

OBTENCIÓN DE MAPAS DE DEFORMACIÓN MEDIANTE INTERFEROMETRÍA DIGITAL DE PATRONES SPECKLE

Daniel Velásquez Prieto

Departamento de Ciencias Básicas
Universidad EAFIT
A.A. 3300, Medellín - Colombia
e-mail: dvelas@eafit.edu.co

Jorge García-Sucerquia

Departamento de Física
Universidad de Antioquia
A. A. 1226, Medellín - Colombia
e-mail: jigarcia@pegasus.udea.edu.co

Resumen

La Interferometría Digital de Patrones de Speckle (DSPI) presenta ventajas comparativas respecto a la Interferometría Holográfica. Pero el ruido óptico asociado con el speckle dificulta la aplicación de las técnicas de corrimiento de fase (PSI). En este trabajo se presentan los resultados experimentales obtenidos a partir de la utilización de la interferometría digital de patrones de speckle junto con las técnicas de corrimiento de fase, para obtener los mapas de deformaciones a partir de las franjas de correlación. Se hacen consideraciones sobre los métodos empleados y las posibilidades de su utilización como una herramienta de medición.

Abstract

Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI) exhibits comparative advantages in comparison with Holographic Interferometry. Besides, optical noise associated with speckle makes it difficult the application of the Phase-Shifting techniques (PSI). In this paper we present the experimental results obtained on the basis of using both the DSPI and the PSI techniques, to obtain the deformation maps through the correlation fringes. The employed methods and the possibilities of using them as a tool for metrology are discussed.

1. Introducción

La Interferometría Digital de Speckles (Digital Speckle Patern Interferometry, DSPI) logra dar solución a algunas de las dificultades de la interferometría holográfica, como es el reemplazo de los medios de registro por cámaras CCD, de mayor sensibilidad, que permiten hacer registros interferométricos de una forma mucho más simple y en condiciones más adversas, aunque con pérdida de resolución en las mediciones. Su desarrollo ha abierto nuevas perspectivas de aplicaciones logrando que se constituya en una técnica complementaria a la holográfica.

La interpretación cuantitativa de las franjas de correlación obtenidas por DSPI, utilizando las técnicas de Salto de Fase PSI (Phase Shifting Interferometry), presenta mayores dificultades, con respecto a las holográficas, debido al ruido de speckle inherente en los interferogramas.

Aquí se presentan los resultados experimentales obtenidos de la implementación de las técnicas de corrimiento de fase en un sistema DSPI, utilizado para realizar mediciones de deformaciones. Estos se comparan con resultados obtenidos holográficamente.

2. Descripción del problema

Tal como se hace en holografía, podemos escribir para la onda objeto (sin deformar), para la onda de referencia y la intensidad del patrón de interferencia, respectivamente [3][5]:

$$A_{o1}(x, y) = a_o(x, y)e^{i\phi_{o1}(x, y)} \quad (1)$$

$$A_r(x, y) = a_r(x, y)e^{i\phi_r(x, y)}$$

$$I_1(x, y) = I_0(x, y)\{1 + \gamma(x, y)\cos[\phi(x, y)]\} \quad (2)$$

En donde γ se define como la visibilidad y $\phi(x, y) = \phi_{o1}(x, y) - \phi_r(x, y)$ es el desfase entre la referencia y el objeto. En el sistema DSPI, como la superficie es rugosa, a_o y ϕ_o varían en forma aleatoria dando lugar a un patrón de speckle cuya fase es $\phi(x, y)$ y su intensidad está dada por $I_1(x, y)$. Esta distribución de intensidades es registrada por la cámara y almacenada en el computador. Luego se produce la deformación, de modo que la nueva onda objeto es

$$A_{o2}(x, y) = a_{o2}(x, y)e^{-i[\phi_{o1}(x, y) + \delta(x, y)]} \quad (3)$$

En donde $\delta(x, y)$ es el cambio de fase introducido por la deformación, que junto con la onda de referencia produce una nueva intensidad I_2 , dada por:

$$I_2(x, y) = I_0(x, y)\{1 + \gamma(x, y)\cos[\phi'(x, y)]\} \quad (4)$$

donde

$$\phi'(x, y) = \phi(x, y) + \delta(x, y) \quad (5)$$

Igualmente esta nueva imagen es almacenada y luego digitalmente restada de la anterior, entonces haciendo $I^2 = (I_2 - I_1)^2$ podemos escribir:

$$I^2(x, y) = 4I_0^2(x, y)\gamma^2(x, y)(\sin^2 \phi) \left[\sin^2(\delta/2) \right] \quad (6)$$

De esta ecuación se puede ver que la luz proveniente del objeto, junto con la de la referencia dada por I_0 , está modulada por dos términos. El término $\sin^2(\delta/2)$ corresponde a las franjas debidas al desplazamiento del objeto, las cuales son las franjas de correlación de speckles producidas por el cambio de fase entre los dos estados del objeto. El término $\sin^2 \phi$ es la modulación del speckle, esto es, corresponde a las variaciones de intensidad en el speckle, y es el responsable del ruido que éste produce, que hace que las franjas se vean con la granularidad típica del speckle.

Las franjas de correlación de patrones de speckle son bastante similares a las que se pueden obtener holográficamente, su interpretación cuantitativa presenta dificultades mayores, precisamente debido al término asociado al speckle. Esto se hace evidente cuando se implementan los algoritmos computacionales de las técnicas de corrimiento de fase[3][7].

Aunque existen varios métodos para abordar el problema, cada uno con una sensibilidad diferente ante la presencia del speckle, nosotros hemos trabajado con los algoritmos de salto de fase de Hariharan, debido a que estos ya los habíamos implementado exitosamente en la interpretación de franjas obtenidas holográficamente.

El problema del ruido se hace particularmente notorio en la etapa del desenvolvimiento de fase, *Phase Unwrapping*. Esto es así porque en general los algoritmos empleados para realizar el desenvolvimiento de la fase son en esencia de tipo puntual, es decir, que a partir de la información contenida en un vecindario de píxeles de una imagen se debe tomar la decisión de la existencia o no de un salto de fase, codificado obviamente en intensidad. Y si las franjas están formadas por speckles, la labor de identificación de las franjas se verá entorpecida por la existencia de tales variaciones de intensidad de oscuro a brillante.

Se debe lograr la eliminación del campo de speckle del sistema de franjas con la mínima modificación de éste como tal; esto con el fin de introducir la mínimas modificaciones posibles en nuestro mapa de fase codificado en intensidad. Una de las técnicas usadas para lograr la mencionada suavización la constituye el uso de filtros de convolución pasa-bajos. En esencia el speckle constituye ruido de alta frecuencia espacial, que con la aplicación de filtros pasa-bajos de niveles adecuados se pueden lograr resultados bastante prometedores según se enuncia en la literatura.[9][10] Nuestra experiencia con esta técnica no fue satisfactoria. Además de que la apariencia del sistema de franjas no es la mejor, la fuerte modificación que introduce este filtro de convolución sobre cualquier tipo de borde en nuestra imagen, incluyendo los bordes de las franjas, produce una fuerte variación en la fase, siendo esto poco deseable cuando se quieren realizar mediciones.

El filtrado pasa-bajo más adecuado lo constituye el realizado en el dominio de la frecuencia por medio de la transformada de Fourier. Computacionalmente se hace uso del algoritmo de

la FTT (Fast Fourier Transform) en el cual se aprovecha la discretización de los datos a transformar con el fin de reducir significativamente el número de operaciones para su calculo y por ende el tiempo en el cual se realiza ésta.

Algunos paquetes convencionales de procesado de imágenes poseen como una de sus herramientas la FFT, pero desgraciadamente para nuestro caso esta herramienta tiene limitaciones en cuanto al tamaño del cuadro que procesan y a la calidad del tipo de filtrado que se logra con éstos. A causa de los inconvenientes mencionados anteriormente fue necesaria la implementación de un algoritmo de FFT, en el cual fuera posible controlar el tamaño de los cuadros a procesar (512 x 512 pixeles), y el nivel de intensidad de las componentes espectrales, facilitando de este modo el filtrado pasabajo en el dominio de las frecuencias espaciales.

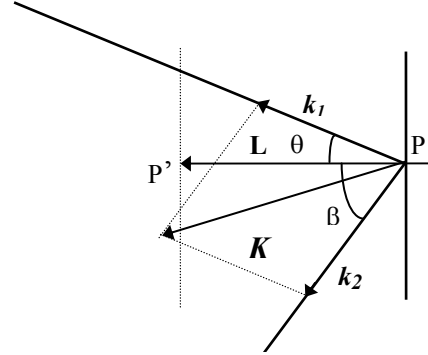


Figura 1: Desplazamiento en la dirección perpendicular al plano

Utilizando el método de corrimiento de fase de Hariharan, es posible obtener el registro de 5 imágenes desfasada en $\pi/2$, con las cuales se puede calcular el valor de la fase en cada punto y reconstruir el frente de onda:

$$\phi(x,y) = \text{tg}^{-1} \left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \right] \quad (7)$$

Como la fase $\phi(x,y)$ esta relacionada con el vector desplazamiento $L(x,y)$ por medio de la ecuación

$$\phi(x,y) = (2\pi/\lambda)(\mathbf{K} \cdot \mathbf{L}) \quad (8)$$

donde $\mathbf{K}$ es el vector de sensibilidad. Podemos calcular, para desplazamientos perpendiculares al plano (ver figura 1), su valor en cada punto con la ecuación:

$$L(x,y) = \frac{\phi(x,y)\lambda}{2\pi(\cos\theta + \cos\beta)} \quad (9)$$

3. Resultados experimentales

En el sistema DSPI mostrado en la figura 2, el haz del láser es dividido en un rayo de referencia, RR y un haz objeto, RO, por medio del divisor de haz BS_1 variable, que permite controlar la relación referencia objeto. El rayo objeto es expandido por una lente L_1 y dirigido hacia el objeto, del cual se forma su imagen en el plano de la cámara CCD, a través de la lente L_2 que tiene un diafragma con el cual se puede modificar el tamaño del speckle

en el plano imagen. El rayo de referencia es dirigido hacia la cámara a través del espejo M, que puede ser desplazado por un actuador, y de un divisor de haz BS_2 , orientado de manera que el ángulo entre éste y el rayo de referencia sea muy pequeño.

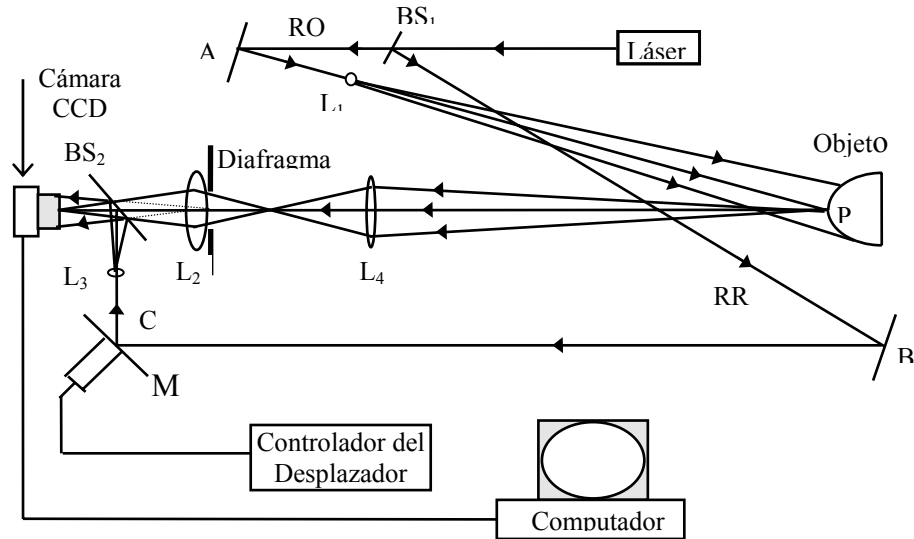


Figura 2: Arreglo experimental del sistema DSPI

En la figura 3 se muestra una placa circular de 12 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor, sujeta con 4 tornillos, que fue sometida a una carga en el centro, para producir una deformación en la dirección perpendicular a su plano, lo cual genera las franjas de correlación mostradas en la figura 4. El filtrado de las franjas se realizó sobre toda la imagen. Estas franjas son obtenidas de la resta del campo de patrones de speckles registrados antes y después de la deformación, lo cual se realiza en tiempo real. La figura 5 muestra el resultado que se puede lograr sobre cada una de las 5 imágenes necesarias para calcular la fase módulo 2π que se ilustra en la figura 6.

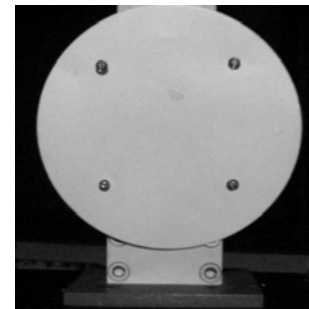


Figura 3: Placa circular

Del conjunto de valores que se obtienen del cálculo de la fase módulo 2π , se selecciona, de manera directa desde la imagen (zona del recuadro), aquellos valores que corresponden a la región donde las franjas tienen un comportamiento más adecuado para realizar el desenvolvimiento de fase, que se ilustra en la figura 7.

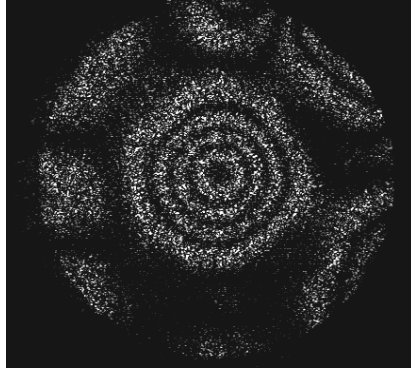


Figura 4: Franjas de correlación

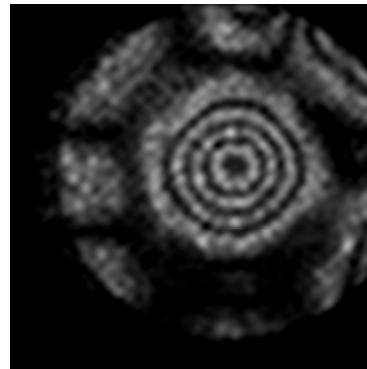


Figura 5: Franjas filtradas

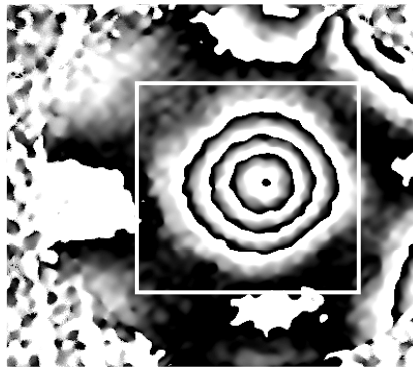


Figura 6: Fase módulo 2π
con región de interés

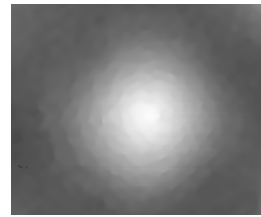


Figura 7: Fase continua
correspondiente a la región
de interés

Este último paso permite tener el valor de la fase $\phi(x,y)$ de forma continua sobre toda la región de interés seleccionada, de modo que a partir de la ecuación (9) y sabiendo que $\theta = 12.5^\circ$ y $\beta = 0^\circ$, se calcula el valor del desplazamiento para cada punto (pixel). Este resultado es mostrado en la figura 8 como un mapa de deformaciones, donde las coordenadas del eje Z indican dicho valor en unidades métricas, y las coordenadas XY ubican el pixel.

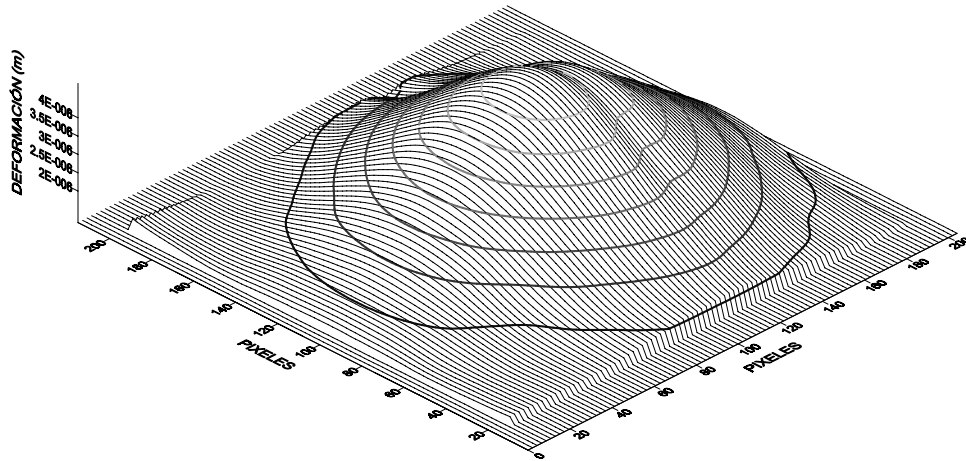


Figura 8: Mapa de deformaciones

La figura 9 muestra las líneas de contorno obtenidas, superpuestas sobre el objeto deformado

Las figuras 10, 11, 12 y 13 muestran resultados obtenidos con franjas obtenidas bajo condiciones más difíciles, con su respectivo mapa de deformaciones

4. Conclusiones

El trabajo experimental realizado nos ha permitido obtener franjas de correlación a partir de un sistema DSPI, en tiempo real, que al lado de las herramientas computacionales implementadas, posibilita realizar análisis cuantitativos de las franjas. De los resultados obtenidos surge la necesidad de continuar con el desarrollo de algoritmos que sean más inmunes a la presencia del speckle.

Estos resultados, aún con sus limitaciones, al lado de los ya obtenidos en interferometría holográfica, amplían las posibilidades del uso de la interferometría como una herramienta de medición.

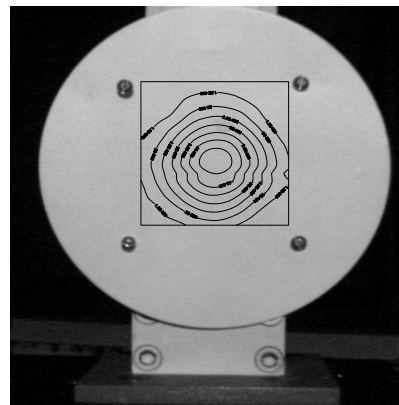


Figura 9: Líneas de contorno sobre el objeto

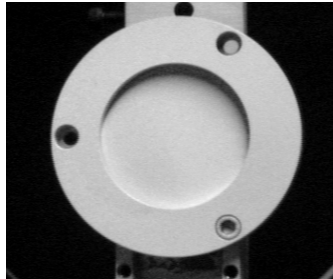


Figura 10: Objeto

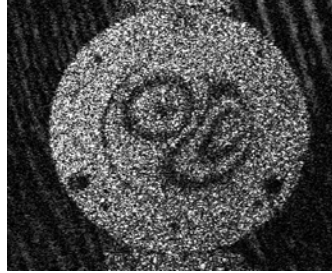


Figura 11: Franjas

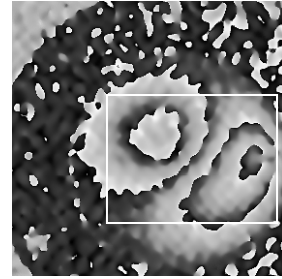


Figura 12: Fase módulo 2π

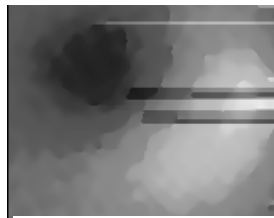


Figura 13: Fase desenvuelta

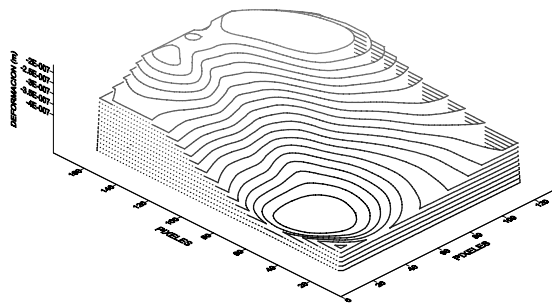


Figura 14: Mapa de deformaciones

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado con equipos y recursos financieros de la Universidad EAFIT

5. Referencias

- [1] CREATH, Katherine. Phase measurement interferometry techniques. Progress in Optics XXVI. New York: Elsevier Science Publishers, 1988. pp 32.5
- [2] _____. Temporal phase measurement methods.. En: ROBINSON D. W, y G. REID T. Interferogram Analysis. Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1993. pp 94-140
- [3] DAINITY, J. C. Laser speckle. 2 ed. New York: Springer Verlag, 1984. p 341
- [4] ERF, Robert K. Holographic nondestructive testing. New York: Academic Press, 1974.
- [5] _____. Speckle interferometry. New York: Academic Press, 1.978. p 334
- [6] HARIHARAN, P. Basics of interferometry. New York: Academic Pres, 1992.
- [7] _____. Optical interferometry. New York: Academic Pres, 1985.
- [8] KREIS Thomas. Holographic interferometry. Berlin: Akademie Verlag, 1.996.
- [9] MALACARA, Daniel. Optical shop testing. New York: John wiley and Sons, 1977.
- [10] WILLIAMS D.C. Optical methods in engineering metrology. New York: Chapman & Hall, 1993.