

Medición de diámetro pupilar ocular

Arturo Bianchetti

Coordinación de Innovación Técnica – Gerencia de Sistemas y Telecomunicaciones (GSyT) – ANSES
abianchetti@gmail.com

CONTEXTO

El presente trabajo, forma parte de la línea de investigación sobre biometría de la Coordinación de Innovación Técnica, dependiente de Gerencia de Sistemas y Telecomunicaciones (GSyT) de ANSES.

RESUMEN

La pupila natural del ojo humano suele ser aproximadamente circular y, en determinadas condiciones externas, su diámetro depende del sujeto y de su estado psicofísico. Para un dado sujeto, el patrón de aberraciones, la difracción, la profundidad de campo y la iluminación retiniana dependen del diámetro pupilar, el cual a su vez varía en función de la iluminación ambiente. El conocimiento de este diámetro es importante tanto en pruebas objetivas como subjetivas en las cuales se determina la calidad visual. La medición del diámetro pupilar también se utiliza como indicador del nivel de vigilia o anestesia o para detectar la presencia de narcóticos. En este trabajo se presenta un software desarrollado en MATLAB (denominado AS08) capaz de procesar imágenes y de medir el diámetro de una pupila circular. Se consideran imágenes registradas dentro del espectro visible y también en el infrarrojo cercano. En el software AS08 se utilizan varias técnicas de procesamiento de imágenes, entre las cuales cabe destacar la transformada de Hough, por sus conocidas virtudes referentes al reducido consumo de recursos computacionales para detectar círculos.

Palabras clave: diámetro pupilar, estado psicofísico, calidad visual, filtrado espacial, transformada de Hough.

1. INTRODUCCION

Cuando se determina la calidad visual mediante pruebas objetivas (aberrometría ocular y corneal, medición de la función de punto extendida, etc.) o subjetivas (agudeza visual, deslumbramiento, sensibilidad al contraste, etc.) suele ser de interés¹⁻⁸ conocer el diámetro pupilar ocular pues este afecta las aberraciones, la difracción, la profundidad de foco, la iluminación retiniana, etc. La determinación del diámetro pupilar también es importante en ciertos tratamientos para corregir la visión como es el caso de la cirugía refractiva (Lasik). Para identificar pacientes que no son aptos para la cirugía, se determina su diámetro pupilar en un cuarto oscuro⁹⁻¹¹ y aquellos que presentan diámetros grandes son advertidos de que corren un mayor

riesgo de padecer de distorsiones visuales nocturnas permanentes tales como halos, imágenes múltiples y pérdida de sensibilidad al contraste. Por otra parte, aunque algunos sujetos pueden tener pupila elíptica o padecer de coloboma o deformaciones de iris causadas por cirugías, la mayoría de las pupilas pueden aproximarse a circulares.

2. LINEAS DE INVESTIGACION y DESARROLLO

En este trabajo presentamos el software AS08¹² el cual, basándonos en Ref.13 pero realizando algunas adaptaciones, desarrollamos en MATLAB para detectar la posición y el diámetro de una pupila ocular circular presente en una imagen. El software puede procesar imágenes en formato RGB convencional o en escala de grises, registradas en el espectro visible o en el infrarrojo cercano. Adicionalmente AS08 contiene un proceso de auto-calibración que permite medir el diámetro pupilar no solo en píxeles sino también en milímetros. Esto brinda una considerable ventaja respecto a otros dispositivos capaces de medir el tamaño pupilar solamente en píxeles tales como el Eyetracker de Arrington Research. El software AS08 puede operar en modo autónomo (AU) o en modo de comandos extendidos (EX) según lo desee el usuario. En modo AU no hay intervención del usuario por lo que AS08 puede integrarse a procesos automatizados mientras que en modo EX el usuario elige algunos parámetros con lo cual facilita el procesamiento de la imagen.

AS08 contiene varios módulos de pre-procesamiento para mejorar y adecuar la imagen ocular adquirida al módulo de detección de círculos basado en la transformada de Hough.

La imagen ocular que se presenta en la parte izquierda Figura 1 presenta bajo contraste y los niveles de gris presentes en ella corresponden a un rango dinámico reducido.

Para mejorar la calidad de una imagen de rango dinámico reducido realizamos una expansión del mismo. Caracterizamos el nivel de intensidad en todos los puntos de la imagen al finalizar este proceso mediante la función de expansión de contraste¹³, $g(x, y)$, definida mediante:

$$g(x, y) = \frac{255}{(J_{MAX} - J_{MIN})} \cdot (f(x, y) - J_{MIN}) \quad (1)$$

Luego de aplicar la expansión, se utiliza al máximo el rango dinámico del dispositivo de

presentación (0-255). La imagen resultante se muestra en la Figura 1 y, debido a que se ha aumentado la separación de los niveles de gris que la componen, hay una mejoría de contraste considerable.

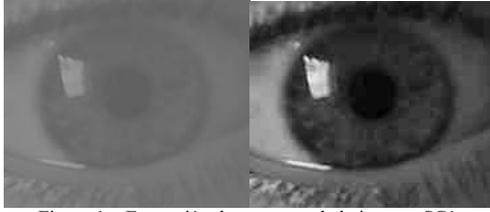


Figura 1 – Expansión de contraste de la imagen SC1.

Aunque en una imagen, aprovechando al máximo el rango dinámico del dispositivo de presentación, J tome valores entre 0 y 255, en varios casos es necesario incrementar el contraste, dependiendo de las características de la imagen, para niveles de gris oscuros (cercanos a 0) o claros (cercanos a 255). Para ello, suele utilizarse¹³ una función de corrección *gamma*, $G[f(x, y)] = g(x, y)$, tal que $g(x, y)$ es la distribución de niveles de gris en todos los puntos de la imagen obtenida al finalizar este proceso. Se tiene¹³

$$g(x, y) = \frac{255}{(255)^{\gamma}} \cdot (f(x, y))^{\gamma} \quad (2)$$

En la Figura 2 se muestra el resultado de aplicar corrección de contraste y luego corrección *gamma* a una imagen capturada en el infrarrojo extraída de CASIA¹⁴.



Figura 2 – Expansión de contraste y corrección *gamma* de la imagen IR1.

Además, la imagen suele tener ruido que es necesario reducir mediante algún tipo de filtro para que las etapas posteriores del procesamiento funcionen adecuadamente. En AS08, el ruido se reduce empleando *filtrado espacial* con la máscara de promediado que se muestra en la Figura 3.

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Figura 3 – Máscara de promediado

En la Figura 4 mostramos el efecto que causa el filtro de promediado en la imagen real IR1 con un agregado de ruido. Se puede apreciar que la reducción de ruido se hace a costa de una pérdida en el nivel de detalle pero esto no afecta al proceso de detección pupilar ocular.

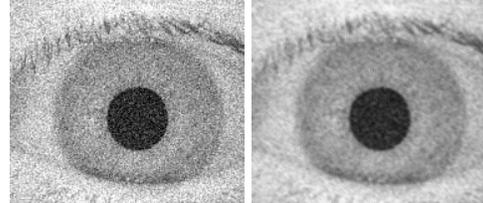


Figura 4 - Aplicación de máscara de promediado a imagen IR1 extraída de CASIA.

Dado que solamente se desea conocer la posición y el diámetro pupilar, se realiza un umbralizado para remover información irrelevante de la imagen que resulta del suavizado. El umbralizado limita los niveles de gris posibles en cada píxel de manera que, mientras que en la imagen de entrada cada píxel puede tener 256 niveles de gris diferentes (8 bits), a la de salida solo puede tener dos (1 bit). Todos los niveles de gris superiores a un nivel de gris umbral, que denotamos T , son transformados al valor 255 y los inferiores al valor 0.

El valor de T se elige de manera tal que la imagen umbralizada contenga información suficiente para detectar la pupila pero excluya información irrelevante que podría interferir en la detección. En la Figura 5 mostramos el perfil de niveles de gris en función de la coordenada x para la imagen IR1.

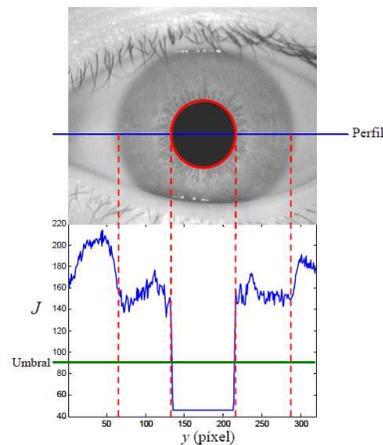


Figura 5 - Perfil de nivel de intensidad de la imagen IR1.

En general para una imagen ocular registrada tanto dentro del espectro visible como en el infrarrojo cercano, el área de la pupila corresponde a una de las áreas de menor nivel de gris. Un nivel umbral adecuado debe ser mayor que el nivel de gris de la pupila y menor que el del iris. Mientras más oscuro sea el iris más parecido será su nivel de gris a

la pupila y más difícil será escoger un valor de umbral adecuado. En base a pruebas realizadas con AS08, si J_{MAX} e J_{MIN} son los valores máximo y mínimo de J teniendo en cuenta toda la imagen (la cual ya ha sido suavizada de manera que se ha eliminando ruido que podría interferir en la determinación de J_{MAX} y J_{MIN}) y si definimos un coeficiente de umbralizado, que denotamos P y es tal que $0 < P < 1$, entonces evaluamos T mediante:

$$T = J_{MIN} + (J_{MAX} - J_{MIN}) \times P \quad (3)$$

donde J_{MAX} e J_{MIN} corresponden a valores máximos y mínimos de intensidad y definimos P como el coeficiente de umbralizado con $0 < P < 1$.

En modo AU, AS08 considera $P = 0.1$ mientras que en modo EX, el usuario puede escoger varios valores de P hasta encontrar un umbral adecuado. En la Figura 6, mostramos el resultado del umbralizado para la imagen de la Figura 5.

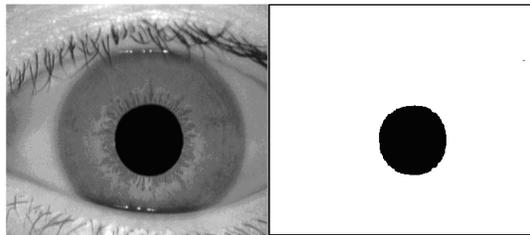


Figura 6 - Umbralizado de la imagen IR1.

Con el objetivo de simplificar aún más la imagen sobre la cual se va a realizar la detección de círculos, utilizamos¹³ la conocida máscara de Laplace para detección de bordes. El procedimiento es similar al de promediado pero los pesos de la máscara son diferentes (Figura 7). Esta máscara tiene la propiedad de resaltar las transiciones o bordes y eliminar las zonas de nivel de gris constante.

$$\frac{1}{9} \times \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline -1 & 8 & -1 \\ \hline -1 & -1 & -1 \\ \hline \end{array}$$

Figura 7 - Máscara de Laplace.

El resultado de aplicar la máscara de Laplace a la imagen IR1 umbralizada, se muestra en la Figura 8. La imagen umbralizada presenta una transición de J más abrupta (por lo tanto más simple) que la imagen de ejemplo presentada en la Figura 5. La imagen a la salida solo contiene un número reducido de píxeles en con niveles de gris o muy altos o muy bajos, es decir que puede contener más de dos niveles de gris. Para que poder detectar círculos en esta imagen utilizando la transformada de Hough debemos

binarizar la imagen, es decir limitar la imagen a solo dos niveles de gris posibles, 0 y 255.

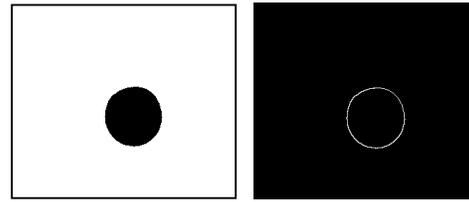


Figura 8 - Resultado de la aplicación de la máscara de Laplace a la imagen IR1. Panel izquierdo: imagen a la salida del umbralizado. Panel derecho: imagen a la salida de la aplicación de la máscara

El procedimiento de detección de círculos lo hemos desarrollado adaptando la metodología presentada en Ref.13 para detección de líneas rectas a detección de círculos. En este trabajo se hace uso de la conocida ecuación paramétrica de un círculo de centro $(x, y) = (a, b)$ y radio R :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (4)$$

La transformada de Hough opera del siguiente modo:

I. Tomando como entrada la imagen binaria obtenida al finalizar el pre-procesamiento (que en el caso ideal contiene una circunferencia ubicada en el lugar donde está la pupila), encontramos todos los píxeles de interés que son tales que tienen $J_{IMAGEN}=1$ y coordenadas (x_q, y_q) (con $q=1, 2, \dots, Q$).

II. Teniendo en cuenta un radio inicial $r_{min} = 1$, aplicamos la transformada de Hough de manera que para cada punto (x_q, y_q) del espacio imagen, en el espacio de parámetros se tiene un círculo de radio 1 y, considerando los Q puntos del espacio imagen, en el espacio de parámetros se tienen Q círculos que se intersectan en algunos puntos del plano (a, b) dando lugar a máximos absolutos o no de J_{HOUGH} (Figura 9).

III. Repetimos el procedimiento descrito en el paso II para cada uno de los radios r_k de interés, siendo $1 \leq r_k \leq 60$, y evaluamos el nivel de gris $J_{MAX,k}$ correspondiente al máximo (absoluto o no) de J_{HOUGH} . Los resultados obtenidos para cada r_k se guardan en diferentes capas del array acumulador.

IV. Considerando todas las capas del array acumulador, que se muestra en la buscamos el píxel del plano (a, b) que contiene el máximo valor de $J_{MAX,k}$ y denominamos r_{PICO} al valor de r_k en esta capa. Las coordenadas (a_{PICO}, b_{PICO}) de este píxel en el plano (a, b) coinciden con las coordenadas del centro del círculo en el plano (x, y) y el radio r_{PICO} correspondiente a esta capa es el radio del círculo detectado (Figura 10).

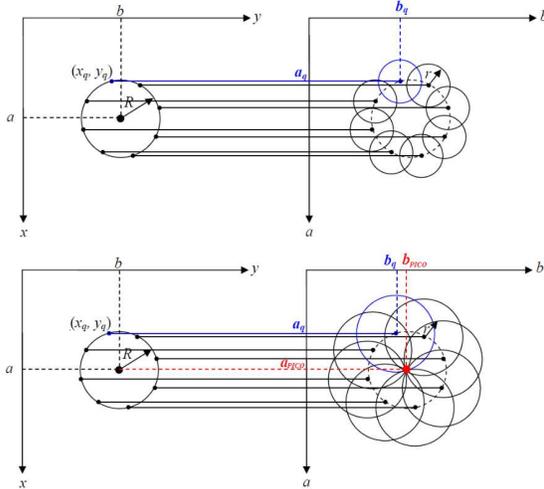


Figura 9 - Arriba: transformada de Hough para $r < R$.
Abajo: transformada de Hough para $r = R$.

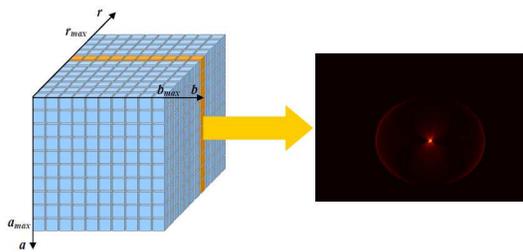


Figura 10 - Panel izquierdo: array acumulador de la transformada de Hough. Panel derecho: transformada de Hough de la imagen de Laplace de la Figura 8.

En la Figura 11 se muestra el resultado de la detección pupilar para la imagen IR2. Se puede apreciar que la detección es satisfactoria pero no perfecta debido a que la pupila no es estrictamente circular.

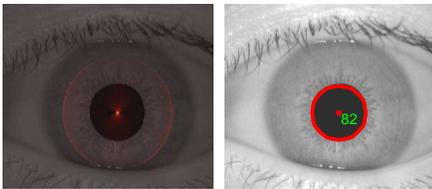


Figura 11 - Detección pupilar exitosa para la imagen IR2. Panel derecho: superposición de imagen original y transformada de Hough. Panel izquierdo: salida de AS08.

El resultado presentado en la Figura 11 corresponde a diámetro en píxeles. Para convertir este resultado a milímetros se utiliza un sticker de diámetro conocido que se utiliza de referencia y que también es detectado por AS08 utilizando la transformada de Hough. Luego utilizando ec.(5) es posible presentar el diámetro detectado en milímetros,

$$D_{pupila} = d_{pupila} \cdot \left(\frac{D_{calibración}}{d_{calibración}} \right) \quad (5)$$

donde D_{pupila} es el diámetro en milímetros de la pupila, d_{pupila} es el diámetro en píxeles de la pupila

$D_{calibración}$ es el diámetro conocido del sticker y $d_{calibración}$ es el diámetro medido en píxeles del sticker. En la Figura 12 se muestra la detección pupilar y de sticker para la imagen SC2, en este último caso el resultado se presenta en milímetros.

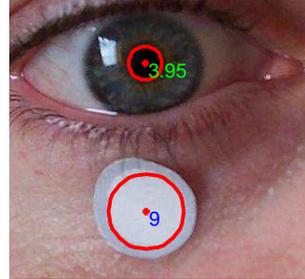


Figura 12 - Detección de diámetro pupilar en milímetros.

3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

En el presente trabajo se implementa un software desarrollado en Matlab (denominado AS08) que, a partir de una imagen conteniendo una pupila ocular circular, puede detectar eficientemente la posición de la pupila y medir su diámetro tanto en píxeles como en milímetros. El software puede operar en modo autónomo (AU) o en modo de comandos extendidos (EX) según lo desee el usuario. La ventaja del modo AU es que no requiere esfuerzo del usuario y su desventaja es que, para imágenes con contraste pobre o con regiones oscuras no correspondientes a la pupila (tales como sombras ocasionadas por la ubicación de la fuente de iluminación), puede fallar la detección. Por otro lado, el modo EX requiere que el usuario esté dispuesto a ingresar una serie de parámetros pero tiene la ventaja de se puede medir el diámetro pupilar para imágenes con condiciones de contraste pobres o con sombras. Para cualquier imagen capturada, la probabilidad de detectar con éxito la región pupilar es mayor cuanto mayor sea el contraste visual iris-pupila.

Para determinar el diámetro pupilar, el software AS08 utiliza la transformada de Hough, la cual al ser apta solo para patrones circulares, no permite detectar satisfactoriamente pupilas elípticas, con coloboma o con deformaciones causadas por cirugías. Esta es la principal limitación del software aunque la mayoría de las pupilas del ojo humano en condiciones cotidianas son casi circulares.

4. FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

Se está articulando horizontalmente con la Universidad de Buenos Aires.

5. BIBLIOGRAFIA

1. S.A.Comastri, G.Martin and T.Pfortner "Analysis of pupil and corneal wave aberration data supplied by the SN CT 1000 topography system", Optik (International Journal for Light and Electron

- Optics, Elsevier, Amsterdam) 117 (11), 537-545 (2006).
2. S.A.Comastri, R.Echarri and T.Pfortner, "Correlation between visual acuity and pupil size", 5th Iberoamerican Meeting on Optics and the 8th Latin American Meeting of Optics, Lasers and their Applications, Isla Margarita-Venezuela 3-8 October 2004, Proceedings of SPIE (International Society for Optical Engineering, Washington) 5622,1341-1346, (2004).
 3. P. L. Kaufman, F. H. Adler, A. Alm, Fisiología del ojo: Aplicación clínica, Elsevier España, 2003.
 4. S.A.Comastri, L.I.Perez, G.D.Pérez, G.Martin and K.Bastida, "Zernike expansion coefficients: rescaling and decentering for different pupils and evaluation of corneal aberrations", Journal of Optics A: Pure and Applied Optics (Institute of Physics Publishing, London) 9, 209-221 (2007).
 5. E. Colombo, S.A. Comastri, L. Issolio, R. Echarri, "Pupil light reflex produced by glare under mesopic adaptation", Journal of Light & Visual Environment (the Illuminating Engineering Institute of Japan, Tokyo) 31 (2), 70-79, (2007).
 6. S.A.Comastri, Liliana I.Perez, Gervasio D.Pérez, Karina Bastida, and G. Martin, "Wavefront aberrations: analytical method to convert Zernike coefficients from a pupil to a scaled arbitrarily decentered one", 6th Iberoamerican Meeting on Optics and 9th Latin American Meeting of Optics, Lasers and their Applications, Campinas-Brasil 21-26 October 2007, Edited by N.U.Wetter and J.Frejlich (American Institute of Physics, New York), Proceedings American Institute of Physics 978, 69-74 (2008)
 7. S.A. Comastri, K. Bastida, G. Martin y A. Bianchetti, "Aberrometrías oculares y de otros sistemas ópticos: transformación de coeficientes Zernike al contraer y desplazar transversalmente la pupila", Edición Universidad de Belgrano (Buenos Aires) Documento de Trabajo No 208,1-17, 2008 http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/208_comastri.pdf
 8. S.A. Comastri, G.D. Pérez, G. Martin, A. Bianchetti, "Aberraciones Zernike corneales para diferentes pupilas: precisión en los parámetros y aplicaciones", Óptica Pura y Aplicada (Journal Sociedad Española de Óptica, Madrid). Aceptado septiembre 2008.
 9. L.J. Maguire, "Keratorefractive surgery, success, and the public health", A.M. J. Ophthalmol, March 1994, (3):177-394.
 10. J.J. Salz, W. Trattler, "Pupil size and corneal laser surgery", A.M. J. Ophthalmol, August 2006, (4):373-9.
 11. M.J. Mannis, W.A. Segal, J.K. Darlington, "Making sense of refractive surgery in 2001: why, when, for whom, and by whom?", Mayo Clinic Proc., August 2001, 76(8):823-9.
 12. Bianchetti, Arturo y Comastri, Silvia A. (2008). Desarrollo de una metodología para medir el diámetro pupilar ocular a partir del procesado de imágenes conteniendo el ojo. Documento de Trabajo N° 221, Universidad de Belgrano. http://www.ub.edu.ar/investigaciones/dt_nuevos/221_bianchetti.pdf
 13. R.C. Gonzalez, R. E. Woods, Digital Image Processing, Second Edition, Prentice Hall (2001).
 14. Chinese Academy of Sciences (CASIA) <http://www.cbsr.ia.ac.cn/english/Databases.asp>