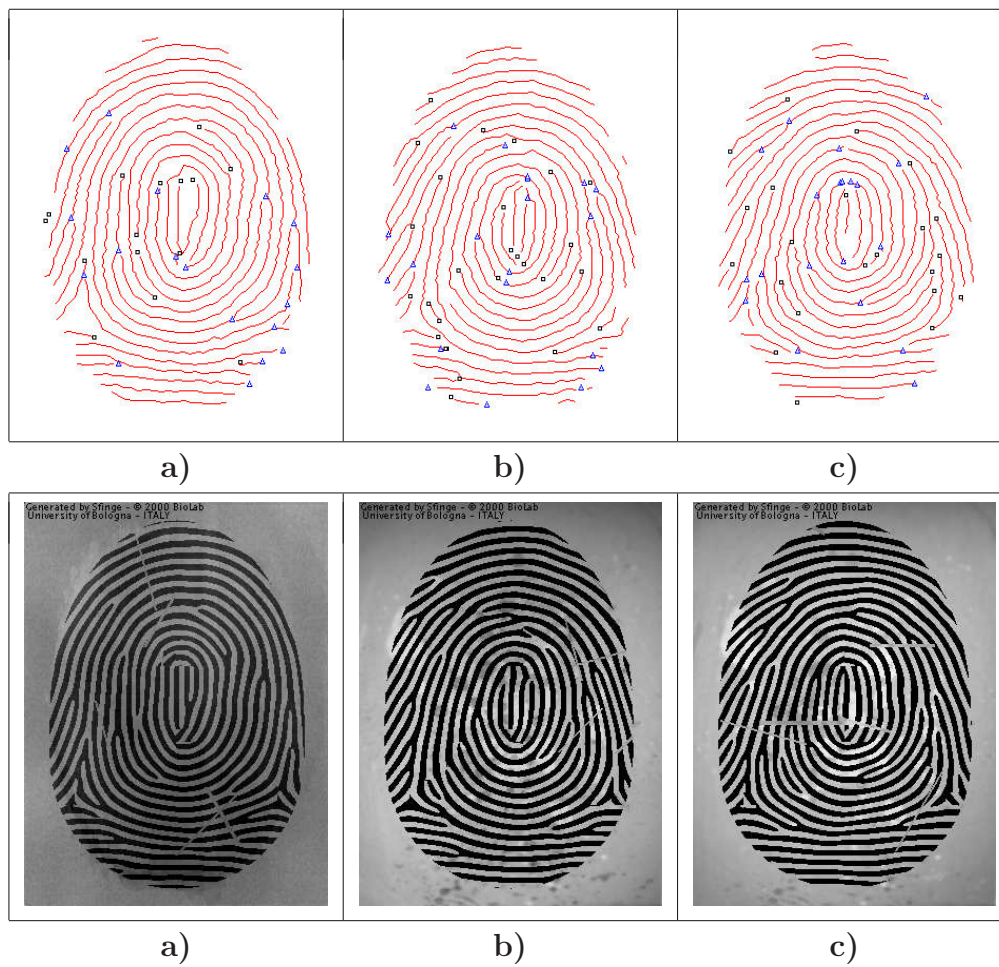


Figura 4.5: Patrones de huella digital de Espiral en a), b) y c).

Huella Digital	Correctas	Procesadas		Perdidas	Espurias	Cambiadas	Tiempo
		T	B				
a)	29	15	19	1	8	3	12.92
b)	31	27	20	5	18	6	11.88
c)	29	22	20	1	12	5	13.27

Cuadro 4.5: Resultados de la extracción de minucias de tres imágenes de huella digital de tipo espiral de la Figura 4.5.

Conclusiones y Perspectivas

En este documento, se presenta la implementación de un sistema de detección de minucias en huellas digitales en escala de grises, en las cuales se desarrollaron las siguientes etapas:

Conclusiones

- Se concluye que la identificación de minucias en imágenes en tonos de gris permite hallarlas sin introducir elementos espurios producto de procesos de binarización, esqueletización, regularización de rupturas y otros artefactos producidos por los dos primeros procesos.
 - La determinación de las características de las minucias sobre la imagen en tonos de gris se puede hacer con alta precisión debido al no adelgazamiento de las crestas o valles. Cabe recalcar que es posible proponer varios métodos para realizar la medición, pero al utilizar uno de manera regular un método de determinación de la posición y ángulo sobre la huella de referencia y luego sobre la huella a prueba (para el matching) arrojará resultados casi iguales; lo cual aumenta el nivel de reconocimiento. Contra el caso de la huella esqueletizada que pierde información debido a que se estudia una línea y la vecindad de la minucia.
 - Al no aparecer en este esquema múltiples puntos terminales y uniones falsos; las minucias halladas son representativas y en cantidad más cercanas al número real.
-

- El vector de características hallado, si bien no incluye todas las existentes e introduce algunas falsas o intercambiadas; si contiene un subconjunto de minucias correctas, a partir de las cuales sí se eliminan en la base de datos las falsas permite aumentar la confiabilidad en la búsqueda e identificación. Esto se puede realizar en primera instancia de manera manual o bien crear una aplicación que usando reglas de correspondencia, vecindad, p.e.; elimine la mayor cantidad de falsos. Se debe entender que no será posible en general eliminarlos todos debido a que las imágenes originales pueden ser de baja calidad o bien estar incompletas.
- Los tiempos para realizar la determinación de las minucias en una huella real o sintética son razonables, lo cual permite crear la base de conocimientos para procesos de identificación y validación.

El método propuesto para realizar el proceso de detección y medición se resume a continuación:

- En la primera parte se realiza un bosquejo del módulo de registro de datos personales, adquisición de la imagen de huella digital, y lo correspondiente a la manipulación de datos en el sistema;
 - Posteriormente, se implementan filtros para normalizar la imagen de huella digital, la cual reduce las variaciones en valores de niveles de gris a lo largo de las crestas y valles;
 - Después, el cálculo de la orientación de la cresta local se estimó a partir de la imagen normalizada, dividiéndola en bloques de ej., 15x15. Posteriormente, se regularizó la imagen direccional para suavizar algunos elementos inconsistentes debido a crestas rotas, y ruido en la imagen de huella digital.
 - Siguiendo, se separa el área de huella digital del fondo para evitar la extracción de características en el segundo plano y en áreas ruidosas
-

de la imagen de huella digital. De hecho, lo que realmente discrimina el frente y el fondo no es el promedio de las intensidades de la imagen sino la presencia de un patrón estriado y orientado en el frente, y de un patrón isotrópico (ej., el cual no tiene una orientación dominante) en el fondo. Se discriminan el frente y fondo usando la magnitud promedio del gradiente en cada bloque de la imagen;

- Regularización del conjunto de puntos Ω , el cual hace que la determinación del mínimo local sea más fiable, de lo contrario, sino se adopta la regularización, el algoritmo de seguimiento de crestas podría ser engañado por ruidos de artefactos tales como pequeñas crestas rotas, crestas ligadas y perfiles de volcán.
- Después, se obtuvo la dirección ortogonal a las crestas para posteriormente encontrar los máximos adyacentes y el mínimo local por el método de rachas de inflexión, y así realizar un ajuste no lineal a un modelo Gaussiano para encontrar el centro y ancho de la cresta local, y realizar el seguimiento de la huella en escala de grises. El paso μ se adapta dinámicamente de acuerdo al ancho de la Gaussiana obtenida del ajuste, y σ se obtiene de acuerdo al ancho de la línea de cresta local.
- Finalmente, se realiza la detección de minucias (puntos terminales y bifurcaciones) en la imagen en niveles de gris. Se almacena la coordenada (x, y) de la minucia, y el ángulo θ que forma con la dirección horizontal.

Este método demuestra en base a los experimentos realizados que es capaz de encontrar y medir las características de las minucias con éxito en diferentes tipos de huella, como se muestra en los experimentos realizados.

La aplicación desarrollada es base para estudiar y proponer otros métodos de pre y post procesamiento, así como para aplicaciones de búsqueda 1:1 o 1:N, ya que entrega el vector de características correspondiente a alguna huella. Obviamente se requerirá generar los invariantes de traslación,

rotación y escalamiento, para lo cual existe suficiente documentación.

A futuro se puede pensar en los siguientes aspectos:

- Incluir un algoritmo de seguimiento de líneas de crestas que sea capaz de separar las líneas de crestas que se tocan paralelamente.
 - Definir un criterio local para evaluar la confiabilidad de la detección de cada minucia.
 - Utilizar un filtro pasa baja (*low-pass*) en dirección ortogonal a las crestas para reducir el ruido y suavizar los pequeños hoyos en la sección Ω , y desunir dos crestas que no estén bien separadas.
 - Realizar un algoritmo de post-procesamiento para diferenciar las minucias espurias de minucias reales, debido a crestas rotas por cicatrices anchas y conexiones cruzadas de crestas por tinta excesiva.
 - Perfeccionar los métodos de pre y post procesamiento para obtener mejores resultados.
 - Refinar y aumentar las reglas determinación de minucias.
 - Incluir algún estándar en la determinación de las propiedades de las minucias procesadas en tonos de gris.
 - Incluir un módulo de pruebas para estudiar degradación en la imágenes y su efecto en la determinación de las minucias, para evaluar y corregir el método utilizado.
 - Generar una base de conocimientos e incluir un módulo de búsqueda 1:1 y 1:N.
 - Incorporar otros dispositivos de captura a la aplicación.
 - Probar el método con imágenes originales no digitales (archivos de papel, microficha y cinta).
-

- Incluir un módulo de perfil forense para: datos incompletos, envejecimiento y cicatrices.

Apéndice A

Conceptos

Operadores Gradientes

El método más común de diferenciación en las aplicaciones de procesamiento de la imagen es el gradiente. Para una función $f(x, y)$ el gradiente de f en el punto de coordenadas (x, y) se define como el vector

$$\nabla \mathbf{f} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

El gradiente de un vector indica la dirección de la máxima variación en f en (x, y) . Una importante cantidad en la detección de bordes es el módulo de este vector, al que generalmente se hace referencia, para simplificar, como *gradiente* con la notación ∇f , donde:

$$\nabla f = (\nabla \mathbf{f}) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

Esta cantidad es igual a la máxima variación de $f(x, y)$ por unidad de distancia en la dirección de $\nabla \mathbf{f}$. Es práctica común aproximar el gradiente por sus valores absolutos:

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y| \quad (\text{A.3})$$

que son bastante más rápidos de implementar, particularmente con hardware dedicado.

La *dirección* del vector gradiente es también una cantidad importante. Sea

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{G_x}{G_y} \right)$$

donde el ángulo se mide con respecto al eje x .

Los operadores de Sobel tienen la ventaja de proporcionar tanto una diferenciación como un efecto de suavizado. Las derivadas basadas en las máscaras de Sobel son:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)$$

y

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)$$

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

a)

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

b)

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

c)

Figura A.1: a) Región imagen 3 x 3; b) máscara utilizada para calcular G_x en el punto central de la región 3 x 3; c) máscara utilizada para calcular G_y en ese punto. A menudo se hace referencia a estas máscaras como operadores de Sobel.

Método de Mínimos Cuadrados no Lineal

El procedimiento más objetivo para ajustar una curva a un conjunto de datos presentados en un diagrama de dispersión se conoce como el método de los mínimos cuadrados no lineal. A continuación se presenta el algoritmo de Levenberg-Marquardt [20], utilizado para realizar el ajuste de la gaussiana:

```
input  $x_0, gtol$ 
set  $\mu_0 = 0.01, \nu = 10$ 
for  $k=0, 1, \dots$  repeat
  set  $\mu_k = \mu_k / \nu$ 
  repeat
    solve  $(J_k^T J_k + \mu_k I) P_k = -J_k^T f_k \rightarrow P_k$ 
    set  $x_{k+1} = X_k + p_k$ 
    if  $F_{k+1} > F_k$  then
      set  $\mu_k = \mu_k^\nu$ 
    end
  end until  $F_{k+1} > F_k$ 
  set  $\mu_{k+1} = \mu_k$ 
end until  $\|2J_{k+1}^T f_{k+1}\| < gtol$ 
```

Cuadro A.1: Algoritmo Levenberg-Marquardt [20].

Apéndice B

Detalles de la Instalación

Requisitos

En este apartado se especificarán los detalles para la instalación y funcionamiento de ésta aplicación. A continuación se presenta una lista de los requisitos necesarios para su funcionamiento:

- I. Instalar *Delphi versión 6*, o incorporar las siguientes librerías en C:\WINDOWS\system32, ó en el folder de la aplicación: *qtintf.dll* y *midas.dll*. Las librerías *GrFinger* y *pthreadVC2.dll* deben permanecer dentro del folder de la aplicación. Éstas últimas, sirven para la captura de la imagen directo del lector óptico de huellas digitales “DigitalPersona”.
 - II. Instalar *FingerCap USB Driver 1.0*, sí desea adquirir imágenes de huella digital con el lector óptico “DigitalPersona”.
 - III. *Mysql-essential versión 5.0.18* ó superior. Es necesario, crear algún usuario (*afi*) con la contraseña (*dbadmin*) para el funcionamiento correcto de la aplicación. Además, los privilegios básicos para realizar alguna operación en la base de datos son: *create*, *delete*, *insert*, *select* y *update*.
-

- IV. *DbExpress-CoreLab version 2.60* ó superior. Este componente sirve para enlazar la base de datos de Mysql con el componente dbExpress de Delphi.
 - V. Para recuperar la base de datos, primero nos ubicamos en el folder “Adgs” que contiene el archivo fingerprints.sql, posteriormente utilizamos el comando de MySQL: ejemplo, C:\Adgs>mysql -u root -p < fingerprints.sql, ó C:\Adgs>mysql -u root --password=dbadmin < fingerprints.sql.
 - VI. Después de realizar las tareas anteriores, ahora se puede iniciar la aplicación “afi.exe”, que se encuentra dentro del folder “Adgs”.
 - VII. Se incluyen 3 tipos de usuarios ó seudónimos: *usuadmin*, *usureg* y *usucons*, los cuales indican las prerrogativas para que algún usuario pueda realizar la tarea de administrar, registrar o consultar dentro del sistema.
 - VIII. Para facilitar la entrada a la aplicación por primera vez, el password es el mismo nombre (ej., *usuadmin*) que el nombre del *usuario*. El nombre del password puede ser cambiado posteriormente al que desee.
-

Detalles de la Aplicación

Detalles de implementación en Delphi

A continuación se explicarán algunas referencias de la unidades creadas en Delphi version 6:

- I. *UGen.pas*, incluye las rutinas para la manipulación de la imagen, así como algunos tipos de datos declarados.
 - II. *UOrient.pas*, en ésta unidad se desarrollaron las operaciones para calcular la orientación dominante de las crestas en la huella digital, definir la rejilla de malla-cuadrada (tamaño de los bloques), regularizar las direcciones, segmentar la imagen, obtener los planos paralelos ortogonales y convolución con la máscara gaussiana simétrica **d**. Además, se calcula la relación <máximo-mínimo-máximo>.
 - III. *UNaveg.pas*, contiene los procedimientos para calcular el nuevo centro en la línea de cresta, etiquetar la imagen auxiliar y verificar si ya ha sido etiquetada alguna línea de cresta.
 - IV. *UFpuntual.pas*, tiene el procedimiento para realizar el negativo de la imagen.
-

- v. *UGeometricos.pas*, comprende los procedimientos para realizar el cambio de escala (zoom).
 - vi. *Valida.pas*, sirve para verificación de los datos de entrada en la unidad *Marco.pas* y *User.pas*.
 - vii. *UEnhance.pas*, unidad que ejecuta los procedimientos para calcular la media, varianza, y normalización de la imagen de huella digital.
 - viii. *Marco.pas*, es el formulario que realiza las tareas de manipulación de datos, para el registro de los datos personales.
 - ix. *Scan.pas*, éste formulario permite realizar las operaciones de adquirir la imagen de huella digital (ya sea de archivo ó de escáner) y efectuar algún tipo de filtro a la imagen.
 - x. *RidgeFollow.pas*, permite examinar la imagen de huella digital. Dentro de ésta unidad se encuentran los procedimientos para detectar las minucias de la huella digital.
 - xi. *Ver.pas*, formulario para mostrar únicamente la imagen de huella digital.
 - xii. *Login.pas*, permite el acceso a los usuarios a la aplicación.
 - xiii. *User.pas*, formulario para registrar, actualizar y eliminar a usuarios involucrados en el sistema.
 - xiv. *Unlsf.pas*, es la unidad de ajuste no lineal de mínimos cuadrados.
 - xv. *GrFinger.pas*, *uCallbacks.pas* y *uUtil.pas*, incluye las funciones para inicializar, finalizar y capturar imágenes de huella digital con un digitalizador óptico “DigitalPersona”.
-

Bibliografía

- [1] Anil Jain, Lin Hong, Sharath Pankanti, and Ruud Bolle, **An Identity Authentication System Using Fingerprints**, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, No. 9, 1997, pp. 1365-1388
 - [2] De la Rosa Flores Rafael, **Sistema Automático para la Identificación de Huellas Dactilares**, *Tesis de Maestría FCC-BUAP*, 2000.
 - [3] Joseph Schmuller, **Aprendiendo UML en 24 hrs**, Prentice Hall, México, 2000.
 - [4] Asker M. Bazen, and Sabih H. Gerez, **Computational Intelligence in Fingerprint Identification**, *Proceedings of SPS2000*, Hilvarenbeek, The Netherlands, March 2000.
 - [5] Ivar Jacobson, Grady Booch, James Rumbaugh, **El Proceso Unificado de Desarrollo de Software**, Primera Edición, Addison Wesley, 2000.
 - [6] Rafael C. González, Richard E. Woods, **Tratamiento Digital de Imágenes**, Addison Wesley Iberoamericana, 1996.
 - [7] Anil Jain, Sharath Pankanti, **Fingerprint Classification and Matching**, *The Image and Video Processing Handbook*. A. Bovik, Ed. Academic Press, April 2000.
 - [8] L. Hong and A. K. Jain, **Classification of Fingerprint Images**, *Proceedings of 11th Scandinavian Conference on Image Analysis*, June 7-11. Kangerlussuaq, Greenland, 1999.
 - [9] N. Ratha, S. Chen, K. Karu and A.K. Jain, **A Real-time Matching System for Large Fingerprint Databases**, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 18, No. 8, 1996, pp. 799-813.
 - [10] Simon Liu and Mark Silverman, **A Practical Guide to Biometric Security Technology**, *IT Professional*, Volume 3, Issue 1, Jan-Feb 2001, pp. 27-32.
-

-
- [11] Davide Maltoni, Dario Maio, Anil K. Jain, Salil Prabhakar, **Handbook of Fingerprint Recognition**, Science+Business Media, Inc., Springer 2005.
- [12] Dario Maio, Davide Maltoni, **Direct Gray-Scale Minutiae Detection In Fingerprints**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 19, Issue 1, Jan. 1997 pp. 27-40.
- [13] L. Hong, Y. Wan and A. K Jain, **Fingerprint Image Enhancement: Algorithms and Performance Evaluation**, *IEEE Transactions on PAMI*, Vol. 20, No. 8, August 1998, pp. 777-789.
- [14] N. Ratha, S. Chen and A. K. Jain, **Adaptive Flow Orientation Based Feature Extraction in Fingerprint Images**, *Pattern Recognition*, Vol. 18, November 1995, pp. 1657-1672.
- [15] K. Karu and A. K. Jain, **Fingerprint Classification Pattern Recognition**, *This paper won Honorable Mention in the Best Paper Award Contest of the Pattern Recognition Society*, Vol. 29, 1996, pp. 389-404.
- [16] William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, **Numerical Recipes in Pascal**, *The art of Scientific Computing*, Cambridge 1996.
- [17] Jiang X., Yau W.Y., and Ser W., **Minutiae Extraction by Adaptive Tracing the Gray-Level Ridge of the Fingerprint Image**, in *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, Vol. 2, 1999, pp. 852-856.
- [18] Liu J., Huang Z., and Chan K., **Direct Minutiae Extraction from Gray-Level Fingerprint Image by Relationship Examination**, in *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, Vol. 2, 2000, pp. 427-430.
- [19] Kass M. and Witkin A., **Analyzing Oriented Patterns**, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 37, No. 3, 1987, pp. 362-385.
- [20] L. E. Scales, **Introduction to Non-Linear Optimization**, Department of Computer Science University of Liverpool, Macmillan 1984.
-