

## Interface para esqueletizado y suavizado de interferogramas

D. H. Penalver-Vidal, D. L. Romero-Antequera y F. S. Granados-Agustín  
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*  
*Calle Luis Enrique Erro No. 1. Tonantzintla, Puebla, 72000, México.*

Received 21 March 2012; accepted 22 November 2012

Se desarrolla una interfaz gráfica para brindar una herramienta computacional de rápido y fácil manejo para el suavizado y/o esqueletizado de imágenes interferométricas. El código de la interfaz está basado en un algoritmo de suavizado para interferogramas, en donde se plantea ajustar la distribución de intensidad de las columnas o filas de imágenes interferométricas mediante mínimos cuadrados, usando como base las funciones de Bessel de primer orden, eliminando así las componentes de ruido de alta frecuencia. Adicionalmente, se utiliza el método de dilatación por medio de un elemento estructural de Strehl para alcanzar el esqueletizado de los interferogramas.

*Descriptores:* Óptica; esqueletización de interferogramas; algoritmo.

It is developed a GUI (graphical user interface) in order to provide a fast and easy to use computational tool, which performs smoothing and/or skeletonizing of interferometric images. The code used in the interface is based in smoothing algorithms for interferograms, where the intensity distribution along rows or columns of the image is fitted by means of least squares and using Bessel functions of the first kind as basis functions, allowing the suppression of high frequency noise components. Additionally, the dilation method is used using a Strehl structural element in order to perform skeletonizing of the interferograms.

*Keywords:* Skelotonizing; interferometry; interferogram smoothing.

PACS: 42.87.-d; 07.05.Pj; 42.25.Hz

### 1. Introducción

La detección de máximos en interferogramas, es un proceso comúnmente conocido como esqueletización. Es por tradición una de las principales tareas dentro de un taller de óptica para la caracterización de superficies en generación. El estudio cuantitativo o caracterización de superficies ópticas, involucra la determinación de su forma geométrica y las variaciones de altura que esta contiene. Para lograr esta tarea, uno de los procedimientos, involucra conocer las coordenadas de los máximos o mínimos del patrón interferométrico. El ruido introducido por vibraciones mecánicas, turbulencias en el ambiente, o cualquier otro factor externo a la medición, degrada la imagen del interferograma capturado y por ende las funciones de distribución de intensidad de la imagen contienen ruido local que debe de ser removido para alcanzar una esqueletización adecuada. Con la finalidad de eliminar este tipo de dificultades dentro de un taller de óptica, se desarrolló una interfaz de fácil manejo, que permite al usuario suavizar la función de intensidad de las imágenes interferométricas para luego ser esqueletizadas. Los algoritmos empleados fueron desarrollados por nosotros y revisados en una reciente publicación [6], y consisten en la utilización de métodos de ajuste de mínimos cuadrados y de umbral respectivamente.

La manufacturación de superficies ópticas involucra cinco etapas principalmente; generación de la superficie, esmerilado, pulido y prueba. Las dos últimas etapas se retroalimentan hasta que, finalmente se obtiene la curvatura y el acabado deseado. En estas etapas el técnico de taller debe probar constantemente la superficie mediante métodos mecánicos y ópticos. Uno de los principales métodos ópticos empleados es el análisis interferométrico, en él es posible conocer deformaciones en la superficie del orden de fracciones de la longitud

de onda implementada. Sin embargo, siempre existe ruido de fondo y de alta frecuencia que dificultan la tarea de probar rápidamente las superficies y regresarlas inmediatamente a la línea de producción para corregir las desviaciones que arroje la prueba.

Usualmente las principales tareas que se realizan con las imágenes interferométricas dentro de un taller de óptica, involucran encontrar las aberraciones ópticas asociadas, para lograrlo se necesita que las mismas tengan un excelente contraste y que el ruido de fondo sea suprimido. Este trabajo es llevado a cabo por los técnicos mediante programas profesionales como GIMP, Corel Draw o Paint; pero estas herramientas muchas veces no se adecúan a la rapidez con la que se desea mejorar la imagen.

Por otro lado, también es común esqueletizar los interferogramas para analizar las aberraciones desde el punto de vista geométrico y/o determinar el RMS de la superficie. En cualquier caso, el ruido de alta frecuencia es un problema, dado que impide determinar adecuadamente los máximos locales de las franjas, por lo que un previo suavizado de la imagen es necesario. Los métodos de esqueletización de interferogramas, consisten en determinar las coordenadas de los máximos principales de la imagen digitalizada del patrón interferométrico. Estos métodos suponen que los extremos locales de la función de distribución de intensidad en la imagen, corresponden a los máximos y mínimos de la función sinusoidal que modula la señal [1]. Físicamente, estos puntos están asociados a múltiplos de media longitud de la onda que se utilice, y por tanto, pueden ser empleados para reconstruir la topología de la superficie.

Diferentes métodos han sido referidos con anterioridad para esqueletizar interferogramas; entre los más comunes se encuentra el FTM (*fringe tracking method*, por sus siglas en

inglés), el cual consiste en un algoritmo inteligente que compara valores de píxeles con su vecindad hasta determinar el de más alto valor [2,3]. Otro método igualmente conocido es el FBM (*fringe binary method*), el cual emplea un valor umbral para adelgazar las franjas y así determinar el centro geométrico de las mismas [4,5]. En ambos casos es necesario implementar previamente un filtrado espacial que permita suavizar la función de distribución de intensidad.

En este trabajo, en la Sec. 2 se describe el funcionamiento de la interfaz del algoritmo desarrollado. Seguidamente en la Sec. 3 se muestra la potencialidad del algoritmo empleando, para ello se muestran diferentes imágenes interferométricas proporcionadas por el taller óptica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica de México. Finalmente algunas conclusiones y futuros trabajos son presentados.

## 2. Funcionamiento general del Programa

En el desarrollo del código computacional se seleccionó el método de suavizado propuesto en [6], debido a que se plantea que la mayor fortaleza del método, es la similitud de las funciones Bessel de primer orden con la forma de las funciones de distribución de intensidad de interferogramas de franjas rectas; [6]. De acuerdo a lo establecido por los autores, la imagen digitalizada del interferograma es considerada como una matriz cuyos elementos representan el promedio de la intensidad a través de los puntos de muestreo expresados en una escala arbitraria ([0,1] en nuestro caso). Si el número de puntos del muestreo es lo suficientemente alto (que suele ser el caso), podemos considerar cada fila o columna de la imagen, como una aproximación discreta de la distribución continua de intensidad. Dada la estructura funcional de Matlab para trabajar con matrices, se seleccionó esta plataforma para desarrollar el código de cálculo así como la interfaz, específicamente Matlab 7.10 R2010®.

El proceso de cómputo, el cual se explica con más detalle en la Ref. 6, para el suavizado de la imagen interferométrica se lleva a cabo como sigue:

1. Se selecciona una columna o fila del interferograma (fila si el desplazamiento lateral es en la dirección horizontal y la columna si es en la dirección vertical).
2. Se calculan los coeficientes de ajuste por medio de mínimos cuadrados, utilizando el siguiente modelo, Ec. (1):

$$f(q) \cong \sum_{k=0}^N a_k J_k(\alpha q) \quad (1)$$

3. Donde  $J_k$  son las funciones Bessel de primera especie, empleadas para lograr el ajuste,  $q$  es la coordenada en la fila o columna  $\alpha$  es un parámetro de control de las oscilaciones (generalmente  $k = 1$ ). Esta coordenada debe definirse en un soporte compacto discreto, de tal forma

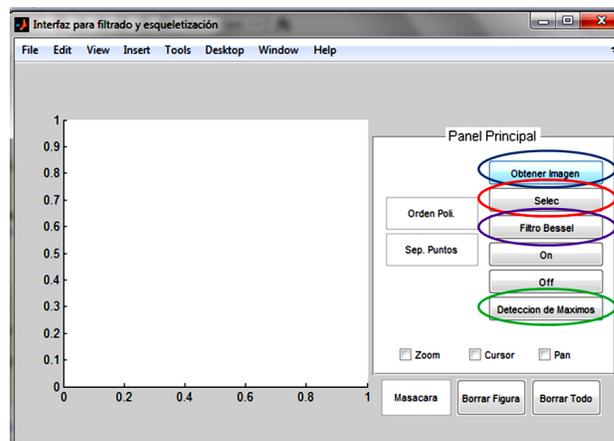


FIGURA 1. Interfaz principal. Primer botón es empleado para cargar imágenes, está señalado dentro de un óvalo azul. El segundo botón es empleado para seleccionar parte de la imagen que se desea recortar, está señalado dentro de un óvalo rojo. Tercer botón es utilizado para aplicar filtro Bessel, está señalado dentro de un óvalo morado; el número de polinomios es cargado desde la casilla “Orden del Polinomio”. El cuarto botón permite esqueletizar la imagen interferométrica, óvalo verde; el parámetro de entrada es introducido en la casilla “Sep. Puntos”.

que el número de puntos en consideración iguallen al de la columna o fila en estudio. Los límites del soporte  $[a, b]$  son arbitrarios.

4. Se reconstruye la fila o columna mediante la aproximación dada por la Ec. (1).
5. Se avanza hacia la siguiente columna o fila.

Como resultado se logra disminuir apreciablemente el efecto de los diferentes tipos de ruido contenidos en la imagen digital (sobre todo el ruido multiplicativo) como es indicado por los autores. El siguiente cálculo que es capaz de realizar el programa computacional es el esqueletizado del interferograma una vez que éste ya ha sido suavizado. La interfaz ofrece al usuario la opción de cargar la imagen suavizada y de introducir ciertos parámetros de control necesarios para llevar a cabo el método de dilatación de la imagen, el cual por medio de un elemento estructural de Strehl detecta el píxel con mayor valor de intensidad en comparación con su vecindad.

El funcionamiento general de la interfaz se basa en una serie de pasos independientes que se enumeran a continuación, Fig. 1:

1. Al presionar el botón “Obtener Imagen” se abrirá una ventana auxiliar, que permite explorar los directorios de la PC hasta encontrar la imagen deseada, una vez encontrada sólo es necesario seleccionarla y automáticamente será cargada dentro del programa, Fig. 2.

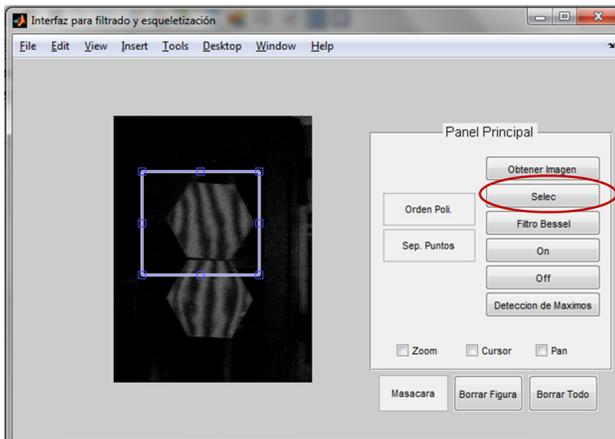


FIGURA 2. La opción “Selec” abre un recuadro interactivo que varía su tamaño manualmente, permitiendo al usuario establecer un área efectiva para extraer de la imagen original la parte deseada que desea filtrar y esqueletizar.

- Una vez seleccionada la imagen, es cargada en escala de grises (0,1) dentro de una interfaz independiente, la cual posee una barra a la derecha que permite controlar y ajustar el contraste entre las franjas del interferograma. En la parte inferior de esta ventana, existen dos casillas de texto para editar el valor máximo y mínimo de referencia para la escala de grises, ver Fig. 3. Para concluir, sólo se debe cerrar la ventana y automáticamente la nueva imagen con contraste mejorado será cargada en la interfaz principal.
- La siguiente opción consiste en recortar el segmento de la imagen que se desea analizar. La opción “Selec” abre un recuadro interactivo que varía su tamaño manualmente, éste permite que el usuario establezca un área efectiva para extraer de la imagen original la parte deseada. La sección de la imagen seleccionada es la imagen final que será filtrada y/o esqueletizada, Fig. 2.
- A continuación se realiza el suavizado de la imagen, para eliminar el ruido local del patrón de interferencia. Es necesario introducir el número de funciones de ajuste que se desea utilizar en la aproximación, en la casilla de texto “Orden Poli.” y ejecutar el proceso haciendo clic en el botón “Filtro Bessel”, Fig. 1.

Finalmente se procede al esqueletizado de la imagen. Para ello se introduce el rango de pixeles (vecindad de aislamiento de máximos) para la búsqueda de máximos en la casilla “Sep. Puntos”. Se ejecuta la esqueletización mediante la operación “Detección de Maximos”.

Existen opciones adicionales dentro de la interfaz que permiten al usuario manejar con mayor facilidad el proceso, entre ellas está “Zoom” para acercamiento de determinadas áreas de la imagen, “Cursor” para conocer posiciones específicas en coordenadas de pixeles de los puntos sobre la imagen y “Pan” para mover la imagen dentro del recuadro cuando la

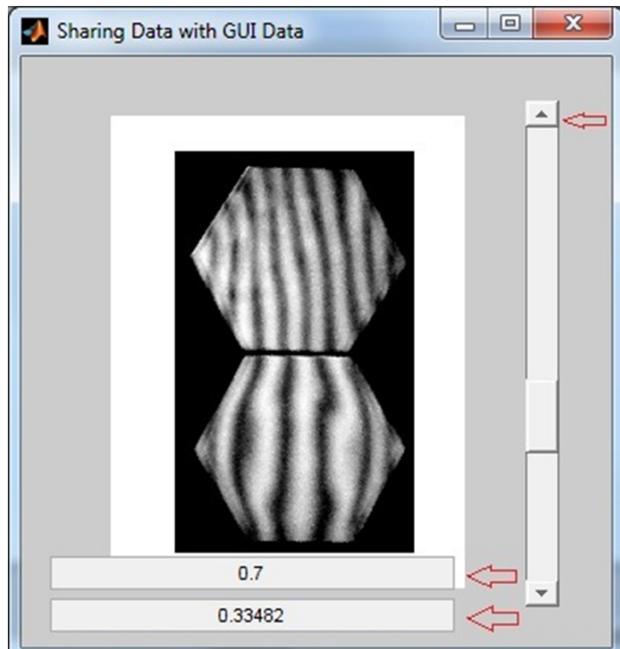


FIGURA 3. Sub-interfaz empleada para establecer la cota superior (cuadro de texto superior) e inferior (cuadro de texto inferior) de intensidad en escala de 0 a 1, que se empleará para mejorar el contraste de la imagen interferométrica a utilizar.

misma se encuentra en modo “Zoom”. Las tres opciones pueden ser activadas accionando el cuadro de verificación que está a la izquierda de cada opción y presionando el botón “On” / “Off” dependiendo de cuál sea el caso. También se cuenta con la opción de borrar la imagen cargada en la interfaz principal, presionando el botón “Borrar Figura”. Así mismo se puede reiniciar todo el proceso presionando el botón “Borrar Todo”.

Cada proceso es independiente, esto quiere decir por ejemplo: que se puede recortar la imagen cuantas veces el usuario lo crea necesario, dado que el programa siempre guarda la última versión de cada paso y solo esta última versión es usada como parámetro de entrada para el siguiente paso.

### 3. Análisis y discusión

Tener herramientas computacionales automatizadas, que permitan a los técnicos evaluar el acabado de superficies ópticas de forma rápida y sencilla es uno de los principales retos dentro de un taller de óptica [7]. Con la intención de probar la capacidad del programa para realizar esta tarea, en la presente sección se emplea el mismo para suavizar y esqueletizar diferentes imágenes de interferogramas obtenidas en pruebas rutinarias del taller de óptica del INAOE. La interfaz desarrollada permite obtener un interferograma suavizado y su respectivo esqueletizado de forma rápida y eficiente. Estas imágenes son guardadas automáticamente en formato “jpg” para ser usadas posteriormente por los técnicos en el estudio de interés. La aplicación dependerá del tipo parámetros que

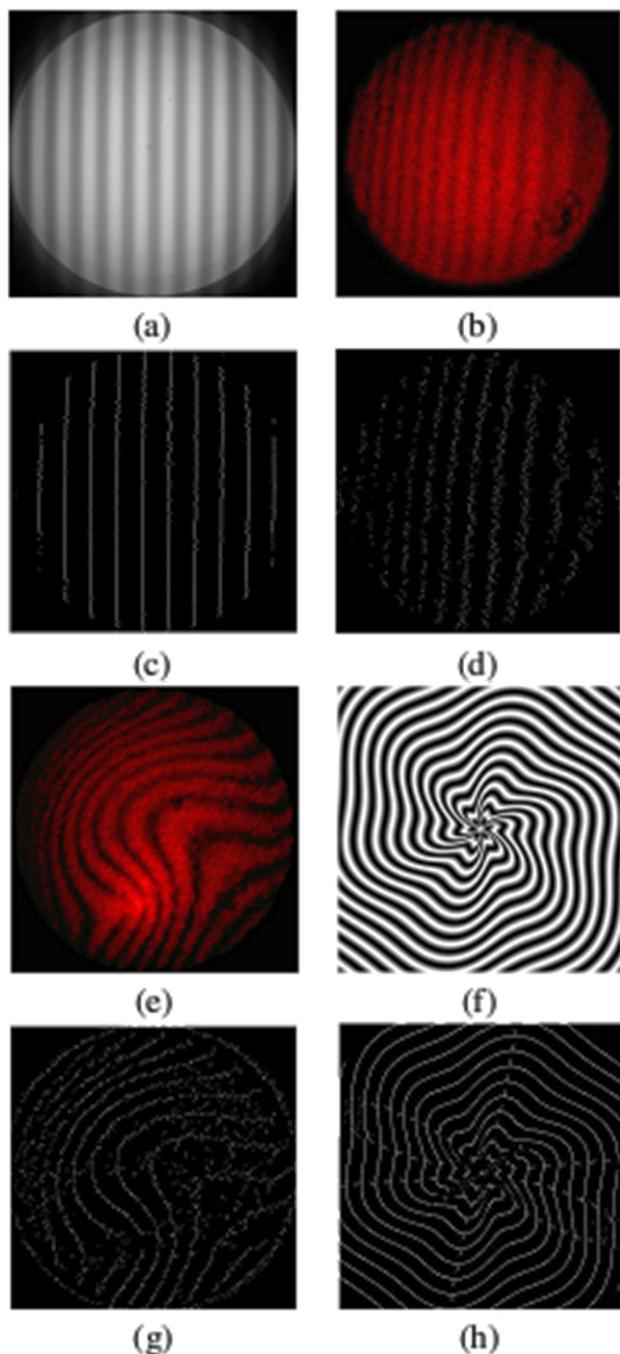


FIGURA 4. (a) (b) (e) Interferogramas experimentales con diferente tipo de franjas interferométricas, (c) (d) (g) sus respectivas esqueletizaciones, en la parte inferior de la imagen original. (f) Interferograma simulado tipo vórtice y (h) es su respectivo esqueletizado. El programa muestra ser robusto tanto para interferogramas simples como para aquellos que poseen vórtices, así como para interferogramas que poseen exceso de ruido experimental.

se deseen medir, esto es: RMS, determinación de las aberraciones geométricas mediante óptica geométrica o mediante óptica física o sólo un diagnostico cualitativo del acabado de la superficie.

Se emplearon 3 interferogramas experimentales proporcionados por el taller de óptica del Instituto Nacional de As-

trofísica Óptica y Electrónica (INAOE) de México, y uno simulado computacionalmente con ruido inducido, los cuales presentan diferente grado de complejidad y resolución. En las Figs. 4(a), 4(b), 4(e), 4(f), se muestran los diferentes interferogramas empleados. Como puede observarse en las imágenes, se estudian desde franjas rectas con poco ruido, franjas rectas con poca resolución y ruido apreciable, hasta franjas curvas y cerradas. En las Figs. 4(c), 4(d), 4(g), 4(h) se encuentran sus respectivos esqueletizados.

El filtro Bessel empleado, permite suavizar la función de distribución de intensidad, la cual puede ser desglosada en columnas o filas de la imagen. En las Figs. 5(a) y 5(b), se muestran perfiles de intensidad de la región central de las imágenes interferométricas, Figs. 4(a) y 4(c), respectivamente. Las líneas de color azul y con cruces corresponden a la data experimental proveniente de la imagen original. La línea continua de color negro en ambas gráficas, es la reconstrucción de los perfiles de intensidad empleando mínimos cuadrados lineal con funciones Bessel de primera especie. Se observa un ajuste adecuado empleando este método, inclusive para perfiles de intensidad que poseen un alto grado de ruido, como el presentado en la Fig. 5(b).

Por otro lado, de la Fig. 4, se puede apreciar que el algoritmo trabaja mejor con interferogramas que poseen franjas abiertas que con aquellos que se cierran formando aros. Esto se debe a que el algoritmo emplea el método de mínimos cuadrados y dilatación en dos direcciones cuando las franjas interferométricas son curvas o inclinadas a el eje horizontal o vertical, esto implicaría que el algoritmo determinará en ambas direcciones los máximos de intensidad, inclusive cuando estos máximos no estén asociados a los correspondientes a la

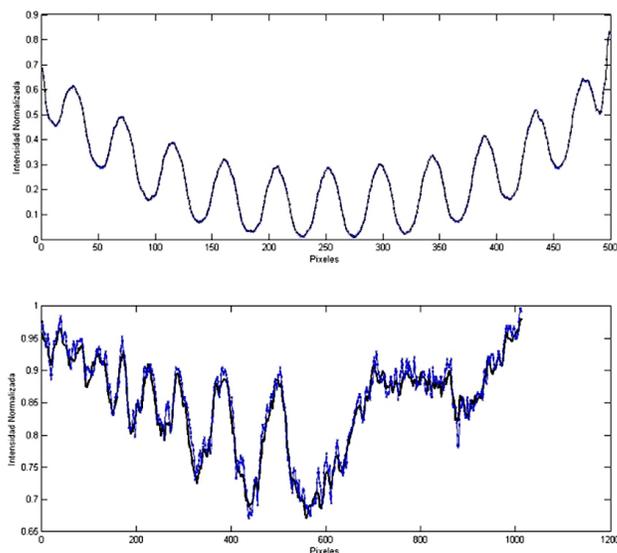


FIGURA 5. Perfiles de intensidad de una fila de la región central de dos interferogramas experimentales (línea azul con cruz), funciones del perfil de intensidad reconstruido mediante mínimo cuadrados lineal (línea negra). (a) Perfil de intensidad con ruido moderado. (b) Perfil de intensidad con altamente afectado por la intensidad de fondo y con variaciones de intensidad notables a lo largo de los lóbulos.

función sinusoidal que modula el interferograma. Por tanto, la imagen final es la combinación de las imágenes resultantes de ambos procesos. Por el contrario, cuando las franjas son rectas y paralelas a algunas de las coordenadas (horizontal o vertical) el proceso es realizado una sola vez y como consecuencia, las variaciones de intensidad en la otra dirección no forman parte de la imagen final.

Igualmente, comparando las Figs. 4(c) y 4(d), se puede observar como afecta la resolución de la imagen en el proceso de esqueletización; en ambos casos se tienen franjas rectas paralelas entre sí, pero la calidad de las imágenes es diferente. Sin embargo, este aspecto puede ser optimizado asegurando mejores condiciones de laboratorio y el empleo de cámaras con resolución adecuada.

Finalmente, es importante destacar que el tiempo de cómputo, sumando ambos procesos, va desde 4 a 10 segundos, lo cual implica al sumar todas las características del algoritmo, que éste representa una herramienta práctica, rápida y de fácil manejo para suavizar y/o encontrar los máximos de las franjas de interferogramas dentro de un taller de óptica.

#### 4. Conclusiones

Se desarrolló un algoritmo de filtrado y esqueletizado de imágenes interferométricas [6] para ser empleado en talleres

de óptica, encargados de la manufacturación de superficies y elementos ópticos. La rapidez del método y la sencillez de su interfaz, lo hace idóneo para la determinación de los máximos de franjas interferométricas. Las imágenes obtenidas pueden ser empleadas para conocer el RMS de la superficie, el tipo de curvatura, así como las aberraciones ópticas que la misma presenta.

En la etapa de filtrado, se observa que el ajuste de mínimos cuadrados lineal con funciones Bessel de primer orden provee perfiles de intensidad suavizados adecuadamente al comparar con el perfil original el error medio es de  $\pm 2$  píxeles, lo cual prepara las imágenes para la detección de máximos mediante el método de dilatación usando un elemento estructural de Strehl. Las condiciones experimentales juegan un papel importante en todo el proceso, sin embargo esta herramienta ha mostrado funcionar exitosamente inclusive con franjas cerradas y con poca resolución. En futuros trabajos se estudiarán las diversas aplicaciones del método.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen las sugerencias del revisor del trabajo, asimismo Romero-Antequera y Peñalver-Vidal, agradecen al CONCYT por el apoyo recibido a través de las becas de doctorado con números 223982 y 23980, respectivamente.

- 
1. T. Kreis, *Handbook of Holographic Interferometry* (WILEY-VCH GmbH and Co. KGaA, Weinheim, 2005). pp. 229-234.
  2. H.E. Cline, W. E. Lorensen, y A. S. Holik *Appl Opt.* **23** (1984).
  3. F. Zhang, M. Shu, y P. Chen, *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* **814** (1987) 806.
  4. K. Ramesh y R. K. Singh, *J Electron Imaging* **4** (1995) 71.
  5. E. Umezaki, T. Tamakai, S. Takahashi *Exp Tech.* **13** (1989) 22.
  6. D. H. Penalver, D. L. Romero-Antequera, F.-Salomón y G.-Agustín, *Opt. Eng.* **51** (2012) 045601.
  7. D. Malacara. “*Optical Shop Testing*” Third Edition (A John Wiley & Sons, Inc., Publication 2007).