

Comparación entre Sistemas de Reconstrucción Tridimensional Usando Perfilometría de Fourier y Perfilometría Wavelet

García-Romero P.¹, Pedraza-Ortega J.C.², Gorrostieta-Hurtado E.², Moya-Morales J.C.², Sotomayor-Olmedo A.², Arreguin-Rico S.P.², García-Tello J.A.³ y Aparicio-Jiménez S.A.³

PICYT, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial¹

CIDIT, Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro²

Universidad del Valle de México, Campus Querétaro³

pgaro@hotmail.com, caryoko@yahoo.com, efren.gorrostieta@uaq.mx, moyajc@hotmail.com, artemiosotomayor@gmail.com, sandia_arreguin@yahoo.com.mx, telloy3k8@yahoo.com.mx, ojos.es.el.mejor@gmail.com

Resumen

En el siguiente artículo presentamos una comparación sobre técnicas de proyección de patrón de franjas, considerando dos métodos desarrollados y modificados; transformada de Fourier y Wavelet. Primero se propone el uso de transformada de Fourier y después el uso de la transformada Wavelet para la extracción de la información 3D de los objetos analizados. Los métodos propuestos requieren una simple imagen la cual contenga un patrón de franjas senoidales proyectadas sobre el objeto. El patrón de franjas tiene una frecuencia espacial conocida que permite eliminar discontinuidades en franjas con altas frecuencias. Simulaciones por computadora fueron realizadas para validar los métodos y los experimentos desarrollados.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, Fourier, Wavelet, Perfilometría.

1. Introducción

El hombre se ha dado cuenta de la importancia de medir, medir es aprender, es ampliar los sentidos y con esto obtener mas información que nos ayudara en la toma de decisiones mas acertadas. En las ultimas tres décadas infinidad de técnicas de contacto y no-contacto se han empleado en aplicaciones de ciencia e ingeniería para reconstrucción de superficies en 3D (tridimensionales). Sin embargo, en los últimos años los sensores óptimos para evaluar la forma 3D de un objeto, juegan un papel cada vez más importante. La principal ventaja de los sensores ópticos es que no necesitan contacto directo alguno con el objeto que se va a caracterizar y como una ventaja adicional de

estos sistemas es que son significativamente más rápidos que las técnicas por contacto.

La idea básica es extraer la información referente a la profundidad de una imagen de manera eficiente y automática. Una vez obtenida dicha información se puede utilizar en diferentes procesos como son los robots manipuladores, inspección automática, control de calidad, ingeniería inversa, mapas de navegación en 3D y realidad virtual [1]. A pesar de que existen varias metodologías, proyección de un patrón de franjas es una de las ampliamente usadas. Los métodos de proyección de franjas son utilizados en pruebas no destructivas, óptica y sistemas de reconstrucción 3D. Algunas de las características de estos sistemas son alta precisión, inmunidad al ruido y rápido procesamiento.

Un método comúnmente usado en procesamiento de franjas es la Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP) [2-3]. Sin embargo es bien conocido que uno de los principales problemas en este método, es la información en la fase envuelta. El primer algoritmo fue propuesto por Takeda y Mutoh en 1982 [2], después Berryman [4] y Pedraza [5] propusieron una modificación a la transformada por perfilometría de Fourier llevando a cabo algunos análisis locales y globales de la fase envuelta, con esto los algoritmos de desdoblamiento de fase (temporal y espacial) fueron introducidos y modificados [6-8]. Otra muy buena solución es extraer la información mediante el uso de la Transformada por perfilometría de Wavelet (WTP).

Debido al factor que representa una multiresolución en tiempo y espacio en el dominio de la frecuencia, la Transformada Wavelet se ha convertido en la última década en una buena opción

para perfilometría, dicha transformada representa muchas ventajas sobre la Transformada de Fourier [9-10].

Los métodos consisten principalmente en demodular el patrón de franjas deformado, extraer la información de la fase envuelta y desdoblar dicha fase para obtener así la altura de la superficie, ya sea usando Transformada Wavelet o Transformada de Fourier.

Diferentes tipos de algoritmos wavelet son usados en el proceso de demodulación para extraer la fase del patrón de franjas deformado y estos algoritmos pueden ser clasificados en dos tipos: técnicas de estimación de fase y estimación de frecuencia.

Los algoritmos de estimación de fase emplean complejas Wavelet madres para estimar la fase del patrón de franjas. Uno de los problemas es que la fase extraída tiene discontinuidades en los saltos de 2π y por lo tanto un algoritmo de desdoblamiento de fase se requiere para estos saltos. Zhong [9] utilizó la Wavelet madre Gabor para extraer la distribución de la fase donde requirió de un desdoblamiento de fase.

Los algoritmos de estimación de frecuencia estiman una frecuencia instantánea sobre un patrón de franjas el cual es integrado para extraer la fase. Esta fase extraída usando esta técnica es continua, por lo tanto, no es necesario un desdoblamiento de fase. Wavelet complejas o reales pueden ser utilizada para estimar la frecuencia instantánea en un patrón de franjas. Dursun [12] y Afifi [13] han usado Wavelets Morlet y Paul respectivamente para obtener la distribución de la fase sin la necesidad de usar algún algoritmo de desdoblamiento de fase.

En la presente investigación presentamos una forma de obtener la información tridimensional de un objeto. La principal contribución de este trabajo es introducir a la perfilometría por transformada de Wavelet, proponer un algoritmo para la Transformada Wavelet y hacer una comparación de este contra el método de Perfilometría por Transformada Fourier. Algunos objetos virtuales son creados, simulaciones por computadora y experimentos son llevados a cabo para verificar la metodología y comparar los resultados.

2. Bases para la Perfilometría.

Las bases para perfilometría fueron sentadas por Takeda [1] en 1982. La idea principal de Takeda era proyectar un patrón de franjas con una frecuencia

espacial conocida sobre un objeto y después usar la Transformada de Fourier en una dimensión para analizar el patrón de franjas proyectado.

Una imagen de cualquier objeto con franjas proyectadas puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$g(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cdot \cos[2 \cdot \pi f_0 x + \varphi(x,y)] \quad (1)$$

$$g_0(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cdot \cos[2 \cdot \pi f_0 x + \varphi_0(x,y)] \quad (2)$$

Donde $g(x,y)$ es la intensidad de la imagen en el punto (x,y) , $a(x,y)$ representa la iluminación del fondo, $b(x,y)$ es el contraste entre la luz y las líneas negras, f_0 es la frecuencia fundamental y $\varphi(x,y)$ es la modulación del patrón de franjas observado por la cámara.

La fase $\varphi(x,y)$ contiene la profundidad, $a(x,y)$ y $b(x,y)$ son variaciones indeseadas o ruido. En la mayoría de los casos $\varphi(x,y)$, $a(x,y)$ y $b(x,y)$ varían poco en la frecuencia espacial f_0 . El ángulo $\varphi(x,y)$ es el cambio de fase causado por la superficie del objeto y el ángulo de proyección, y se expresa como:

$$\varphi(x,y) = \varphi_0(x,y) + \varphi_z(x,y) \quad (3)$$

Donde $\varphi_0(x,y)$ es la fase causada por el ángulo de la proyección con respecto al plano de referencia, y $\varphi_z(x,y)$ es la fase causada por la distribución de la altura del objeto.

En la figura 1, tenemos un patrón de franjas proyectadas por un proyector, las franjas alcanzan al objeto en el punto H y cruzan el plano de referencia en el punto D_p , $H D_c$ y CH son similares.

$$\frac{CF}{-h} = \frac{d_0}{l_0} \quad (4)$$

Dejándonos la siguiente ecuación:

$$\varphi_z(x,y) = \frac{h(x,y) 2\pi f_0 d_0}{h(x,y) - l_0} \quad (5)$$

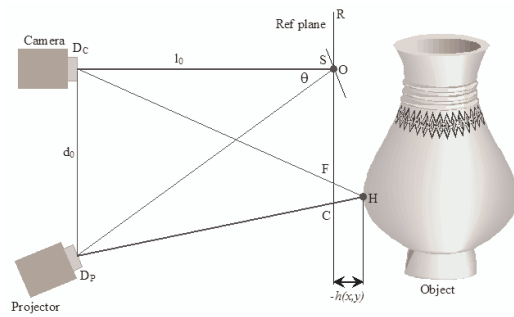


Fig. 1. Configuración experimental.

2.1 Perfilometría por Transformada de Fourier

Utilizando la ecuación 1 que representa cualquier objeto con franjas proyectadas, entonces FFT (Transformada Rápida de Fourier) unidimensional es aplicada en dirección al eje x , tenga en cuenta que el eje y lo consideramos como fijo debido a que las franjas están proyectadas verticalmente. Obtenemos la siguiente ecuación:

$$G(f, y) = \sum_{-\infty}^{\infty} Q_n(f - nf_0, y)$$

El siguiente paso es remover todas las señales a excepción de la frecuencia fundamental f_0 y centrarla en el origen.

Después la IFFT (Rápida Transformada Inversa de Fourier) es aplicada en todos los renglones (dirección x), misma dirección que la FFT aplicada anteriormente. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$\hat{g}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i(2\pi f_0 x + \varphi(x, y))\} \quad (7)$$

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 r_0(x, y) \exp\{i(2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y))\} \quad (8)$$

Por ultimo obtenemos la fase envuelta de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \varphi_z(x, y) &= \varphi(x, y) + \varphi_0(x, y) \\ &= \text{Im}\{\log(\hat{g}(x, y)\hat{g}_0^*(x, y))\} \end{aligned} \quad (9)$$

Donde Im representa la parte imaginaria de las ecuaciones.

De esta ultima ecuación, vemos que podemos obtener el mapa de fase aplicando el mismo proceso para cada línea horizontal de la imagen. Los valores de esta mapa de fase están envueltos, es decir, el rango esta entre π y $-\pi$.

Para recuperar la verdadera fase es necesario aplicar un algoritmo de desdoblamiento de fase para recuperar las discontinuidades en los saltos de 2π .

Sin embargo el desdoblamiento de fase no es un problema fácil debido a que muchas veces información importante es perdida este proceso, por lo tanto es muy importante la selección de un buen algoritmo para este propósito.

2.2 Perfilometría por Transformada de Wavelet

El primer paso para la realización de la Transformada Wavelet es seleccionar una Wavelet madre, en nuestro caso ocuparemos la wavelet madre de Morlet, por lo tanto tenemos la siguiente ecuación:

$$\psi(x) = \pi^{1/4} \exp(icx) \exp(-x^2/2) \quad (10)$$

Después CWT (Transformada continua de Wavelet) de una dimensión es aplicada sobre la ecuación 1, solo se aplica sobre el eje de las x , mismo caso que en la transformada de Fourier.

$$W(s, b) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{x-b}{s} \right) g(x) dx \quad (11)$$

El siguiente paso es identificar los valores reales e imaginarios que la transformada nos entrega. La figura 2 muestra un ejemplo de los valores reales e imaginarios de la CWT aplicando una wavelet madre Morlet.

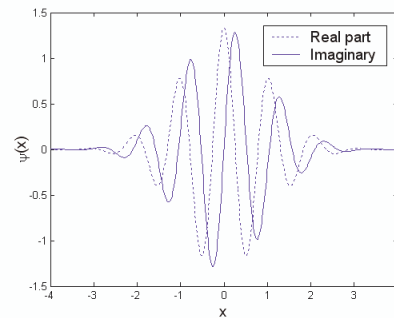


Fig. 2. Ejemplo de CWT.

Lo siguiente es obtener la magnitud de los coeficientes de la siguiente forma:

$$A(s, b) = \sqrt{(\text{imag}[W(s, b)])^2 + (\text{real}[W(s, b)])^2} \quad (12)$$

Y su vez el arreglo de fase para dicha transformada de la siguiente forma:

$$\varphi(s, b) = \arctan\left(\frac{\text{imag}[W(s, b)]}{\text{real}[W(s, b)]}\right) \quad (13)$$

De las últimas dos ecuaciones es necesario recuperar la fase específica para dichos valores. Para recuperar la fase se requiere obtener el valor mayor obtenido del arreglo $A(s, b)$ y en dicha posición encontrar su respectiva fase $\varphi(x, y)$, la fase que se encuentra en esa posición representa la fase para todos los valores.

Este procedimiento se repite en cada una de las líneas horizontales de la imagen.

Una vez realizado esto obtenemos el mapa de la fase, sin embargo, a igual que en Perfilometría por Transformada de Fourier es necesario un algoritmo de desdoblamiento de fase. Nuestra contribución a este método consiste una vez realizada el desdoblamiento de fase, restar a la imagen con el objeto la imagen del plano de referencia, esto nos trajo como consecuencia la disminución aun mayor del ruido.

En la figura 3 se presenta un diagrama a bloques de la metodología empleada para Perfilometría por Transformada de Wavelet.

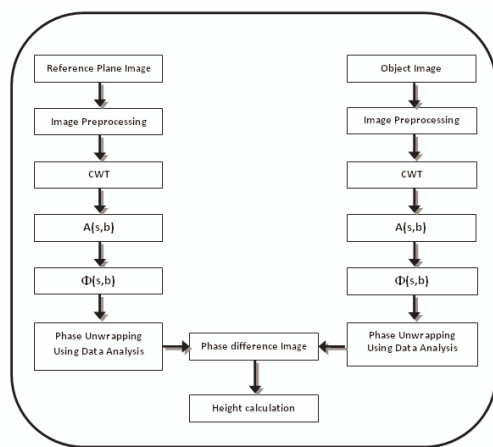


Fig. 3. Metodología propuesta para Perfilometría por Transformada de Wavelet.

3. Metodología

Le primer paso es adquirir la imagen. Debido a la naturaleza de la imagen algunas veces un filtro para la eliminar el ruido es necesario. En esta investigación solo el filtro gaussian 9x9 se usa para la transformada de Fourier. En la transformada de wavelet ningún filtro se aplica.

Siguiente, es estimar el número de franjas debido a que este factor esta directamente relacionado con la frecuencia fundamental f_0 . Entonces, f_0 es obtenido después de aplicar un algoritmo. En este punto, se precisa decidir el método que va ser aplicado, Fourier o Wavelet. Ambos métodos están representados en la figura 4.

En le caso de Fourier, una vez aplicada la transformada rápida de Fourier, es necesario sacar la información referente a la fase y por lo tanto se necesita un algoritmo robusto de desdoblamiento de fase con un análisis local y global.

Por otro lado, usando la transformada wavelet, primero se selecciona una wavelet madre, en nuestro caso usamos la wavelet madre Morlet.

Cabe mencionar que el método de wavelet necesita un algoritmo simple de desdoblamiento de fase, con dicho algoritmo es suficiente para obtener la forma tridimensional del objeto.

El paso final es obtener el objeto reconstruido y en algunos caso determinar el error (solo se determina el error en objetos construidos virtualmente).

Para una practica experimental, se puede usar una cámara CCD con alta resolución. El plano de referencia puede ser cualquier superficie plana, es importante considerar una superficie no reflectiva para minimizar el ruido en el proceso de adquisición de imágenes. El objeto de interés puede ser cualquier objeto tridimensional, para este trabajo se usan una pirámide creada por computadora y una mascara.

Es importante desarrollar un software capaz de producir el patrón de franjas a proyectar. Para crear el patrón de franjas se necesita modificar la frecuencia espacial (numero de franjas por unidad de área), y resolución (numero de niveles para crear el patrón senoidal) del patrón de franjas. Además podría ser necesario incluir una rutina en el software capaz de hacer cambio de fase e incluir una proyección de franjas tanto como horizontal como vertical.

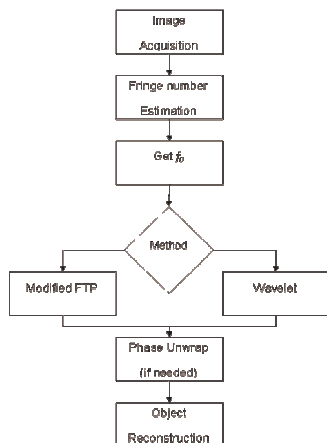


Fig. 4. Metodología propuesta.

4. Resultados

Una pirámide es generada por computadora y usada para probar los algoritmos. La pirámide generada se muestra en la figura 2. Entonces, se crea un patrón de franjas senoidal conocido y después aplica a la formada de la pirámide. La imagen resultante se muestra en la figura 5. Se pueden observar las distorsiones del patrón de franjas debido a la forma de la pirámide.

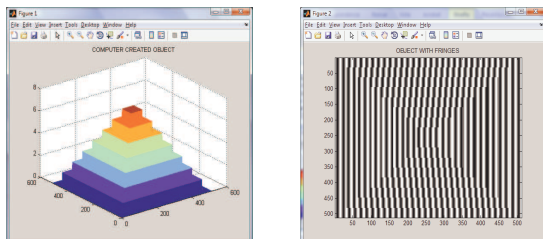


Fig. 5. Pirámide creada por computadora y patrón de franjas proyectadas sobre esta.

Para estos resultados consideramos primero la transformada de wavelet para obtener la forma de la pirámide. Como resultado tenemos la fase envuelta mostrada en la figura 6. Después, obtenemos la pirámide reconstruida aplicando un algoritmo de desdoblamiento de fase y calculamos su error (ver figura 7). Note que aplicando wavelet la magnitud de error es muy pequeña.

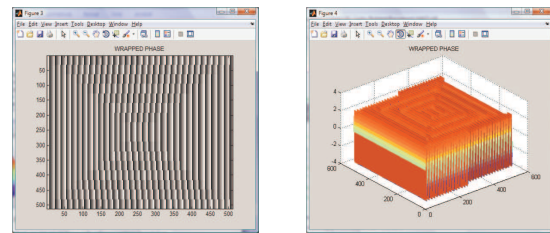


Fig. 6. Fase envuelta.

Aplicando Perfilometría por Transformada de Fourier obtenemos el objeto reconstruido (ver figura 7). Hasta ahora podemos ver que el error parece ser más pequeño en Fourier que el obtenido con wavelet, sin embargo, la magnitud del error en Fourier es mayor. La simulación por computadora nos permite probar y validar ambos métodos.

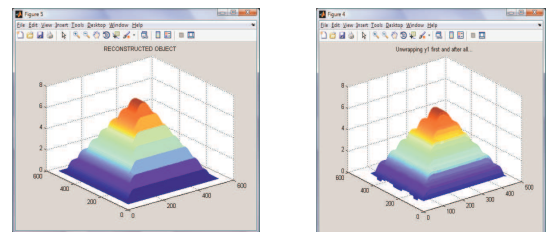
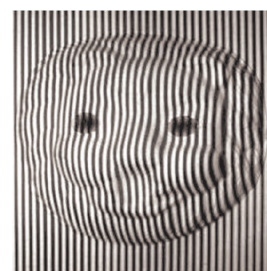


Fig. 7. Objeto reconstruido usando Wavelet y Fourier respectivamente.

Finalmente, el método por wavelet y fourier son aplicados a un objeto real y los resultados de la reconstrucción se pueden observar en la figura 8.



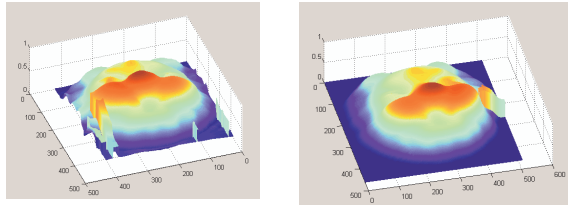


Fig. 8. Objeto real y su reconstrucción usando Fourier y Wavelet.

Como una conclusión preliminar, es claro que la transformada wavelet presenta un mejor desempeño que la transformada de Fourier para el mismo objeto. El error del método de wavelet es alrededor de 1 a 2 % y usando Fourier es alrededor de 4 a 6%. El tiempo tomado por la perfilometría de Fourier fue 10.8114 segundos y el tiempo para perfilometría por wavelet fue 15.4016 segundos. Todas estas pruebas fueron realizadas en una laptop Dell XPS M1330, Intel dual core 2GHZ con 4 GB en RAM.

5. Conclusión.

En el presente trabajo, dos métodos de reconstrucción tridimensional fueron presentados, los métodos esta basados en las transformadas de Fourier y Wavelet respectivamente. Objetos generados por computadoras fueron generados y un conocido patrón de franjas fue proyectados sobre ellos con el fin de tener un objeto de referencia y de esta manera medir el error entre ambos métodos. Ambos métodos presentaron un buen desempeño, sin embargo, Wavelet fue el método que presento el mínimo error. Después se probaron ambos métodos en objetos reales, comprobándose el mejor desempeño de Wavelet sobre Fourier.

Un valor agregado de este artículo es que presentamos una nueva metodología para Perfilometría por Transformada Wavelet ayudándonos a minimizar el error de dicha transformada, al restar a la imagen con el objeto la imagen del plano de referencia.

Como futuro trabajo seria realizar más pruebas usando diferentes objetos tanto virtuales como reales, implementar multi-hilos en los programas para minimizar el tiempo de procesamiento. Otra gran contribución seria realizar reconstrucciones 3D en tiempo real, esto podría ser posible al implementar directamente los algoritmos sobre un FPGA.

Agradecimientos

A través de este medio queremos expresar nuestro agradecimiento a PROMEP por el apoyo económico otorgado, mediante el proyecto PROMEP/103.5/08/3320, y al CONACYT por el apoyo otorgado por la beca de estudios de posgrado con numero (CVU/Becario) 296554/225596.

6. Referencias

- [1] Mats Gokstorp, "Depth Computation in Robot Vision", Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering, Linkoping University, S-581 83 Linkoping, Sweden, 1995.
- [2] Grevenkamp, JE, Bruning, JH, "Phase-shifting interferometry, in Optical Shop Testing", D Malacara, ed. Wiley New York, 1992.
- [3] Mitsuo Takeda, Hideki Ina and Seiji Kobayashi, "Fourier-Transform method of fringe pattern analysis for computed-based topography and interferometry". J.Opt. Soc.Am. Vol. 72, No.1, pp. 156-160, January 1982.
- [4] Fiona Berryman Paul Pynsent and James Cubillo, "A theoretical Comparison of three fringe analysis methods for determining the three-dimensional shape of an object in the presence of noise". Optics and Lasers in Engineering. Vol. 39, pp. 35-50, 2003
- [5] Pramod K. Rastogi, "Digital Speckle Pattern Interferometry and related Techniques". Edit. Wiley, 2001
- [6] Itoh, K., "Analysis of the phase unwrapping algorithm". Applied Optics, 21(14): 2470-2486, 1982.
- [7] Wu Lu, "Research and development of fringe projection-based methods in 3D shape reconstruction". Journal of Zhejiang University SCIENCE A, pp. 1026-1036, 2006
- [8] Pedraza, J.C., Wilfrido Rodriguez, Leonardo Barriga, et al, "Image Processing for 3D Reconstruction using a Modified Fourier Transform Profilometry Method", MICA 2007, LNAI 4827, pp. 705-712, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.