

PROYECTO FIN DE CARRERA

AUTOR:

RAFAEL COOMONTE BELMONTE

TÍTULO:

Sistema de reconocimiento de personas mediante su patrón de iris basado en la transformada wavelet

ORIGEN

Desde los tiempos más antiguos, la obsesión por la seguridad ha sido un tema que ha comprendido el desarrollo de diversas técnicas para evitar el acceso de personas no deseadas a información o a lugares privados, lo que sin lugar a dudas, en una sociedad como la actual, que ha venido a denominarse "de la información", viene a constituir un aspecto fundamental, dada la gran parte del situaciones cotidianas que están basadas en situaciones relacionadas con el uso de información confidencial de gran importancia: números de cuentas bancarias, accesos a determinadas fuentes de información privadas y un sinfín de aplicaciones que implican la necesidad de mantener un acceso restringido de personas, y como no, de mantener en ciertos casos la integridad de las personas, aspecto fundamental y al que se ha prestado gran atención a raíz de atentados terroristas, acaecidos en los últimos años.

Es por tanto necesario desarrollar en todo momento aplicaciones y sistemas que ayuden a preservar la seguridad del usuario en cuanto al acceso a la información y en lo que a cualquier tipo de comunicación se refiere, en las cuales supone un aspecto primordial garantizar que esta información se maneja de forma fiable y confiable.

Este factor lleva a mantener un continuo avance en la investigación y el desarrollo de nuevos sistemas que puedan llegar a garantizar el nivel requerido de seguridad, tales como la criptografía cuántica o la biometría. La primera de estas opciones es hasta la fecha un tema exclusivamente teórico, debido a la complejidad de los fundamentos de la misma. Sin embargo la biometría es a día de hoy una realidad, que avanza cada vez más, y que trata de introducirse en cantidad de aspectos relacionados con el tránsito de información o el control de accesos e incluso en otros aspectos en auge en la sociedad actual como la domótica.

Es esta, la base de desarrollo del proyecto que aquí se presenta, en el que se lleva a cabo un exhaustivo repaso de los fundamentos de la biometría, así como de las bases necesarias para comprender aplicación particular de la misma que se encuentra en la modalidad de biometría basada en el patrón del iris, pilar fundamental del proyecto y que aborda aspectos como el tratamiento digital de imágenes, el reconocimiento de patrones, y herramientas matemáticas y de análisis de señales tales como la transformada wavelet.

OBJETIVOS

El hasta ahora poco conocido mundo de la biometría, alberga gran cantidad de oportunidades para el desarrollo de sistemas de seguridad de gran confiabilidad. Sin embargo para que los avances en este campo sean del todo productivos, es necesario conocer a fondo los fundamentos y también sus orígenes. Con este proyecto se trata de revisar la teoría básica relacionada con este tipo de sistemas, haciendo un repaso de su historia y los tipos de

sistemas biométricos existentes, así como de las características propias de un sistema de este tipo.

Dada la amplitud del campo de la biometría, se escoge el sistema de reconocimiento biométrico basado en el patrón de iris, debido a la probada capacidad de estos sistemas, dentro de la amplia variedad de sistemas biométricos existentes, para alcanzar los objetivos marcados en su aplicación.

Estos sistemas biométricos basados en iris presentan una serie de características particulares, tanto en su base teórica como en su evolución a través de los diferentes métodos seguidos, y cuyo conocimiento a fondo aporta una visión mejorada para el futuro desarrollo de aplicaciones más eficaces.

En este sentido, se optó por abordar el estado del arte de esta tecnología, que dado que todavía se encuentra en un estadio de madurez muy poco avanzado, se enfoca desde el punto de vista de la investigación básica llevada a cabo en diversas universidades internacionales.

Igualmente, uno de los aspectos relevantes en el uso de estos sistemas es la aportación de muestras y bases de datos, que contengan imágenes que permitan probar los desarrollos existentes, factor fundamental para verificar las prestaciones de los sistemas desarrollados.

DESARROLLO

La estructuración del proyecto, trata en un primer momento de repasar de manera completa los fundamentos necesarios para el correcto entendimiento del sistema estudiado. Por este motivo, el proyecto se llevo a cabo atendiendo a un esquema fijado que coincide con el posterior desarrollo de la memoria que se presenta.

En este sentido, el proyecto se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Introducción a la biometría

Capítulo 2. La transformada wavelet

Capítulo 3. Introducción a los sistemas de reconocimiento de iris

Capítulo 4. Bases de datos

Capítulo 5. Diseño del sistema de reconocimiento biométrico de iris

Capítulo 6. Resultados

Capítulo 7. Conclusiones

En el Capítulo 1, se hace un repaso exhaustivo de los fundamentos de la biometría, abordando nociones básicas de los sistemas de seguridad y de los procesos de identificación, lo que permite argumentar la necesidad de desarrollo de este tipo de sistemas, así como de los aspectos básicos de la biometría y de los tipos de sistemas que es posible desarrollar en base a sus fundamentos. De este modo observamos la existencia de tecnologías

biométricas basadas en rasgos como las huellas dactilares, la geometría de la mano, la cara, la retina, el ADN, la voz, y por supuesto el protagonista principal de este proyecto, el iris.

Sin duda es importante conocer los parámetros que permiten medir las prestaciones de un determinado sistema biométrico, de modo que una vez determinados estos, se hace necesario comparar cada una de las características propias de las diferentes tecnologías, lo que permite concluir que no existe un sistema biométrico perfecto, y que dependiendo de las necesidades de la aplicación en cuestión, se escogerá uno u otro tipo.

Posteriormente se repasan las partes fundamentales de un sistema biométrico estándar y sus modos de funcionamiento (verificación, identificación y reclutamiento), así como la medida técnica de las prestaciones de este tipo de sistemas, a saber los diferentes ratios estadísticos que permiten evaluar el correcto funcionamiento de un sistema biométrico cualquiera (FAR, FRR, FTE y EER).

Vistos ya los fundamentos de estos sistemas, se abordan temas relacionados, tales como la biometría multimodal o las barreras que en la actualidad se encuentran para el correcto desarrollo de este tipo de sistemas y su integración en el uso cotidiano de los sistemas de seguridad, y finaliza el capítulo repasando algunas de las posibles aplicaciones de este tipo de sistemas, con ejemplos actuales de desarrollo.

El capítulo 2, supone la base matemática del proyecto en cuanto al análisis de señales se refiere, las wavelets, lo que supone una diferenciación clara en cuanto al método de tratamiento de la señal que se obtiene como resultado del funcionamiento propio del sistema. En este caso se hace necesario un repaso a los fundamentos del análisis de señales, para posteriormente abordar de manera teórica la transformada wavelet, así como el análisis multiresolución y los diferentes tipos de transformada existentes: discreta (DWT), semidiscreta y continua (CWT). El capítulo finaliza con una visión práctica del uso de la transformada wavelet continua y de la transformada wavelet discreta.

El capítulo 3, sirve de introducción a los sistemas biométricos de iris, punto clave del proyecto, y que aborda desde el funcionamiento propio del iris como órgano, hasta la historia del reconocimiento de iris y sus fundamentos, tecnologías existentes y aplicaciones. En una primera parte se lleva a cabo un análisis anatómico y fisiológico del globo ocular del ser humano, detallando en particular la parte de interés dentro del conjunto: el iris. Posteriormente se hace un repaso a la historia de una tecnología, la de la biometría de iris, que si bien es bastante reciente comprende las características necesarias para experimentar un notable desarrollo en un futuro a medio plazo.

En esta parte se describen también, los fundamentos de este tipo de sistemas, como particularización de lo descrito en el capítulo 1, detallando así las partes de un sistema de este tipo y los parámetros que lo describen, finalizando con un repaso al estado actual del mercado de los sistemas

biométricos de iris y las tendencias del mismo. Finalmente a modo de caso práctico, se estudia la actualidad en cuanto a los métodos de falsificación de rasgos biométricos de iris y las medidas para evitar este tipo de fraudes a un sistema de seguridad, detallando un estudio de gran repercusión mediática, que apareció retratado en la edición de Abril de 2002 de la revista National Geographic, acerca del uso del reconocimiento biométrico de iris para la verificación de la identidad de una chica afgana que había servido de portada para la misma revista.

El capítulo 4, presenta sin duda una gran novedad en cuanto al estudio de los sistemas biométricos de iris, ya que supone una descripción detallada de uno de los elementos fundamentales para el desarrollo de aplicaciones y prototipos de este tipo de sistemas, las bases de datos de imágenes de iris, elemento necesario y fundamental en el proceso de prueba del sistema. En este sentido a lo largo del capítulo se hace una descripción exhaustiva y completa de diferentes bases de datos, así como de los procesos seguidos para la obtención de las imágenes y las características de estas imágenes, para concluir con una comparativa de las características de las imágenes, lo que permitirá en una posterior comparativa de los algoritmos determinar que características de las imágenes benefician en mayor medida el funcionamiento de los sistemas biométricos de iris.

El capítulo 5, sin duda es básico en el desarrollo del proyecto, ya que supone el diseño teórico del sistema de reconocimiento biométrico de iris. En una primera parte se revisan los fundamentos de la teoría de reconocimiento de patrones, parte importante en el funcionamiento global del sistema.

Las siguientes partes de este capítulo detallan cada una de las partes propias del sistema: la etapa de adquisición de muestras, que en este caso se resuelve gracias a las bases de datos descritas en el anterior capítulo; la etapa de preprocesado que permite adecuar la imagen tratada para la posterior etapa extracción de características de las regiones adecuadas de modo que se evite en la medida de lo posible obtener en la señal a procesar toda la información innecesaria; en esta etapa de extracción de características se obtiene mediante un estudio de los niveles de escala de gris de los píxeles propios de las regiones de interés una señal característica, que se tratará mediante la transformada wavelet, en base a dos posibilidades diferentes: el estudio de los cruces por cero o el de los máximos de módulos de la señal; para finalmente obtener lo que se denomina la "firma de iris", exclusiva de cada persona y que en una etapa final, y atendiendo al modo de funcionamiento, servirá como patrón para llevar a cabo las comparaciones necesarias para la toma de decisiones.

El capítulo 6, recoge los resultados obtenidos del funcionamiento del sistema a partir de las diferentes bases de datos descritas. En una segunda parte, se lleva a cabo una comparativa de los diferentes algoritmos y métodos diferentes desarrollados, en otros estudios tales como el uso de filtros de Gabor en el apartado de procesado de la señal extraída, o algoritmos con fundamentos completamente distintos a los presentados anteriormente, para

las partes de pre-procesado de la imagen, lo que supone la elección de distintas regiones de estudio, así como el uso de distintos métodos de obtención de la firma de iris a partir de la señal extraída de la imagen. Sin duda reveladores resultan los diferentes procesos y la comparación de los resultados obtenidos tras su uso, de los que se obtienen una serie de conclusiones, que permiten sin duda abrir nuevas líneas en el desarrollo de algoritmos más eficaces para el diseño de estos sistemas.

El capítulo 7, recoge una serie de conclusiones a nivel general, acerca de los sistemas biométricos de iris, tales como el conocimiento del mercado propio de este tipo de sistemas y de los estándares que existen y que se están desarrollando para permitir un óptimo funcionamiento. Finalmente se aborda el que sin duda representa una de las barreras que la biometría tiene que afrontar, para que su explosión como sistema de seguridad eficaz y fiable sea un hecho, y es sin duda las repercusiones éticas y sociales que derivan del uso de este tipo de sistemas. Por último y como no podía ser de otro modo se consideran ciertas líneas futuras de actuación que permitan progresar en el desarrollo de la biometría de iris.

CONCLUSIONES

La incipiente lucha de las tecnologías biométricas para hacerse un hueco en el mercado de los sistemas de seguridad, va a ser sin duda dura y llena de obstáculos, propiciados en primer lugar por la actitud celosa de los usuarios de permitir que sus datos personales, y más aún teniendo en cuenta que se trata de rasgos propios del usuario, se utilicen con estos propósitos.

Sin embargo, no va a ser este el único reto al que se tengan que enfrentar este tipo de sistemas, las barreras tecnológicas, aunque de otra índole diferente a las sociales, son igualmente notorias en una tecnología poco madura, que requiere sin duda de los esfuerzos de la investigación básica para evolucionar poco a poco en un sector, el de la seguridad, en auge en la actualidad, en el que se desarrollan una gran variedad de aplicaciones y servicios, destinados a mejorar la confianza de los usuario en el uso de nuevas tecnologías y en aplicaciones que requieran identificación, tanto para mantener la seguridad en las acciones del usuario, como para evitar usos fraudulentos de dichos sistemas y aplicaciones.

Es por esto, que, como ya se ha mencionado, resulta necesario una comprensión a fondo de los aspectos relativos a esta tecnología, desde el diseño de los algoritmos, hasta el desarrollo de las aplicaciones y tecnologías propias de los sistemas, sin olvidar la importancia de desarrollar igualmente métodos de prueba y validación de estos sistemas, lo que incluye los protocolos y estándares necesarios para delimitar estas acciones, y también para la obtención de las imágenes necesarias para el funcionamiento del sistemas, tema abordado en profundidad en este proyecto.

Como conclusión final, se puede detallar, la necesidad de continuar el proceso de evolución de un sistema que cuenta con diversas patentes en la

actualidad, una de ellas española (Prof. D. Carmen Sánchez Ávila ETSIT, UPM), y que sin duda requiere avances tanto en el aspecto técnico (tecnológico), como de desarrollo de procesos y protocolos, que permitan mejorar las prestaciones de las que sin duda serán los sistemas de seguridad más utilizados del futuro.

ORIGINALIDAD

Aunque existen estudios tanto teóricos como de desarrollo práctico de sistemas de este tipo, tanto a nivel nacional como internacional, uno de los motivos básicos por los que se abordó este tema es el de poner en común las desordenadas ideas existentes sobre este mundo de la biometría, permitiendo llevar a cabo comparaciones de la versatilidad tanto de los diferentes sistemas y tecnologías, como de los propios desarrollos existentes relativos a la biometría basada en el patón de iris, de modo que se saquen diversas conclusiones acerca de las posibilidades de evolución y mejora de estas tecnologías.

Una de las novedades más importantes recogidas en este proyecto radica en la recopilación de información y de muestras de diferentes bases de datos de imágenes de iris, que se han desarrollado tanto en universidades extranjeras, como en la propia Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, más concretamente en los trabajos llevados a cabo en el GBTNI (Grupo de Biometría y Tratamiento Numérico de la Información). Estas bases de datos a falta de desarrollos de prototipos de sistemas biométricos de iris, permiten manejar y estudiar los procesos propios de la primera parte del sistema, que incluye la introducción de la información en forma de imagen para su posterior procesado, en base a una serie de algoritmos.

Otro de los aspectos novedosos, que se presenta en este proyecto, es la revisión de los citados algoritmos de procesado, desarrollados igualmente por diversos grupos de investigación repartidos por universidades de todo el mundo, basados en diversos métodos de tratamiento de imágenes y de tratamiento de la información obtenida de estas imágenes. El estudio de los fundamentos en los que se basan estos algoritmos, permiten tras una posterior prueba de los mismos en las diversas bases de datos mencionadas, obtener datos acerca de las prestaciones y medidas estadísticas del funcionamiento, de estos sistemas, permitiendo evaluar la conveniencia en el uso de los diferentes métodos utilizados en cada uno de los algoritmos.

Por último, se realiza una breve, aunque sin duda importante, recopilación de diversos aspectos ligados necesariamente al desarrollo de estos sistemas como son, el estudio del mercado actual de la biometría de iris, los grupos internacionales encargados de llevar a cabo los estándares y protocolos de uso de estos sistemas y también los aspectos éticos relacionados con el uso de estos sistemas y que en la actualidad implica el trabajo de diversas organizaciones, con el objetivo de consensuar las implicaciones y estudiar que métodos son los más correctos para que la aceptación de estos sistemas por parte de la sociedad se lleve a cabo de una manera satisfactoria.

RESULTADOS

La evaluación de los distintos algoritmos desarrollados, así como de las características de las diversas bases de datos estudiadas, supone sin duda la principal fuente de resultados del proyecto, lo que permite extraer, resultados numéricos de las prestaciones de los distintos experimentos de uso, y derivado de esto, las conclusiones acerca de las prestaciones de cada uno de los algoritmos, y de las oportunidades de desarrollo de cada uno de ellos.

Por otro lado el análisis de los conceptos fundamentales relacionados con los sistemas biométricos y de las distintas aplicaciones y oportunidades que presenta este mercado tecnológico, así como de las barreras actuales que se presentan ante la adopción de este tipo de sistemas. Análisis por otra parte muy importante, y necesario para la búsqueda de un modelo de negocio adecuado para la correcta evolución de estos sistemas.

Los resultados obtenidos, se plasmaron en el artículo "*Sistemas biométricos de identificación mediante iris basados en la transformada wavelet diádica discreta: descripción y análisis comparativo*", presentado en la IX Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información (se adjunta como Anexo en el fichero [acta_recsi2006.pdf](#)), y elaborado por Carmen Sánchez Ávila, Raúl Sánchez Reíllo y Rafael Coomonte Belmonte.

APLICABILIDAD

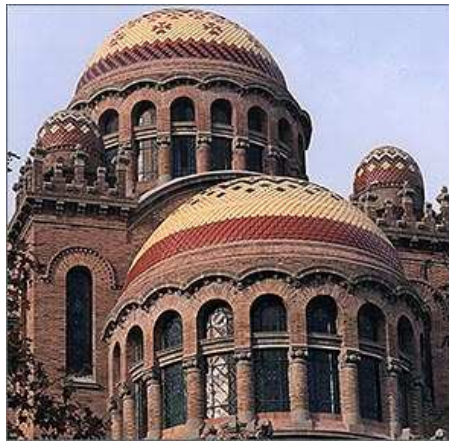
Sin duda una tecnología, que se ha ganado su propia fama de futurista, dada las múltiples apariciones de estos sistemas en diversas películas de ciencia ficción, la aplicabilidad de estos sistemas a la vida real necesita ante todo de una concienciación de los usuarios de las bondades de una tecnología que sin duda necesitará de un esfuerzo grande por parte de las empresas involucradas en este mercado.

El conocimiento del entorno cercano a este tipo de tecnologías, y el acercamiento de las ideas en que se sustenta su funcionamiento, se hacen del todo necesario para la comprensión de los mismos, y el acercamiento de la idea de que suponen ante todo una ventaja y un avance en los sistemas de seguridad, siempre y cuando se mantengan una serie de premisas acerca de la privacidad de estos usuario, parte muy importante como ha quedado señalado.

En cuanto a las aplicaciones de estos sistemas en el ámbito de la seguridad, son diversas y muy aprovechables en entornos tecnológicos y que requieran de elevados niveles de seguridad, como los desarrollos basados en entornos domóticos que permitan la identificación de los ocupantes de una casa y la adecuación del entorno a sus necesidades, la aplicación a desarrollos tales como el DNI electrónico, o el uso combinado con aplicaciones criptográficas lo que supone sin duda una de las líneas de actuación más actuales. Uno de los sectores, muy cercano al propio de seguridad, que se puede beneficiar del uso y aplicación de estos sistemas es el sector de defensa,

en el que a lo largo de la historia se ha demostrado que la seguridad, en facetas como la criptografía, ha jugado un papel de gran importancia.

Actas de la
IX Reunión Española sobre Criptología y
Seguridad de la Información



Casa de Convalescència, Hospital de la Santa Creu i Sant Pau

7, 8 y 9 de septiembre del 2006, Barcelona

Departament d'Enginyeria de la Informació i les Comunicacions,
Universitat Autònoma de Barcelona
Estudis d'Informàtica, Multimèdia i Telecomunicacions,
Universitat Oberta de Catalunya

Editores

Joan Borrell Viader
Jordi Herrera Joancomartí

Sistemas biométricos de identificación mediante iris basados en la transformada wavelet diádica discreta: descripción y análisis comparativo

C. Sánchez-Ávila, R. Coomonte-Belmonte (U. Politécnica de Madrid), R. Sánchez-Reíllo (U. Carlos III de Madrid)

¹ Grupo de Biometría y Tratamiento Numérico de la Información
Centro de Domótica Integral. Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, España
csa@cedint.org

² Grupo de Diseño Microelectrónico-Grupo Universitario de Tarjeta Inteligente
Dpto. de Tecnología Electrónica, Electrónica y Automática
Universidad Carlos III de Madrid
C/ Butarque, 15, 28911 Leganes (Madrid), España
rsreillo@ing.uc3m.es

Resumen En este trabajo se presentan dos sistemas de identificación biométrica basados en el patrón del iris ocular. Ambos sistemas utilizan la transformada wavelet diádica discreta de la denominada *firma del iris*, diferenciándose entre sí esencialmente en el establecimiento de la misma y en la utilización de su transformada wavelet diádica discreta, ya que el primer sistema utiliza la representación multiescala de cruces por cero de la firma del iris, mientras que el segundo hace uso de los máximos de los módulos de la misma en diferentes escalas de su análisis multiresolución. La evaluación de ambos sistemas se ha llevado a cabo utilizando varias distancias de disimilaridad sobre una base de datos elaborada por los autores de este trabajo, mostrando excelentes resultados tanto en identificación como en esquemas de verificación. Finalmente, utilizando una base de datos independiente y de libre distribución como es la base de datos CASIA, se incluye un estudio comparativo de los resultados obtenidos con ambos sistemas frente a los que se obtienen con otros sistemas biométricos existentes en la literatura que utilizan el iris ocular como característica biométrica de identificación.

1. Introducción

El objetivo de las técnicas biométricas es la identificación de un individuo basándose en sus características biológicas y/o de comportamiento. Dichas técnicas, así como las tecnologías que las utilizan, han experimentado en los últimos años un importante auge debido, entre otros motivos, a su potencial aplicación en el reconocimiento y verificación de individuos en el control de accesos a áreas o servicios de seguridad. Hoy día, existen numerosas técnicas biométricas ampliamente utilizadas o en investigación, entre las que podemos encontrar las basadas

en voz, mano, cara, huella, oreja, iris, retina, firma, forma de caminar, dinámica de teclado, etc [6]. Cada técnica posee ventajas e inconvenientes, y es prácticamente imposible determinar cual es la mejor; la técnica de escáner de retina, por ejemplo, es la más fiable pero también es la más intrusiva y provoca el rechazo de los usuarios. Sin embargo, de entre todas las técnicas existentes, teniendo en cuenta los resultados obtenidos hasta ahora, el reconocimiento por iris ocular es la más adecuada en entornos de alta seguridad [3], considerando a su vez que se trata de una técnica no invasiva, ya que únicamente requiere la fotografía del ojo del usuario.

Respecto a la técnica de reconocimiento de iris, además de los prototipos de Daugman [3], [4], [5] y Wildes [20], encontramos trabajos más recientes entre los que podemos citar [7], [8], [9], [10] basados en análisis de texturas, [19] que utiliza la transformada de Hilbert, [1] basado en la transformada wavelet, [16] utilizando filtros de Gabor y [14], [15] basados en la representación multiescala de cruces por cero.

En este trabajo se describen dos sistemas de reconocimiento por iris que hacen uso de la transformada wavelet diádica discreta desarrollados por los autores, el primero de ellos utiliza la representación multiescala de cruces por cero de la transformada wavelet diádica discreta de la *firma del iris*, y el segundo hace uso de los máximos locales del módulo de la misma; así como los resultados de su evaluación utilizando dos bases de datos de irises disponibles actualmente y de libre distribución hasta el momento. Como paso previo se revisarán los conceptos más importantes relacionados con el esquema y funcionamiento de cualquier sistema de identificación biométrica, para pasar a continuación a describir detalladamente los pasos y etapas de de los sistemas que se presentan. En la siguiente sección se detallan los resultados obtenidos con las diferentes bases de datos utilizadas, describiendo previamente las características de las mismas. Las conclusiones de este estudio se recogen en la sección que cierra este trabajo.

2. Sistemas de identificación biométrica

El diseño de un sistema automático de reconocimiento de patrones en general, y por tanto de un sistema de reconocimiento biométrico en particular, consta de cuatro etapas: 1) *captura* de los datos biológicos (o de comportamiento); 2) *preprocesado* de los datos capturados; 3) *extracción de características* propias del usuario; y 4) *comparación* de las características extraídas con el patrón previamente almacenado [17].

En particular, en un sistema biométrico la última etapa puede configurarse bien como un:

- *clasificador* (reconocimiento o identificación biométrica), en el que las características extraídas se comparan con los patrones de todos los usuarios con el fin de determinar la identidad del usuario; o bien, como un:
- *verificador* (verificación o autenticación biométrica), en el que la muestra sólo se compara con el patrón del usuario que dice ser, con el fin de autenticar la identidad del usuario.

El problema de reconocimiento de usuarios requiere una base de datos de patrones, con los requisitos de capacidad de almacenamiento y seguridad de los datos oportunos, y la existencia de una red de comunicaciones, siempre en línea, que comunique los puestos de identificación con la base de datos. En el caso de la autenticación, el almacenamiento del patrón puede hacerse en un sistema portátil de información, por lo que no serían necesarias ni la base de datos ni la red de comunicaciones.

A continuación se detallan los diferentes bloques que componen los sistemas biométricos diseñados basados en el patrón de iris, así como los resultados obtenidos tanto en clasificación como en verificación.

3. Descripción de los sistemas biométricos desarrollados

A continuación se describen detalladamente las diferentes etapas de los sistemas de identificación personal mediante iris que se han desarrollado. En ellos, las etapas de captura y preprocesado, así como los métodos de comparación, son idénticos, y sólo difieren en la etapa de extracción de características, en la que distinguiremos claramente los dos métodos empleados.

3.1. Captura de la imagen y preprocesado

En el caso de la base de datos que los autores han confeccionado, se ha realizado utilizando una cámara fotográfica de alta resolución. No obstante, en futuros trabajos se contempla la posibilidad de utilizar una cámara de video, como ocurre con la base de datos CASIA, que también se utilizará posteriormente para la evaluación de ambos sistemas. Con el fin de evitar el rechazo del usuario, se ha utilizado la óptica necesaria para facilitar la ampliación (zoom) de la imagen del ojo. Así, el primer paso en el pre-procesado, teniendo en cuenta las características de las imágenes capturadas, es una conversión a blanco y negro, seguido de un estiramiento del histograma. Una vez realizada esta operación, se procede a la detección de los bordes del iris. Así, partiendo de un punto elegido (x_0, y_0) , se toma éste como centro y a partir de él se muestrea la imagen, tomando los puntos correspondientes a partir de un incremento del radio Δ_r y un incremento del ángulo Δ_θ , buscando el múltiplo n de Δ_r que maximice D ,

$$D = \sum_m \sum_{k=1}^5 (I_{n,m} - I_{n-k,m}) \quad (1)$$

siendo

$$I_{i,j} = I(x_0 + i\Delta_r \cos(j\Delta_\theta), y_0 + i\Delta_r \sin(j\Delta_\theta)) \quad (2)$$

donde m son los múltiplos de Δ_θ que corresponden a puntos en los conos laterales del iris e $I(x, y)$ son los valores de intensidad de la imagen. Una vez detectado el borde externo del iris, se eliminan todos aquellos puntos que quedan fuera de la circunferencia que enmarca al iris y se realiza el mismo proceso para la detección

del borde interno, es decir la frontera entre el iris y la pupila. Por último, se eliminan los puntos del interior del borde interno detectado, obteniéndose la imagen que se muestra en la Figura 1 (a).

3.2. Extracción de características

Puesto que ambos sistemas utilizan en esta etapa la transformada wavelet diádica discreta, revisaremos brevemente los principales conceptos y propiedades de esta herramienta matemática.

La transformada wavelet diádica discreta. Sea $\psi_s(x)$ la versión dilatada de una función ψ por un factor de escala s :

$$\psi_s(x) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x}{s}\right). \quad (3)$$

La transformada wavelet continua de una función $f(x)$ en la escala s puede escribirse mediante la siguiente convolución

$$W_s f(x) = f * \psi_s(x). \quad (4)$$

Denotamos $\hat{\psi}(\omega)$ a la transformada de Fourier de $\psi(x)$. Grossmann y Morlet demostraron que si $\hat{\psi}(\omega)$ satisface

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega = C_\psi < \infty, \quad (5)$$

entonces $f(x)$ puede reconstruirse a partir de su transformada wavelet. La condición (5) se denomina condición de admisibilidad e implica que

$$\hat{\psi}(0) = 0. \quad (6)$$

Se denomina wavelet a cualquier función de $L^2(\mathbb{R})$ que satisface la condición de admisibilidad. Observando (6), es fácil ver que la wavelet $\psi(x)$ puede interpretarse como la respuesta al impulso de un filtro paso-banda. Entonces, la transformada de una función f puede verse como el resultado de aplicar una familia de filtros paso-banda dilatados a la función f .

En las implementaciones prácticas, se han de discretizar los parámetros x y s , que intervienen en la transformada wavelet continua $W_s f(x)$. A continuación, describiremos brevemente las relaciones entre las versiones continua y discreta de la transformada wavelet, consideramos un conjunto discreto de escalas. Así, si

$$\sum_{-\infty}^{\infty} \left| \hat{\psi}(2^j \omega) \right|^2 = 1, \quad (7)$$

entonces el parámetro escala puede muestrearse a lo largo de la secuencia diádica $\{2^j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ preservando la propiedad de reconstrucción. Cualquier wavelet que satisfaga la ecuación (7) se denomina wavelet diádica y la secuencia de funciones

$$\{W_{2^j} f(x)\}_{j \in \mathbb{Z}} \quad (8)$$

se denomina transformada wavelet diádica. No obstante, en la práctica, estaremos limitados por una escala (grande) finita. Por otra parte, y debido a la resolución finita de cualquier equipo de medida, la escala más fina también estará acotada. Así, asumiremos que la escala más fina es 1 y la escala más grande es 2^J . Para un número finito de escalas, necesitamos interpretar qué tipo de información está contenida en

$$\{W_{2^j} f(x)\}_{1 \leq j \leq J}. \tag{9}$$

En primer lugar, introducimos una función de escala $\phi(x)$ cuya transformada de Fourier, $\hat{\phi}(\omega)$, satisface

$$|\hat{\phi}(\omega)|^2 = \sum_{j=1}^{\infty} |\hat{\psi}(2^j \omega)|^2. \tag{10}$$

Utilizando (10), es fácil demostrar que

$$|\hat{\phi}(\omega)|^2 = \sum_{j=1}^J |\hat{\psi}(2^j \omega)|^2 + |\hat{\phi}(2^J \omega)|^2, \tag{11}$$

y, mediante (7), podemos comprobar que $\lim_{\omega \rightarrow 0} |\hat{\phi}(\omega)| = 1$. Por lo que $\phi(x)$ puede interpretarse como la respuesta al impulso de un filtro paso-bajo o, de forma equivalente, a una función suavizadora. Definimos el operador suavizador S_{2^j} mediante

$$S_{2^j} f(x) = f \star \phi_{2^j}(x) \tag{12}$$

donde $\phi_{2^j}(x) = \frac{1}{2^j} \phi\left(\frac{x}{2^j}\right)$. Es fácil deducir que las frecuencias más altas de $S_1 f(x)$, que han desaparecido en $S_{2^J} f(x)$, pueden recuperarse a partir de la transformada wavelet diádica $\{W_{2^j} f(x)\}_{1 \leq j \leq J}$. Suponemos que la señal original es una secuencia discreta f^d de energía finita. Si existen dos constantes $C_1 > 0$ y $C_2 > 0$ tales que $\hat{\phi}(\omega)$ satisface

$$\forall \omega \in \Omega, \quad C_1 \leq \sum_{n=-\infty}^{\infty} |\hat{\phi}(\omega + 2n\pi)|^2 \leq C_2, \tag{13}$$

entonces es fácil probar que la señal de entrada puede escribirse de la forma $f^d = S_1 f[n]$. Denotamos

$$\begin{aligned} S_{2^J}^d f &= (S_{2^J} f[n+w])_{1 \leq n \leq N}, \\ W_{2^j}^d f &= (W_{2^j} f[n+w])_{1 \leq n \leq N}, \end{aligned} \tag{14}$$

donde N es la longitud de f^d , y w es un desplazamiento de muestreo dependiente sólo de ψ [13]. Entonces, la transformada wavelet diádica discreta (DDWT) de $f^d = S_1 f[n]$ puede definirse como la secuencia de señales discretas

$$\left\{ (W_{2^j}^d f)_{1 \leq j \leq J}, S_{2^J}^d f \right\}, \tag{15}$$

para cualquier escala 2^J . En este trabajo, para la ejecución de la transformada wavelet diádica discreta, se ha implementado el algoritmo rápido que se detalla en [11].

Cuando la información más importante de una señal está contenida en diferentes escalas, resulta conveniente reorganizar la información de la señal en un conjunto de componentes de detalle", mediante el denominado análisis multiescala [13]. Es conocido que es posible obtener la posición de los puntos correspondientes a variaciones rápidas de la señal a partir de los cruces por cero del análisis multiescala de la señal convolucionada con la laplaciana de una gaussiana [12]. Este procedimiento se ha utilizado con éxito en numerosas aplicaciones relacionadas con el reconocimiento de patrones. Es claro, que uno de los objetivos más importantes es comprobar si los cruces por cero definen una representación completa y estable de la señal original. Además es preciso tener en cuenta, especialmente en aquellas aplicaciones relacionadas con el reconocimiento de patrones, que se eliminan algunas componentes importantes de la señal cuando se representa mediante sus cruces por cero multiescala.

Sea $f \in L^2(\mathbb{R})$ y $\{W_{2^j} f(x)\}_{j \in \mathbb{Z}}$ su transformada wavelet diádica. Para cualquier par de cruces por cero consecutivos de W_{2^j} cuyas abscisas son $(z_{n-1}$ y $z_n)$, respectivamente, podemos calcular el valor de la integral

$$e_n = \int_{z_{n-1}}^{z_n} W_{2^j} f \, dx. \quad (16)$$

Para cualquier $W_{2^j} f$, la posición de los cruces por cero $(z_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ pueden representarse mediante una función constante a trozos

$$Z_{2^j} f = \frac{e_n}{z_n - z_{n-1}}, \quad x \in [z_{n-1}, z_n]. \quad (17)$$

Representación de cruces por cero de la DDWT de la firma del iris. En este sistema biométrico basado en el patrón de iris humano, el primer paso del bloque de extracción de características es la obtención de un conjunto de datos a partir de cada imagen del iris aislado que permita una adecuada extracción de sus características. Se ha elegido el centroide de la pupila detectada como punto de referencia para obtener este conjunto de datos. Así, se propone una definición de *firma del iris*, como alternativa a la propuesta en [1], de la forma siguiente: se extraen los valores de los niveles de grises de cada contorno de un círculo virtual, centrado en el centroide de la pupila, con radio r , tal que $r_i \leq r \leq r_e$, siendo r_i y r_e los radios interno y externo del anillo, fijados previamente, y tomando incrementos angulares de $2\pi/L_s$, siendo $L_s = 256$ la longitud de la secuencia (previamente fijada) que resulta al muestrear los datos de cada círculo virtual. Finalmente, el conjunto de datos que denominamos *firma del iris* (I_S) (Figura 1 (b)) en este primer sistema, se calcula de la forma

$$I_S = \frac{1}{r_e - r_i + 1} \sum_{r=r_i}^{r_e} I_E(x_c + r \cos \theta, y_c + r \sin \theta), \quad (18)$$

siendo

$$2n\pi/L_s \leq \theta \leq 2(n+1)\pi/L_s, \quad n \in \mathbb{N} \cup \{0\}.$$

Con el fin de obtener una representación completa y estable de la información contenida en la *firma del iris*, consideramos los cruces por cero de la transformada wavelet diádica discreta de la *firma del iris* (I_S), es decir en lugar de considerar los cruces por cero de la transformada wavelet en escalas continuas, nos restringimos a escalas diádicas, calculando el valor de dicha transformada entre dos cruces por cero consecutivos.

En la práctica, la señal de entrada, en nuestro caso la *firma del iris*, ha sido medida con una resolución finita lo cual impone la escala más fina en el cálculo de la transformada wavelet diádica, y, por otra parte, no será posible calcular dicha transformada en todas las escalas 2^j para $-\infty < j < +\infty$. En efecto, estamos limitados por la escala más fina y la más grande, que suponemos, a efectos de normalización, son 1 y 2^J , respectivamente. Obtenemos, por tanto, la transformada wavelet diádica discreta de la *firma del iris* (I_S)

$$\left\{ S_{2^j}^d(I_S), (W_{2^j}^d(I_S))_{1 \leq j \leq J} \right\}, \tag{19}$$

donde $S_{2^j}^d(I_S)$ es la señal burda y $(W_{2^j}^d(I_S))_{1 \leq j \leq J}$ puede interpretarse como las señales de detalle que no aparecen en la escala 2^J [11].

Estimamos los cruces por cero de $(W_{2^j}^d(I_S))_{1 \leq j \leq J}$ a partir de los cambios de signo de sus muestras. La posición de cada cruce por cero se estima mediante una interpolación lineal entre dos muestras de diferente signo. Así, si I_S tiene N muestras distintas de cero, y puesto que existen a lo sumo $N \log(N)$ muestras en su representación wavelet discreta, el número de operaciones necesarias para obtener la posición de los cruces por cero es $O(N \log(N))$. Es claro que, si consideramos la transformada wavelet diádica discreta sólo podemos calcular los posiciones de los cruces por cero a lo largo de las escalas 2^j con $1 \leq j \leq J$. Por tanto, consideraremos como representación multiescala de cruces por cero de la *firma del iris* (I_S) al conjunto de señales

$$\left\{ (Z_{2^j}(I_S))_{1 \leq j \leq J} \right\}. \tag{20}$$

En este trabajo, se han excluido los niveles más burdo y más finos con el fin de obtener una representación robusta en un entorno ruidoso y, al mismo tiempo, reducir la carga computacional. Como es conocido, la información contenida en los niveles de resolución más fina está fuertemente contaminada por el ruido que afecta al sistema así como por los errores de cuantificación [12]. Así, para reducir tales efectos en la representación de cruces por cero se consideran únicamente los niveles de resolución intermedios. En particular, en este trabajo se han considerado cuatro niveles, correspondientes a $3 \leq j \leq 6$. En la Figura 1 (c) se muestra la representación de cruces por cero correspondiente a los 4 niveles de resolución de la transformada wavelet previamente mencionados. La wavelet diádica utilizada es la spline cuadrática de soporte compacto definida en [11].

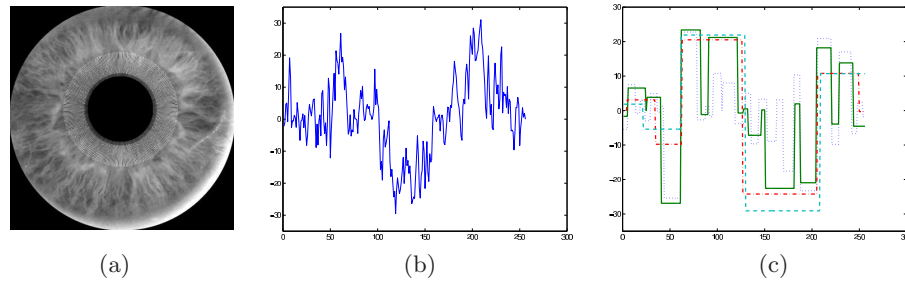


Figura 1. (a) Iris aislado y sección anular considerada; (b) *firma del iris*; (c) Representación multiescala de cruces por cero correspondiente, considerando cuatro niveles de resolución $3 \leq j \leq 6$.

Representación de máximos locales de la DDWT de la firma del iris.

Para obtener la *firma del iris* en el segundo esquema, se crean 32 circunferencias virtuales concéntricas situadas en el interior de la estructura del iris, y alrededor de la pupila. Se utilizan las coordenadas del centro del iris calculadas en la etapa de preprocesado así como el radio de la pupila. Con el fin de no tomar datos dentro de la zona correspondiente a la pupila, el radio de la primera circunferencia virtual será igual al radio de la pupila más un margen de seguridad. Para la definición de la circunferencia se toman 64 grados distintos con un incremento angular de $\Delta\phi = 2\pi/64$. Al finalizar la primera circunferencia se incrementa el valor del radio un valor fijo Δr , y se repetirá el proceso descrito. El primer ángulo a partir del cual comenzarán a dibujarse las circunferencias virtuales, se elige siguiendo el siguiente esquema: a partir del centro de la imagen del iris encontrado en la etapa de preprocesado, calculamos el centro de la imagen normalizada del iris también hallada en la anterior etapa del sistema. El ángulo que forma la recta que une estos dos puntos con el eje horizontal que divide la imagen del iris en dos partes iguales, se toma como referencia para que se comiencen a construir las circunferencias virtuales, es decir, para que la adquisición de datos que permite la creación de la *firma del iris* en este segundo esquema, I_S , comience en un punto fijo para cada usuario del sistema, independientemente de la posición relativa del ojo del individuo durante la etapa de captura.

A continuación obtenemos la representación multiescala de los máximos locales del módulo de la transformada wavelet diádica discreta de la *firma del iris* determinada anteriormente, seleccionando únicamente los niveles $3 \leq j \leq 5$ de la misma, es decir,

$$\left\{ \left(|W_{2^j}^d(I_S)| \right)_{3 \leq j \leq 5} \right\}. \quad (21)$$

En la Figura 2 se muestra la selección de los puntos que formarán las circunferencias virtuales se toman a partir de un valor de ángulo calculado (Figura 2 (a)), la *firma del iris* obtenida (Figura 2 (b)) y la representación de los máximos locales del módulo de la DDWT de la *firma del iris* para las escalas seleccionadas (Figura 2 (c)).

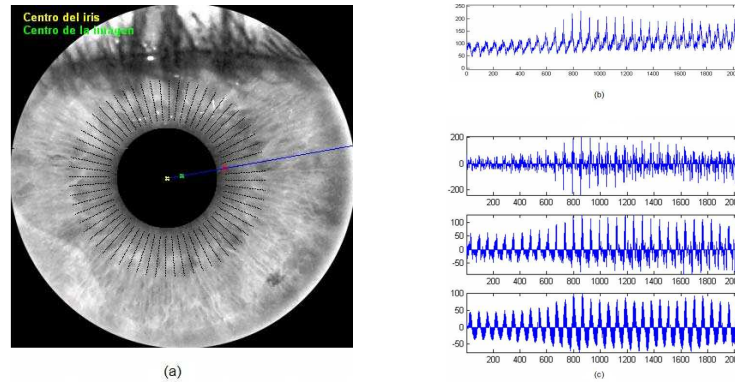


Figura 2. (a) Establecimiento del inicio de ángulos y muestreo de la imagen para la determinación de la *firma del iris*; (b) *firma del iris*; (c) Representación de los máximos locales del módulo de la DDWT de la firma del iris para los niveles $3 \leq j \leq 5$.

3.3. Resultados en Clasificación y Verificación

A continuación se presentan los resultados obtenidos utilizando los sistemas biométricos descritos tanto en identificación (clasificación) como en verificación. La base de datos construida consta de las imágenes de ambos ojos de 50 personas con al menos 30 muestras de cada uno de los ojos. Las fotografías se tomaron en diferentes días y horas, durante 11 meses. Se consideró cada ojo como una persona "distinta", es decir cada persona tiene dos identidades una por cada ojo, lo cual nos proporciona 100 usuarios "virtuales" diferentes.

Se han utilizado como distancias de disimilaridad: la distancia euclídea, la distancia binaria de Hamming y la distancia:

$$d_Z(y, p) = \sum_{j=K}^M \frac{d_j(y, p)}{K - M - 1}, \quad (22)$$

siendo

$$d_j(y, p) = \frac{\sum_{i=1}^{R_j} \left\{ [\mu_j(r)]_y [\rho_j(r)]_y - \Gamma [\mu_j(r)]_p [\rho_j(r)]_p \right\}^2}{\Gamma \sum_{i=1}^{R_j} \left| [\mu_j(r)]_y [\rho_j(r)]_y \right| \left| [\mu_j(r)]_p [\rho_j(r)]_p \right|}, \quad (23)$$

donde, si $Z_j p$ es la representación de cruces por cero de un objeto p en un nivel de resolución j ; y $X_j = \{x_j(r); r = 1, \dots, R_j\}$ es el conjunto que contiene las posiciones de los cruces por cero en el nivel j , R_j denota el número de cruces por cero de la representación en ese nivel, $[\rho_j]_p$, y real, $[\mu_j]_p$, indican las posiciones y amplitudes de los cruces por cero de $Z_j p$ entre dos puntos de cruce por cero consecutivos, respectivamente y Γ un factor de escala igual a la razón entre la razón media del modelo candidato y la del objeto desconocido [18].

Resultados en Clasificación. En el caso del sistema basado en la representación multiescala de cruces por cero, para el establecimiento de la *firma del iris*, se ha considerado $r_i = 3(r_{ext} - r_{int})/100$ y $r_e = 30(r_{ext} - r_{int})/100$, siendo r_{int} y r_{ext} los radios interno y externo, respectivamente, del iris completo. Para analizar en profundidad este sistema se han utilizado las tres distancias previamente mencionadas, obteniendo un resultado óptimo utilizando la distancia binaria de Hamming, ya que se ha conseguido clasificar correctamente el 99,6% de los casos, mientras que con las distancias euclídea y d_Z los resultados han sido del 95% y 95,6% respectivamente.

En el caso del segundo sistema, basado en los máximos locales del módulo de la transformada wavelet diádica discreta, se han utilizado únicamente las distancias euclídea y de Hamming binaria (en este caso, no tiene sentido utilizar la distancia d_Z) y considerando únicamente los 3 niveles mencionados, los resultados obtenidos son ligeramente inferiores en el caso de la distancia de Hamming, consiguiéndose tasas de éxito en clasificación del 97,6%, aunque sensiblemente más bajas para la distancia euclídea, con la que se obtiene una tasa de clasificación correcta del 73,8%.

Método	Éxito en clasificación		
	Hamming	Euclídea	d_Z
Cruces por cero	99,6%	95%	95,6%
Máximos locales	97,6%	73,8%	-

Cuadro 1. Resultados en clasificación.

Resultados en Verificación En una arquitectura de verificación el rendimiento del sistema biométrico basado en la representación multiescala de cruces por cero, la distancia binaria de Hamming obtiene también los mejores resultados, llegándose a obtener una tasa de igual error (EER) de 0,12%. Pero, lo que es más importante, se obtiene una tasa de falsa aceptación nula (FAR) para una tasa realmente pequeña de falso rechazo (FRR), ya que se obtiene una FRR de 0,19% para una FAR nula, lo que hace de éste un sistema óptimo para entornos que requieran una alta seguridad. Los resultados obtenidos con la distancia euclídea y d_Z son sensiblemente inferiores, llegándose a tasas de igual error (EER) de 2,44% utilizando la distancia euclídea y de 2,12% utilizando la distancia d_Z .

En el caso del sistema basado en los máximos locales del módulo de la transformada wavelet los resultados son similares a los obtenidos con el sistema anterior, llegándose a tasas de EER de 0,19%, con FAR nula para una FRR DE 0,38%. Para la distancia euclídea sin embargo los resultados son sensiblemente inferiores, ya que la tasa de EER obtenida es de 6,54%.

Método	Tasa de igual error (EER)		
	Hamming	Euclídea	d_Z
Cruces por cero	0,12%	2,44%	2,12%
Máximos locales	0,19%	6,54%	-

Cuadro 2. Resultados en verificación.

3.4. Comparación con otros sistemas biométricos basados en iris

En este segundo estudio se ha realizado la comparación entre los resultados obtenidos utilizando los dos sistemas anteriormente descritos frente a los que se obtienen al utilizar otros sistemas biométricos basados en iris existentes en la literatura, para lo cual se ha utilizado la base de datos independiente CASIA. En particular en este análisis se han considerado, además del sistema propuesto por Daugman [4], el descrito en [10] basado en análisis de texturas, y el propuesto por Tisse *et al.* [19] que utiliza la transformada de Hilbert.

La base de datos CASIA (ver 1.0) [2], de libre distribución, cuenta con 756 imágenes de iris de 108 personas. De cada uno de los ojos se han tomado 7 imágenes en dos sesiones con un intervalo de un mes: tres imágenes en la primera sesión y 4 en la segunda. El dispositivo de captura es un escáner de iris que utiliza un sensor óptico digital diseñado por National Laboratory of Pattern Recognition con iluminación infrarroja y buen nivel de contraste, obteniendo imágenes con una resolución de 320x280. Las imágenes de esta base de datos son en su gran mayoría de personas de raza asiática. Como es bien sabido, la característica propia de este nicho de población son los ojos rasgados, factor que influye de manera notable a la hora del tratamiento de las imágenes de iris.

Tanto en el caso del sistema basado en la representación multiescala de cruces por cero de la *firma del iris* (sistema 1), como en el sistema que utiliza los máximos locales del módulo de la transformada ondicular diádica discreta (sistema 2) se ha utilizado únicamente la distancia binaria de Hamming en la etapa de comparación, por ser ésta la que mejores resultados proporciona en ambos casos.

Sistema	Identificación Porcentaje de acierto	Verificación FAR/FRR
Daugman	99,90	0,01/0,09
L. Ma	98,00	0,02/1,98
Tisse	89,37	1,84/8,79
Sistema 1	97,89	0,03/2,08
Sistema 2	96,87	0,08/2,39

Cuadro 3. Comparación de los diferentes sistemas biométricos basados en iris utilizando la base de datos CASIA.

Como puede observarse, los resultados obtenidos con el sistema que utiliza la representación multiescala de cruces por cero (sistema 1), son similares a los

obtenidos por el sistema de L. Ma *et al.*, aunque ambos no logran superar los obtenidos por el sistema propuesto por Daugman. Es interesante, no obstante, constatar que el patrón de iris que utiliza el sistema de Daugman es un patrón binario de 2048 bits, mientras que el utilizado en el sistema 1 consta únicamente de 1024 bits, 256 por cada una de las 4 escalas consideradas.

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado dos sistemas de reconocimiento biométrico de personas mediante iris basados ambos en la transformada wavelet diádica discreta de la firma de iris, el primero de ellos hace uso de la representación multiescala de los cruces por cero de la misma, el segundo utiliza los máximos locales del módulo de dicha transformada para determinados niveles de su análisis multiresolución. Ambos sistemas han sido evaluados utilizando una base de datos confeccionada por los autores y utilizando varias distancias de disimilitud, obteniéndose para ambos resultados excelentes utilizando la distancia de Hamming, llegando al 99,6% de éxito en clasificación y una tasa EER de 0,12% en verificación en el caso del primer sistema, y lo que es más importante, obteniendo tasas muy bajas de FRR para una FAR nula, lo que hace este sistema óptimo para entornos de alta seguridad. Finalmente se ha realizado un estudio comparativo, utilizado la base de datos CASIA, con otros sistemas de identificación mediante iris descritos actualmente en la literatura, obteniéndose resultados comparables especialmente en el caso del sistema que utiliza la representación multiescala de cruces por cero.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto PRADO (Proyecto Integral en Domótica) subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, soporte y germen del Centro de Domótica Integral (Cedint).

Referencias

1. W. W. Boles, B. Boashash, A Human Identification Technique Using Images of the Iris and Wavelet Transform, *IEEE Transactions on Signal Processing* **46** (4) (1998), 1185–1188.
2. <http://nlpr-web.ia.ac.cn/english/irds/irisdatabase.htm>.
3. J. Daugman, High confidence visual recognition by test of statistical independence, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **15** (1993), 1148–1161.
4. J. Daugman, Statistical richness of visual phase information: Update on recognizing persons by iris patterns, *International Journal of Computer Vision* **45** (1) (2001), 25–38.
5. J. Daugman. Complete discrete 2-d Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression. *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing* **36** (1988), 1169–1179.

6. A. K. Jain, R. Bolle, S. Pankanti S. et al., *Biometrics: Personal Identification in Networked Society*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
7. S. Lim, K. Lee, O. Byeon and T. Kim, Efficient Iris Recognition through Improvement of Feature Vector and Classifier, *ETRI Journal* **23** (2) (2001), 61–70.
8. Y. Liu, S. Yuan and Z. Liu, Research on Approaches of Iris Texture Feature Representation for Personal Identification, *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 2745, Springer-Verlag, 2003, 405–410.
9. L. Ma, Y. Wang, T. Tan, Iris Recognition using Circular Symmetric Filters. *Proc. 6th International Conference on Pattern Recognition*, vol. II, 2002, 414–417.
10. L. Ma, T. Tan, Y. Wang and D. Zhang, Personal Identification Based on Iris Texture Analysis, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **25** (12) (2003), 1519–1533.
11. S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999.
12. S. Mallat, Zero-Crossings of a Wavelet Transform, *IEEE Transactions on Information Theory* **37** (4) (1991), 1019–1033.
13. S. Mallat, S. Zhong, Characterization of Signals from Multiscale Edges, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14** (7) (1992), 710–732.
14. C. Sánchez-Ávila, R. Sánchez-Reillo and D. de Martín-Roche, Iris-based Biometric using Dyadic Wavelet Transform, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, **17** (2002), 3–6.
15. C. Sánchez-Ávila and R. Sánchez-Reillo, Two Different Approach for Iris Recognition using Gabor Filters and Multiscale Zero-Crossing Representation, *Pattern Recognition*, 38 (2005), 231–240.
16. R. Sanchez-Reillo, C. Sanchez-Avila, Iris Recognition with Low Template Size, in J. Bigun and F. Smeraldi (eds.), *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 2091 (2001), 324–329.
17. S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, Academic Press, 1999.
18. Q. M. Tieng, and W. W. Boles, Recognition of 2D Object Contours Using the Wavelet Transform Zero-Crossing Representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **19** (8) (1997), 910–916.
19. C. Tisse, L. Martin, L. Torres, M. Robert, Person Identification Technique using Human Iris Recognition. *Proc. Vision Interface*, 2002, 294–299.
20. R. Wildes et al., A System for Automated Iris Recognition. *Proc. 2nd IEEE Workshop Applicat. Comput. Vision* (1994), 121–128.