

Método óptico para la detección de bordes robusto al desenfoco

J. Mazzaferri, S. Ledesma

Laboratorio de Procesado de Imágenes, Departamento de Física J.J. Giambiagi, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

e-mail: jmazza@df.uba.ar

Distintos métodos ópticos para detección de bordes han sido estudiados en los últimos años. En un trabajo reciente, hemos presentado un extractor de bordes invariante a rotaciones que consiste en el diseño de un filtro para un correlador óptico con arquitectura de Vander Lugt⁽¹⁾. Este método, al igual que la mayoría de los métodos para extracción de características basados en correladores ópticos requieren que la escena a procesar sea ubicada con cierta precisión en el plano de entrada. Esta condición limita, por ejemplo, el procesamiento de imágenes en 3 dimensiones, ya que el método funciona correctamente sólo en un región axial limitada del objeto. Las pupilas anulares han sido estudiadas y utilizadas para regular la profundidad de campo y la resolución transversal de sistemas ópticos. En este trabajo presentamos un filtro de fase y amplitud binaria que combina un método extractor de bordes con una pupila anular de fase que tiene un efecto apodizante axial. Este diseño permite al dispositivo extraer adecuadamente los bordes de un conjunto de figuras ubicadas en distintos planos axiales. Se muestran resultados de simulación numérica y experimentales.

Palabras clave: extracción de características, resaltado de bordes, reconocimiento óptico de formas

Different methods for edge extraction have been studied in the past years. In a recent paper we have presented a rotation invariant edge extractor based in the design of an optical filter placed in the frequency plane of a Vander Lugt correlator⁽¹⁾. As almost all the optical methods based in a correlation architecture, this method requires an important precision in the position of the input scene. This condition limits the processing of three dimensional objects, because the filters are designed for working in a given region of the axial axis. On the other hand, annular pupils have been widely used to regulate the depth of focus and the transversal resolution of optical systems. In this paper we present a new filter which complex transmittance (with binary amplitude) combines an edge extractor and an annular pupil with an axial apodizing effect. This design allow us to perform edge extraction of objects placed in different axial coordinates Numerical simulation results and experimental images are shown.

Keywords: feature extraction, edge enhancement, optical pattern recognition

I. INTRODUCCIÓN

Los filtros extractores de características han sido bien estudiados, ya sea desde el punto de vista de procesamiento digital como del procesamiento óptico⁽²⁻⁹⁾. Últimamente ha resurgido el interés en los procesadores ópticos capaces de realizar estas operaciones a tiempo real^(10,11), ya que podrían tener interesantes aplicaciones tanto en microscopía, particularmente con muestras biológicas, como en medicina en estudios realizados in vivo^(12,13).

En algunas aplicaciones particulares, puede ser de interés que las características sean reconocidas en objetos que no sean planos, es decir en objetos tridimensionales o bien en objetos que puedan moverse en la dirección axial⁽¹⁴⁾. Por otra parte, en el campo de la microscopía y la litografía se viene trabajando en el diseño de pupilas que permitan modificar la respuesta tridimensional del haz⁽¹⁵⁾, ya sea variando su profundidad de foco como su respuesta transversal. Quizás el diseño más sencillo y eficiente es el de las pupilas anulares⁽¹⁶⁾ de fase.

En este trabajo presentamos un extractor de bordes

que combina las características de un filtro omnidireccional con la capacidad de ser robusto a desplazamientos del objeto. El filtro es ubicado en un correlador convergente y es representado en un modulador operando en modo sólo de fase. En las secciones siguientes se presenta el diseño del filtro, el dispositivo experimental, los resultados y por último, las conclusiones.

II. DISEÑO DEL FILTRO

Supongamos que se tiene el correlador convergente esquematizado en la Figura 1. La luz emitida por la fuente puntual S es focalizada en el plano π_f por la lente L_1 . Si en el plano π_0 se ubica un objeto semitransparente $o(x_0)$, como es bien sabido, en el plano π_f se obtiene la figura de difracción de Fraunhofer del objeto. En la aproximación escalar de la difracción el campo resulta proporcional a la transformada de Fourier de la función $o(x_0)$, que describe al objeto. En este plano se ubica un filtro de frecuencias $H^*(x_f)$. Luego, una segunda lente L_2 , forma imagen de la correlación $c(x_i) = o(x_0) \otimes h(x_0)$

sobre el plano imagen π_i , donde $h(x_0)$ es la transformada inversa de la función $H(x_f)$.

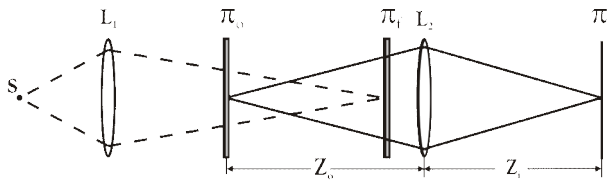


Figura 1. Correlador convergente.

En un trabajo previo¹ hemos presentado un filtro que realiza extracción de bordes utilizando esta arquitectura. Aunque se ha mostrado que el método tiene un muy buen rendimiento, cabe destacar que un desplazamiento del objeto $o(x_0)$ sobre el plano axial podría arrojar resultados distorsionados en el plano final.

El filtro desarrollado fue obtenido a partir de un extractor de bordes unidireccional. Este detector unidireccional está basado en dos operaciones que se realizan en forma simultánea. Por un lado, para reducir la influencia del ruido, se aplica un filtrado pasabajos Gaussiano. Por otra parte, la extracción en sí misma se realiza por medio de una derivación a primer orden. Realizando una descomposición en armónicos circulares del detector unidireccional, se obtiene un detector omnidireccional de bordes. El filtro resultante es un filtro complejo y en nuestro caso se ha binarizado la amplitud con el objeto de implementarlo físicamente. En la Figura 2 se muestran las transmitancias de fase y amplitud del filtro

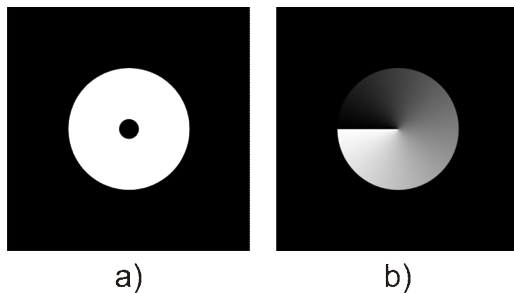


Figura 2. Transmitancia del detector de bordes: a) amplitud, b) fase. En la imagen de amplitud blanco y negro denotan transmisiones 1 y 0 respectivamente, en la imagen de fase la escala de grises que va de negro a blanco denota fases que van de 0 a 2π .

Por otra parte, las pupilas anulares de fase suelen ser usadas para incrementar la profundidad de foco de sistemas ópticos. Más generalmente, estas pupilas pueden ser utilizadas para producir diferentes resultados de un sistema óptico dependiendo de la selección de parámetros de ancho y transmitancia de los anillos. Básicamente se puede obtener apodización o superresolución axial con las posibles combinaciones para las respuestas transversales.

Para la construcción del filtro compuesto se ha elegido un filtro anular de dos zonas que produce una

respuesta axial extendida o apodizante, combinado con un extractor de bordes. Los filtros anulares que producen apodización axial pueden producir desde respuestas que siendo más extendidas que el sistema sin el filtro difieren en forma muy poco a la respuesta con filtro, a respuestas muy extendidas en el eje axial que pueden ser casi planas en la zona cercana al plano de mejor enfoque (BIP, del inglés "best image plane") o incluso pueden tener un mínimo local en este plano. En este último caso, la profundidad de foco es muy grande y puede ser muy adecuada si se requiere gran profundidad de foco y si no hay requerimientos de intensidad constante a lo largo del enfoque del sistema.

En la Figura 3-a) se muestra un esquema de la pupila anular empleada en este trabajo. En la Figura 3-b) se grafica la intensidad axial para los sistemas con y sin pupila anular, como función de la coordenada axial relativa $\Delta u = u - u_0$ donde $u = u(z_0)$ se define como⁽¹⁷⁾:

$$u = 4kz_0 \sin^2(\alpha/2) \quad (1)$$

y $u_0 = u(z_0^0)$ es la posición del plano de mejor imagen. En la ec. (1), $k=2\pi/\lambda$ y λ es la longitud de onda de la luz emitida por la fuente. Para el anillo elegido, la profundidad de foco aumenta en un factor 2.3 con respecto al sistema sin pupila. Adicionalmente, el centro del BIP decrece al 25% del valor de los máximos secundarios.

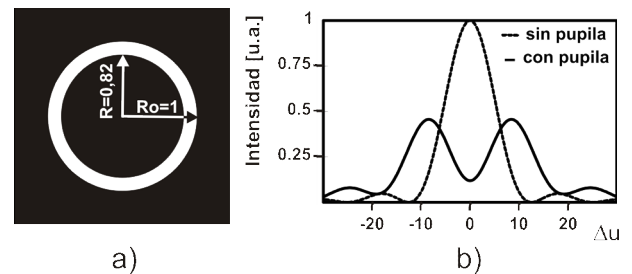


Figura 3. a) Transmisión de fase para la pupila anular con $R/R_0 = 0.82$ y modulación $0 - \pi$. R_0 denota el radio de la pupila de amplitud. b) Respuesta axial.

El filtro combinado, compuesto por la pupila anular y el extractor de bordes se muestra en la Figura 4

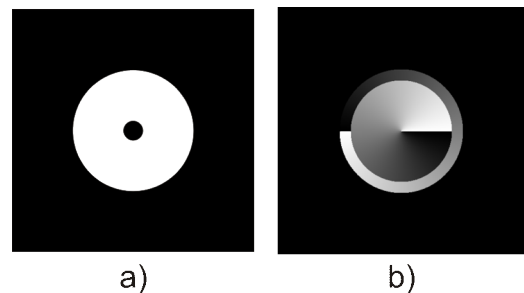


Figura 4. Transmitancia del detector de bordes combinado con el filtro apodizante axial, a) amplitud, b) fase.

III. DISPOSICION EXPERIMENTAL

El detector de bordes propuesto fue testeado experimentalmente y fue comparado con el detector sin apodizador. El dispositivo experimental utilizado se muestra en la Figura 5. Un láser de Argón ($\lambda = 457\text{nm}$) incide sobre la lente L_1 . La transformada de Fourier de la escena representada en el primer modulador SLM_1 es obtenida sobre el plano donde se ubica el segundo modulador SLM_2 . Los polarizadores P_1 y P_2 y las láminas retardadoras LR_1 y LR_2 configuran el SLM_1 para trabajar en modo de amplitud ^(18,19). La amplitud del filtro es representada por la máscara binaria MB y el diafragma D que es ubicado en contacto con SLM_2 . En este segundo modulador se representa la fase del filtro. Los polarizadores P_3 y P_4 y las láminas retardadoras LR_3 y LR_4 configuran el SLM_2 para trabajar en modo de fase ^(18,19). La lente L_2 forma imagen de la correlación sobre la cámara CCD al final del correlador. Ambos moduladores son pantallas de TV de cristal líquido nemático que provienen de un Video Proyector (Proxima) y que son controlados mediante una PC. Las imágenes son capturadas por una cámara CCD conectada también a una PC.

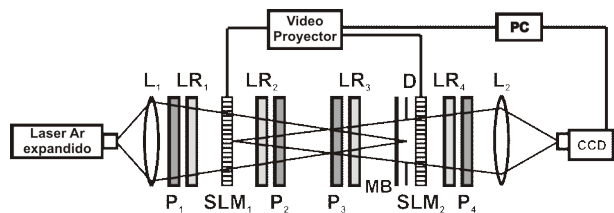


Figura 5. Arquitectura del correlador convergente trabajando con moduladores espaciales de luz.

IV. RESULTADOS

Con el objeto de estudiar el rendimiento del filtro propuesto y su robustez a desplazamientos del objeto, hemos comparado como funciona el filtro extractor de bordes con y sin anillo apodizante. La escena a estudiar consistió en un objeto binario con esquina redondeada, como se ve en la Figura 6 a). El diafragma D se ajustó para que funcione como diafragma de apertura del sistema de forma tal que la pupila de salida del sistema es la imagen de D por la lente L_2 . Se comparan las imágenes obtenidas con los filtros de las figuras 2 y 3 para diferentes posiciones del objeto. Las imágenes de los bordes fueron registradas con ambos filtros para distintas posiciones z_0 del objeto, es decir para diferentes valores de Δu .

En la Figura 6 se muestran imágenes de borde para valores de Δu desde 0 a 7,5. Puede notarse de la figura que el ancho de los bordes aumenta de manera monótona con Δu para el detector original. Por el contrario, con el filtro compuesto, el ancho de los bordes se mantiene prácticamente constante. Para realizar un análisis más profundo, hemos graficado los perfiles de los bordes de la Figura 6, como se muestra en

la Figura 7.

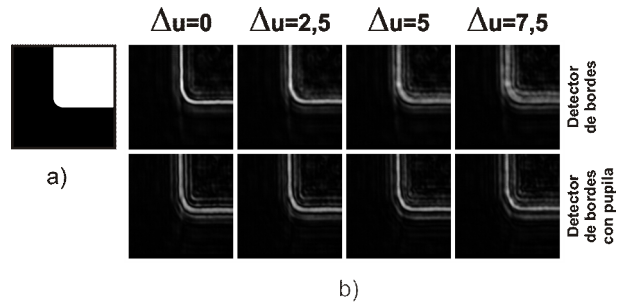


Figura 6. a) Escena de entrada, b) resultados experimentales de bordes para distintos valores de Δu .

Para reducir el efecto del ruido experimental, calculamos el promedio de 100 trazas paralelas, siendo todas ellas ortogonales al borde vertical. El procedimiento fue llevado a cabo para cada imagen de borde.

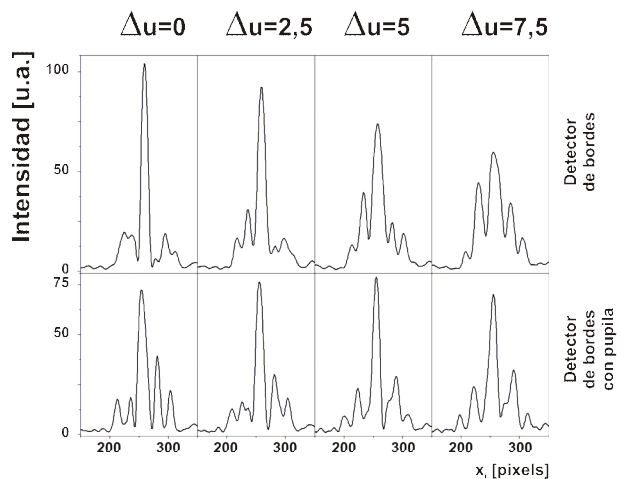


Figura 7. Perfiles transversales trazados a partir de los bordes obtenidos en la Figura 6.

Como puede observarse de los perfiles de la Figura 7, la respuesta del detector de bordes se ve degradada a medida que el objeto se desplaza de π_0 . Por un lado, el incremento en el ancho de los bordes puede observarse claramente. Por otro lado, el crecimiento de los lóbulos laterales tanto como el decrecimiento del pico central se hace evidente. Ambos aspectos de la degradación se ven claramente reducidos cuando se utiliza el filtro combinado con la pupila apodizante. Para hacer una comparación cuantitativa en cuanto a la degradación de los bordes con la variación de Δu , hemos graficado el contraste entre el máximo central y el mayor de los lóbulos laterales, y la convencional medida del ancho pleno a media altura (FWHM, del inglés, "Full width at half maximum") de los perfiles de la Figura 7 en función de Δu . Estos gráficos se muestran en la Figura 8.

Tanto el contraste como el FWHM en el dispositivo sin pupila, cambian apreciablemente con las variaciones de Δu , mientras que al incluir la pupila las variaciones

observadas son mucho menores. Para el detector de bordes solo, el contraste toma valores de desde 0,7 hasta 0,15 a valores de $\Delta u=0$ y $\Delta u=7,5$ respectivamente, mientras que al utilizar la pupila, el contraste varía entre desde 0,3 a 0,45 en el mismo intervalo Δu .

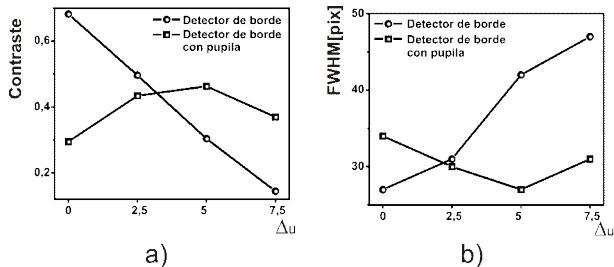


Figura 8. comportamiento experimental del filtro detector de bordes con y sin pupila anular: a) contraste, b) ancho pleno a media altura (FWHM).

En cuanto al FWHM, el detector original presenta variaciones desde 27 píxeles, a $\Delta u=0$, hasta 47 píxeles, a $\Delta u=7,5$. Sin embargo, al utilizar la pupila apodizante, este parámetro toma valores dentro de un rango que va de 27 a 34 píxeles en $\Delta u=7,5$ y $\Delta u=0$ respectivamente. Puede notarse que mientras el contraste disminuye a 0,15 para el detector solo, cuando se utiliza la pupila, se mantiene por arriba de 0,3. Análogamente, el FWHM crece hasta 47 píxeles en sistema sin pupila, pero está acotado debajo de 34 píxeles si se utiliza la pupila anular. Estos resultados ponen de manifiesto que la inclusión de la pupila apodizante, constituye una notoria mejoría en el desempeño del detector de bordes en cuanto a robustez a desplazamientos axiales del objeto.

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló un detector óptico de bordes robusto a desplazamientos del objeto. El método está basado en la combinación entre un detector de bordes de fase espiral y una pupila anular de fase. El filtro fue implementado ópticamente en un correlador convergente y se obtuvieron resultados con los que se pone en evidencia que la inclusión de la pupila apodizante representa una mejora del método en cuanto a desplazamientos axiales del objeto. El método podría ser utilizado en dispositivos de microscopía óptica para analizar bordes de objetos tridimensionales, o bien objetos planos cuya posición no es conocida con precisión.

REFERENCIAS

[1] J. Mazzaferri, S. Ledesma, Opt. Comm. 272, 367-376, (2007).
 [2] T. Shimada, F. Sakaida, H. Kawamura, T. Okumura, Rem. Sens. of Env. 98, 21, (2005).

[3] H. Liu, and K. C. Jezek, International Journal of Remote Sensing, 25, 937 (2004).
 [4] Haarpaintner, J. Tonboe, R.T. Long, D.G. Van Woert, M.L. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42, 1433 (2004).
 [5] Brandt Tso, Richard C. Olsen, Remote Sensing of Environment, 97, 127 (2005).
 [6] H. Tang, E. Wu, Q. Ma, D. Gallagher, G. Perera, T. Zhuang, Comp. Med. Im. and Graph., 24, 349 (2000).
 [7] L. Anil K. Jain, Hong Chen, Pattern Recognition, 37, 1519 (2004).
 [8] Yin, A. Basu, J. Kwei Chang, Patt. Recogn., 37, 1407 (2004).
 [9] Van Dokkum, Pieter G., The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 113, 1420 (2001).
 [10] H. Zhang, C. Cartwright, M. Ding, W. Gillespie, Opt. Comm., 185, 277 (2000).
 [11] J. Mazzaferri, S. Ledesma, C. Iemmi, J. Opt. A., 5, 425 (2003).
 [12] S. Fürhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, Opt. Exp., 13, 689 (2005).
 [13] A. Jesacher, S. Fürhapter, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, PRL 94, 233902, (2005).
 [14] L. Fan, F. Song, and S. Jutamulia, Opt. Comm., 270, 169-175, (2007).
 [15] S. Ledesma, J.C. Escalera, J. Campos, M. Yzuel, Opt. Comm., 249, 183-192, (2005).
 [16] S. Ledesma, J.C. Escalera, J. Campos, J. Mazzaferri, M. Yzuel, Opt. Comm., 266, 6-12, (2006).
 [17] C.J.R. Sheppard, Z.S.Hegedus, JOSA A, 5, 643-647, (1988).
 [18] A. Márquez, J. Campos, M. Yzuel, I. Moreno, J. Davis, C. Iemmi, A. Moreno, A. Robert, Opt. Eng., 39, 3301 (2000).
 [19] A. Márquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Davis, J. Campos, M. Yzuel, Opt. Eng., 40, 2558 (2001).