

# A reconstruction of objects by interferometric profilometry with positioning system of labeled target periodic

Néstor Alonso Arias-Hernández<sup>a</sup>, Martha Lucía Molina-Prado<sup>a</sup>, & Jaime Enrique Meneses-Fonseca<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Óptica Moderna, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. [nesariher@unipamplona.edu.co](mailto:nesariher@unipamplona.edu.co)

<sup>b</sup> Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. [jaimen@uis.edu.co](mailto:jaimen@uis.edu.co)

Received: March 15<sup>th</sup>, 2014. Received in revised form: June 1<sup>st</sup>, 2014. Accepted: March 15<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

A method to extract 3D information using a white light interferometer without using PZT is presented. Instead a positioning system that uses the phase sensitivity of a target periodic is employed. The image treatment realized on the periodic target permits to calculate the relative distance between Mirau objective and object surface. Topographic reconstructions of objects with dimensions of some tenths of millimeters were calculated with an accuracy of approximately 28 nanometers. Theoretical analysis and experimental results are shown.

**Keywords:** profilometry, optical metrology, surface topography, Mirau interferometer.

# Reconstrucción de objetos por perfilometría interferométrica con sistema de posicionamiento de mira periódica

## Resumen

En este trabajo se presenta un método para extraer información 3D usando un microscopio interferométrico, sin la necesidad de utilizar un dispositivo transductor piezoeléctrico (PZT, por su siglas en inglés). En lugar de ello se utiliza un sistema de posicionamiento que aprovecha la sensibilidad a la fase de una mira periódica, que es registrada mediante el uso de un sistema de visión. El procesamiento de la mira permite calcular la distancia relativa entre el objetivo Mirau y el objeto. Reconstrucciones topográficas de algunas décimas de milímetros fueron calculadas con una precisión de aproximadamente 28 nanómetros. Se presenta un análisis teórico y algunos resultados experimentales.

**Palabras clave:** Perfilometría, metrología, óptica, topografía de superficie, interferómetro Mirau.

## 1 Introducción

La interferometría con luz blanca es una técnica ampliamente utilizada para medidas topográficas de alta resolución axial, sin contacto [1-5,14]. La técnica básicamente divide un rayo de luz de una fuente de luz blanca en dos haces separados. Un rayo es reflejado por la superficie del objeto a medirse (Brazo muestra) mientras que el otro sigue un trayecto conocido de distancia óptica constante (Brazo de referencia). Debido al ancho de banda espectral extendido de la fuente y la longitud de coherencia corta, franjas de buen contraste se obtendrán únicamente cuando los dos brazos del interferómetro estén próximos en longitud, cuya diferencia sea menor a la longitud de coherencia de la fuente. Usualmente se utiliza un PZT para variar la distancia óptica del brazo muestra del

interferómetro. Las variaciones de altura a través de la muestra pueden ser determinadas buscando la posición que tiene el PZT cuando se obtiene el máximo contraste de franjas. Este modo de operación es conocido como *modo de sensado del pico de coherencia por barrido vertical*. En esta situación, el rango máximo axial de distancias para el análisis topográfico es determinado por el máximo desplazamiento del PZT. Un esquema experimental tradicional puede incluir un objetivo tipo Mirau de 10X y un PZT con desplazamiento máximo de 40 $\mu$ m. Si se desea incrementar el máximo desplazamiento, los dispositivos PZT presentan algunos inconvenientes, dentro de estos se puede mencionar: alto costo y presencia de histeresis.

En publicaciones anteriores se ha demostrado la alta precisión y resolución de un sistema de posicionamiento que se obtiene al emplear una mira periódica [11,13]. La

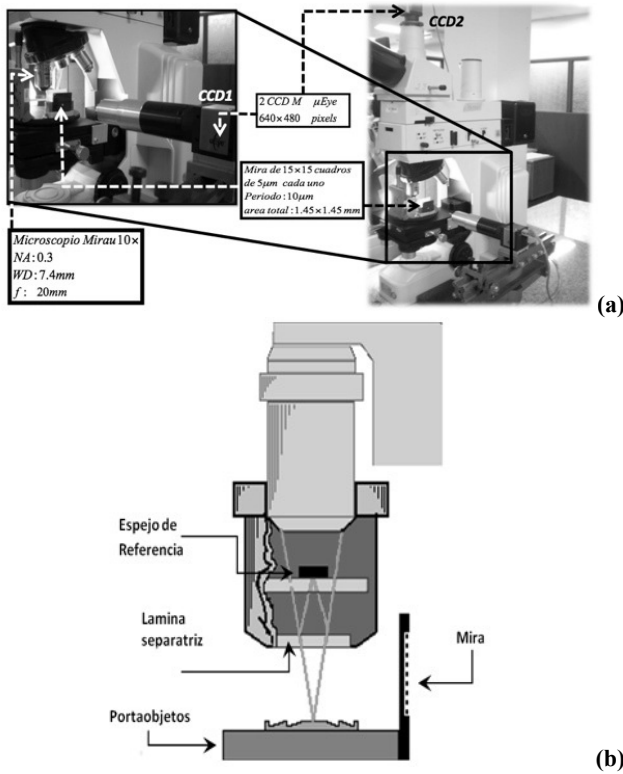


Figura 1. (a) Esquema de un sistema interferométrico y cámara de posicionamiento utilizada. (b) Esquema de un interferómetro Mirau y la Mira de posicionamiento.

Fuente: propia

alta sensibilidad se obtiene al utilizar la información de fase espacial como elemento codificador de la posición espacial de la mira periódica. En el presente artículo se propone reemplazar el PZT utilizado para realizar el barrido axial en un microscopio interferométrico tipo Mirau del interferómetro.

En el presente trabajo se realiza inicialmente una descripción de la microscopía interferencial tipo Mirau, en donde se detalla el principio de funcionamiento del interferómetro. De igual forma se explica la metodología tradicional para el análisis de franjas interferométrica de luz policromática, utilizando como sistema de codificación de altura un sistema de posicionamiento basado en el rastreo de una mira periódica con un sistema de visión apropiado.

## 2. Sistema de microscopía interferencial tipo Mirau

Un sistema de microscopía interferencial tipo Mirau está compuesto por un microscopio de reflexión, el cual tiene un objetivo interferométrico tipo Mirau, Fig. 1(a) y (b). El objetivo interferométrico Mirau está compuesto de una lámina semitransparente entre el objetivo y la muestra (lámina separatriz), y un espejo de referencia sobre el centro de su cara frontal. El funcionamiento del objetivo interferométrico es similar al de un interferómetro Michelson, con la diferencia que los dos brazos por donde la luz realiza su recorrido están en un mismo eje. De esta

manera, cuando el haz atraviesa el objetivo, la lámina separatriz divide el frente de onda en dos: uno que se transmite hacia la muestra y el otro que es reflejado. El haz reflejado va al espejo de referencia, regresa a la lámina separatriz y se superpone con el reflejado por el objeto. Así, la correlación de los dos haces es vista por el objetivo. El contacto óptico se obtiene cuando la diferencia de camino óptico entre la lámina separatriz-espejo y la lámina semitransparente-objeto, es cero.

## 3. Análisis de franjas de interferencia de luz policromática

Al utilizar el sistema mostrado de la Fig. 1(a) y (b) con luz policromática, las reflexiones sobre la muestra, ubicada en el portaobjeto, son combinadas con las reflexiones provenientes del espejo de referencia, localizado en el objetivo Mirau. El campo eléctrico  $E(t)$  que llega al detector es la superposición de la luz que proviene de la muestra y el espejo de referencia,

$$E(t) = E_s(t) + E_r(t + \tau) \quad (1)$$

Donde  $E_s$  y  $E_r$  son respectivamente las amplitudes ópticas del haz señal y del haz referencia. Mientras que,  $\tau$  es el tiempo de retraso debido a la diferencia de longitud en los caminos ópticos de los dos haces. La intensidad registrada por el detector está dada por,

$$I_d = \langle |E(t)| \rangle = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{\frac{1}{2}} \Re\{\gamma(\tau)\} \quad (2)$$

donde  $\gamma(\tau)$  es el grado complejo de coherencia mutua, que se expresa como,

$$\gamma(\tau) = \frac{\langle E_s^*(\tau) E_r(t+\tau) \rangle}{(I_s I_r)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

En general, el grado complejo de coherencia mutua incluye los efectos de coherencia espacial y temporal. Para un interferómetro de división de amplitud con el microscopio interferométrico Mirau en iluminación de Köhler, la coherencia espacial se puede despreciar. Así la coherencia mutua se reduce a la auto-coherencia o coherencia temporal, en este caso,

$$I_d(\tau) = \langle |E(t)| \rangle = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{\frac{1}{2}} \Re\{\gamma_{tc}(\tau)\} \quad (4)$$

Donde,  $\Re\{\gamma_{tc}(\tau)\}$  es la parte real del grado complejo de coherencia temporal de la fuente de luz. Su forma normalizada está dada por  $\gamma_{11}(\tau)$ ,

$$\gamma_{11}(\tau) = \frac{\Gamma_{11}(\tau)}{\Gamma_{11}(0)} \quad (5)$$

Donde  $\Gamma_{11} = \langle E(t+\tau) E^*(\tau) \rangle$  y el subíndice 11, corresponde a un único punto de la fuente incoherente. El grado complejo de coherencia normalizado de la fuente de luz es dado por la transformada de Fourier de la densidad espectral de energía. Si la fuente de luz es policromática y se asume una densidad espectral de energía gaussiana con

ancho espectral  $\Delta f$  y frecuencia media  $\bar{f}$ , el grado complejo de coherencia temporal  $\gamma_{11}$  estará dado por,

$$\gamma_{11}(\tau) = G_0 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{f-\bar{f}}{\Delta f}\right)^2\right] \exp(-i2\pi\tau f) df \quad (6)$$

Donde  $G_0$  es una constante. Teniendo en cuenta que  $\gamma_{11}(0) = 1$ , se tiene que:

$$\gamma_{tc}(\tau) = \exp[-(\pi\tau\Delta f)^2] \exp(-i2\pi\bar{f}\tau) \quad (7)$$

Así la ec. 4, se puede escribir como,

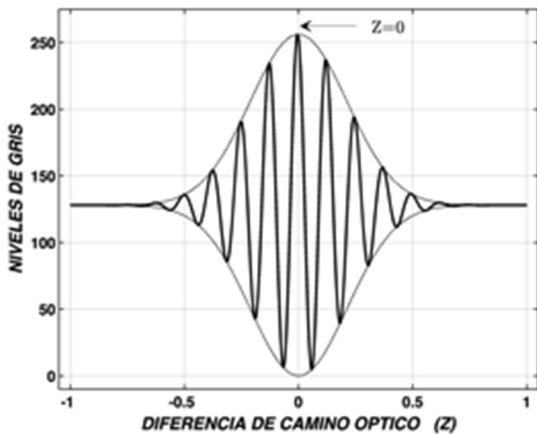
$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{\frac{1}{2}} \exp[-(\pi\tau\Delta f)^2] \cos(2\pi\bar{f}\tau) \quad (8)$$

O

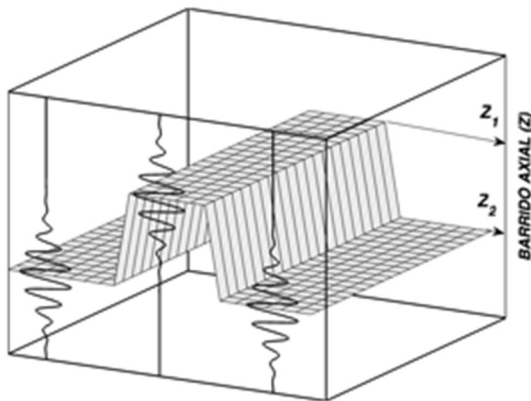
$$I_d = I_o [1 + V(\tau) \cos(2\pi\bar{f}\tau)] \quad (9)$$

Donde  $I_o$  es la intensidad de fondo,  $V$  es la función de contraste de las franjas o envolvente del patrón de franjas observado. Esta función  $V$  está dada por,

$$V(\tau) = \frac{2(I_s I_d)}{I_s + I_d} \exp[-(\pi\tau\Delta f)^2] \quad (10)$$



(a)



(b)

Figura 2. (a) Perfil del interferograma. (b) Representación de las vistas de interferograma en tres píxeles arbitrarios y la localización de los picos de los interferogramas que determinan las medidas de alturas relativas.

Fuente: propia

Si en el sistema de la Fig. 2(a) y 2(b) el origen de coordenadas es tomado sobre un punto  $z$  en particular en la dirección axial, donde los dos caminos ópticos son iguales, y la superficie de prueba es movida a lo largo del eje  $z$  en una serie de pasos de tamaño  $\Delta z$ , entonces la intensidad sobre un punto  $(x,y)$  en el plano de la imagen que corresponde a un punto del objeto de altura  $h$ , se puede escribir como,

$$I_d(\tau) = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{\frac{1}{2}} \gamma\left(\frac{p}{\lambda}\right) \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)p + \phi_o\right] \quad (11)$$

donde  $I_s$  e  $I_r$  son las intensidades de los dos haces que actúan independientemente,  $\gamma\left(\frac{p}{\lambda}\right)$  es el grado complejo de coherencia, la cual corresponde a la visibilidad de la envolvente de la franjas de interferencia, y  $\cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)p + \phi_o\right]$  es la modulación cosenoidal donde  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda media de la fuente,  $p = 2(z - h)$  es la diferencia de longitud de los caminos ópticos atravesados por los dos haces y  $\phi_o$  es la diferencia del corrimiento de fase debido a las reflexiones sobre el divisor de haz, los espejos y posiblemente el material de prueba. La Fig. 2(a), muestra las variaciones de intensidad sobre el punto de la imagen cuando el objeto es barrido axialmente.

Se utiliza una cámara (CCD2 en la Fig. 1(a)), ubicada en el plano imagen del sistema óptico del microscopio, como mecanismo de registro del interferograma. Cada pixel de la cámara tiene la posibilidad de registrar patrones de interferencia similares a los de la Fig. 2(a) en la medida que el objeto es desplazado en la dirección  $z$ . Estos patrones de interferencia tienen la posición del máximo de la envolvente en posiciones de barrido que depende de la topografía de la superficie del objeto. De esta manera, de las posiciones del máximo de la envolvente sobre el eje de barrido se obtiene la topografía del objeto, ver Fig. 2(b).

#### 4. Detección de máximos

La detección de máximos es una técnica que aprovecha la propiedad de los interferogramas producidos por una fuente policromática. Según la ec. 9, las franjas se encuentran moduladas por una envolvente  $V(\tau)$ , presentando un máximo de intensidad en puntos donde la diferencia de camino óptico es cero. Como se menciona en la sección anterior, determinar la forma del objeto consiste en localizar la posición del máximo de la envolvente del interferograma para cada punto del objeto. Esto se realiza desplazando uno de los brazos del interferómetro Mirau, de tal manera, que cada punto pase por el plano de contacto óptico. Este desplazamiento se puede realizar moviendo el porta-objeto o moviendo el objetivo y dejando fijo el porta-objeto. En el presente trabajo se deja fijo el objetivo de microscopio y se desplaza el porta-objeto, sobre el cual se ha adherido una mira periódica para determinar su posición axial, como se muestra en la sección siguiente.

La cámara CCD2 registra los valores de la intensidad del interferograma, almacenando tanto el máximo del interferograma como el desplazamiento del portaobjeto, asociado al valor de intensidad máximo. Así se obtienen dos

matrices: una con la información de los máximos de intensidad del interferograma y otra con las posiciones de desplazamiento del portaobjeto. La primera da una imagen en niveles de grises de los puntos del objeto focalizados y con la mayor reflectividad y la segunda brinda la información de altura del objeto discretizada en un número de niveles de grises, propio de la cámara utilizada.

### 5. Dispositivo experimental

La Fig. 1(a y b) muestra como está conformado el sistema de microscopía interferencial Mirau, utilizado en el presente artículo. Este está constituido por un microscopio de reflexión metalográfico Eclipse 600, marca Nikon y un objetivo interferométrico tipo Mirau de 10X de apertura numérica (NA) de 0.3 y de distancia de trabajo (WD) de 7.4mm, la cual está sincronizado a dos cámaras CCD monocromáticas de 640x480 pixeles de conexión USB, marca µEye. Una de estas cámaras tiene como propósito registrar el interferograma (CCD2) y la otra registrar la mira que está adherida al porta-objeto del microscopio (CCD1), ver Fig. 1(a) . Tradicionalmente la muestra se ubica sobre un PZT y este sobre el porta-objeto.

La propuesta implementada en el presente artículo reemplaza el PZT por la mira periódica que se ubica verticalmente sobre el porta-objeto, ver Fig. 1(a). La mira

está constituida por un arreglo periódico de 15x15 cuadros de 5µm cada uno y de período 10µm, constituyendo así una mira de 1.45mm x 1.45mm, ver Fig. 3(a).

### 6. Calibración del sistema

Inicialmente se realiza la calibración del sistema de posicionamiento, es decir, obtener la resolución y rango de desplazamiento de la mira, la cual es observada por una cámara µEye monocromática de 640x480 pixeles(CCD1). Para obtener una imagen ampliada de la mira se utiliza un objetivo de microscopio de 50mm de distancia focal, junto con un tubo extensor de 10cm aproximadamente. Para evaluar la influencia del ruido y vibraciones del sistema se adquirieron 100 imágenes de la mira para una posición fija axial. Se calcularon las 100 posiciones del centro de la mira utilizando el método de codificación de fase. Este método aprovecha la información de fase debido a la distribución regular de los puntos para calcular el centro de cada uno. Como el centro de cada punto debe tener una fase igual a un número entero de  $2\pi$ , la posición se obtiene con precisión subpixel al interpolar la fase. Este método es presentado en detalle en [11].

La desviación estándar de las coordenadas del centro los eje X y Y determinan la influencia del ruido en el cálculo de la posición axial usando la mira. De igual forma, se puede determinar el tamaño del pixel de la CCD1 en el plano de la mira, valor importante para calcular las coordenadas axiales en unidades métricas. Al desplazar el porta-objeto en dirección vertical y al usar el factor de conversión pixeles a milímetros sobre el plano de la mira, se puede establecer la dirección del eje de barrido. La Fig. 5(a) muestra los datos obtenidos para un desplazamiento vertical de 5.3 µm de la mira. De esta serie de datos se determina el eje de barrido, al realizar un ajuste por mínimos cuadrados, y el vector unitario del eje de barrido. Con el vector unitario se puede determinar la posición de cualquier posición de la mira al proyectar las coordenadas del centro sobre el eje de barrido, ver Fig. 5(b).

Del análisis de los datos se obtuvo una desviación estándar de 0.0011µm en X y 0.0010µm en Y, como se puede observar en la Fig. 3(b) y el tamaño de pixel calculado es de  $D_{px} = 3.95\mu\text{m}$  en X y  $D_{py} = 3.96\mu\text{m}$  en Y, ver en la Fig. 3(a). Esto implica que el sistema es bastante estable, pudiéndose resolver dos posiciones axiales consecutivas igual al doble de la desviación estándar, empleando la mira. Como el sensor es de 640x480 pixeles, el campo de observación es de 2.535mm x 1.899mm.

Para el cálculo del centro de la mira empleando la información de fase se requiere que la imagen de la mira en la CCD1 se observe completamente. Esto implica que la imagen de la mira ocupa una fracción de la superficie del sensor de la cámara CCD1, obteniéndose regiones libres en los extremos de la mira, como se observa en la Fig. 3(a). Esta región libre define el rango de traslación de la mira en los ejes X y Y. Debido a la disposición de la cámara CCD1, el rango de traslación en X define el rango de desplazamiento máximo del sistema de perfilometría, que corresponde a 0.449 mm. Para aplicaciones en donde sea necesario un mayor rango de desplazamiento es conveniente

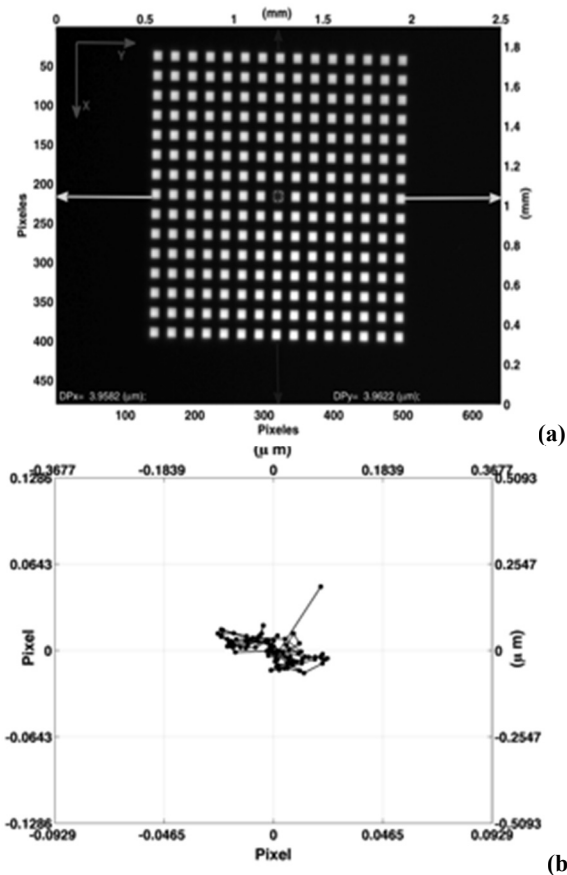


Figura 3. (a) Imagen de la mira capturada por la CCD1. (b) Dispersión de la medida de 100 posiciones sin desplazamiento. Fuente: propia

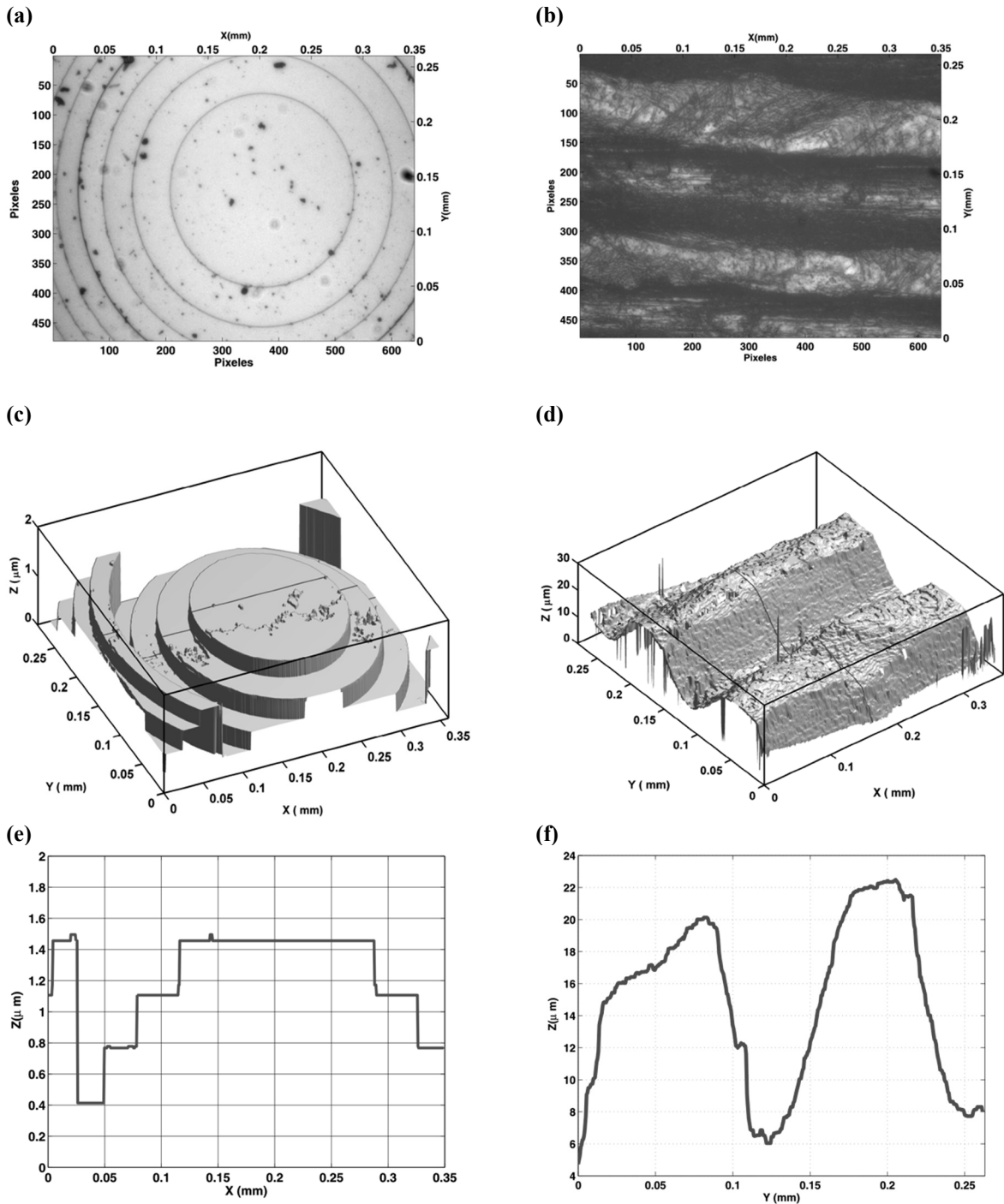


Figura 4. Resultados de algunas reconstrucciones realizadas por el sistema interferométrico sin la utilización de un PZT: (a), (b) Imagen de intensidad focalizadas de la lente de Fresnel y parte de una moneda de 500 pesos. (c),(d) Reconstrucción 3D de la lente de Fresnel y Moneda. (e),(f) Perfil de la lente de fresnel y de la Moneda.  
 Fuente: propia

orientar la cámara, de tal forma, que la dirección de mayor número de pixeles coincida con la dirección de barrido. De esta manera, el uso de la mira permite un rango de desplazamiento o tamaño máximo del objeto de 449 micras con desplazamiento mínimo de 2.2 nm.

Por otro lado, para determinar el campo de observación

de la cámara colocada en el interferómetro (CCD2), es decir el tamaño de la región transversal al eje óptico observada sobre el objeto, se realiza un procedimiento clásico de calibración. Este procedimiento consiste en realizar desplazamientos conocidos, empleando tornillos micrométricos, de un objeto que está siendo observado por

el sistema de visión del interferómetro, al cual se facilite hacer el seguimiento de un punto particular de su superficie.

Esto permite obtener una función de asociación entre los píxeles en el plano imagen y milímetros en el plano del objeto. En este caso como el desplazamiento realizado es lineal, se encontró una recta de ajuste por mínimos cuadrados,  $D_p = 1832,02D_m - 16955$  [píxeles], donde  $D_p$  es la distancia recorrida en píxeles y  $D_m$  la distancia recorrida en mm. Esta ecuación permite determinar el tamaño del pixel de observación de la cámara en el interferómetro (CCD2), bajo la suposición de que el pixel posee una razón de aspecto 1. El tamaño del pixel obtenido es  $5,4584 \times 10^{-4} \text{mm}$ , y el campo de observación es  $0,2620 \text{mm} \times 0,34933 \text{mm}$ , ver Fig. 5 (a) y (b).

**7. Resultados**

La perfilometría con luz policromática fue implementada con base en la detección de máximos de intensidad explicada en las secciones 3 y 4. El método se implementó utilizando un sistema sincronizado de dos cámaras, una que registra las intensidades del interferograma y otra que registra la mira de posicionamiento. La imagen registrada de la mira permite obtener la posición en píxeles del centro de la mira, la cual es posteriormente convertida a mm mediante el proceso de calibración [11]. Mientras se realiza el barrido vertical, se almacenan dos matrices de igual tamaño en memoria (dimensiones que son determinadas por el sensor de la cámara que registra el interferograma): la matriz de los valores de intensidades máximas del interferograma y la matriz de posiciones de los máximos, las cuales son calculadas por el método de posicionamiento de la mira. Al realizarse el barrido completo, la matriz de intensidades máximas almacena el valor del máximo de intensidad obtenido en todo el recorrido y su correspondiente posición del centro de la mira, para cada posición en la imagen de la CCD2. La matriz de intensidades máximas brinda información de reflectividad de la superficie del objeto. La matriz de las posiciones de los máximos corresponde a la topografía de la superficie del objeto.

Utilizando como fuente de iluminación la lámpara halógena y aplicando el algoritmo de detección de máximos de intensidad sobre dos muestras (lente de Fresnel y una moneda de 500 COP), se obtuvieron la reconstrucción 3D de sus superficies. Las Figs 4 (a) y (b) muestra las matrices de máximos de intensidad y las Figs 4 (c) y (d) las matrices de las posiciones de los máximos en micras para las dos muestras analizadas. Para cada posición del centro de la mira se calcula la posición sobre el eje de barrido al realizar la proyección, ver Fig. 5(b). Para la lente de fresnel se realizó un barrido de 2 micras y para la moneda de 24 micras.

**8. Conclusiones**

Se implementó un sistema de microscopía interferencial Mirau, que permite obtener la topografía de un objeto, con una resolución axial de  $0,028 \mu\text{m}$  (tres desviaciones estandar) y una resolución transversal de  $5,45 \times 10^{-4} \text{mm}$ ; sin la necesidad de utilizar un dispositivo de posicionamiento piezoeléctrico (PZT) para obtener las posiciones o medida

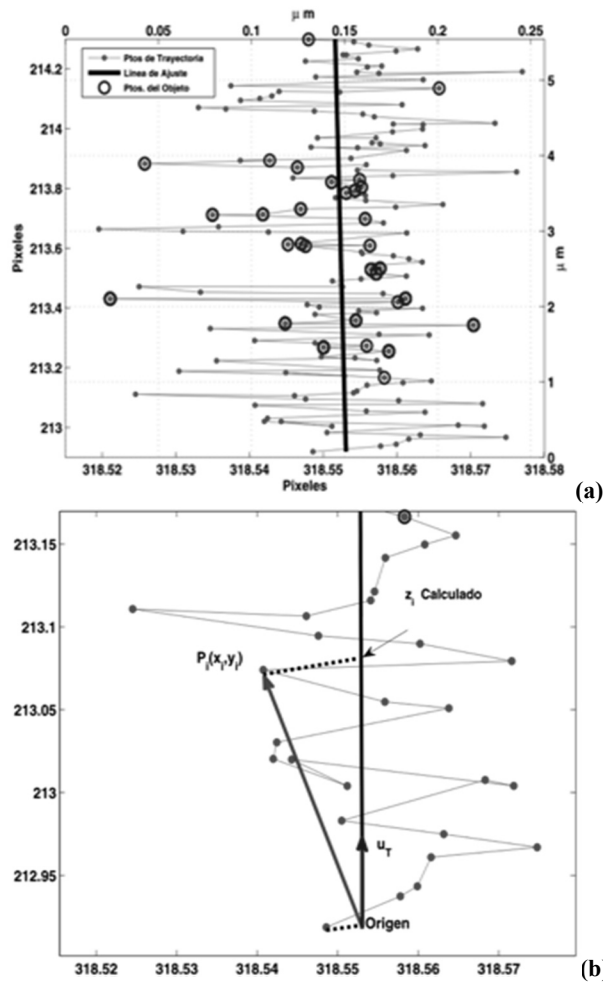


Figura 5 (a). Cálculo de posiciones y trayectoria del barrido. (b). Determinación de desplazamientos. Fuente: propia

de las alturas. El posicionamiento se logra utilizando el método de posicionamiento de alta resolución basado en la recuperación de la fase [11]. Para este esquema experimental, se hace un análisis de franjas de interferencia de luz blanca. El nuevo esquema implementado abre la posibilidad de ampliar el rango de desplazamiento, permitiendo reconstruir objetos de dimensiones mayores que las permitidas por un dispositivo piezoeléctrico convencional. En este caso, se utilizó una cámara monocromática de 640X480 píxeles, un objetivo de microscopio de 50mm de distancia focal, un tubo extensor de 10cm y una mira de 15x15 cuadros de  $5 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$  de período. Se logra un desplazamiento de barrido máximo de  $0,468 \text{mm}$ , con posibilidad de aumentar su rango de trabajo a  $1,0858 \text{mm}$ .

**Agradecimientos**

Néstor Alonso Arias Hernández y Martha Lucía Molina Prado, agradecen al Departamento de Ciencia, Tecnología e innovación – COLCIENCIAS Colombia, a la Universidad de Pamplona (Colombia) a través de la Vicerrectoría de

Investigación y Extensión (Proyecto Interno PR130-00-012(GA160-BP-II-2013-2.1.2.2.1)) y a la Universidad Industrial de Santander (Colombia) por el apoyo financiero y logístico para la realización del presente trabajo. De igual forma Jaime Meneses agradece el apoyo brindado por la Universidad Industrial de Santander a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (Proyecto Interno 1343).

## Referencias


- [1] Caber, P.J., Interferometric profiler for rough surfaces, *Appl. Opt.*, 32 (19), pp. 3438-3441, 1993. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.32.003438>
- [2] Deck, L. and De Groot, P., High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry, *Appl. Opt.*, 33 (31), pp. 7334-7338, 1994. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.33.007334>
- [3] De Groot, P. and Deck, L., Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain, *J. of Mod. Opt.* 42 (2), pp. 389-401, 1995. <http://dx.doi.org/10.1080/09500349514550341>
- [4] Sandoz, P., An algorithm for profilometry by white light phase shifting interferometry, *J. Mod. Opt.*, 43 (8), pp. 1545-1554, 1996. <http://dx.doi.org/10.1080/09500349608232826> <http://dx.doi.org/10.1080/095003496154987>
- [5] Larkin, K.G., Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry, *J. Opt. Soc. Am.*, 13 (4), pp. 832-843, 1996. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAA.13.000832>
- [6] Takeda, M., Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *J. Opt. Soc. Am.*, 72 (1), pp. 156-160, 1982. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.72.000156>
- [7] Sandoz, P., Ravassard, J.C., Dembele, S. and Janex A., Phase sensitive vision technique for high accuracy position measurement of moving targets, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 49 (4), pp. 867-872, 2000. <http://dx.doi.org/10.1109/19.863940>
- [8] Sandoz, P., Bonnas, V. and Gharbi, T., High-accuracy position and orientation measurement of extended two-dimensional surfaces by a phase-sensitive vision method, *Appl Opt.*, 41 (26), pp. 5503-5511, 2002. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.41.005503>
- [9] Sandoz, P., Nanometric position and displacement measurement of the six degrees of freedom by means of a patterned surface element, *Appl. Opt.*, 44 (8), pp. 1449-1453, 2005. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.44.001449>
- [10] Sandoz, P., Zeggari, R., Prétet, J.L. and Mougin, C., Position referencing in optical microscopy thanks to sample holders with out-of-focus encoded patterns, *Journal of Microscopy*, 255 (3), pp. 293-303, 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2818.2007.01745.x>
- [11] Arias, N., Suarez, M.A., Meneses, J. y Gharbi, T., Medida de la orientación, posición y desplazamiento en el plano de un objeto por codificación de fase, *Revista BISTUA*, 7 (2), pp. 70-76, 2009.
- [12] Galeano, J., Sandoz, P., Gaiffe, E., Prétet, J.L. and Mougin, C., Pseudo-periodic encryption of extended 2D surface for high accurate recovery of any random zone by vision, *International Journal of Optomechatronics*, 4 (1), pp. 65-82, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/15599611003660395>
- [13] Arias, N., Suarez, M.A., Meneses, J. and Gharbi, T., 3D localization of a labeled target by means of a stereo vision configuration with subvoxel resolution. *Opt. Exp.*, 18 (23), pp. 24152-24162, 2010. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.024152>
- [14] Munera, N., Lora, G.J., Garcia-Sucerquia J., Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3D reconstruction of dental pieces. *DYNA*, 79 (171), pp. 65-63, 2012.

**N.A. Arias-Hernández**, received the Bsc in Mathematical and Physics in 1994, from the Universidad Popular del Cesar, Colombia, the MSc degree in Physics in 2004, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia, the PhD degree in Natural Sciences (Physics) in 2010. He has worked as a professor and researcher for over fifteen years. Currently, he is a full professor in the Physics Program, Faculty of Natural Sciences,

Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. His research interests include: optics, image processing, optical design and optical metrology. ORCID: 0000-0002-9224-7654

**M. L. Molina-Prado**, received the Bsc. in Mathematic and Physics in 1994, from the Universidad Popular del Cesar, Colombia, the MSc degree in Physics in 2003, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia, the PhD degree in Natural Sciences (Physics) in 2010, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia. She has worked as a professor and researcher for over fifteen years. Currently, she is a full professor in the Physics Program, Faculty of Natural Sciences, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia. Her research interests include: optics, speckle metrology and photorefractive crystals. ORCID: 0000-0002-3347-7986

**J.E. Meneses-Fonseca**, received the Bsc in Physics in 1990, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia, the MSc degree in Physics in 1993, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia, the PhD degree in Sciences Pour L'ingénieur in 1998, from the Université de Franche Comté, France. He has worked as a professor and researcher for over seventeen years. Currently, he is a full professor in the Physics Program, Faculty of Natural Sciences, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. His research interests include: optics, signal processing and optical metrology. ORCID: 0000-0001-5551-9959



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Mecánica

Oferta de Posgrados

**Maestría en Ingeniería - Ingeniería Mecánica**

Mayor información:  
E-mail: [acmecanica\\_med@unal.edu.co](mailto:acmecanica_med@unal.edu.co)  
Teléfono: (57-4) 4259262