

CORRECCIÓN DE LA ABERRACIÓN DE FASE POR EFECTO PERSIANA DE SENSORES CMOS EN MICROSCOPIA HOLOGRÁFICA DIGITAL

CORRECTION OF PHASE ABERRATION INDUCED BY ROLLING SHUTTER EFFECT IN DIGITAL HOLOGRAPHIC MICROSCOPY

Cabrera C. M.^a, Monaldi A. C.^{a,b*}, Romero G. G.^{ab}

^a Facultad de Ciencias Exactas - CIUNSa - Universidad Nacional de Salta

^b INENCO-CONICET*

Av. Bolivia 5150- 4400- Salta - Argentina

e-mail: romeropelayog@gmail.com

Recibido: 01/11/2013; aceptado: 22/07/2014

Debido a la naturaleza de lectura secuencial de los sensores CMOS, cada fila del sensor se expone en diferentes tiempos, resultando en el denominado efecto persiana que introduce distorsiones geométricas en la imagen si la cámara o el objeto se mueven durante la adquisición. En particular, para el registro de hologramas digitales, y en general para la mayor parte de las condiciones experimentales, mientras el sensor captura barriendo progresivamente cada fila del holograma, las franjas producto de la interferencia entre el haz objeto y el haz de referencia oscilan debido a vibraciones y/o ruidos. El sensor captura cada fila del holograma en distintas instancias de estas perturbaciones; por ende, los desplazamientos entre las franjas se traducen en aberraciones de fase. Como efecto final se observan patrones de perturbación espurios que distorsionan la calidad de los hologramas reconstruidos. En este trabajo se propone un método simple y eficiente para corregir este efecto mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. Se ejemplifica el método con hologramas de especímenes microscópicos estáticos. Los resultados alientan a la incorporación de sensores CMOS en lugar de sensores CCD en los montajes experimentales de Microscopía Holográfica Digital ya que estos ofrecen mejor resolución, además de ser menos costosos en el mercado.

Palabras clave: CMOS, holografía digital, efecto persiana

Due to the sequential-readout nature of CMOS sensors, each row of the sensor array is exposed at a different time, resulting in the so-called rolling shutter effect that induces images geometric distortion when whether the video camera or the object are moving during image acquisition. Particularly, in digital holograms recording for most experimental conditions, while sensor sweeps each row of the hologram, the fringes resulting from the superposition of the object beam and the reference one oscillate due to external vibrations and/or noises. Sensor captures each hologram row in different instants of these disturbances, therefore, the fringes shifting result in phase aberrations. As a final effect, a spurious pattern is observed that distorts the reconstructed holograms quality. In this work, a simple and efficient method for eliminating this effect by using image processing tools is proposed. The method is exemplified in holograms of microscopic statics biologic objects. Results encourage incorporating CMOS sensors over CCD in Digital Holographic Microscopy because of better resolution and less expensive benefits.

Keywords: CMOS, digital holographic microscopy, rolling shutter effect

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la tecnología CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), ha empezado a ganar el mercado de las videocámaras por sobre los tradicionales camcorders que utilizaban sensores CCD (Charge Coupled Device). Ambos tipos de sensores tienen propiedades únicas que hacen a cada uno de ellos adecuado para un tipo de aplicación u otro, por lo que sus características necesariamente deben ser tenidas en cuenta por los usuarios a la hora de determinar qué tipo de cámara es más apropiada para el uso requerido.

Aunque el objetivo de este trabajo no es realizar un estudio exhaustivo de cómo difiere un tipo de dispositivo

de otro, vamos a enfocarnos en algunas propiedades que son sensibles a una aplicación concreta como lo es la Microscopía Holográfica Digital (MHD)^{1,2,3}. Un holograma digital consiste en el registro de las franjas de interferencia de un haz objeto y un haz de referencia en un sensor fotosensible. De acuerdo al Teorema de Shannon-Whitaker para que el sensor resuelva las franjas de interferencia, el muestreo debe hacerse al menos al doble de la máxima frecuencia de la señal. El período de muestreo del dispositivo de registro está fijado por el tamaño de los pixels que conforman el sensor. Para la holografía digital, técnica cuyo auge data de la última década, los dispositivos CCD han sido los favoritos para reemplazar a los clásicos films holográficos, por su

* acmonaldi@gmail.com

propiedad de satisfacer los requerimientos mínimos de resolución a pesar de su elevado costo⁴.

La resolución espacial necesaria para registrar un holograma digital, en condiciones experimentales óptimas, depende fuertemente del tamaño de los fotositos, siendo deseable disponer de pixeles elementales más pequeños, ventaja principal de los sensores CMOS frente a los CCD. Adicionalmente, los sensores CMOS requieren de menor energía para su operación con lo cual generan menor ruido térmico que los sensores CCD. Además los primeros registran y descargan las imágenes más rápido siendo más apropiados en cámaras de alta velocidad. Estas propiedades de los CMOS, sumado a su relativamente más bajo costo, los hacen atractivos como medio de registro en holografía digital. Sin embargo, debido a su estructura de lectura secuencial, cada línea de la imagen adquirida se expone en un instante de tiempo diferente, resultando en el conocido efecto persiana, 'rolling shutter' en inglés, que induce distorsiones geométricas cuando el objeto o la cámara de adquisición se mueven durante la captura^{5,6,7}. En el caso de la holografía, las franjas de interferencia que surgen de la superposición del haz objeto y el haz de referencia son altamente susceptibles a ruidos, vibraciones, etc; por lo que pueden cambiar su configuración conforme se realiza el proceso de captura. El resultado de este efecto se traduce en aberraciones de fase que introducen errores en la información óptica a procesar. Por esta razón en la mayoría de las aplicaciones de Holografía Digital se utilizan los sensores CCD a costa de una disminución en la resolución espacial y aumento de ruido térmico.

El problema del efecto persiana ha sido objeto de atención en los últimos años en particular en el caso de aplicaciones de visión automática, habiéndose desarrollado diferentes técnicas para su atenuación y/o eliminación; algunas de las cuales forman parte de ciertos software de procesamiento de imágenes. Para resolver este inconveniente utilizando un sensor CMOS, en este trabajo se propone una metodología simple, basada en procesamiento digital de imágenes aplicada a la información de los mapas de fase continua de objetos biológicos estáticos obtenidos por MHD.

II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Microscopía Holográfica Digital

En general, la holografía digital (HD) supone el registro de un holograma, mediante un montaje interferométrico, sobre un arreglo de detectores de estado sólido, tal como los CMOS y la posterior reconstrucción numérica de la información mediante computadora.

Para la caracterización de objetos microscópicos, la configuración típica para HD debe modificarse de manera que sea posible magnificar el tamaño de los especímenes bajo estudio. Con este fin, la Microscopía Holográfica Digital (MHD) ha sido propuesta en varias configuraciones. En este trabajo, se utiliza particularmente la arquitectura propuesta por VanLigten y Osterberg⁸.

La idea básica consiste en hacer del brazo objeto del interferómetro un pequeño microscopio, insertando un objetivo de microscopio (OM) que actúe como lente

magnificadora y forme una imagen real, aumentada e invertida del espécimen de interés, como se ilustra en la Fig. 1: La característica más notable, es que el plano del holograma (esto es, el plano del CMOS) se ubica entre el OM y el plano imagen, a una distancia d de la misma. Esta situación puede considerarse equivalente a una configuración holográfica sin lente con una onda objeto emergiendo directamente de la imagen aumentada y no del objeto en sí mismo¹. Puesto que el CMOS no se ubica en el plano imagen del OM, el holograma consiste en la imagen desenfocada de la muestra modulada por franjas brillantes y oscuras producto de la interferencia.

A la salida del interferómetro, un sensor CMOS registra la interferencia entre un haz de referencia, con amplitud compleja $R(x,y)$, y un haz objeto, de amplitud compleja $O(x,y)$, que lleva la información de la amplitud y de la fase del frente de onda emanado por el objeto. La distribución de intensidad correspondiente queda expresada por la ecuación:

$$I_H(x,y) = |R(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + R^*(x,y)O(x,y) + R(x,y)O(x,y)^* \quad (1)$$

donde (x,y) son las coordenadas sobre el plano del holograma y * indica complejo conjugado.

Los dos primeros términos constituyen el orden cero, mientras que el tercero y el cuarto son la imagen virtual y la imagen real respectivamente. Para que al momento de la reconstrucción estos términos no se superpongan espacialmente, se considera la geometría fuera de eje, como se muestra en la Fig. 1; es decir, se considera que el haz de referencia llega al sensor con un pequeño ángulo θ con respecto a la dirección de propagación de la onda objeto.

El holograma digital consiste en una matriz de $N \times M$ números que resultan del mapeo bidimensional de $I_H(x,y)$ por la cámara CMOS:

$$I_H(i,j) = I_H(x,y) \text{rect}\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \times \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-M/2}^{M/2} \delta(x-i\Delta x, y-j\Delta y) \quad (2)$$

donde, i,j son enteros, $(L_x \times L_y)$ es el área sensible del chip, y $\Delta x=L_x/N$, $\Delta y=L_y/M$ definen los intervalos de muestreo en el plano del holograma, esto es, el tamaño del píxel. Por lo tanto para un área sensible dada, si los pixeles son más pequeños se tendrá una mejor resolución en pixeles por franja de interferencia.

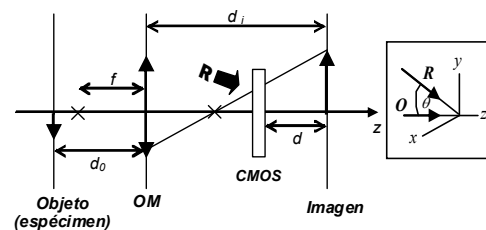


Figura 1. Configuración óptica del brazo objeto. OM: objetivo de microscopio; f : distancia focal; d_o : distancia objeto; d_i : distancia imagen; R : haz de referencia.

Una vez que el holograma fue capturado, la instancia de reconstrucción supone aplicar los fundamentos de la teoría escalar de la difracción para obtener un arreglo matricial de números complejos llamado frente de onda reconstruido $\Psi(m,n,d)$, que representa la amplitud compleja del campo óptico en el plano de observación. A partir de éste se recupera la información tanto de la amplitud como de la fase, obteniéndose lo que se conoce como imágenes de contraste de amplitud y de contraste de fase dadas respectivamente por⁹:

$$I(m,n,d) = |\Psi(m,n,d)|^2 \quad (3)$$

$$\phi(m,n,d) = \arctan \frac{\text{Im}[\Psi(m,n,d)]}{\text{Re}[\Psi(m,n,d)]} \quad (4)$$

En el presente trabajo el método utilizado para la reconstrucción de los hologramas es la Propagación del Espectro Angular (PEA)¹⁰. Previamente, al holograma se le restan incoherentemente los campos uniformes correspondiente a los haces objeto y referencia respectivamente como se detalla a continuación:

$$I'_H(i,j) = I_H(i,j) - K_1 O(i,j) \quad (5)$$

$$I''_H(i,j) = I'_H(i,j) - K_2 R(i,j) \quad (6)$$

donde K_1 y K_2 son números reales cuyos valores se obtienen haciendo que la varianza de las diferencias en las ec. 5 y 6 sea mínima. Este procedimiento tiene la ventaja de que produce una notable atenuación del orden cero del holograma, los dos primeros términos de la ec. 1. De esta manera se facilita el proceso de filtrado en el espectro, del orden de difracción de interés (imagen real o imagen virtual) previo a la propagación inherente al método PEA.

La fase de ec. 4, es una distribución de fase bidimensional denominada fase envuelta. La fase toma valores en el intervalo $(-\pi, \pi]$ o $(0, 2\pi]$ por la naturaleza de la función arcotangente. Por lo tanto, es necesario aplicar algoritmos de desenvolvimiento de fase¹¹ para recuperar la información de fase continua relacionada con alguna cantidad física real.

Efecto Persiana, eliminación y/o corrección

La diferencia más importante entre un sensor CCD y un CMOS subyace en el mecanismo de lectura de la señal. Mientras que para obtener una imagen todos los fotodiodos de una CCD se exponen a una escena simultáneamente, cada fila de un sensor CMOS se registra secuencialmente. Esquemáticamente, la forma de operación de captura de este tipo de dispositivo se ilustra en la Fig. 2.

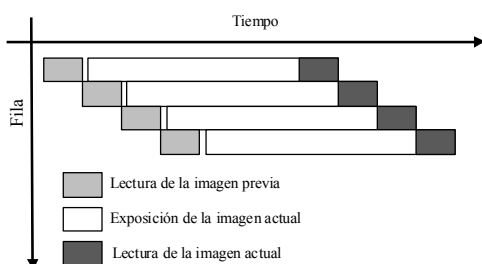


Figura 2. Sincronización de la matriz de sensores CMOS.

Los tiempos de lectura de cada fila de la imagen no se superponen, y la lectura sólo comenzará después que la lectura anterior se haya completado. El intervalo de tiempo entre la exposición y la lectura es el tiempo requerido para el restablecimiento del fotosensor. Como resultado, el objeto, cuya imagen se desea registrar, puede aparecer inclinado, cortado, alargado, reducido y aún arbitrariamente deformado, produciendo el efecto normalmente conocido como efecto persiana.

Si el objeto que se desea registrar es un holograma, el efecto introduce aberraciones de fase, ya que mientras el sensor registra cada línea, las franjas de interferencia en las que consiste el holograma, aún en las condiciones experimentales más rigurosas, se desplazan por la presencia de vibraciones y ruidos externos introduciendo “franjas” espurias. Esto se pone en evidencia en los mapas de fase continua obtenida del holograma. Estos patrones de “franjas” espurias, aunque bien pueden tener una frecuencia característica, muy difícilmente podrán filtrarse en el espectro de Fourier.

En la literatura diversos trabajos reportan soluciones para eliminar o atenuar este efecto ya sea utilizando dispositivos mecánicos o eléctricos o bien mediante algoritmos matemáticos que generalmente requieren de varias imágenes de la misma escena para su sincronización^{7,12}. Estos mecanismos de corrección se utilizan generalmente en dispositivos de visión automática o en cámaras de dispositivos de uso popular. Sin embargo para el caso de las imágenes de hologramas digitales a nuestro conocimiento no se han desarrollado metodologías para la eliminación de este efecto.

La metodología propuesta para solucionar este problema en la aplicación de interés, consiste en aplicar ordenadamente una serie de operaciones sobre la matriz de datos de la fase desenvuelta que pueden resumirse en los siguientes pasos:

1. De la matriz de N filas y M columnas que representa el mapa de fase, se calcula la mediana de cada fila y se lo almacena en un arreglo unidimensional de $N \times 1$.
2. Al arreglo resultante se le aplica un filtro espacial suave (por ejemplo, un filtro Gaussiano) para suavizar los bordes.
3. El arreglo se estira a las dimensiones originales de la matriz, replicándolo hasta convertirlo en una matriz de $N \times M$. La matriz resultante se la denomina “matriz filtro”.
4. Se resta punto a punto este resultado a la matriz original.

Dada la naturaleza de las herramientas de procesamiento utilizadas, este algoritmo conserva valores reales de la imagen por lo que su efecto sobre la información relevante de la fase es despreciable.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Experimentalmente en el caso que nos ocupa, tanto la cámara como el objeto son estáticos durante el proceso de adquisición mientras que las franjas de interferencia que constituyen el holograma oscilan o vibran de acuerdo a factores externos. El efecto persiana sólo afectará a la

información de la fase, siendo ésta generalmente la información de interés en aplicaciones como la MHD.

Para ilustrar la aplicación del filtro diseñado, en la Figura 3 se muestran para una microalga (*Ceratium Hirundinella*) capturada con una cámara CMOS: a) el holograma (ec. 1); b) el espectro original o sea la Transformada de Fourier del holograma; c) el espectro corregido donde claramente se observa que el orden cero ha sido fuertemente atenuado. El holograma reconstruido se muestra tanto en d) la imagen de amplitud (ec. 3), como en e) la imagen de fase envuelta (ec. 4). Se advierte claramente el efecto en la fase debido al mecanismo ‘rolling shutter’ propio del método de adquisición de datos de los sensores CMOS. En este caso consiste en una aberración en la fase que se traduce en un patrón de “franjas” horizontales.

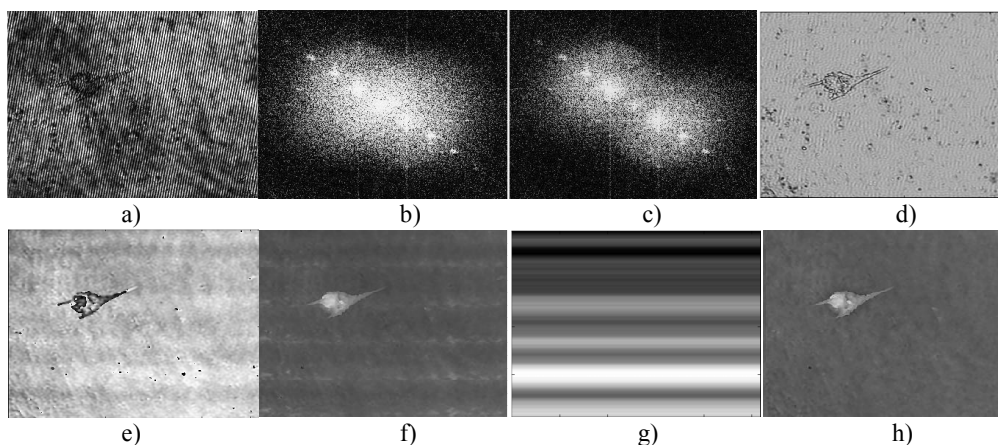


Figura 31: a) holograma, b) espectro original, c) espectro corregido, d) imagen de amplitud, e) imagen de fase envuelta, f) imagen de fase desenvuelta g) imagen de la matriz filtro y h) imagen de fase de continua corregido

De esta manera se obtiene la imagen de fase desenvuelta que se muestra en la Fig. 3 f). En esta última imagen todavía se observan las franjas espurias. Aplicando el algoritmo descrito en la sección II, se construye la matriz filtro de las franjas espurias, cuya imagen se muestra en la Fig. 3 g). Posteriormente esta matriz es restada punto a punto de la matriz de fase desenvuelta obteniéndose la imagen de fase continua corregida de la Fig. 3 h).

V. CONCLUSIONES

Se presenta un método simple y eficiente para corregir aberraciones de fase introducidas por el efecto persiana característico de los sensores CMOS. La propuesta resulta novedosa ya que en la literatura no hemos encontrado reportes para la corrección de este efecto en aplicaciones de interferometría. Los resultados muestran que el método en comparación con los otros métodos clásicos de corrección de este efecto son alentadores para promover la sustitución de los costosos CCD en MHD.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por ANPCyT-PME 1392/2, SCETIP-PFIP 1198/2006, el CIUNSA y FCE-UNSA

El holograma ha sido capturado utilizando un láser de He-Ne de 35 mW, $\lambda=632.8$ nm y un objetivo de microscopio 10X/0.25 AN. El sensor utilizado es un CMOS Array Bayer monocromo de 2592x1944 pix² cuadrados de 1,75 μ m de lado.

Como se mencionó más arriba, en MHD, la fase es la información más relevante del holograma y para poder relacionarla con alguna cantidad física, como por ejemplo la medida de biovolumen o del índice de refracción del espécimen bajo estudio, es necesario proceder a su conversión a fase continua. Para ello se aplicó un algoritmo de desenvolvimiento mediante mapas de calidad¹¹.

VII. REFERENCIAS

- 1 - Cuche E., Marquet, P., Depeursinge, C. Applied Optics **38** (34), 6994-7001 (1999).
- 2 - Palacios, F., Ricardo, J., Palacios, D., Gonçalves, E., Valin, J. L., De Souza, R. Optics Communications **248**, 41-50 (2005).
- 3 - Mann, C. J., Yu, L., Lo, C., Kim, M.K., Optics Express **13** (22), 8693-8698 (2005).
- 4 - Jacquot, M., Sandoz, P., Tribillon, G. Optics Communications **190**, 87-94 (2001).
- 5 - Liang, C-K, Peng, Y.C, Chen, H. Proc. Spie 5960, Visual Communications and Image Processing 2005, 59603V (2006).
- 6 - Ait-Aider, O., Bartoli A., Andreff, N. Proc. of CVPR, 1-6 (2007).
- 7 - Liang, C-K., Chang, L-W., Chen, H.H, IEEE Transactions on Image Processing, **17** (8), 1323-1330 (2008).
- 8 - R. F. VanLigten, H. Osterberg, Nature, 211 282-283 (1966).
- 9 - Schnars, U., Jueptner, W. In “Digital Holography. Digital Hologram recording, numerical reconstruction and related techniques”. Springer-Verlag (2005).
- 10 - Goodman, J. In Introduction to Fourier Optics, Mc Graw-Hill Book Company (1968).

11 – Ghiglia, D. C., Pritt, M. D. In “Two-Dimensional phase unwrapping. John Wiley & Sons, Inc. New York (1998).

12 – Chun, J-B, Jung, H., Kyung, C-M. IEEE Transactions on Consumer Electronics, **54** (4), 1479-1487 (2008).