

Procesamiento y análisis de imágenes digitales de fondo de ojo para facilitar el tele-diagnóstico oportuno

PONCE-RIVERA, Enrique*†, VILLALOBOS-CASTALDI, Fabiola Miroslaba, DAMIÁN-REYES, Pedro y CAMERO-BERRONES, Rosa Gabriela

Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico Superior de Pánuco.

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México.

Departamento de Telemática, Servicios y Tecnologías de la Información. Universidad de Colima.

Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de Cd. Madero

Recibido Julio 12, 2017; Aceptado Septiembre 6, 2017

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre el procesamiento y análisis de imágenes digitales de fondo de ojo para facilitar el tele-diagnóstico de enfermedades relacionadas con la retina de manera oportuna. Para ello se desarrolla un sistema informático que permita identificar y segmentar imágenes de la retina (o fondo de ojo), utilizando el lenguaje de programación C++ con el uso de la librería OpenCV para la segmentación de imagen. Así mismo el diagnóstico digital por imagen de fondo de ojo necesita de sistemas de procesamiento de imágenes de alta resolución para tomar fotografías del interior del ojo; esto ayuda a que los médicos determinen el estado de la retina, detecten y controlen enfermedades y afecciones oculares que puedan observarse en la imagen. La metodología para el desarrollo del proyecto está basada en el Proceso de Desarrollo de Software, el cual define las fases de análisis, diseño y arquitectura, programación, realización de pruebas y la implementación del sistema. Con esta investigación se desea realizar la tarea de procesar y detectar las estructuras oculares de la retina para su análisis, descripción y extracción de características que ayuden a la detección de algunas enfermedades que alteran la retina.

Sistema informático, imágenes de fondo de ojo, retina

Abstract

This paper presents a study on the processing and analysis of digital images of the eye fundus to facilitate the tele-diagnosis of diseases related to the retina in a timely manner. It develops a computer system that allows to identify and segment images of the retina (or eye fundus), using C ++ programming language with the use of the library OpenCV for image segmentation. Likewise, the digital imaging diagnosis of the eye fundus requires high-resolution image processing systems to take photographs of the inside of the eye; This helps doctors determine the state of the retina, detect and control eye diseases and conditions that can be seen in the image. The methodology for the development of the project is based on the Software Development Process, which defines the phases of analysis, design and architecture, programming, testing and system implementation. This research aims to perform the task of processing and detecting the ocular structures of the retina for analysis, description and extraction of characteristics that help detect some diseases that alter the retina.

Computer system, eye fundus images, retina

Citación: PONCE-RIVERA, Enrique, VILLALOBOS-CASTALDI, Fabiola Miroslaba, DAMIÁN-REYES, Pedro y CAMERO-BERRONES, Rosa Gabriela. Procesamiento y análisis de imágenes digitales de fondo de ojo para facilitar el tele-diagnóstico oportuno. Revista de Cómputo Aplicado 2017, 1-3: 22-37

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: enrique.ponce@itspanuco.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La salud es un bien intangible de cuyo estado depende el bienestar social y económico de una población en general; diversas investigaciones revelan que haciendo un diagnóstico por imagen de la retina, se pueden detectar y controlar algunos tipos de enfermedades de manera oportuna, ya que en cada situación se presentan rasgos distintos en la imagen, y que además ayudan al médico a identificar el tipo de enfermedad detectada; algunos ejemplos son: la diabetes, glaucoma, desprendimiento de retina, y degeneración macular.

Con la obtención de la imagen, el médico puede establecer un tratamiento o por lo menos tener identificado el problema, y realizar las pruebas más profundas a quienes realmente lo necesitan, evitando gastos innecesarios.

Las imágenes médicas son el medio de diagnóstico único, que aún sin información textual, facilitan el diagnóstico clínico. Actualmente, la mayoría de las imágenes médicas son analizadas por clasificadores humanos, pero hay dos problemas principales en dicho análisis: El primero consiste en la subjetividad por parte del observador, lo que se traduce en una baja confiabilidad entre clasificadores humanos. El segundo problema es el tiempo necesario para un análisis cuantitativo por parte del observador. El análisis asistido por computadora de imágenes médicas puede ayudar a reducir la subjetividad y el tiempo de análisis por parte del observador (Li, Ko, & Lim, 2008).

Otra aproximación de la obtención de imágenes, es mediante el uso de cámaras digitales convencionales de 8 bits, con el inconveniente de una mala relación señal-ruido.

El problema conocido de este tipo de sistemas es la poca practicidad del mismo, ya que una vez capturada la imagen, esta tiene que ser descargada al ordenador, para posteriormente hacer el procesamiento de la misma (Morales, Sánchez, & Díaz, 2016).

La imagenología comprende la realización de todo tipo de exámenes diagnósticos y terapéuticos, en los cuales se utilizan equipos que reproducen imágenes del organismo (Montaño, 2007).

La exploración del fondo de ojo u oftalmoscopia consiste en la visualización a través de la pupila y de los medios transparentes del globo ocular (córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo) de la retina y del disco óptico. Es un componente importante de la evaluación clínica de muchas enfermedades y es la única localización donde puede observarse in vivo el lecho vascular de forma incruenta (Fernández, 2012).

La adopción generalizada de los teléfonos inteligentes por parte de los médicos, y una mejor capacidad en las cámaras incorporadas en los mismos, ha incrementado el interés en su uso para la imagenología médica y oftálmica; la portabilidad y las capacidades de conexión inmediata de los teléfonos inteligentes, hacen de ellos un dispositivo atractivo para la adquisición de imágenes de retina en entornos remotos no hospitalarios, y se está convirtiendo en una herramienta valiosa en el campo de la oftalmología, para desempeñar un papel importante en el diagnóstico médico en general (Russo, Morescalchi, Costagliola, & Semeraro, 2014).

Algunas enfermedades como: glaucoma, retinopatía diabética, cáncer, hipertensión, desprendimiento de retina, entre otras, son padecidas por algunas personas, y las cuales no tienen síntomas inmediatos por lo que no se logra su medicación o tratamiento a tiempo.

En esta investigación se propone mostrar la importancia de realizar la segmentación de imagen de la red vascular de la retina o fondo de ojo, para su análisis, descripción y extracción de características que ayuden a la detección de algunas enfermedades vinculadas con la retina como son la diabetes, glaucoma, desprendimiento de retina, y degeneración macular.

Estado del Arte

Examen del fondo de ojo

El examen de fondo de ojo es una técnica que permite observar el interior del globo ocular para diagnosticar una enfermedad, o para comprobar la evolución de patologías como la diabetes o la hipertensión.

Para realizar un examen de fondo de ojo, primeramente se instilan unas gotas de colirio en el ojo para dilatar poco a poco la pupila; estas gotas pueden escocer un poco. Este proceso puede llevar de varios minutos a una hora, hasta que el ojo se encuentra en el estado ideal para poder realizar la prueba, después se utiliza un oftalmoscopio ya sea directo o indirecto para poder ver el fondo de ojo.

Oftalmoscopio

Para poder visualizar el fondo de ojo, se necesita de un oftalmoscopio, de los cuales existen dos tipos, el directo e indirecto. El oftalmoscopio directo, es un instrumento muy útil para el examen de la retina alrededor del fondo de ojo. La luz de un bombillo se refleja en ángulo rectos y se proyecta como punto a través del iris del paciente para iluminar la retina. Esta reflexión se logra mediante un espejo frontal plateado frontalmente o un espejo parcialmente plateado o un prisma de reflexión total. La retina iluminada es vista directamente por el médico a través del iris del paciente.

El Oftalmoscopio indirecto moderno funciona como el ocular de un microscopio estereoscópico en el cual un lente esférico positivo (17D, 20D o 30D) sostenido con la mano sirve como el objetivo. Cuando se ve correctamente, se observa una imagen ampliada de la retina. Algunas de las ventajas del instrumento en comparación con el oftalmoscopio directo son imagen estereoscópica, un mayor campo de visión, mayor iluminación, y reducción de la distorsión. Una ventaja adicional es que el médico está a una distancia del paciente (Srinivasan, 2003).

Existen oftalmoscopios con nuevas tecnologías que facilitan el ingreso a la pupila sin dilatar, dando lugar a un campo de visión de 25 grados, donde se puede ver 5 veces más grande el fondo de ojo comparado con otros oftalmoscopios tradicionales y en pupila sin dilatar. La visualización directa del fondo de ojo a través de este oftalmoscopio proporciona mejores imágenes de los cambios en la retina causados por la hipertensión, retinopatía diabética, glaucoma y degeneración macular, facilitando a los médicos un diagnóstico temprano. Además se puede capturar digitalmente, almacenar y compartir imágenes de fondo de ojo mediante la utilización de un adaptador para Smartphone.

Teleoftalmología

La imagen juega un papel muy importante en la oftalmología. De hecho, muchos diagnósticos pueden hacerse a partir de las imágenes adquiridas mediante diverso equipamiento oftalmológico, como el retinógrafo no midriático, la lámpara de hendidura con cámara digital o la tomografía óptica de coherencia (eDiagnostic, 2017).

La Teleoftalmología, es un sistema que permite realizar exploraciones del fondo de ojo y otras estructuras oculares a distancia y detectar lesiones o alteraciones, salvando las barreras de tiempo y espacio.

Además evita desplazamientos y largos periodos de espera y a la vez resulta ser muy eficaz. Esto ayuda a que un médico solicitante, pida consejo a un oftalmólogo acerca de un problema de salud de un paciente relativo con lesiones oculares, de modo que disponiendo de la mayor información pueda llegar a una decisión clínica efectiva.

Aplicaciones para dispositivos y adaptadores

Existen una serie de adaptadores que permiten a los profesionales de la salud capturar fotografías oftálmicas mediante la conexión de un Smartphone a un oftalmoscopio.

Algunas aplicaciones para Smartphones, permiten tomar imágenes del fondo de ojo, para posteriormente transferirlas por un sistema de teleoftalmología al oftalmólogo que será el que realice el diagnóstico enviando posteriormente un informe. Cabe señalar que estos sistemas únicamente obtienen la imagen sin procesarla.

Algunos dispositivos y adaptadores para Smartphones son:

iExaminer y *iExaminer App*. Esta aplicación optimiza la cámara de un iPhone para realizar exámenes de la vista capturando hasta 85 imágenes en 5 segundos, permitiendo almacenar en el teléfono un máximo de 10 casos. Este accesorio periférico y aplicación, ofrece la capacidad de realizar exámenes de los ojos a médicos de atención primaria sin necesidad de invertir en un equipamiento oftalmológico muy costoso.

Adaptador "Low Cost". Desarrollado por la Universidad de Stanford (USA). Permiten a un Smartphone capturar imágenes de alta calidad de la parte frontal y posterior del ojo.

Gracias a las nuevas tecnologías de los Smartphones, a una buena resolución de la cámara y a la capacidad de transferencia de datos, se puede subir la imagen de forma segura a la historia clínica del paciente en cuestión de segundos.

EyePhotoDoc. Es un adaptador de diseño personalizado creado para su uso con el iPhone (3, 4 y 4s) y otros teléfonos con cámara en conjunción con una lámpara de hendidura. El EyePhotoDoc puede adaptarse casi a cualquier lámpara de hendidura y utilizar un sistema ocular de imagen digital.

Como se ha visto, los teléfonos inteligentes con capacidades fotográficas y de video de alta calidad son ahora de gran utilidad en la medicina. Gracias a los adaptadores que han sido diseñados para conectar un teléfono inteligente a una lámpara de hendidura, se ha logrado que los profesionales obtengan fotografías clínicas utilizando solamente un Smartphone con un mínimo de hardware adicional.

Así mismo se ha observado que estos sistemas únicamente obtienen la imagen digital sin realizar algún proceso de segmentación para su análisis. En esta investigación se presenta un estudio sobre el proceso de segmentación y análisis de imágenes digitales de fondo de ojo.

Descripción del Marco Teórico

Telemedicina

Los avances de la tecnología están moldeando nuevos paradigmas en las relaciones entre los individuos. Estos cambios tienen una influencia directa sobre la provisión de los servicios de salud, reemplazando en muchos de los casos la forma tradicional en la cual se ha ejercido la medicina por la oferta de servicios médicos a distancia, en tiempo real (Litewka, 2005).

La telemedicina es un recurso tecnológico que posibilita la optimización de los servicios de atención en salud, ahorrando tiempo y dinero, facilitando el acceso a zonas distantes para tener atención de especialistas.

Así mismo la telemedicina está dirigida a apoyar a los profesionales de la salud de todos los niveles de atención en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, la gestión y gerencia de servicios de salud.

En los países centrales, el uso de la telemedicina es cada vez más frecuente, no sólo para la transmisión de imágenes (posiblemente la aplicación más difundida), sino en especialidades como neurología y neurocirugía, dermatología e, incluso, psiquiatría.

Algunos autores mencionan como ventajas sobre la práctica habitual de la medicina el hecho de evitar la necesidad de desplazarse, la reducción en los costos médicos y el ahorro de tiempo (para los médicos), sosteniendo que las "videovisitas" son mucho más cortas que las consultas convencionales, evitando los saludos y despedidas de cortesía (Marckmann & Goodman, 2006).

Imagenología

La imagenología es una especialidad médica que agrupa toda una serie de métodos diagnósticos y/o terapéuticos que se sirven de la imagen para llegar a un diagnóstico o para hacer un tratamiento. Es un conjunto de técnicas y procedimientos que permiten obtener imágenes del cuerpo humano con fines clínicos o científicos.

Dentro del ramo de la imagenología biomédica se pueden utilizar diversas técnicas.

Sin embargo, las menos costosas y más rápidas que se utilizan para diversos propósitos son el ultrasonido, la imagenología por fluorescencia y la biomicroscopía por retroiluminación. Cada una de ellas se utiliza para diferente propósito (Zhou, y otros, 2014).

Dispositivos Móviles

Un dispositivo Móvil o teléfono inteligente (Smartphone en inglés) es un tipo de teléfono móvil construido sobre una plataforma informática con mayor capacidad de almacenamiento de datos, que realiza actividades semejantes a la de una minicomputadora, con una mayor conectividad que un teléfono móvil convencional.

Estos dispositivos móviles (Smartphones), cuentan con una cámara integrada, que junto a una infraestructura basada en servidor permite al usuario compartir fotos y vídeos inmediatamente.

La fotografía móvil es un campo que ha avanzado muchísimo durante los últimos años; en la actualidad existen Smartphones capaces de capturar imágenes realmente increíbles. Gracias a la gran calidad de la cámara de los dispositivos móviles, se podrán realizar tareas mucho más complejas, como es en el área de la salud para la detección de enfermedades.

Existen Oftalmoscopios como el PanOptic de la marca Welch Allyn, que permite adaptar un dispositivo móvil como el iPhone en algunas de sus versiones, en donde es posible alinear el acceso óptico del oftalmoscopio con el eje visual de la cámara del dispositivo, para capturar fotografías de alta resolución del fondo de ojo.

Utilizando técnicas de Visión Artificial se puede realizar un tratamiento inteligente de las imágenes recibidas en una computadora, en la que, más allá de la manipulación, se llega al análisis y reconocimientos de los objetos presentes en ellas.

Esta visión artificial no es más que la adquisición automática de imágenes sin contacto (que puede ser mediante un dispositivo móvil), y cuyo análisis tiene como fin extraer la información necesaria para realizar un proceso (Kalbakdij, Lebrero & Sánchez, 2009).

Imagen del fondo de ojo

Se llama fondo de ojo a una exploración que se realiza en medicina para visualizar a través de la pupila la porción posterior e interior del ojo, y es la única parte del organismo donde se puede observar en vivo el lecho vascular, de una manera sencilla y con magnificación mediante la oftalmoscopia, lo que permite sacar ciertas conclusiones en cuanto a cuál es el estado de los vasos en otros órganos y sistemas.

Las enfermedades que pueden evidenciarse mediante este examen, está la diabetes, la hipertensión arterial, enfermedad cerebral, alteraciones renales, metástasis tumorales, leucemias, etc. (Marcano, 2015).

Existen varias formas de realizar la exploración del fondo de ojo, la más utilizada es mediante un instrumento óptico que se llama oftalmoscopio. Gracias a este procedimiento pueden observarse diferentes estructuras internas del globo ocular: mácula, retina y papila óptica entre otras. También es posible visualizar directamente los vasos sanguíneos de la retina y detectar cualquier anomalía que presenten.

Para explorar el fondo de ojo, el médico se sirve de un oftalmoscopio e instila en el ojo una sustancia que dilata las pupilas. De esta forma puede observar las porciones internas del órgano, la retina y sus vasos sanguíneos, la papila óptica, la coroides y el humor vítreo, así como detectar diversas enfermedades, como un desprendimiento de retina o signos de hipertensión arterial o diabetes, ya que en la imagen se aprecian las características que ayudan a detectar el tipo de enfermedad.

Las imágenes de retina (o de fondo de ojo) proporcionan información relacionada con el sistema de alimentación sanguínea de la retina. Así mismo analizar una imagen de fondo ocular permite a los oftalmólogos detectar de una forma más robusta y automática de enfermedades como: la degeneración macular dependiente de la edad, la retinopatía diabética, el glaucoma, la retinosis pigmentaria, y otras de no menor importancia (Villalobos Castaldi & Felipe Riverón, 2008).

Las imágenes retinales de fondo de ojo sin auto-fluorescencia pueden ser útiles para la detección de cataratas. En una imagen retinal, y con una imagen de fondo de ojo en el espacio RGB, el canal verde posee el contraste más elevado entre el objeto y el fondo. Estas imágenes son pre-procesadas y posteriormente se extraen algunas características para introducirlas a una red neuronal (Yang, Yang, Zhang, & Li, 2013).

Base de datos DRIVE

La base de datos DRIVE (*Digital Retinal Images for Vessel Extraction*, Imágenes digitales de la retina para la extracción de vasos sanguíneos, por sus siglas en inglés, <http://www.isi.uu.nl/Research/Databases/DRIVE>), ha sido establecida para permitir estudios comparativos sobre la segmentación de los vasos sanguíneos en las retinianas; contiene 40 imágenes en colores las cuales se adquirieron utilizando una cámara Canon CR5 no midriática 3CCD con un campo de visión de 45 grados (FOV). Cada imagen fue capturada utilizando 8 bits por plano de color a 768 por 584 píxeles.



Figura 1 Fondo de ojo

Fuente: Imagen contenida en la base de datos DRIVE

Enfermedades detectadas por la retina

La retina es un tejido sensible a la luz que recubre la parte posterior del ojo, y puede ser considerada una parte integral del sistema nervioso central (SNC). La estructura y la función de la retina pueden ser examinadas fácilmente con métodos no invasivos o mínimamente invasivos, mientras que la investigación del cerebro tiene numerosas limitaciones a la hora de un abordaje directo (HERALDO, 2016).

La retina es una capa de tejido en la parte posterior del ojo que percibe la luz y envía las imágenes al cerebro. En el centro de este tejido nervioso se encuentra la mácula. Provee la capacidad de enfoque central y la agudeza necesaria para leer, conducir y ver en forma clara los detalles. Las enfermedades de la retina afectan este importante tejido. Puede afectarle la vista y algunas son lo suficientemente graves como para causar ceguera. Algunos ejemplos son:

- Degeneración macular: Enfermedad que destruye la agudeza de la visión central.
- Enfermedad diabética del ojo.
- Desprendimiento de retina: Urgencia médica que ocurre cuando la retina se despega de la parte posterior del ojo.

- Retinoblastoma: Cáncer de la retina. Es más común en niños pequeños.
- Membrana epirretiniana: Tejido cicatricial en la mácula.
- Agujero macular: Pequeña ruptura en la mácula que suele ocurrir en personas mayores de 60 años.
- Cuerpos flotantes: Telarañas o pequeñas manchas en el campo de la vista. (MedlinePlus, 2016).

En el análisis de la retina existen diferentes procedimientos para analizar específicamente el disco óptico. La naturaleza de estos análisis cobra un amplio espectro de técnicas y métodos en diferentes áreas. Particularmente en la oftalmología los procedimientos médicos para poder diagnosticar algunas enfermedades relacionadas con la retina, son identificación directa o indirecta del disco óptico, partiendo de fotografías ópticas de la retina humana (De la Fuente, Garduño, & Cuevas, 2011).

Segmentación de imágenes

En el procesamiento de imágenes, la detección de objetos dentro de las imágenes, la mayoría de las veces se hace por medio de alguna propiedad característica del objeto u objetos que se pretenden detectar; propiedades como el tamaño, color, textura, y forma, las cuales son con frecuencia las más usadas (Ambriz, Avilés, Cano & Flores, 2015).

Para el procesamiento de la imagen del fondo de ojo, las propiedades importantes a detectar son: el tamaño, la forma, la textura, el color, los bordes o líneas, así como la unión de puntos o píxeles que representen una característica importante en la imagen.

La segmentación es el proceso de dividir una imagen digital en varias partes (grupos de píxeles) u objetos.

El objetivo de la segmentación es simplificar y/o cambiar la representación de una imagen en otra más significativa y más fácil de analizar.

El proceso de la segmentación de imagen tiene como objetivo establecer regiones en la misma, donde cada región es homogénea en relación a una característica determinada. En el ámbito del procesamiento de imágenes médicas es una herramienta de importancia, teniendo aplicaciones que incluyen simulaciones de cirugía, medición de volumen de tumores, clasificación de células sanguíneas, estudios de desarrollo cerebral, detección de micro-calcificaciones en mamografías y detección de tumores. Si bien existen una gran cantidad de técnicas de segmentación de imagen disponibles a la fecha, no existe aún un procedimiento estándar que se pueda utilizar en todas las aplicaciones de procesamiento de imágenes y producir resultados satisfactorios (Bankman, 2009).

El análisis y procesamiento de imágenes permite la extracción de información de éstas, y dentro de esta disciplina la segmentación permite la identificación de sus partes constituyentes. La segmentación de imágenes tiene aplicaciones en reconocimiento de patrones y sistemas de control de tráfico entre otros. Si se realiza la segmentación de imágenes al rubro de imágenes médicas, las aplicaciones van desde la detección de tumores y otras patologías hasta la medición de volúmenes en tejidos (Gavidia Calderón, 2014).

La segmentación cobra especial importancia en el ámbito de imágenes médicas, donde es común el uso de computadoras y técnicas de segmentación automáticas para delinear estructuras anatómicas, dado que la realización de estos procedimientos de manera manual es tediosa y demanda tiempo considerable (Pratx & Xing, 2011).

La segmentación de vasos sanguíneos en imágenes digitales permite tener un método no invasivo de diagnosticar enfermedades como diabetes, hipertensión y algunas enfermedades cardiovasculares, debido a las características detectadas en la imagen de la retina.

Puede servir en la implementación de programas para la detección temprana de varias enfermedades de la retina y también para la identificación biométrica basada en la forma de los vasos sanguíneos.

Una de las etapas en el análisis automático de imágenes oftalmoscópicas, es la de la segmentación de la red vascular. La tarea de la segmentación radica en tomar como archivo de entrada una imagen oftalmoscópica del fondo ocular y crear como archivo de salida una nueva imagen con la representación binaria de la red vascular completa. Una correcta segmentación de la red vascular es de gran importancia para el análisis de las imágenes, ya que de esta dependen las etapas de representación, descripción y extracción de características posteriores (Villalobos Castaldi & Felipe Riverón, 2008).

Los algoritmos de segmentación se basan en una de estas dos propiedades básicas de los valores del nivel de gris: discontinuidad o similitud entre los niveles de gris de píxeles vecinos.

Dada su importancia, varios procedimientos han sido definidos para afrontar esa tarea en gran medida, debido a que las características y naturaleza de la imagen a segmentar influyen en la selección del algoritmo. Las técnicas de segmentación pueden agruparse en técnicas basadas en umbrales, basadas en detección de bordes, basadas en regiones y en técnicas de transformación divisoria.

Asimismo, el desempeño de estas técnicas puede ser optimizado mediante el uso de herramientas avanzadas como algoritmos evolutivos, redes neuronales y lógica difusa (Raut, Raghuwanshi, & Dharaskar, 2009).

Las técnicas basadas en crecimiento de regiones tiene como punto de partida un píxel -o un grupo de píxeles- que pertenecen a la estructura de interés, donde estos píxeles pueden seleccionarse de manera manual o por un procedimiento automático.

El criterio de homogeneidad -también llamado prueba de uniformidad, puede ser la diferencia entre el valor de intensidad del píxel y la media del valor de intensidad dentro de la región. Un enfoque alternativo es comenzar con una segmentación inicial, y dividir las regiones que no satisfagan el criterio de uniformidad. En general, las técnicas basadas en regiones tienen la ventaja de generar regiones conectadas (Gavidia Calderón, 2014).

Metodología a desarrollar

La metodología para el desarrollo del sistema computacional está basada en el Proceso de Desarrollo de Software, que define las fases de análisis de requisitos, diseño y arquitectura del sistema, programación, realización de pruebas y la implementación del sistema. El modelo utilizado para realizar el proyecto de software es el Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD), ya que se comprenden bien los requisitos y se limita el ámbito del proyecto.

Los proyectos de ingeniería tienen como objetivo que a partir de una problemática determinada, se logre desarrollar una alternativa de solución, poniendo en práctica sistémicamente y sistemáticamente los conocimientos teórico-experimentales.

Esta necesidad se ha generado a partir de la propia complejidad del mundo, en donde actualmente se demandan soluciones tecnológicas a problemáticas complejas y multicausales, en donde las herramientas metodológicas actuales no logran, en su totalidad, ofrecer los resultados deseados en las soluciones hasta ahora planteadas, sobre todo porque dichas herramientas metodológicas no fueron desarrolladas para este fin, y ello dificulta sensiblemente su aplicación para proyectos de ingeniería (Reyes, Soto & Elizarrarás, 2017).

Técnicas algorítmicas para la segmentación de imágenes

Existen varios tipos de algoritmos de visión artificial que han sido utilizados para captar patrones en imágenes obtenidas por un medio óptico. Cada uno de ellos tiene diferentes desempeños dependiendo del tamaño o del tipo de figura a reconocer, varían por la cantidad de luz y la posición de la imagen, sin embargo se desconoce cuál es el más eficiente para procesar la imagen y reconocer el patrón de la imagen (Alonso, Benítez, Morales, & Silva, 2016).

La segmentación de imágenes es el proceso de dividir una imagen digital en varias partes (grupos de píxeles) u objetos. Su objetivo es simplificar y/o cambiar la representación de una imagen en otra más significativa y más fácil de analizar. La segmentación se usa tanto para localizar objetos como para encontrar los límites de estos dentro de una imagen.

Una de las fases del diseño de la estructura del sistema, es el de identificar técnicas algorítmicas para la segmentación de imagen de la retina. Los algoritmos de segmentación se basan en los siguientes principios:

Discontinuidades del nivel de gris: Consisten en segmentar la imagen a partir de los cambios grandes en los niveles de gris entre los píxeles, por ejemplo la detección de líneas, de bordes, de puntos aislados, entre otros.

Similitud de niveles de gris: Es lo contrario al método anterior, las divisiones de la imagen se hacen agrupando los píxeles que tienen unas características similares. Algunas técnicas que usan esto son la umbralización, el crecimiento de regiones, etc.

Para realizar el análisis de una imagen ocular, primeramente se tiene que realizar una segmentación. En este proceso se divide la imagen en las partes u objetos que la forman, y el nivel al que se realiza esta subdivisión dependerá de la aplicación en particular, es decir, la segmentación terminará cuando se hayan detectado todos los objetos de interés para la aplicación.

En la mayor parte de los casos, una buena segmentación de imagen del fondo de ojo, dará lugar a una solución correcta, por lo que se debe poner todo el esfuerzo posible en esta etapa.

Para poder analizar la imagen, primero se debe convertir en un formato más apropiado para extraer las características; en este caso se convierte la imagen a una escala de grises, en donde cada píxel es representado con un único valor entre 0 y 255, el cual representa que tan oscuro es el mismo.

Detección de puntos

El método más común de buscar discontinuidades en una imagen, es su correlación con una máscara. Un punto aislado de una imagen tiene un tono de gris que difiere significativamente de los tonos de gris de sus píxeles vecinos, es decir, de los ocho píxeles de su entorno 3x3. Una máscara para detectar un punto aislado es la siguiente:

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Esto significa que el pixel (i, j) es un punto aislado si:

$$|g(i,j)| > T \quad (1)$$

Donde T es el valor umbral fijado por el decisor. Dicho valor depende de la aplicación que se esté realizando.

Detección de líneas

Una línea es una secuencia de píxeles en la que dos píxeles consecutivos están conectados, es decir, son vecinos en un entorno 3x3 de alguno de ellos. Cada píxel se puede conectar con alguno de sus 8 píxeles vecinos, y por lo tanto, se tendrá sólo 4 direcciones (tramos lineales) posibles: horizontal, vertical, de 45° y de -45°.

Detección de bordes

La detección de bordes es el procedimiento empleado más habitualmente para la detección de discontinuidades. Un borde o arista es la frontera entre dos regiones cuyos tonos de gris difieren significativamente o tienen propiedades diferentes, como ocurre en el caso de texturas. Si se requiere detectar los bordes se pondrá énfasis en los cambios bruscos de los niveles de gris de píxeles vecinos y suprimir aquellas áreas con valores de gris constantes.

Las técnicas de segmentación basadas en los bordes, son adecuadas cuando las regiones son suficientemente homogéneas de manera que la transición entre regiones se pueda realizar en base a los tonos de gris. En caso contrario es más adecuado utilizar las técnicas de segmentación basadas en regiones.

Un borde local (eje o arista local), es un píxel cuyo nivel de gris difiere significativamente del nivel de gris de algunos píxeles de su entorno. Es decir, hay diferencia de contraste local.

Ello se debe esencialmente a dos situaciones.

a). El píxel forma parte del borde entre dos regiones diferentes de la imagen (cada región tiene cierta homogeneidad en sus niveles de gris, con respecto a algún criterio de homogeneidad).

b). El píxel forma parte de un arco muy fino sobre un fondo de diferente nivel de gris.

Resultados

Una de las herramientas utilizadas para la segmentación de la imagen es el uso de la librería OpenCV (Open Source Computer Vision Library), la cual es una biblioteca libre de visión artificial originalmente desarrollada por Intel. Desde su creación se ha utilizado en infinidad de aplicaciones, desde sistemas de seguridad con detección de movimiento, hasta aplicaciones de control de procesos donde se requiere reconocimiento de objetos. Esto es debido a que su publicación se da bajo licencia BSD, que permite que sea usada libremente para propósitos comerciales y de investigación.

OpenCV es multiplataforma, existiendo versiones para GNU/Linux, Mac OS X y Windows. Contiene más de 500 funciones que abarcan una gran gama de áreas en el proceso de visión, como reconocimiento de objetos (reconocimiento facial), calibración de cámaras, visión etérea y visión robótica.

El lenguaje nativo de OpenCV es C/C++, el cual toma la base del lenguaje C, y es un lenguaje que abarca tres paradigmas de la programación: Programación Estructurada, Programación Genérica, y Programación Orientada a Objetos.

El lenguaje C++ fue creado por Bjarne Stroustrup en los laboratorios de At&T en 1983. En la actualidad, el C++ es un lenguaje versátil, potente y general, y es una de las mejores herramientas para el desarrollo de aplicaciones (Bustamante, y otros, 2004).

OpenCV proporciona unos tipos de datos básicos para su utilización. También provee de tipos de datos introducidos como ayuda al programador, para hacer que el acceso a la información de interés sea más simple.

Para implementar la acción de abrir imágenes utilizando OpenCV, se hace uso de la función `cvLoadImage`.

$$img = cvLoadImage(fileName, flag). \quad (2)$$

Para convertir un píxel de una imagen en color a uno en escala de grises con OpenCV, se suele hacer un promedio ponderado de la intensidad de cada uno de los tres colores en donde a cada color se le asigna un peso.

Al ser un promedio ponderado la suma de los tres pesos debe ser igual a 1. Los pesos utilizados por OpenCV se muestran en la fórmula.

$$gris = 0,2989 * rojo + 0,5870 * verde + 0,1140 * azul \quad (3)$$

Dentro de las funciones que tiene OpenCV para la manipulación de imágenes se encuentra `cvtColor` la cual puede convertir una imagen de un color a otro; por ejemplo, si se utiliza `cvtColor` con imágenes de 8 bits, la conversión tendrá alguna información perdida.

Para muchas aplicaciones, esto no va a ser notable, pero se recomienda el uso de imágenes de 32 bits en aplicaciones que necesitan toda la gama de colores o que conviertan una imagen antes de una operación y luego convertirla de nuevo.

En este caso para convertir la imagen en escala de grises se puede utilizar la siguiente función:

```
cvtColor(image,gray_image,CV_RGB2GRAY);
```

(4)

Las transformaciones dentro del espacio RGB como la adición / eliminación, se realiza invirtiendo el orden de los canales, la conversión a color de RGB de 16 bits (R5: G6: B5 o R5: G5: B5), así como la conversión a escala de grises.

Para realizar pruebas en el proceso de segmentación y análisis de la imagen de la retina, se utilizan las muestras de las imágenes contenidas en la base de datos DRIVE, la cual fue mencionada con anterioridad.



Figura 2 Conversión a escala de grises la imagen del fondo de ojo

Fuente: Imagen segmentada a partir de imágenes contenidas en la base de datos DRIVE.

Algoritmo de Canny

El algoritmo de Canny permite un conocimiento de contornos óptimo, y cuyo resultado es una evaluación a través de una comparación futura; presenta gran adaptabilidad para diversos tipos de imágenes, además de que su eficiencia sigue siendo alta a pesar de que dichas imágenes presenten ruido (Alonso, 2016).

En términos generales el algoritmo de Canny consiste en los siguientes pasos: Obtención del gradiente, supresión no máxima, histéresis de umbral, y cerrado de contornos.

Detector de bordes Canny.

La detección de bordes Canny es una técnica para extraer información estructural útil de diferentes objetos de visión y reducir drásticamente la cantidad de datos a procesar. Fue desarrollado por John F. Canny en 1986.

El algoritmo de Canny es usado para detectar todos los bordes existentes en una imagen. Este algoritmo está considerado como uno de los mejores métodos de detección de contornos mediante el empleo de máscaras de convolución y basados en la primera derivada. Los puntos de contorno son como zonas de píxeles en las que existe un cambio brusco de nivel de gris (Valverde, 2014).

Canny ha encontrado que los requisitos para la aplicación de detección de bordes en diversos sistemas de visión son relativamente similares. Por lo tanto, una solución de detección de bordes para abordar estos requisitos se puede implementar en una amplia gama de situaciones. Los criterios generales para la detección de bordes incluyen:

1. Detección de bordes con baja tasa de error, lo que significa que la detección debe captar con precisión los bordes que se muestran en la imagen como sea posible.
2. El punto de bordes detectados desde el operador debe localizarse con precisión en el centro del borde.
3. Un borde determinado en la imagen sólo debe marcarse una vez, y cuando sea posible, el ruido de la imagen no debe crear bordes falsos.

Para satisfacer estos requisitos, Canny utilizó el cálculo de variaciones; La función óptima en el detector de Canny se describe por la suma de cuatro términos exponenciales, pero puede ser aproximada por la primera derivada de un Gaussiano.

Entre los métodos de detección de bordes desarrollados hasta ahora, el algoritmo de detección de bordes Canny es uno de los métodos más estrictamente definidos que proporciona una detección buena y fiable.

El proceso del algoritmo de Canny en la detección de bordes se puede dividir en 5 pasos diferentes:

1. Aplicar filtro gaussiano para suavizar la imagen con el fin de eliminar el ruido.
2. Encontrar los gradientes de intensidad de la imagen.
3. Aplicar supresión no máxima para eliminar la respuesta espuria a la detección de bordes.
4. Aplicar doble umbral para determinar los bordes potenciales.
5. Borde de la oruga por histéresis: Finalizar la detección de los bordes suprimiendo todos los otros bordes débiles y no conectados a bordes fuertes.

En la siguiente figura se observa el resultado de procesar una imagen de fondo de ojo; esta muestra es obtenida de la base de datos DRIVE, a la cual se le aplicó el algoritmo de Canny para la detección de bordes.



Figura 3 Detección de bordes mediante el algoritmo Canny

Fuente: Imagen procesada a partir de imágenes contenidas en la base de datos DRIVE

Con este procedimiento se pueden identificar las venas y arterias del fondo de ojo; la arteria central de la retina puede constituir un solo vaso central o ingresar al ojo en un número variable de troncos, que se consideran variantes anatómicas normales.

Procesamiento de la imagen del fondo de ojo

Otro tipo de operaciones que pueden realizarse para la segmentación de la imagen del fondo de ojo, es la utilización de funciones básicas de OpenCv para tener acceso a los valores de intensidad de pixeles que contiene la imagen. Una de estas funciones es generar una matriz de puntos 2D para una imagen de escala de grises, la cual contiene un valor numérico correspondiente a la intensidad cuyo valor se encuentra entre 0 y 255.

En seguida se puede realizar una comparación sobre cada pixel para poder encontrar similitudes que ayuden a identificar ciertas áreas importantes del fondo de ojo.

En la siguiente figura se observa la detección del disco óptico del fondo de ojo, de una imagen de muestra contenida en la base de datos DRIVE.



Figura 4 Detección del Disco Óptico del fondo de ojo

Fuente: Imagen procesada a partir de imágenes contenidas en la base de datos DRIVE

Con el uso de funciones básicas mediante OpenCv para la manipulación de imágenes, se ha podido detectar la Papila o Disco Óptico, el cual corresponde a la cabeza del nervio óptico por donde las fibras ganglionares retinales confluyen e ingresan al tracto óptico. Normalmente tiene un color amarillo claro o rosáceo, redonda u oval (diámetro aproximado de 1,5 mm) en dirección vertical, plana (ni más adelante ni más atrás de la retina) y de bordes netos; su proyección espacial determina el punto o mancha ciega del campo visual (Mancha de Marriotte).

Así mismo mediante el uso de estas funciones que permiten obtener la imagen como una matriz 2D o 3D, y sus valores de intensidad de píxeles; se pueden detectar las estructuras oculares de la retina más importantes para su análisis; algunas de ellas son: La mácula, la fovea central, las arterias y venas centrales de la retina, entre otras.

Al identificar las áreas importantes del fondo de ojo, se podrá detectar cuando existan ciertas anomalías en la imagen que no corresponda a una retina saludable y que indiquen alteraciones o características específicas de algún padecimiento, para que el médico pueda realizar un diagnóstico oportuno en la detección de algunas enfermedades relacionadas con la retina.

Conclusiones

Con el procesamiento y análisis de imágenes digitales del fondo de ojo, se pueden obtener características estructurales de la retina que sirvan de apoyo en la detección y/o evaluación clínica de enfermedades relacionadas con la retina.

Para la obtención de la imagen del fondo de ojo, es necesario utilizar un oftalmoscopio, un adaptador, y un dispositivo que permita capturar la imagen; este dispositivo puede ser un teléfono inteligente que contenga una cámara integrada y pueda adaptarse a la herramienta médica.

Gracias al uso de la programación estructurada, y a la utilización de algoritmos pertenecientes a la librería OpenCv para la segmentación de la imagen, se puede obtener de la misma un pixel o un grupo de píxeles que pertenezcan a estructuras de interés para su análisis y procesamiento.

Se pretende dar continuidad a esta investigación en trabajos futuros, para realizar un sistema móvil que permita enviar la imagen del fondo de ojo capturada hacia un servidor que realice la segmentación de la imagen, así como la descripción de las estructuras más importantes de la retina, y que la información procesada sea devuelta al dispositivo móvil, complementando así el procedimiento de la evaluación clínica.

En general, la segmentación de imágenes digitales del fondo de ojo permite tener un método no invasivo para poder describir y extraer características que ayuden a detectar y diagnosticar enfermedades vinculadas con la retina.

Referencias

Alonso L., Benítez C., Morales O., & Silva D. (2016). Análisis de algoritmos para reconocimiento de imágenes digitales. *Revista de Sistemas Computacionales y TIC's. ECORFAN. Vol.2 No.5* 82-93.

Ambriz C. F., Avilés F. J., Cano R. J., & Flores P. J. (2015). Desarrollo de Interfaz Gráfica para la Experimentación de la Detección de células. *Revista de Sistemas Computacionales y TIC's. ECORFAN. Vol.1 No.1* 70-74.

Bankman, I. (2009). *Handbook of Medical Image Processing and Analysis*. San Diego, California: In-Chief.

Bustamante, P., Aguinaga, I., Aybar, M., Olaizola, L., Lazcano, I. (2004). *Aprenda C++ Básico como si estuviera en primero*. Tecnun.

De la Fuente, J. A., Garduño, E., & Cuevas, F. J. (2011). Estado actual de las técnicas computacionales para la valoración del disco óptico en glaucoma. *Memorias del Congreso Mexiquense CTS+I*, 155-161.

eDiagnostic. (2017). *Oftalmología*. Obtenido de <http://www.ediagnostic.es/especialidades/teleoftalmologia>

Fernández, A. (2012). Técnica de exploración del fondo de ojo. *AMF Actualización en Medicina de Familia*, 383-387.

Gavidia, C. G. (2014). Segmentación de imágenes médicas mediante algoritmos de colonias de hormigas. San Miguel.

HERALDO. (04 de Octubre de 2016). Las enfermedades cerebrales se manifiestan en la retina del ojo. Obtenido de <http://www.heraldo.es/noticias/suplementos/salud/2016/10/04/las-enfermedades-cerebrales-manifiestan-retina-del-ojo-1093558-1381024.html>

J.J. Staal, M.D. Abramoff, M. Niemeijer, M.A. Viergever, B. van Ginneken, "Ridge based vessel segmentation in color images of the retina", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2004, vol. 23, pp. 501-509.

Kalbakdij, S., Lebrero, P., & Sánchez, S. (2009). *Aplicaciones del tratamiento inteligente de imágenes*. Universidad Complutense de Madrid.

Li, H., Ko, L., Lim, J. H., Liu, J., Wong, T. Y., & Sun, Y. (2008). Automatic opacity detection in retro-illumination images for cortical cataract diagnosis. *2008 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 553-556.

Litewka, S. (2005). Telemedicina: Un desafío para América Latina. *Acta Bioethica* 2005; 11(2), 127-132.

Marcano, R. J. (2015). *Medicina Preventiva Santa Fe*. Obtenido de http://www.medicinapreventiva.com.ve/fondo_ojo.htm

Marckmann, G., & Goodman, K. W. (2006). Introduction: Ethics of Information Technology in Health Care. *IRIE Introduction: Ethics of Information Technology in Health Care*, 2-5.

MedlinePlus. (2016). Enfermedades de la retina. Obtenido de <https://medlineplus.gov/spanish/retinaldisorders.html>

Montaño, L. M. (2007). Imagenología y detectores. *Cinvestav*, 16-23. Obtenido de *Montaño Zetina*.

Morales, H. I., Sánchez, J. C., & Díaz Méndez, J. A. (2016). Cataract Detection Techniques: A Review. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 14, NO. 7, 3074-3079.

OpenCV. (2014). OpenCV 2.4.10.0 documentation. Obtenido de <http://www.swarthmore.edu/NatSci/mzucker1/opencv-2.4.10-docs/index.html>

Pratx, G., & Xing, L. (2011). GPU computing in medical physics: A review. *Medical Physics*, Vol. 38, No. 5, May 2011, 2685-2697.

Raut, S. A., Raghuwanshi, M., & Dharaskar, R. (2009). Image Segmentation – A State-Of-Art Survey for Prediction. *Advanced Computer Control, 2009. ICACC '09. International Conference on.*

Reyes, R., Soto, L., & Elizarrarás, R. (2017). La innovación tecnológica a través de proyectos de ingeniería con enfoque sistémico. *Revista de Aplicación Científica y Técnica. ECORFAN. Vol.3 No.7 41-50.*

Russo, A., Morescalchi, F., Costagliola, C., & Semeraro, F. (2014). Comparison of Smartphone Ophthalmoscopy With Slit-Lamp Biomicroscopy for Grading Diabetic Retinopathy. *American Journal of Ophthalmology 159(2)*, 360-364.

Srinivasan, V. (2003). Instrumentos y Equipos Oftalmológicos. Instituto Lions Aravind De Oftalmología Comunitaria.

Valverde, J. (2014). Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny. Escuela Académico Profesional de Informática. Universidad Nacional de Trujillo.

Villalobos, F. M., & Felipe, E. M. (2008). Segmentación de la red vascular en imágenes de retina basado en la matriz de coocurrencia de niveles de gris. Conference: IXX Simposio Mexicano De Cirugía Asistida Por Computadora Y Procesamiento De Imágenes Médicas/MEXCAS 2008.

Yang, M., Yang, J.-J., Zhang, Q., & Li, J. (2013). Classification of retinal image for automatic cataract detection. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) Conference Proceedings: 674.

Zhou, Z., Huang, C.-C., Shung, K. K., Tsui, P.-H., Fang, J., Ma, H.-Y., Lin, C.-C. (2014). Entropic Imaging of Cataract Lens: An In Vitro Study. *PLoS ONE 9(4)*: e96195. doi:10.1371/journal.pone.0096195.