

Técnicas ópticas para el contorno de superficies tridimensionales

A. Martínez, J.A. Rayas, J.M. Flores M., R. Rodríguez-Vera y D. Donato Aguayo

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.,
Apartado Postal 1-948, 37000, León, Gto., México,
e-mail: amalia@cio.mx, jrayas@cio.mx, jmflores@cio.mx,
rarove@cio.mx, daguayo@cio.mx

Recibido el 14 de febrero de 2005; aceptado el 17 de mayo de 2005

Se presentan algunos sistemas sin contacto para la recuperación de la topografía de objetos tridimensionales. Entre ellos están los sistemas ópticos basados en la técnica de proyección de franjas incoherente, interferometría Talbot e interferometría de moteado. En la técnica de proyección de franjas incoherente, se inicia la digitalización al proyectar sobre el objeto una serie de líneas blancas y negras cuya imagen sobre la pieza es registrada por una cámara CCD. En interferometría Talbot, el objeto a digitalizar es colocado en uno de los planos de las autoimágenes de una rejilla. Posteriormente, se capta con una CCD la imagen del objeto con la rejilla proyectada ahora deformada. Ésta es superpuesta con una rejilla generada sintéticamente, formando así un patrón de franjas de moiré, el cual nos dará información de la topografía del objeto bajo prueba. Para el caso de interferometría de moteado, el objeto es iluminado dual y simétricamente a un ángulo θ con respecto al eje óptico. Se capta una imagen inicial y una segunda imagen después de rotar el objeto un ángulo $\Delta\theta$. Procesando ambas imágenes se obtiene información de la profundidad del objeto bajo estudio. Como ejemplo de objetos digitalizados se presentan una parte automotriz, una membrana metálica la cual forma parte de un empaquetamiento conocido comercialmente como “gasket”, una horma de calzado, entre otros. Se discutirán las ventajas e inconvenientes de las técnicas utilizadas.

Descriptor: Metrología óptica, proyección de franjas, interferometría de Talbot, interferometría de moteado.

We will present some non-contact systems for obtaining three-dimensional objects topography. The described systems are incoherent fringe projection technique, Talbot and speckle interferometry. In fringe projection technique, the digitalization is realized when black and white lines are projected over the object and this image is captured by the CCD. In Talbot interferometry, the object is collocated on one of the grating auto-image planes. The deformed grating image is captured by the CCD and superposed with a synthetic grating generated in the computer for obtaining a moiré pattern which gives information about the object topography. In the speckle interferometry technique, dual collimated illumination is used for contouring. The collimated beams illuminate symmetrically the object at an angle θ with the optical axis, and an image is recorded in the usual way. Now if the object is tilted by a small $\Delta\theta$, a system of equispaced interference planes intersects the object. A second recorded is taking in this object position. Both images are processed to get the object topography. The shape of the car part, a gasket, shoe mold and other examples of digitalized objects are shown. Advantages and disadvantages of the techniques are discussed.

Keywords: Optical metrology, fringes projection, Talbot interferometry, speckle interferometry.

PACS: 89.20.Bb; 89.20.-a; 42.30.Ms

1. Introducción

En la actualidad, un gran número de artículos (como por ejemplo un automóvil, un teléfono, un reloj, una bota de esquiar, un asiento, etc.) están diseñados con unas formas sumamente complejas que son imposibles de describir mediante formulaciones matemáticas sencillas. La copia de una creación, que por definición es única, permite a un gran número de personas beneficiarse de dicha creación. Es por ello que mucho de los productos fabricados en serie parten de un prototipo o modelo único que sirve de patrón para lanzar la producción. De aquí nace lo que se denomina la ingeniería inversa. Debido a sus orígenes podría pensarse que su única aplicación es el copiado de piezas. Sin embargo, las aplicaciones de la ingeniería inversa van mucho más allá que la simple duplicación de objetos físicos. Por ello se utilizan, quizá con mucho acierto, otras expresiones para definir el concepto como reconstrucción, retroingeniería, o numerización y modelización.

Además de las aplicaciones de la digitalización [1] en ingeniería inversa (*copymilling*: copias o replicas de modelos, ingeniería de producto, inspección dimensional, control de calidad, aplicaciones avanzadas de ingeniería) se pueden mencionar las aplicaciones médicas, arte y restauración, comercio electrónico, aplicaciones multimedia, aplicaciones ergonómicas avanzadas, etc. De lo mencionado anteriormente se intuye la importancia de las técnicas de digitalización, que son clasificadas en dos grandes grupos: sistemas con contacto (digitalizadores mecánicos) y sin contacto (digitalizadores láser y sistemas de visión óptica) [2]. Entre las técnicas sin contacto que serán analizadas están la técnica de proyección de franjas, interferometría Talbot e interferometría de moteado. La adquisición de datos se realiza en tres etapas: obtención de la fase por algunas de las técnicas como detección sincrónica espacial (método directo) [3] o desplazamiento de fase (*phase stepping*) [4], desenvolvimiento de fase y obtención de los parámetros del sistema óptico, los cuales están involucrados en el vector de sensibilidad, obteniendo así las

dimensiones de topografía del objeto analizado en coordenadas reales.

2. Descripción de los métodos experimentales y de la teoría aplicada

2.1. Proyección de franjas

La Fig. 1 muestra la geometría óptica de donde se puede obtener la relación para la altura del objeto bajo estudio. Se proyecta una rejilla donde las líneas son paralelas al eje y , el eje z coincide con la dirección de observación y el plano xy ($z = 0$) es un plano de referencia, es decir la altura es igual a 0 en este plano. La normal de la rejilla proyectada hace un ángulo α con respecto al eje óptico. La superficie es entonces iluminada incoherentemente con una rejilla cosenoidal y observada por una cámara CCD en la normal del plano xy . La distribución de intensidad observada en la normal del plano xy es [5]:

$$I_1(x, y) = K \left\{ 1 + \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_1 \tan \alpha) \right] \right\}, \quad (1)$$

donde $p = p_0 / \cos \alpha$, $K =$ una constante, $z_1 = z_1(x, y)$ y $p_0 =$ periodo de la rejilla proyectada.

Si se tiene ahora una segunda superficie $z_2 = z_2(x, y)$, la cual puede representar una desviación con respecto a una superficie de referencia z_1 , la cual es plana, su intensidad para esta segunda superficie es representada por

$$I_2(x, y) = K \left\{ 1 + \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_2 \tan \alpha) \right] \right\}. \quad (2)$$

Estas distribuciones de intensidad son representadas por señales de voltaje V_1 y V_2 en la PC, y son proporcionales a las funciones de intensidades I_1 e I_2 , respectivamente. Haciendo contorno electrónico de moiré, la imagen de video resultante es proporcional a

$$V_1 - V_2 \propto |I_1 - I_2| = \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_1 \tan \alpha) \right] - \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_2 \tan \alpha) \right], \quad (3)$$

sustituyendo p en función de p_0 , la ecuación anterior llega a ser

$$V_1 - V_2 \propto |I_1 - I_2| = \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p_0} \right) (x \cos \alpha - z_1 \sin \alpha) \right] - \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p_0} \right) (x \cos \alpha - z_2 \sin \alpha) \right]. \quad (4)$$

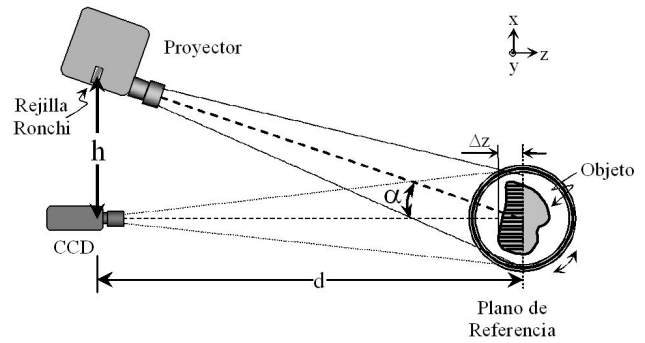


FIGURA 1. Geometría óptica para el método de proyección de franjas utilizando luz blanca.

De la identidad trigonométrica

$$\cos A - \cos B = 2 \sin \frac{1}{2} (A + B) \sin \frac{1}{2} (A - B),$$

la ecuación anterior se puede escribir como

$$|I_1 - I_2| = \sin \left[\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \sin \alpha \right] \times \sin \left[\frac{2\pi}{p_0} \left(x \cos \alpha - \frac{(z_2 + z_1)}{2} \sin \alpha \right) \right]. \quad (5)$$

La ecuación anterior representa el patrón de franjas proyectado originalmente (desplazado en fase) modulado en amplitud por el factor

$$\sin \left[\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \sin \alpha \right].$$

Esta función de modulación corresponde a las franjas de moiré, teniendo un mínimo cuando

$$\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \sin \alpha = n\pi, \quad (6)$$

donde n es un entero. El intervalo de contorno está dado entonces por

$$\Delta z = \frac{p_0}{\sin \alpha}, \quad (7)$$

La fase del objeto es obtenida aplicando la técnica conocida como detección sincrónica espacial (también conocida como detección directa de la fase). La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos para una salpicadera de carro. La Fig. 3 muestra los resultados para una horma de calzado. En este caso se obtuvo información en los 360° del objeto al ser rotado éste con respecto al eje "y" [6]. En este caso, el objeto es colocado sobre una platina motorizada giratoria de alta resolución (0.01°) y se le proyecta un patrón de franjas en cada desplazamiento angular. Las líneas de la rejilla proyectada son paralelas al eje y , el eje z coincide con la dirección de observación y el plano xy ($z = 0$) es un plano de referencia, es decir, la altura es igual a 0 en este plano. En el tratamiento de datos, mediante una máscara, los puntos del objeto son separados de los puntos del fondo así como de información traslapada. Como todos los intervalos de rotación tienen un

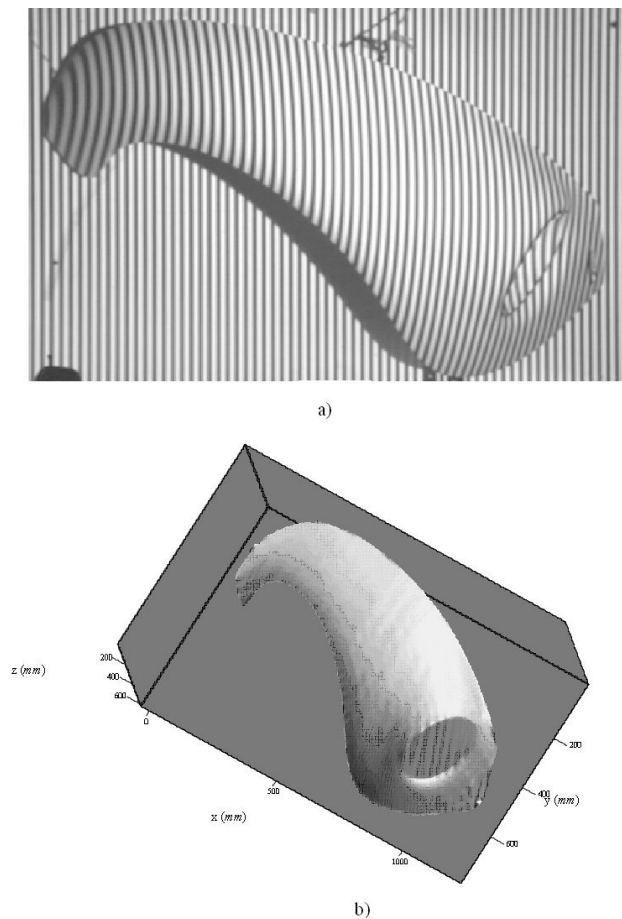


FIGURA 2. a) Objeto bajo estudio que corresponde a una salpicadera de VW; b) Relieve recuperado.

punto en común situado en el eje de rotación (y), los diferentes grupos de puntos son rotados sobre el eje y hasta tomar la posición correspondiente según el ángulo en que hayan sido digitalizados, recuperando la forma del objeto en 360° .

2.2. Interferometría de Talbot

En el fenómeno de Talbot [7], (también conocido como de auto imágenes o de imágenes de Fourier), no se requieren de componentes ópticas para formar una imagen. El efecto de auto imágenes se debe a la propiedad de las rejillas de difracción de que, cuando son iluminados por un frente de ondas, coherente y monocromático, se forma imágenes fieles de ellas sin necesidad de componentes ópticas. Los planos de Talbot son equidistantes y están localizados a distancias $N/(\nu^2\lambda)$ del objeto, donde $N = 1, 2, 3, \dots$ dando el orden de los planos de Talbot, ν es la frecuencia de la rejilla de difracción y λ es la longitud de onda de iluminación. La interferometría de Talbot utiliza una de las auto imágenes como una rejilla proyectada sobre el objeto, la cual se deforma de acuerdo a la topografía del objeto. La rejilla deformada es captada con una CCD y superpuesta con una rejilla ya sea física [8] o sintética [9] de la misma frecuencia que la rejilla

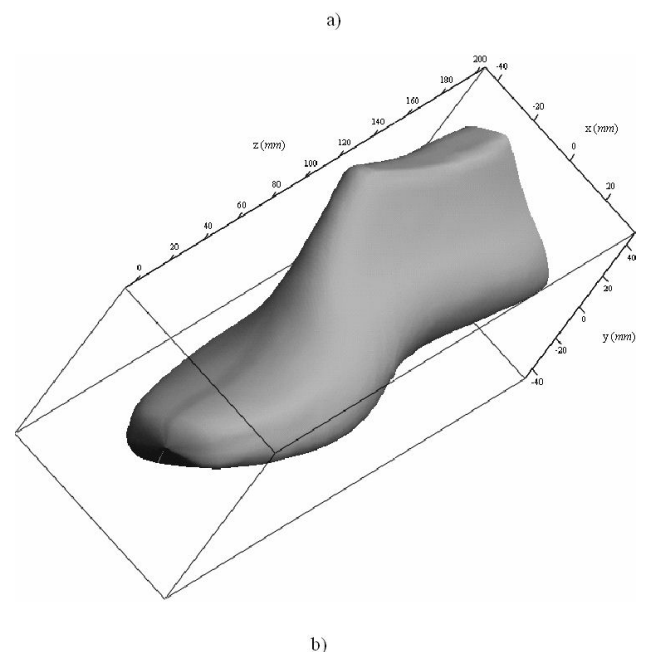
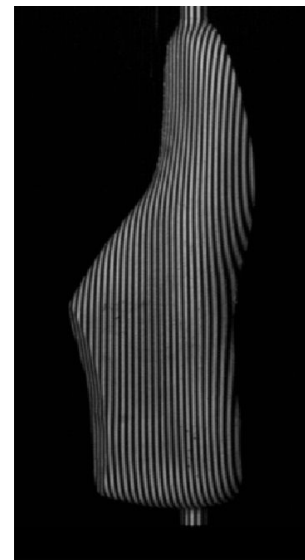


FIGURA 3.a) Objeto bajo estudio que corresponde a una horma de zapato; b) Relieve recuperado.

física usada para generar las auto imágenes, obteniendo un patrón de moiré que contiene información del relieve del objeto. La distancia entre franjas de este patrón, representa una medida de la variación en profundidad de la muestra bajo estudio correspondiente a la dirección en z . Entonces siguiendo el desarrollo mostrado en la sección anterior, al considerar un estado de referencia y uno deformado donde la fases de patrones de franjas es modulada respectivamente por las Ecs. (1) y (2), el intervalo de contorno estará dado entonces por la Ec. (7), donde p_0 = periodo de la rejilla que genera la auto imagen. La Fig. 4 muestra el arreglo ($\nu = 50$ líneas/plg, $\alpha = 14.5^\circ$) utilizado para obtener la forma de una gasket mostrada en la Fig. 5. Otra topografía recuperada con esta técnica es mostrada en la Fig. 6. En la obtención de la fase

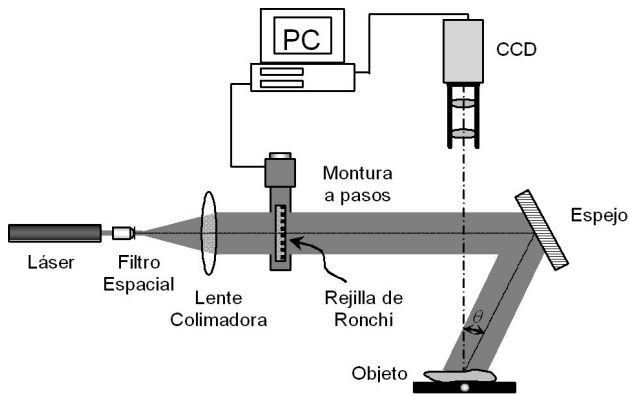
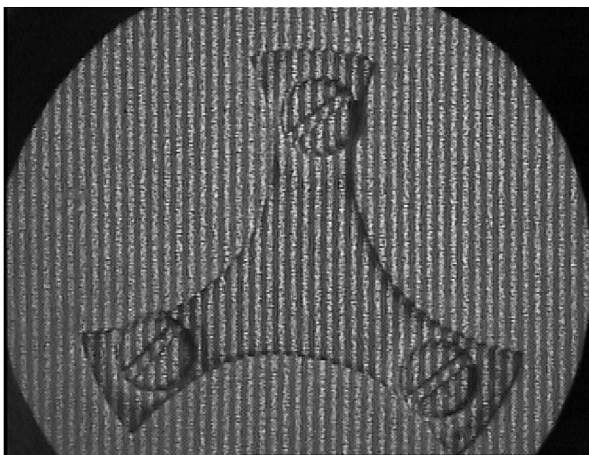
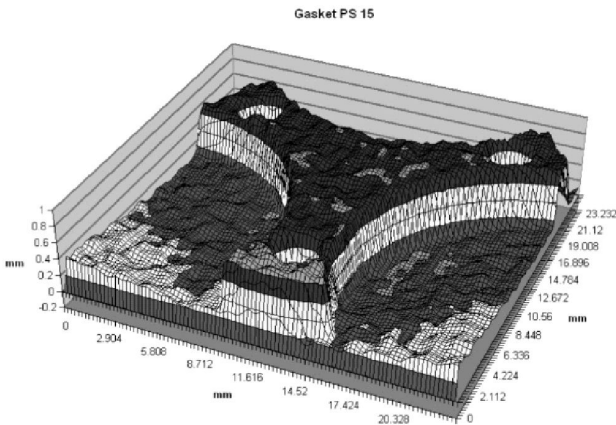


FIGURA 4. Interferómetro de Talbot para obtener la topografía del objeto mostrado en la Fig. 5.



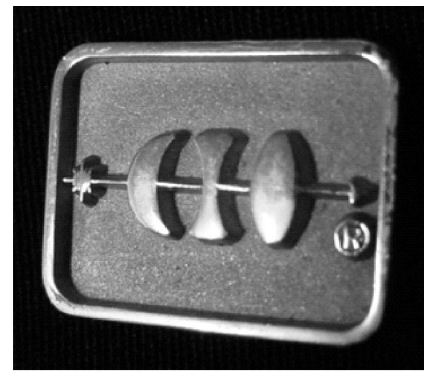
a)



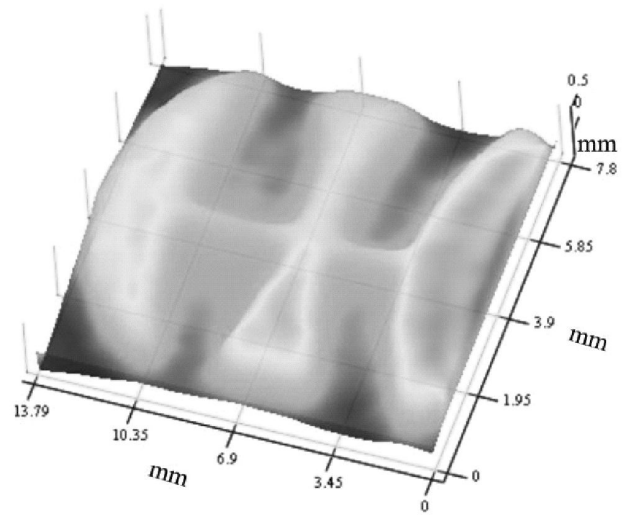
b)

FIGURA 5. a) Objeto del cual se desea la topografía: gasket; b) Relieve recuperado.

se utilizó una técnica de corrimiento de fase de 15 pasos [10] para promediar el ruido que las imágenes presentan debido al moteado.



a)



b)

FIGURA 6. a) Pin del CIO; b) Relieve recuperado.

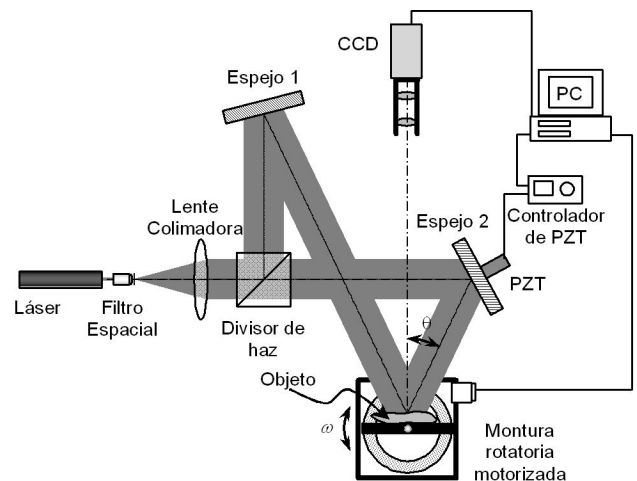


FIGURA 7. Sistema ESPI.

2.3. Interferometría de moteado (ESPI)

La técnica implementada [11] consiste en utilizar un sistema ESPI con iluminación dual, simétrica y colimada como

se muestra en la Fig. 7. Se capta mediante una cámara CCD, una imagen del objeto bajo estudio. Posteriormente el objeto es rotado en un pequeño ángulo ω con respecto al eje y , tomando una segunda imagen. Estas son restadas para obtener un patrón de franjas que nos dará información de la topografía del objeto.

De la Fig. 8 se puede deducir la ecuación de profundidad del objeto. Sea el plano xy un plano de referencia, con respecto al cual será medida la topografía. En el diagrama anterior, se consideran dos puntos del objeto $P(x_0, y_0)$ y $P(x_1, y_1)$, éste último se encuentra a una posición angular de $\alpha(x_1, y_1)$. La profundidad del punto $P(x_0, y_0)$ con respecto al plano de referencia es denotada como z . Si el objeto es rotado con respecto al eje y un ángulo ω , entonces el punto $P(x_0, y_0)$ y $P(x_1, y_1)$ se localizan en una segunda posición, donde para el segundo punto se ha denotado como $P'(x_1, y_1)$. De un análisis geométrico es posible obtener

$$U = 2 \cdot z \cdot \text{sen} \left(\frac{\omega}{2} \right), \tag{8}$$

donde U es la componente del vector de desplazamiento en la dirección x .

Para un interferómetro con iluminación dual colimada, se tiene que la relación entre la fase y desplazamiento U está dada por [12]:

$$\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot U \cdot \text{sen} \theta, \tag{9}$$

donde θ es el ángulo de la iluminación dual.

Considerando el hecho de que, el ángulo de rotación ω es muy pequeño, y sustituyendo la Ec. (8) en la (9), se obtiene [13]:

$$z(x, y) = \frac{\Delta\phi(x, y) \cdot \lambda}{4 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \text{sen} \theta}, \tag{10}$$

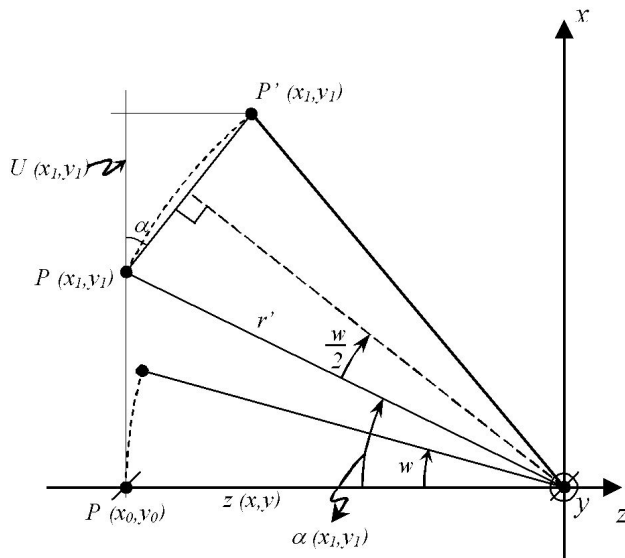
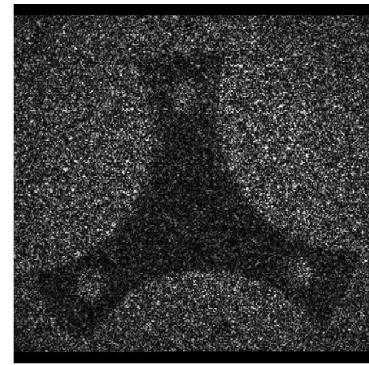
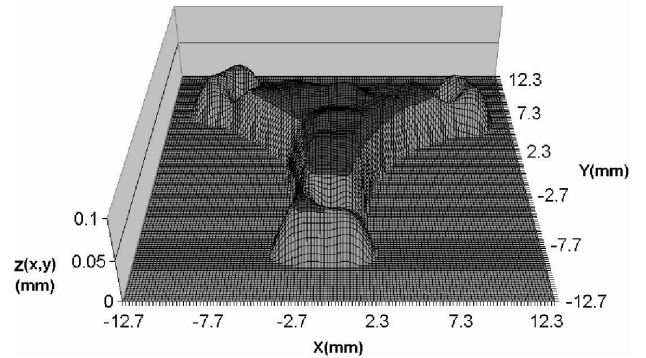


FIGURA 8. Diagrama para determinar la topografía de un objeto.



a)



b)

FIGURA 9. a) Objeto: gasket iluminada con láser, b) Relieve recuperado por ESPI, usando un interferómetro con iluminación dual.

la cual determina la topografía del objeto, quedando la ecuación dependiente de la fase obtenida de la forma ya descrita, ángulo de rotación del objeto, y el ángulo de iluminación dual colimada. El intervalo de contorno estaría dado por:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{2 \cdot \omega \cdot \text{sen} \theta}. \tag{11}$$

La Fig. 9 muestra la topografía del objeto obtenida por esta técnica al utilizar desplazamiento de fase de cuatro pasos y cuyo objeto es mostrado en la Fig. 5a. Los datos experimentales correspondientes son: $\lambda = 0.663 \mu\text{m}$, $\omega = 69.81 \times 10^{-6} \text{ rad}$ y $\theta = 59.18^\circ$.

3. Conclusión y discusión de las técnicas

Se presentaron resultados acerca de la obtención de la topografía de algunos objetos. Las técnicas aplicadas son: proyección de franjas con luz blanca (método incoherente), interferometría de Talbot y de ESPI. De manera general se puede mencionar que la técnica de proyección de franjas con luz blanca resulta una técnica de fácil manejo, ya que las otras técnicas utilizan iluminación láser, lo que con lleva a una fácil desalineación del sistema. Sin embargo, la técnica ESPI tiene un mayor poder de resolución, le sigue luego la interferometría de Talbot y finalmente la técnica de proyección de franjas utilizando luz blanca. El uso de la interferometría Talbot queda restringida a analizar topografía de objetos pequeños, ya

que depende del tamaño de la rejilla y de la lente colimadora. Lo mismo sucede con la técnica ESPI, dado que utiliza lentes colimadoras en la iluminación dual. Se puede observar que la técnica de proyección de franjas no presenta esta restricción.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo de Ciencia y Tecnología del estado de Guanajuato convenio 05-04-K117-037, anexo 1 el apoyo parcial otorgado. J. Mauricio Flores M. y D. Donato Aguayo agradecen a CONACYT el apoyo económico recibido a través de sus becas de maestría.

-
1. <http://www.plastunivers.com/Arees/enginversa/resumen.htm>
 2. A. Martínez, *Evaluación de formas de superficies: comparación de distintas técnicas ópticas*, Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, B.C. México (Mayo de 1987).
 3. D. Malacara –Hernández, M. Servín, Z. Malacara, *Interferogram analysis for optical testing* (Marcel Dekker Inc., NY, 1998) p. 119.
 4. T. Kreis, *Holographic Interferometry* (Akademie Verlag Inc., New York, NY, 1996) p. 125.
 5. K.J. Gåsvik, *Optical metrology* (John Wiley&Sons Ltd., Great Britain, 1987) p. 128.
 6. J.A. Rayas, R. Rodríguez-Vera, A. Martínez, *proc. SIPE* **5766** (2005) 101.
 7. J.W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1996) Chap. 4.
 8. R. Rodríguez-Vera, D. Kerr y F. Mendoza Santoyo, *J. Mod. Opt.* **38** (1991) 1935.
 9. J.M. Flores M., *Determinación de topografía de un gasket mediante la proyección de una imagen de Talbot*, Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, León, GTO. México (Agosto 2004).
 10. J. Schwider *et al.*, *Appl. Opt.* **22** (1983) 3421.
 11. D. Donato Aguayo, *Detección de forma y deformaciones por ESPI*, Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones en Óptica, León, GTO. México (Agosto 2004).
 12. A. Martínez, R. Rodríguez-Vera, J.A. Rayas y H.J. Puga, *Opt. Comm.* **223** (2003) 239.
 13. C. Joenathan, B. Berthold Pfister y H.J. Tiziani, *Appl. Opt.* **29** (1990) 1905.