

Análisis de la Perfilometría Wavelet 2D en su Desempeño para la Reconstrucción 3D de Objetos

López-Torres Claudia Victoria, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Talavera-Velázquez Dimas, Gorrostieta-Hurtado Efrén, Vargas-Soto José Emilio.

Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

En el presente artículo se presenta un análisis de la Perfilometría Wavelet 2D, donde se incluyó una etapa de obtención del número de franjas, así como de la consideración de las wavelets Morlet, Fan y Paul bidimensionales. En la selección de los parámetros de escalamiento y ángulos incluidos en las wavelets, se considera el número de franjas previamente estimado. Como resultado de aplicar la Wavelet 2D a las imágenes se obtiene un arreglo complejo en cuatro dimensiones, del cual se extrae una imagen de intensidad y una imagen de fase, esta última es el mapa de fase. Para la obtención de la altura de los objetos se aplican al mapa de fase los algoritmos desdoblamiento de fase sencillo y robusto. Dentro de los resultados, se obtuvo que el uso de la Wavelet Morlet 2D en combinación con los algoritmos robustos de desdoblamiento de fase obtuvieron el mejor desempeño, en comparación con la metodología aplicada en investigaciones similares.

Palabras clave: Perfilometría, Wavelet 2D, desdoblamiento de fase, Morlet.

1. Introducción

Entre las diferentes técnicas de medición 3D de objetos, y entre ellos aquellas que son de no contacto, los métodos de luz estructurada han ganado una aceptación muy grande entre laboratorios de investigación, así como de diferentes tipos de industrias. Este tipo de técnicas tiene una amplia variedad de aplicaciones en ciencia, medicina e ingeniería, donde se tiene la necesidad de conocer la forma y dimensión (información 3D) de los objetos. Entre ellos, la perfilometría de Fourier (FTP) es uno de los métodos más utilizados en las técnicas de proyección de franjas. Este método introducido en los años 80's por Takeda y Mutoh [1], tiene algunas ventajas, tales como alta velocidad, utiliza un patrón de franjas, además de tener un análisis de campo completo Sikun Li [2]. Sin embargo, tiene una capacidad pobre de localizar las propiedades de la señal, dado que trabaja solo con señales estacionarias, derivando de ello una pérdida de la información de localización en el tiempo de las frecuencias de los componentes dados Zhang [3]. Otro método que también trabaja con análisis de patrones de proyección de franjas y que ha sido implementado en las últimas décadas debido a sus propiedades es la Perfilometría Wavelet (WTP), éste método destaca gracias a su capacidad para procesar señales no estacionarias, las cuales son oscilantes en tiempo y frecuencia, además de su análisis de multi-resolución. El término de Perfilometría Wavelet es utilizado por primera vez por Zhong, et al., en 2004 [4] presentando un análisis de patrón de franjas usando la Transformada Wavelet 1D, para una reconstrucción 3D haciendo uso del análisis de multi-resolución. Es así como la Transformada Wavelet ha sido estudiada y aplicada en una gran variedad de investigaciones recientes, así como sus variantes dependiendo de la función Wavelet utilizada que a su vez dependerá de la naturaleza de la señal y del análisis requerido [5], entre estas variedades se encuentran, la Haar, Paul, Gaussiana, Morlet, Mexican Hat, etc. Destaca dentro de la parte de reconstrucción 3D, dadas sus propiedades de frecuencia combinada y localización espacial la Wavelet Morlet, la cual fue desarrollada por Morlet y Grossman en 1984 [6].

Gdeisat, et al., 2006 [7] hacen uso de la Transformada Wavelet Fan 2D continua para demodulación de patrones de franjas propuesta, haciendo una comparación de este algoritmo con

el de la Transformada Wavelet Continua 1D. Kemao en 2007 [8] introduce dos algoritmos para el desenvolvimiento de fase, uno siendo la determinación de la tensión y el otro la detección de fallas y bordes; el primero se basa en el filtrado y el segundo en medida de similitudes. Abdulbasit Z, et al., en 2008 [9] propone una modificación en la Transformada Wavelet Morlet 1D para su uso en el análisis de patrones de franjas, utilizando también la Wavelet Morlet 2D. Huang, et al., 2010 [10] su propuesta implementa un algoritmo 1D y 2D, utilizando la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet haciendo una comparación involucrando ondas no sinusoidales y ruido para el procesamiento de patrón de franjas. Wang, et al., 2012 [11] introducen una técnica más precisa y rápida para un análisis de patrón de franjas complejas con ruido y defectos, utilizando la Transformada Wavelet Continua 2D. Dehaeck, et al., 2015 [12] proponen un algoritmo para analizar imágenes de franjas cerradas, extrayendo no solo la fase local, además brinda la información de frecuencia local, utilizando la Transformada Wavelet Fan 2D. Petra B, et al., 2016 [13] aplica su método al procesamiento de imágenes médicas utilizando algoritmos ortogonales con las wavelets Shannon, B-Spline, Gaussiana y Morlet, mostrando que la Transformada Wavelet tiene una capacidad de alto nivel para el procesamiento de señales.

La Transformada Wavelet 1D, es frecuentemente utilizada dentro de las técnicas de reconstrucción 3D apoyando con ello en la eficiencia, obteniendo mejor calidad al implementar algoritmos más desarrollados, abriendo así un campo de oportunidad para desarrollar mejoras en Wavelet 2D, la cual es una extensión natural de la Wavelet 1D y que hasta el momento ha sido menos utilizada en las técnicas de reconstrucción 3D.

Este trabajo está enfocado principalmente en el análisis de transformada Wavelet 2D, considerando tres tipos de Wavelet (Morlet, Fan y Paul), con el propósito de determinar cuál wavelet presenta el mejor desempeño en la reconstrucción 3D de objetos. Primero se utilizarán las tres wavelets para reconstruir un objeto virtual, obteniendo los mejores parámetros de escalamiento o dilatación y ángulos de rotación para poder utilizarlos en la reconstrucción 3D de objetos reales.

2. Perfilometría Wavelet

La Perfilometría Wavelet concepto introducido en 2004 [4], trabaja con señales no estacionarias, además de proveer un análisis multi-resolución, el cual divide las señales en sub-señales, es decir, una señal puede ser vista a diferentes escalas de resolución. La forma de onda de la Wavelet es lo que permite no limitarse a funciones seno y coseno, pues es una onda irregular y puede ser asimétrica. Es la variación de los coeficientes lo que dan origen a los diferentes tipos de wavelets, en la medida en la que estos coeficientes (escala y traslación) son modificados en la función llamada Wavelet madre, se derivan estos tipos, tales como: Paul, Shannon, B-Spline, Mexican Hat, Morlet, Fan, entre otras. La transformada Wavelet trabaja con tiempo y escala, permitiendo trabajar con ventanas anchas para obtener frecuencias bajas y con ventanas angostas para la información de alta frecuencia.

La función madre está definida por:

$$\psi_{\tau,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{x-\tau}{s}\right) \quad (1)$$

donde, s es el factor de escala, y τ es el factor de traslación.

Por lo tanto, la función de la Transformada Wavelet Continua (CWT) está determinada por la suma para toda x de la señal multiplicada por la escala, definida por:

$$W_f(S, \tau) = \int f(x) \psi_{S,\tau}^*(x) dx \quad (2)$$

Esta función es obtenida a través de la variación de la escala y la traslación de la señal, así como de la convolución de la Wavelet conjugada.

En el contexto bidimensional, la transformada Wavelet se define como el producto tensor de las wavelets unidimensionales Arellano [14] $\Phi(x, y) = \phi(x)\phi(y)$; en la función de escala y $\psi_1(x, y) = \psi(x)\psi(y)$, $\psi_2(x, y) = \psi(x)\psi(y)$, $\psi_3(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ en los detalles de las Wavelets.

La Transformada Wavelet Continua 2D ha sido utilizada por varios autores en una amplia gama de problemas. El uso principal es el análisis de imágenes, particularmente para la determinación de características específicas como bordes, contornos, límite entre zonas de diferente luminosidad, donde el tipo de Wavelet elegido depende de la finalidad a requerir.

El análisis de la Transformada Wavelet 2D nos permite realizar análisis para señales bidimensionales, clasificándose en dos métodos: Estimación de fase. Kadooka, et al., (2003) [15] y Estimación de frecuencia. Sciammarella, et al., (2005) [16].

El patrón de franjas $f(x, y)$ en la Wavelet 2D es proyectado dentro de la Wavelet $\psi_{a,b,s,\theta}$ por traslación en el eje x y y , por a y b respectivamente, con una dilatación s y una rotación con el ángulo θ de la Wavelet madre $\psi(x, y)$, dando como resultado una transformada de cuatro dimensiones, definida por:

$$S(a, b, s, \theta) = \frac{1}{s} \int \int \psi \left[\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, r_\theta \right] f(x, y) dx dy \quad (3)$$

Como resultado se tiene un arreglo complejo de 4 dimensiones.

Se dice que una Wavelet ψ es direccional, si el respaldo efectivo de su transformada de Fourier ψ está contenido en un cono convexo dentro de un espacio de frecuencia espacial (k), con vértice en el origen o una unión disjunta finita de tales conos; en este caso se le llamará ψ multidireccional.

Una Wavelet bidimensional es una función de valores complejos $\psi \in L^2(\mathbb{R}^2, d^2\vec{x})$ cumpliendo así con la condición de admisibilidad.

$$c_\psi \equiv (2\pi)^2 \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{k} \frac{|\hat{\psi}(\vec{k})|^2}{|\vec{k}|^2} < \infty, \quad (4)$$

donde $\hat{\psi}$ es la Transformada de Fourier de ψ y $|\vec{k}|^2 = \vec{k} \cdot \vec{k} = (k_1)^2 + (k_2)^2$

Las características de las Wavelets son importantes, pues el análisis Wavelet a utilizar dependerá del tipo de información que se quiera obtener de la imagen, por ejemplo; si se está interesado en la detección de características orientadas a una imagen como las regiones, entonces la Wavelet isotrópica es la adecuada, por su análisis puntal, es decir, si las características no orientadas están presentes o son relevantes en la señal se puede elegir una Wavelet isotrópica 2D.

La Wavelet Morlet Compleja 2D se deriva de la Wavelet Gabor madre, en este caso la Morlet presenta un buen desempeño solo con variaciones suaves en el patrón de franjas. La Wavelet Morlet está dada por:

$$\psi_M(x, y) = \exp[ik_0(x \cos \theta + y \sen \theta)] \exp\left(\frac{-1}{2} \sqrt{x^2 + y^2}\right) \quad (5)$$

Donde x, y son los índices de los ejes x y y respectivamente y θ es el ángulo de rotación.

Es la Wavelet Fan, la que puede presentar un mejor desempeño más que la Wavelet Morlet en las variaciones de patrón de franjas Gdeisat, et al., 2010 [17]. La Wavelet Fan Compleja 2D está dada por:

$$\psi_F(x, y) = \sum_{j=0}^{N_0-1} \exp[ik_0(x \cos \theta_j + y \sen \theta_j)] \exp\left(\frac{-1}{2} \sqrt{x^2 + y^2}\right) \quad (6)$$

Otra Wavelet compleja es la Wavelet Paul, la cual está definida por:

$$\psi_p(x, y) = \frac{2^n n! \left(1 - i \frac{x^2 + y^2}{2}\right)^{-n+1}}{2\pi \sqrt{\frac{(2n)!}{2}}} \quad (7)$$

3. Metodología propuesta

La Figura 1 muestra la metodología propuesta, la cual consiste de 9 pasos. Como primer paso se considera el cargar una imagen, la cual tiene un objeto y sobre este un patrón de franjas senoidales. Cabe hacer mención que el objeto puede ser virtual (creado por la computadora) o real. La forma del objeto distorsiona el patrón de franjas proyectado y como éste tiene un número finito de franjas, el cual corresponde a la frecuencia espacial f_0 de cierta forma tiene la información de la altura del objeto. Posteriormente la imagen es re-dimensionada a un valor de 512x512 pixeles para su procesamiento en computadora. Como segundo paso se determina el número de franjas, que es el que nos proporcionará la frecuencia espacial f_0 de ahí su importancia. Para determinar esta frecuencia espacial se aplica la transformada de Fourier y se considera el centro de la imagen y mediante la obtención del espectro de amplitud se pueden obtener las componentes espectrales que sean múltiplos de f_0 ($\dots -3f_0, -2f_0, -f_0, f_0, 2f_0, 3f_0, \dots$) a ambos lados del centro de la imagen, de aquí se extrae exclusivamente el valor de $-f_0$ ó bien el valor de f_0 . Como tercer paso tenemos la consideración de los parámetros de la Wavelet madre a considerar, esto es las escalas y los ángulos; tomando la parte inicial para cada uno de ellos, así como los incrementos que tendrán.

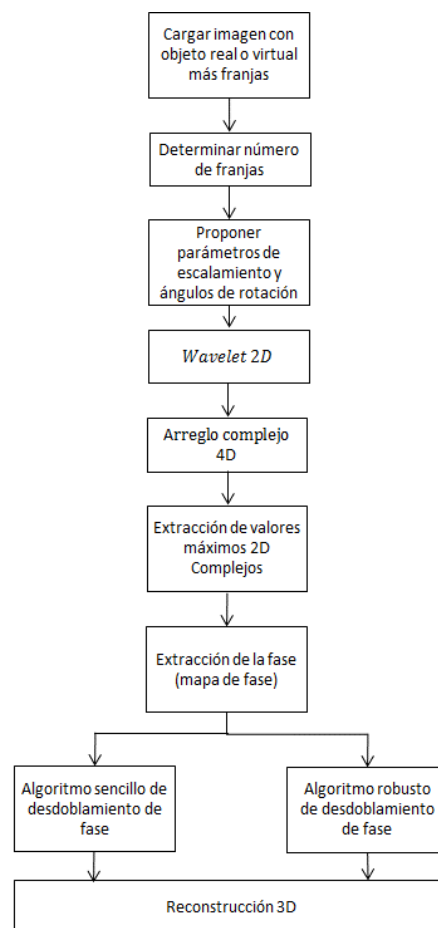


Figura 1. Metodología propuesta.

En el cuarto paso, se aplica la Transformada Wavelet 2D; en este caso se trabajó con las Wavelets Morlet, Paul y Fan. Como resultado de aplicar la transformada Wavelet 2D al patrón de franjas proyectado sobre el objeto, se va a obtener un arreglo 4D, el cual es almacenado en el quinto paso. Después se procesa este arreglo en el paso seis, en donde se va a extraer una matriz compleja y de esta matriz se considera la parte real, obteniendo el valor de borde máximo en cada columna de la imagen. A este valor de borde máximo corresponde un valor en la parte imaginaria, el cual es el valor de fase correspondiente a cada renglón del patrón senoidal distorsionado por la forma del objeto. Este proceso se repite para los n-renglones que forman la imagen. El resultado de aplicar esta parte es la obtención del mapa de fase, el cual contiene la altura del objeto y es el proceso que corresponde al paso siete. Este mapa de fase tiene la característica de que los valores se encuentran entre los límites de $-\pi$ a π . Estos valores de fase envueltos contienen la altura del objeto y es necesario el utilizar algoritmos de desdoblamiento de fase para recuperar esa información. En el octavo paso se van a utilizar dos tipos de algoritmos de desdoblamiento de fase con el propósito de obtener la reconstrucción del objeto. En el paso final se obtiene la reconstrucción 3D del objeto y se comparan los resultados con la finalidad de ver cuales objetos y bajo qué circunstancias se pudieron reconstruir mejor. Un diagrama de flujo de los distintos procesos que se llevan a cabo se puede apreciar en la Figura 2. Es importante notar que en algunos de los pasos de la metodología se tienen resultados intermedios importantes, los cuales se deberán de analizar con cuidado para poder obtener los parámetros que mejoren el desempeño global de la metodología propuesta. Algunos ejemplos de reconstrucción 3D de objetos se muestran en la siguiente sección.

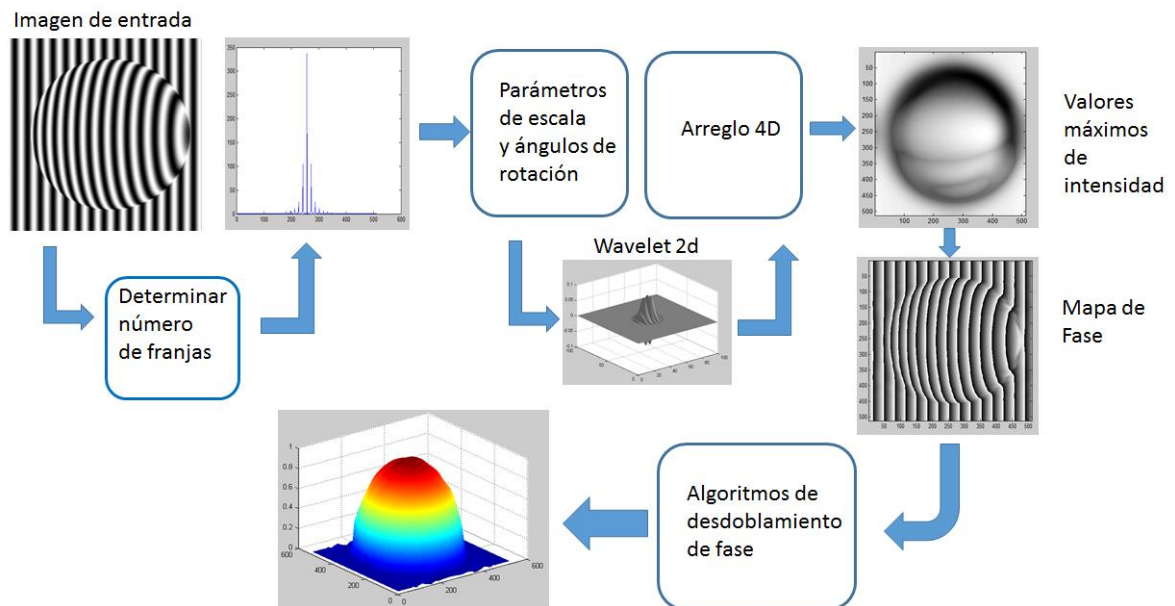


Figura 2. Diagrama de flujo de los pasos de la metodología propuesta.

4. Pruebas y Resultados

Con la finalidad de aplicar la metodología propuesta, se consideraron dos tipos de objetos a la entrada del método: objetos virtuales (creados por computadora) y objetos reales. Para cada objeto virtual se aplicó la metodología propuesta, teniendo como opciones las siguientes: a) el número de franjas a proyectar (16, 23 y 64), y b) el tipo de Wavelet 2D utilizado (Morlet, Fan y Paul). En esta parte de la experimentación se utilizó exclusivamente un algoritmo simple de desdoblamiento de fase, el cual sirve para recuperar la información de la altura de los objetos. En la Figura 3 a) se puede observar el objeto virtual a reconstruir. La Figura 3 b), 3 c) y 3 d) representan la

reconstrucción 3D del objeto virtual cuando se tienen (16, 32 y 64) franjas, utilizando la Wavelet Morlet. De igual forma en la Figura 3 e), 3 f) y 3 g) es la reconstrucción del objeto virtual con el número de franjas mencionado, pero con el uso de la Wavelet Fan. Y en la misma figura, pero en los incisos h), i) y j) es la reconstrucción del mismo objeto virtual, con el número de franjas descrito, pero cambiando la Wavelet, en este caso se utilizó la Wavelet Paul. Como se puede observar en la Figura 3, teniendo 16 franjas se tuvo una buena reconstrucción, y con 64 franjas se tuvieron oscilaciones a lo largo de la reconstrucción. Sin embargo, el mejor desempeño en la reconstrucción 3D del objeto virtual utilizando las diferentes Wavelets se tiene alrededor de las 32 franjas. Globalmente los mejores resultados se observan en la Wavelet Morlet.

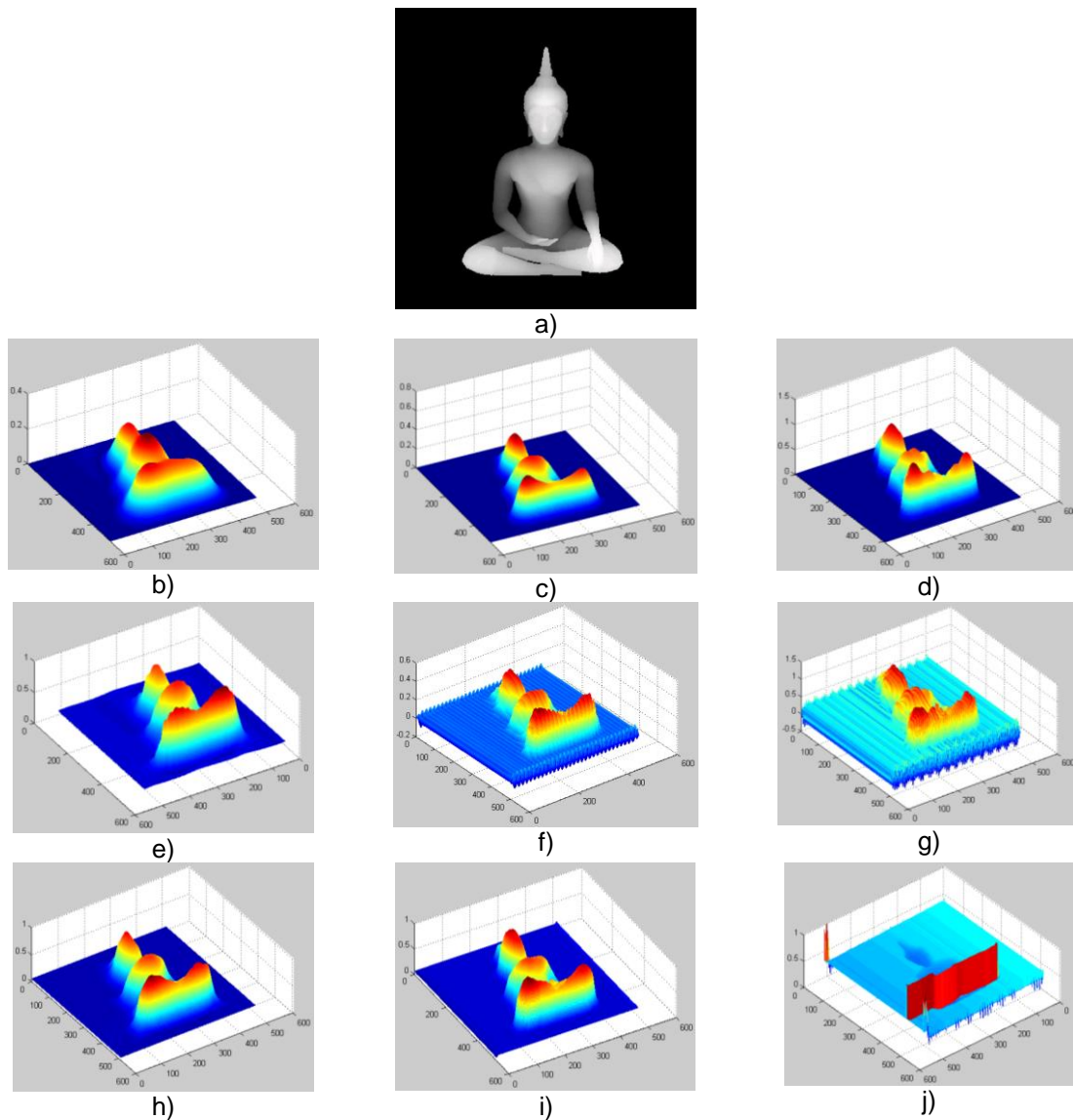


Figura 3. Objeto virtual y su reconstrucción 3D mediante la variación del número de franjas (16, 32 y 64), así como el tipo de Wavelet 2D a utilizar (Morlet, Fan y Paul).

De los resultados anteriores, se puede observar que el desempeño en la reconstrucción 3D de los objetos virtuales considerando los diferentes tipos de Wavelets es bueno, aunque se pudiera

mejorar en algunos casos, si en la etapa final se agregan algoritmos robustos de desdoblamiento de fase, a diferencia de lo expuesto por Gdeisat en el 2010 [2017]. Por esta razón, en la metodología se introdujo una variante de uso de algoritmos simples de desdoblamiento de fase, así como de algoritmos robustos que lleven a cabo este proceso.

En las Figuras 4 a) y 5 a) se muestran dos objetos reales distintos a los que se les aplicó la metodología propuesta, teniendo como variante que se utiliza un algoritmo simple y otro robusto de desdoblamiento de fase. En ambos casos, el número de franjas es desconocido y se obtuvo mediante el uso de la línea central del espectro de Fourier, y determinando a ambos lados de esta línea, la primer cresta que corresponde a la frecuencia fundamental, esto es $-f_0$ y f_0 respectivamente. Las Figuras 4 b), 4 c), así como 5 b) y 5 c), representan la reconstrucción 3D de los objetos utilizando la Wavelet Morlet, pero con el algoritmo simple y el algoritmo robusto de desdoblamiento de fase. También, las Figuras 4 d), 4 e), así como 5 d) y 5 e), representan la reconstrucción 3D de los objetos utilizando la Wavelet Fan, pero con el algoritmo simple y el algoritmo robusto de desdoblamiento de fase respectivamente. Finalmente, en las Figuras 4 f), 4 g), así como 5 f), 5 g) es la reconstrucción de los objetos, pero cambiando la Wavelet, en este caso se utilizó la Wavelet Paul.

Globalmente, el mejor desempeño de la reconstrucción lo proporciona la Wavelet Morlet, lo cual coincide con las pruebas del objeto virtual anteriormente presentadas.

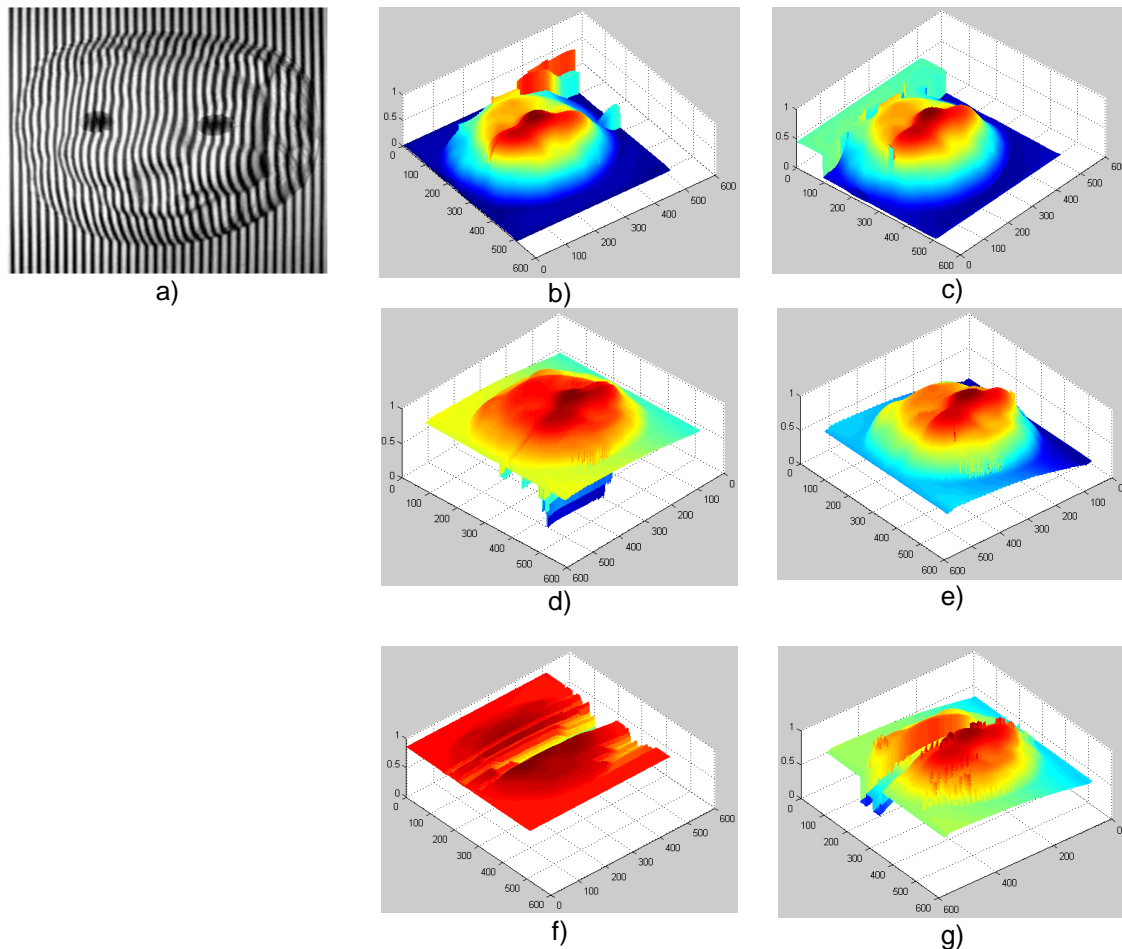


Figura 4. Máscara y su reconstrucción 3D mediante la obtención del número de franjas, variando el tipo de Wavelet 2D a utilizar (Morlet, Fan y Paul), y utilizando un algoritmo sencillo, así como otro robusto de desdoblamiento de fase.

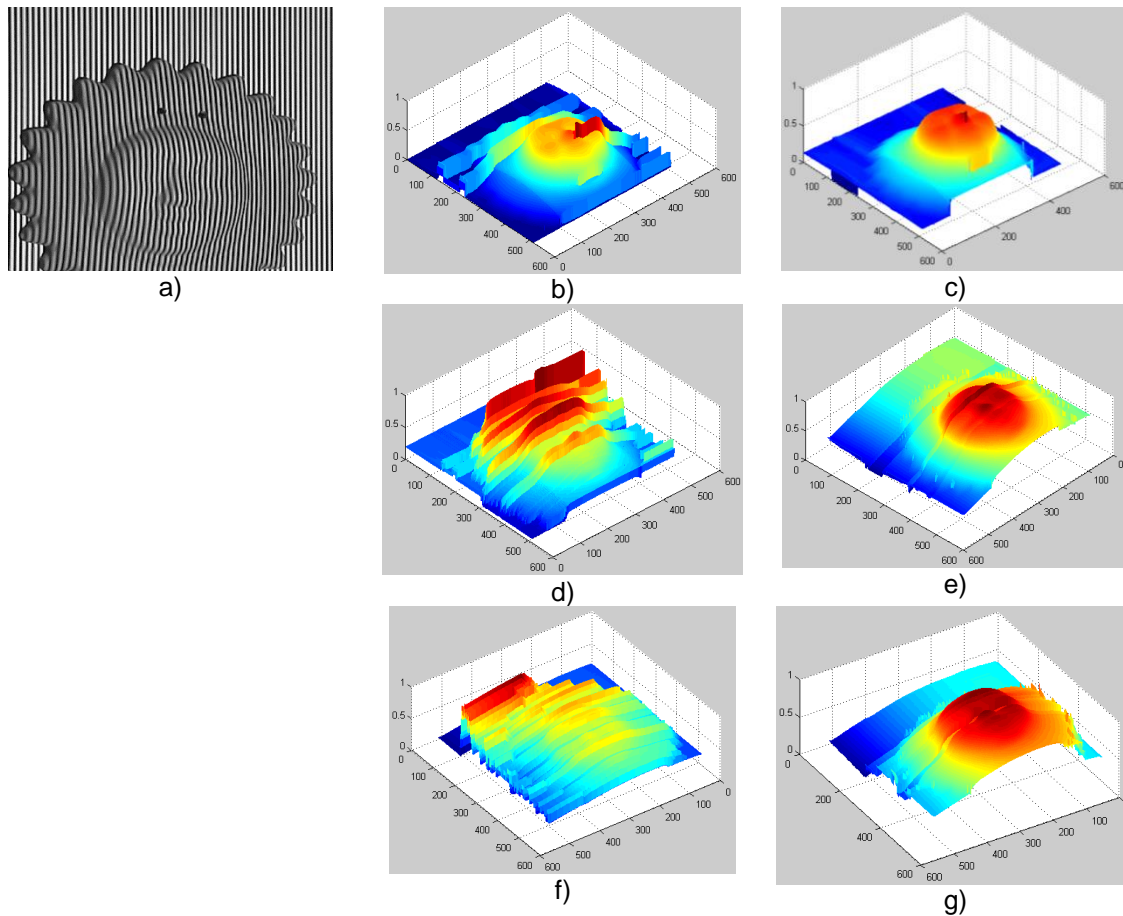


Figura 5. Sol de barro y su reconstrucción 3D mediante la obtención del número de franjas, variando el tipo de Wavelet 2D a utilizar (Morlet, Fan y Paul), y utilizando un algoritmo sencillo, así como otro robusto de desdoblamiento de fase.

Finalmente, y tomando en consideración las pruebas anteriores, se implementó la metodología, pero en esta ocasión se consideró el uso exclusivo de la Wavelet Morlet, y la única variante fue el uso de los algoritmos simple y robusto de desdoblamiento de fase. Los resultados se muestran en la Figura 6. Como se puede observar, los objetos tienen formas diferentes y también diferente número de franjas.

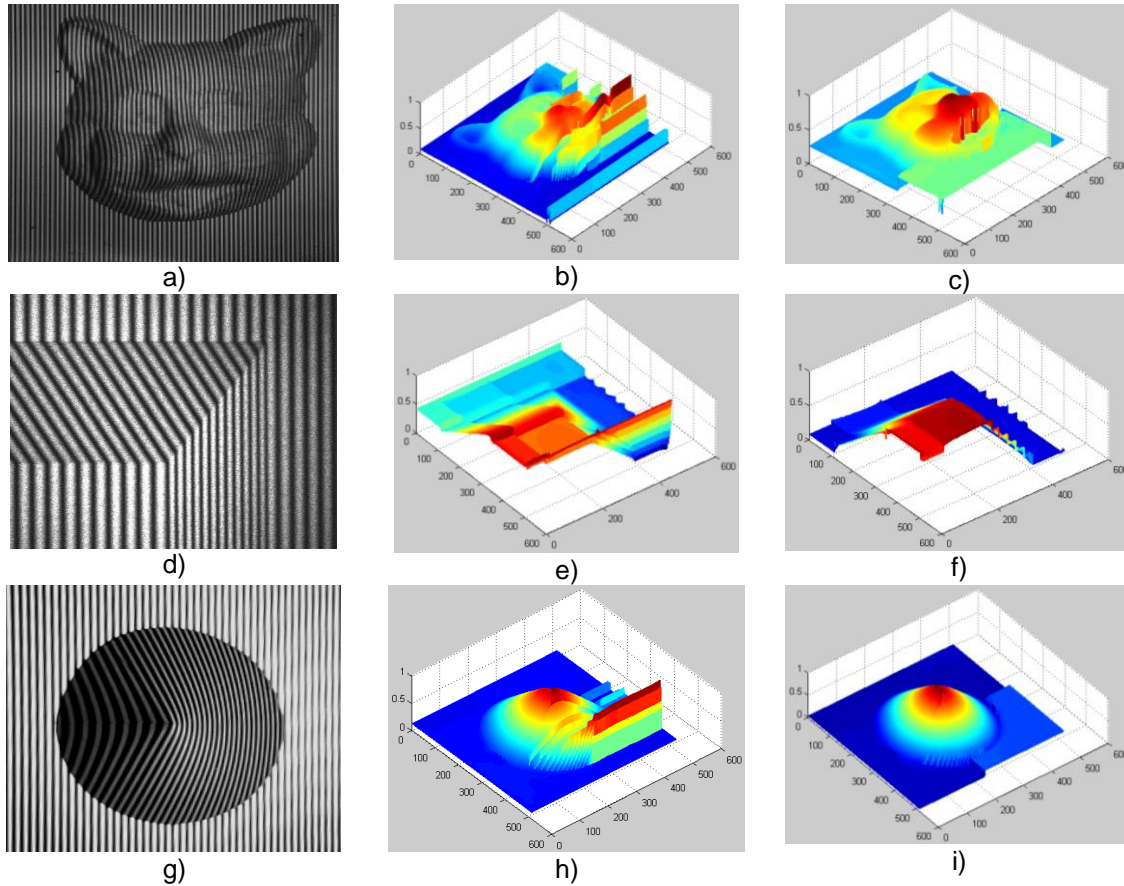


Figura 6. Tres objetos distintos con su reconstrucción 3D, utilizando la Wavelet Morlet 2D, y utilizando un algoritmo sencillo, así como otro robusto de desdoblamiento de fase.

Es claro que el método funciona mejor cuando se utiliza la Wavelet Morlet y adicional a esto, el uso del algoritmo robusto de desdoblamiento de fase ayuda a una mejor reconstrucción 3D de los objetos.

5. Conclusiones

Un análisis del método de Perfilometría Wavelet 2D se propuso en este artículo. La metodología considera la obtención del número de franjas como una de las primeras etapas. Dentro de la etapa de selección de las Wavelet se utilizaron Morlet, Fan y Paul 2D. Para uso de la Transformada Wavelet 2D es necesario considerar parámetros de escalamiento y ángulos, que se obtienen mediante el uso del valor de número de franjas previamente estimado. Posteriormente se extrae una imagen compleja (intensidad y fase) como resultado de aplicar la Wavelet 2D a las imágenes. La parte de la fase es conocida como mapa de fase, el cual tiene como característica que los valores se encuentran entre los límites de $-\pi$ a π . Finalmente, la altura de los objetos se obtiene al aplicar algoritmos de desdoblamiento de fase al mapa de fase. En comparación con trabajos previos se obtuvo que la mejor reconstrucción 3D de los objetos es alcanzada mediante el uso de la Wavelet Morlet 2D en combinación con los algoritmos robustos de desdoblamiento de fase.

Referencias

- [1] Takeda M.; Mutoh K. "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes", *Appl. Opt.* 1983, 22, 3977-3982.
- [2] Li, S., Chen, W., & Su, X. (2008). Reliability-guided phase unwrapping in wavelet-transform profilometry. *Applied optics*, 47(18), 3369-3377. [4] Jose Esteve-T; Javier G; Carlos F. "Application of Fourier transform profilometry to the recognition of 3-D objects". *Proceedings of Spie*, 2003, S227:59-66
- [3] Zhang, Z., Jing, Z., Wang, Z., & Kuang, D. (2012). Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase calculation at discontinuities in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(8), 1152-1160.
- [4] Zhong J, Weng J. Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Applied optics* (2004); 43(26): 4993-4998.
- [5] Tesis Ruíz S.
- [6] Grossmann, Alexander, and Jean Morlet. "Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape." *SIAM journal on mathematical analysis* 15.4 (1984): 723-736. [9] Feng L, Wenjing C, Xianyu S. "Eliminating zero spectra in Fourier transform profilometry by application of Hilbert transform", *Optics Communications* 365 (2016) pp. 76–85.
- [7] Gdeisat, Munther A., David R. Burton, and Michael J. Lalor. "Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform." *Applied optics* 45.34 (2006): 8722-8732.
- [8] Kemao, Qian. "Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations." *Optics and Lasers in Engineering* 45.2 (2007): 304-317.
- [9] Abid, Abdulbasit Z., et al. "Fringe pattern analysis using a one-dimensional modified Morlet continuous wavelet transform." *Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics*, 2008.
- [10] Huang, L., Qian, KM., Pan, B., Asundi, A., K.: Comparison of Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optical and Lasers Engineering*, 48, pp. 141-148 (2010).
- [11] Wang, Yajun, and Song Zhang. "Novel phase-coding method for absolute phase retrieval." *Optics letters* 37.11 (2012): 2067-2069.
- [12] Dehaeck, S., Tsoumpas, Y., & Colinet, P. (2015). Analyzing closed-fringe images using two-dimensional Fan wavelets. *Applied optics*, 54(10), 2939-2952.
- [13] Balla, P., Kocsis, P., Eigner, G., & Antal, Á. (2016, June). Surface reconstruction with Wavelet transformation. In *Intelligent Engineering Systems (INES), 2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on* (pp. 201-206). IEEE. [16] Juan Carlos M, Zaira Yared G, Jesús Carlos P, Artemio S, Manuel D, Sandra C, "Caracterización de un sistema reconstrucción de objetos", 6to congreso internacional de ingeniería UAQ, Querétaro, ISBN: 978-607-7740-39-1.
- [14] Arellano, P. (2003). Missing information in remote sensing: wavelet approach to detect and remove clouds and their shadows. *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands*.
- [15] Kadooka, K., Kunoo, K., Uda, N., Ono, K., & Nagayasu, T. (2003). Strain analysis for moiré interferometry using the two-dimensional continuous wavelet transform. *Experimental Mechanics*, 43(1), 45-51.
- [16] Sciammarella, C. A., & Kim, T. (2005). Frequency modulation interpretation of fringes and computation of strains. *Experimental mechanics*, 45(5), 393-403.
- [17] Gdeisat, M., Burton, D., Lilley, F., Lalor, M., & Moore, C. (2010, April). Spatial Carrier Fringe Pattern Demodulation by Use of a Two-Dimensional Continuous Paul Wavelet Transform. In P. K. Rastogi, & E. Hack (Eds.), *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1236, No. 1, pp. 112-117). AIP.