

Reconstrucción Topográfica Combinando Simultáneamente Métodos de Luz Monocromática con Luz Blanca

Arturo Plata G., Jaime Enrique Meneses, Miguel Angel Suarez S., Johnson Garzón*.

Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad Industrial de Santander,

Bucaramanga, Colombia. e-mail: aplata@uis.edu.co

Resumen

En la actualidad existen diversos sistemas ópticos para el análisis de superficies a partir de reconstrucciones 3D del objeto. Las técnicas interferométricas ofrecen resoluciones axiales adecuadas para el análisis de objetos de algunas micras de altura. La interferometría con luz monocromática presenta inconvenientes en objetos que poseen discontinuidades mayores de $\lambda / 2$ y en el caso de interferometría con luz blanca presenta inconvenientes debido a la no-linealidad del sistema de desplazamiento. En este trabajo se presenta un sistema metrológico que combina interferometría con luz monocromática y con luz blanca para el análisis de superficies con discontinuidades mayores de $\lambda / 2$.

Abstract

Currently there are several optical systems for surface analysis from 3D topography. Some interferometry techniques can offer adequate axial resolutions for object analysis with some microns of height. The monochromatic light interferometry present difficulties for discontinue greater than $\lambda / 2$ at objects. In addition, the white light interferometry presents difficulties because of no-linear displacement system. In this work a metrology system that combining monochromatic light interferometry and white light interferometry is introduced, for surface analysis with discontinue greater than $\lambda / 2$ at objects.

* Escuela de Ciencia Básica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

1. Introducción

La interferometría es actualmente un procedimiento estándar que permite, basados en la localización de las franjas, determinar la diferencia de camino óptico de dos haces. Si se conoce el camino de uno de ellos, se puede determinar el camino del segundo. Observando la diferencia de camino para todos los puntos de la fuente se logra obtener la información topográfica de un objeto, la cual es optimizada realizando algoritmos de tratamiento digital de imágenes.^[1]

Entre las técnicas diseñadas para decodificar la información de la fase del interferograma; se encuentra el método de “Phase Shifting”, cuyo concepto básico es determinar la fase del interferograma, adquiriendo varias imágenes del mismo al cambiar la fase en cierta cantidad conocida; estos cambios pueden ser introducidos tanto en el rayo objeto como el de referencia. Hay varios algoritmos usados para extraer la información de la fase, estos dependen del número de imágenes tomadas durante el cambio de fase^[2]; pero este método presenta problemas para discontinuidades discretas que sobrepasen una variación de fase de 2π .

Otra técnica fue desarrollada por P. De Groot and L. Deck al realizar un análisis en el dominio de frecuencia.^[3] Una tercera técnica de decodificación se realiza por medio de detección de máximos, de una manera análoga al confocal, y consiste fundamentalmente en localizar la posición de máxima intensidad para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección Z uno de los brazos del interferómetro. También citado como “Scanning Coherence” por Byron S. Lee and Timothy C. Strand,^[4]

Diferentes algoritmos han sido desarrollados para obtener la información topográfica de muestra y poder eliminar las desventajas que presentan cada uno de ellos.^[5, 6]

2. Teoría

a. Interferometría

El microscopio está basado sobre la interferometría, por tanto es importante determinar los parámetros que definirán la calidad de la señal para poder decodificar la información a partir del interferograma. En un interferómetro a dos ondas la intensidad luminosa esta dada por ^[7,8]

$$I(P') = I_1(P') + I_2(P') + g(\tau) \cos(2\pi\tau / \lambda_0) \quad (1)$$

Donde τ es la diferencia de camino óptico, $g(\tau)$ es la visibilidad de las franjas que es determinado por el ancho de banda y las dimensiones de la fuente.

b. Phase-shifting

Basados en el comportamiento del interferograma producido por una fuente monocromática según la ecuación (1), al ser la envolvente constante se puede codificar la topografía de una superficie en la diferencia de fase óptica entre los puntos. Esta técnica se realiza iluminando la muestra con una fuente monocromática de longitud central λ_0 y tomando una serie de n registros a medida que se introduce un factor de fase conocido igual a $2\pi/n$, al variar la diferencia de camino óptico. Empleando relaciones trigonométricas se halla la diferencia de fase donde está contenida la información topográfica de la muestra.

La técnica más utilizada para el desarrollo de este método es el realizado para n igual a cuatro imágenes, las cuales se van registrando a medida que se introduce una diferencia de camino en $\lambda_0/2$. Obteniendo imágenes cuya intensidad esta dada por.

$$\begin{aligned}
I_0(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y)) \\
I_1(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + \pi / 2) \\
I_2(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + \pi) \\
I_3(x, y) &= I_R + I_M + 2(I_R I_M)^{1/2} \cos(\phi(x, y) + 3\pi / 2)
\end{aligned} \tag{2}$$

La fase ϕ se puede calcular realizando la siguiente operación entre las imágenes.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \right) \tag{3}$$

La topografía de la muestra está dada por.

$$z(x, y) = \frac{\lambda_0 \cdot \phi(x, y)}{4\pi} \tag{4}$$

Para esta técnica se observa que al hallar la fase, el valor del arco tangente sólo toma valores entre $-\pi$ y π , mostrando una fase discontinua. Para eliminar esta discontinuidad es necesario realizar una corrección de fase conocida como “unwrapping”. Además presenta una desventaja debido a la ambigüedad en la determinación de variaciones de fase mayores de 2π entre puntos consecutivos.

c. Detección de máximos

En esta técnica se aprovecha la propiedad de un interferograma producido por una fuente policromática, según la ecuación (1) las franjas se encuentran moduladas por una envolvente $g(\tau)$ presentando un máximo de intensidad cuando la diferencia de camino óptico es cero. De una manera análoga al confocal, el problema radica en localizar la posición de máxima intensidad del interferograma para todos los puntos de la muestra, desplazando en dirección Z uno de los brazos del interferómetro. En este método se busca que el desplazamiento “Z” realizado por un mecanismo Piezoeléctrico sea tal que la franja brillante del interferograma recorra todos los puntos de la muestra, almacenando estas posiciones.

Para esta técnica se observa que el movimiento del Piezo, para que todos los puntos de la muestra pasen por el contacto óptico, debe de ser del orden del rango de alturas de la muestra, introduciendo la no-linealidad del Piezo, y además del ruido sistemático.

3. Reconstrucción conjunta

Según lo anterior, la técnica de “Phase-Shifting” resulta óptima para la reconstrucción 3D de superficies, pero presenta problemas para muestras con variaciones discretas de altura mayores a $\lambda_0/2$. En cuanto a la detección de máximos, se ve como puede influenciar el ruido introducido por la cámara, el algoritmo, la histéresis del Piezo. Si se analizan las diferencias entre las alturas encontradas por el método de Phase-Shifting y la detección de máximos, se encuentran valores cercanos a múltiplos de $\lambda_0/2$. Combinar estos dos métodos podría dar soluciones óptimas en determinación de la topografía.

Para realizar la reconstrucción 3D combinando los dos métodos, se debe obtener la fase a partir de phase-shifting y realizar la reconstrucción de la muestra por detección de máximos. Es necesario determinar las regiones de igual altura. Por medio del contraste de las franjas sobre los puntos de la muestra, se pueden observar las regiones donde existen variaciones discretas mayores de 2π . Por “Phase-Shifting” se sabe que la altura entre estas regiones es la diferencia de fase más un número entero de veces 2π ($\lambda_0/2$), y por detección de máximos es la diferencia de altura más un ruido debido a la no-linealidad del Piezo. Si la no-linealidad del Piezo es menor que 2π ($\lambda_0/2$), se puede determinar la altura real de la región, por medio de la siguiente operación.

$$\begin{aligned} n &= ((4 * h(x, y) / (\lambda_0)) - \phi(x, y)) + 1 \\ \phi_f(x, y) &= 2n\pi + \phi(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde $h(x,y)$ es la altura en el punto (x,y) determinada por la detección de máximos y $\phi(x,y)$ es la fase en el punto (x,y) . Determinada esta altura se realiza el “unwrapping” para esta región.

4. Resultados experimentales

Con el fin de probar esta técnica, se realizó la reconstrucción de una muestra escalonada que presenta variaciones discretas mayores que 2π obtenida del E.N.S.T.B. de Francia. Se observa, al realizar la reconstrucción por ambos métodos, los problemas presentados por cada reconstrucción. Estos fueron corregidos al combinar las dos técnicas, en la figura 1 se puede apreciar las distintas reconstrucciones.

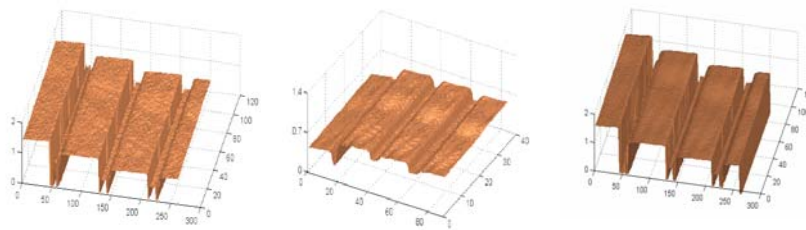


Figura 1. Reconstrucción de la misma muestra por métodos los tres métodos

a)Detección de Máximos, b)Phase-Shifting, c)Combinación de a) y b)

En la figura 2 se muestra el corte de una línea para los tres métodos; Se puede observar la variación de las alturas para la reconstrucción de cada método y los problemas presentados por cada reconstrucción.

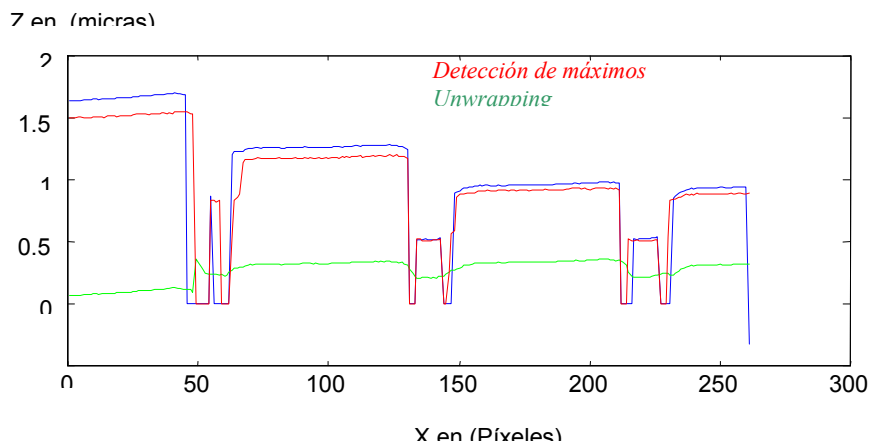


Figura 2 Corte para una línea del objeto con los tres métodos

5. AGRADECIMIENTOS:

Este trabajo fue realizado gracias al D.I.F. UIS y como parte del proyecto de “nanometrología de materiales” el cual es patrocinado por Conciencias.

6. Bibliografía

- [1]. Arturo Plata “Algorithmes De Détection De Phase Dédiés a L’Interférométrie en Lumière Polychromatique: Application Et
- [2]. Apport Des Systèmes Adaptatifs a la Profilométrie” Thèse, L’Université de Franche-Comté, (1997).
- [3]. Bok Kong and Seung-Woo Kim “Portable Inspection of Precision Surface by Phase Shifting Interferometry with Automatic Suppression of Phase Shift Errors” Optical Engineering, **34**, p 1400-1404, (1995).
- [4]. P. De Groot and L. Deck “Surface Profiling by Analysis of White Light Interferograms in the Spatial Frequency Domain” Journal of Modern Optics, **42**, p 389-401, (1995).
- [5]. Byron S. Lee and Timothy C. Strand “Profilometry with a Coherence Scanning Microscope” ” Applied Optics, **29** 3784-3788, (1990).
- [6]. P. Sandoz, R. Devillers and A. Plata “Unambiguous Profilometry by Fringe – Order Identification in White Light Phase Shifting Interferometry” Journal of Modern Optics, **44**, p 519-534, (1997).
- [7]. C. Joenathan “Phase-measuring interferometry: new methods and error analysis” Applied Optics, **33**, p 4147 – 4155, (1994).
- [8]. Born and Wolf “Principles of Optics” sixth ed. Pergamon Press, (1980).
- [9]. W.H. Steel “Interferometry” Cambridge at the university press, (1967) .