



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Informática

Doctorado en Ciencias de la Computación

ANÁLISIS PARA LA RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO PERFILOMETRÍA
WAVELET 2D MODIFICADA Y ALGORITMOS 2D DE DESDOBLAMIENTO DE FASE

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctora en Ciencias de la Computación

Presenta

M.S.I. Claudia Victoria López Torres

Dirigida por:

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega

Presidente

Dr. Juan Manuel Ramos Arreguín

Secretario

Dr. Efrén Gorrostieta Hurtado

Vocal

Dr. Marco Antonio Aceves Fernández

Suplente

Dr. Saúl Tovar Arriaga

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Gro.

Diciembre de 2019

México

RESUMEN

El procesamiento de imágenes ha sido beneficiado por el avance tecnológico, el cual está abarcando áreas significativas que no eran consideradas en el pasado, dada la falta del desarrollo de herramientas necesarias para ello. Sin embargo, hoy debido a estos avances, existen nuevos métodos, los cuales incrementan la calidad de los procesos, siendo éstos cada vez más sofisticados y precisos. Por ello en la actualidad, las técnicas de procesamiento de imágenes presentan progresos significativos para el área de reconstrucción tridimensional.

Partiendo de estas técnicas de reconstrucción 3D y considerando las características que la Transformada Wavelet tiene con respecto al análisis de señales no estacionarias, el siguiente trabajo de investigación es presentado, mostrando un análisis de reconstrucción 3D, utilizando esta técnica de Perfilometría Wavelet 2D y algoritmos 2D de desdoblamiento de fase, con la finalidad de conocer su desempeño y lo relevante de esta Transformada Wavelet 2D con respecto de la Transformada Wavelet 1D, así como los tipos de algoritmos 2D de fase existentes y cuál de ellos muestra el mejor desempeño.

Esta investigación es la continuación de un trabajo realizado en 2012, López, (2012) el cual muestra un estudio comparativo entre los diferentes tipos de Transformada Wavelet.

La investigación parte de los antecedentes de la Transformada Wavelet 1D, así como la implementación de los mejores parámetros López, et al (2016) para obtener un mejor desempeño de la transformada y con ello una mejor reconstrucción 3D de objetos. La Transformada Wavelet 2D (TW 2D) es una extensión natural de la Transformada Wavelet 1D, la última entrega un arreglo complejo de dos dimensiones, mientras que la primera (TW 2D) entrega un arreglo complejo de cuatro dimensiones.

Otros factores considerados en este trabajo de investigación son la detección y eliminación de sombra del objeto, la cual es adquirida al momento de la captura, y que de no ser eliminada genera ruido en el proceso de reconstrucción, brindando una reconstrucción 3D de mala calidad. El concepto de proyección de patrones de franjas también es introducido, dado que es el elemento que hace posible identificar la distorsión del objeto para ser capturada.

Es la Morlet compleja 2D la implementada en este trabajo de investigación, mostrando sus conceptos matemáticos, así como la parte real e imaginaria que derivan de ella y el uso de estas partes en el proceso de reconstrucción 3D. Un análisis simple del parámetro correspondiente a la escala para la TW 2D fue implementado López, et al (2017). Los algoritmos de fase implementados a la fase envuelta, resultado del proceso de reconstrucción, también son explicados dentro de esta investigación.

(Palabras Clave: Perfilometría, Transformada Wavelet, Morlet compleja 2D, Sombras, Parametrización.)

SUMMARY

Image processing has benefited from technological progress in areas where tools had previously not been available. New, advanced methods are more sophisticated, improving quality and precision. Significant progress has been made in processing techniques for three-dimensional reconstruction.

Research work is presented based on these 3D reconstruction techniques using the Wavelet Transform for analysis of non-stationary signals.

This research continues the work carried out in 2012 (López, 2012), which compares different types of Wavelet Transforms 3D reconstruction using 1D and 2D Wavelet Profilometry and 2D phase splitting algorithms to understand relative performance among them.

The present research is based on the 1D Wavelet Transform, as well as the implementation of the best parameters (López et al., 2016) for better transform performance and thus a better 3D reconstruction of objects. The 2D Wavelet Transform (2D WT) is a natural extension of the 1D Wavelet Transform, delivering a complex 4-dimensional array compared with a complex two-dimensional array in the 1D case.

Other factors considered in this research work are detection and removal of the object shadow acquired at the time of capture, which otherwise generates noise in the reconstruction process, leading to poor 3D reconstruction. Fringe pattern projection is also introduced, which makes it possible to identify the distortion of the object to be captured.

The complex 2D Morlet is implemented in this research work. Its mathematical concepts are presented, with real and imaginary part that make it a complex wavelet. A simple analysis of the scale parameter for the 2D WT was implemented (López et al., 2017). The phase wrapping algorithms implemented for the reconstruction process are also explained.

(Keywords: Profilometry, Wavelet Transform, 2D Complex Morlet, Shadow, Parameterization.)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a una de las personas que ha marcado mi vida, que me ha acompañado desde siempre en todo momento, a cada instante.

Ha sabido impulsar mis sueños, pero no solo eso, también me ha apoyado para hacerlos realidad.

Soñar y aterrizar contigo siempre es posible.

Eres una de las personas a quien más admiro y respeto, me motivas a ser mejor en todos los aspectos. Siempre cuidando de mí y haciéndome sonreír.

¡ G r a c i a s !

Kevin Kells

por el simple hecho de existir.

A mis padres: Guadalupe Torres y Rufino L. Carlin con amor.

Quienes me han acompañado hasta aquí. Madre, gracias por siempre tu apoyo, por enseñarme que rendirse no es una opción, a pesar de la adversidad.

Carlin, gracias por ser el mejor papá del mundo, por creer en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por su dulzura y los invaluables regalos que me ofrece cada día.

A mi asesor, el Dr. Pedraza, por siempre su apoyo, cariño y motivación continua para seguir.

A mis sínodos, por su enseñanza.

A ti, Sebastián por marcar la diferencia y apoyarme a lograr esta meta. Sin ti no hubiera sido posible.

A mis hermanos, por su amor incondicional.

A mis amigos que han estado ahí, sobre todo en los momentos difíciles, listos para regalarme una sonrisa cuando más lo necesito.

A V. L. quien fue un detonante para iniciar este camino.

A Koki, por creer en mí.

*El movimiento de las olas,
día y noche, viene del mar, tú ves las olas,
pero ¡qué extraño! no ves el mar.*

Yalal ad-Din Muhammad Rumi

Índice

RESUMEN	1
SUMMARY	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
Índice de tablas	6
Índice de figuras	6
1 Introducción.	8
1.1 Estado del arte.	9
1.2 Definición del proyecto de investigación	12
1.3 Justificación	13
1.4 Objetivos	13
1.5 Hipótesis	14
1.6 Alcances y limitaciones	14
1.7 Estructura de la tesis	14
2 Pre-Procesamiento de Imágenes.	17
2.1 Introducción	17
2.2 Suavizado	17
2.3 Histograma	21
3 Perfilometría Wavelet 1D.	27
3.1 Introducción	27
3.2 Técnicas de Reconstrucción 3D	27
3.3 Transformada Wavelet 1D	28
3.4 Proyección de Patrón de Franjas	31
3.5 Composición de un Patrón de Franjas	31
3.6 Perfilometría Wavelet 1D	32
3.7 Uso de la Transformada Wavelet 1D	37
3.8 Algoritmos de Desdoblamiento de Fase	39
4 Perfilometría Wavelet 2D.	42
4.1 Introducción	42
4.2 Transformada Wavelet 2D	42
4.3 Método Propuesto de Perfilometría Wavelet 2D	45
4.5 Uso de la Transformada Wavelet 2D Morlet	47
5 Resultados Experimentales	50
5.1 Introducción	50

5.2	Objetos Creados por Computadora	50
5.3	Objetos Reales	51
5.4	Análisis y Discusión de Resultados	57
6	Conclusiones y Trabajo Futuro	59
7	Apéndice A	67
8	Apéndice B	70
9	Apéndice C	73
10	Apéndice D	75

Índice de tablas

Tabla		Página
Tabla A 1.	Total de combinaciones de caracterización de parámetros 1D	67
Tabla A.2	Parámetros para error mínimo reconstrucción 3D. Objeto 1	67
Tabla A.3	Parámetros para error mínimo reconstrucción 3D. Objeto 2	67

Índice de figuras

Figura		Página
Figura 1.1.1.	Clasificación de técnicas ópticas.	9
Figura 2.2.1.	Triángulo de Pascal.....	18
Figura 2.2.2.	Filtro Gaussiano.....	19
Figura 2.2.3.	Filtro Mediano.	20
Figura 2.3.1.	Ecualización Histograma.	22
Figura 2.3.2.	Ajuste Brillo.....	23
Figura 2.3.3.	Ajuste Contraste.....	24
Figura 2.3.4.	Ajuste Gamma.	25
Figura 3.3.1.	Dominios.....	30
Figura 3.4.1.	FPP.....	31
Figura 3.5.1.	Patrón.....	32
Figura 3.6.1.	Wavelet Compleja.....	34
Figura 3.6.2.	Proyección	35
Figura 3.6.3.	Perfil.....	35
Figura 3.6.4.	Mapa de fase.	36
Figura 3.6.5.	Reconstrucción.....	36
Figura 3.6.6.	Transformada Wavelet y su Inversa.	37
Figura 3.7.1.	Escala.	38
Figura 3.7.2.	Traslación.....	39

Figura 4.2.1. Wavelet 2D.....	44
Figura 4.3.1. Metodología.....	45
Figura 4.5.1. Morlet 2D.....	47
Figura 5.2.1. Objeto virtual.....	51
Figura 5.3.1. Bombonera.....	52
Figura 5.3.2. Bombonera.....	53
Figura 5.3.3. Kitty. (a).....	54
Figura 5.3.4. Kitty.....	54
Figura 5.3.5. Unicornio.....	55
Figura 5.3.6. Unicornio.....	55
Figura 5.3.7. Licorera.....	56
Figura 5.3.8. Licorera.....	56
Figura A.1. Error mínimo.....	68
Figura B.1. Patrón.....	70
Figura B.2. Vaca.....	71
Figura B.3. Vaca.....	71

Dirección General de Bibliotecas U.A.Q

1 Introducción.

El procesamiento digital de reconstrucción 3D se apoya en diferentes técnicas de adquisición de información. Una de ellas son las técnicas ópticas, las cuales son clasificadas en dos grupos dependiendo de la fuente o fuentes de luz que iluminan la escena Bels (1988), estas técnicas son:

Técnicas ópticas activas. En este tipo de técnicas las fuentes de iluminación influyen de forma directa en el momento de determinar las coordenadas tridimensionales, por ello el tipo de iluminación usado debe tener características específicas. Este método de técnica de contacto se basa en la emisión de radiación, la cual a través del reflejo discierne el objeto o ambiente. El tipo de radiación incluye la luz ultrasonido o radiografía. Las técnicas activas presentan mejor resultado en el ámbito industrial, debido a que ofrecen mejores resultados de las imágenes.

Técnicas ópticas pasivas. En este tipo de técnicas las fuentes de iluminación no son consideradas en la escena para el cálculo de las coordenadas tridimensionales de los objetos. Este método es de no contacto, dado que no se emite radiación alguna, debido a que la radiación reflejada del ambiente es detectada. Su proceso se basa principalmente en hacer uso de la luz visible ya existente. Por esta razón, existe un grado de incertidumbre, dado que la fuente de luz no está controlada produciendo que la correspondencia entre los puntos de la escena y los de la imagen limiten la exactitud de la medida Molleda (2008). La radiación infrarroja (IR), es un ejemplo de una técnica pasiva. Se hace uso de un proyector de IR para emitir rayos infrarrojos, los cuales rebotan sobre el objeto, y de esta forma, dicho objeto puede ser detectado posteriormente por una cámara IR, (el dispositivo del Kinect trabaja de esta forma, incluyendo, además, una cámara RGB, para detectar la luz visible del entorno). El costo de estos métodos suele ser accesible dado que no se requiere de un hardware en especial. Estas técnicas se muestran en la Figura 1.1.1.

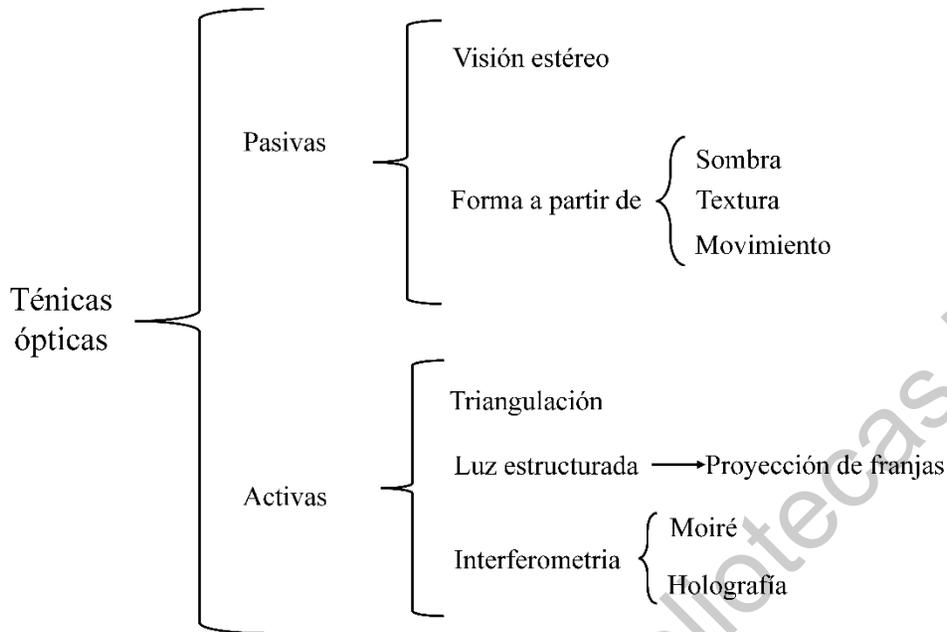


Figura 1.1.1. Clasificación de técnicas ópticas. (Molleda, 2008)

Dentro de los métodos activos existen la Transformada de Fourier (Perfilometría de Fourier), y la Transformada Wavelet (Perfilometría Wavelet), que son métodos que trabajan con proyección de franjas.

En la actualidad estos métodos ya han sido desarrollados y están siendo mejorados, aportando avances importantes para el proceso de reconstrucción 3D. La reconstrucción 3D se está llevando a cabo con Fourier 1D, 2D e incluso 3D. La Transformada Wavelet tiene investigaciones basadas más en 1D y algunas en 2D con Wavelets específicas, como la Wavelet Daubechies, Gabor, Morlet, Fan, entre otras.

1.1 Estado del arte.

Yagnik, et al. (2005) proponen el desarrollo de la Perfilometría Wavelet utilizando Transformada Morlet, aplicado a la reconstrucción 3D de rostros, utilizando una sola imagen. La propuesta dentro de su método fue el uso de filtros pasa-bajas el cual estima la textura del rostro de la misma imagen, considerando las regiones del rostro con vello facial.

Quan, et al. (2005) proponen la Transformada Wavelet Continua CWT para un conocimiento a priori de una distribución de densidad de patrón de franjas. Este método de estimación de densidad de franjas se basa en una Transformada Wavelet Continua, así para una señal unidimensional, donde la frecuencia instantánea es detectada en la cresta, y en la señal bidimensional, esta frecuencia se detecta en ambas direcciones.

Wang, et al. (2006) proponen un algoritmo de Transformada Wavelet Continua 2D para el análisis de un interferograma digital y procesamiento. Este algoritmo es una extensión de la Transformada Wavelet original, la selección de la transformada y el parámetro de normalización se basa en las características de los interferogramas ópticos. El algoritmo es simple y es una herramienta robusta que filtra el interferograma para franjas de campo amplio y obtención de la información de fase.

Gdeisat, et al. (2006) proponen una nueva técnica dimensional utilizando la Transformada Wavelet Fan 2D Continua CWT para la fase demoduladora de patrones de franjas propuesta; comparando este algoritmo con el de CWT unidimensional.

Kemao, (2007) propone dos algoritmos, uno basado en el filtrado y el otro en medida de similitudes, los cuales incluyen las frecuencias instantáneas provenientes de la información extraída del patrón de franjas (strain), el desenvolvimiento de fase, bordes, segmentación de franjas, así como la detección de fallas, las cuales se producen cuando la fase tiene cambios abruptos, pues esto genera un cambio repentino en la densidad marginal o frecuencia local.

Watkins, (2007) propone la Transformada Wavelet Continua CWT, para la técnica óptica, -interferometría-; codificada como la fase de una variable periódica; tomando las propiedades de localización de frecuencia espacial de las ondas; utilizando el módulo máximo de la wavelet, obteniendo de forma instantánea la frecuencia de desplazamiento espacial de la franja.

Pedraza, et al. (2007/2009) proponen una técnica de reconstrucción 3D utilizando y comparando dos técnicas (Fourier y Wavelet). Se consideró un método modificado en el caso de perfilometría de Fourier y el uso de la Wavelet Morlet en el caso de Perfilometría Wavelet.

Li, et al. (2008) emplean un mapa de los valores de amplitud de los coeficientes de la Transformada Wavelet posicionados en la cresta de la misma, identificando la confiabilidad de los datos de fase, así como la ruta de su desenvolvimiento. Con la finalidad de disminuir el error de fase causado por un proceso de desenvolvimiento no adecuado dentro de la Perfilometría de Transformada Wavelet.

Abid, (2008) propone en su tesis doctoral el uso de la Transformada Wavelet Continua en 1D y 2D para la demodulación de patrones de franjas.

Abid, et al. (2008) proponen una transformada wavelet madre diseñada para mejorar la capacidad de la transformada wavelet continua para analizar patrones de franjas que contienen variaciones de fase repentinos.

Huang, et al. (2010) proponen la implementación de algoritmo 1D y 2D y compensación de fase. Ruido y formas de ondas no sinusoidales son involucradas en esta comparación utilizando los principios de la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet para el procesamiento de patrón de franjas.

Wang, et al. (2012) proponen una técnica mejorada de la Transformada Wavelet Continua 2D para el análisis de patrón de franjas, más preciso y rápido, el cual analiza patrones de franjas con franjas complejas, así como la adición de ruido y defectos.

Zhang, Z. et al. (2012) evalúan las ventajas y desventajas de los métodos de fase en las discontinuidades y/o pendientes. Los datos simulados y experimentales se prueban con los bordes con la finalidad de confirmar que método es el adecuado para medir objetos que tienen discontinuidades mediante el uso del método de adquisición de patrón de franjas en una trama. Las técnicas evaluadas son la transformada de Fourier, ventaneo de transformada de Fourier y transformada wavelet.

Dehaeck, et al. (2015) proponen un algoritmo relativamente rápido haciendo uso de dos transformadas Wavelet Fan 2D, para analizar imágenes de patrones circulares de franjas, siendo el algoritmo capaz no solo de extraer la fase local, sino también la información de frecuencia local.

Petra B, et al., (2016) 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.

Zhang, et al. (2017) proponen un análisis de perfilometría de superficie 3D, basándose en el método de transformada wavelet, debido a sus características, con respecto de la localización del dominio de tiempo y frecuencia, así como su análisis de multiresolución. Este análisis muestra los valores de modulación de un patrón de franjas obtenido a través de la implementación de la transformada wavelet. Finalmente, realizan una comparativa del método de transformada wavelet versus transformada de Fourier; concluyendo, que el mejor rendimiento con respecto a la recuperación de valores de fase es la transformada wavelet.

Wang, et al (2018) proponen un nuevo método de extracción de cresta con Perfilometría Wavelet 2D. El valor máximo es extraído del módulo de la wavelet, obteniendo los puntos de valor extremo local, por encima del valor máximo, constituyendo estos valores la cresta de la wavelet. Utilizan la función de costo de Abid para trabajar el gradiente del factor de rotación, para encontrar la cresta óptima de la wavelet, extrayendo con ello la fase en la cresta. Obteniendo mediante el algoritmo mayor precisión en la superficie tridimensional.

Bailich, et al (2019) proponen un método adaptativo basándose en un análisis multi escala, usando Transformada Wavelet 2D. Realizan un análisis de patrones de franjas a múltiples escalas con la propuesta de una nueva wavelet, la cual implementa una mejora del algoritmo local de demodulación marginal.

1.2 Definición del proyecto de investigación

Con base en los antecedentes, podemos concluir que la aportación brindada por el desarrollo de este tipo de sistemas de reconstrucción 3D es parte fundamental dentro del avance tecnológico. Por lo que la aportación principal que este trabajo muestra es el análisis de la Transformada Wavelet, implementando un algoritmo mejorado de desdoblamiento de fase 2D, auxiliado por un algoritmo de extracción de bordes.

La implementación de este algoritmo mejorado de desdoblamiento de fase 2D, es la consecuencia del trabajo realizado anteriormente basado en el estudio comparativo de diferentes tipos de Transformadas, el cual aportó un estudio enfocado a 1D y ahora servirá como base para una extensión, ayudando al desarrollo de un algoritmo de fase mejorado para ser implementado en 2D.

El proyecto estará enfocado en la mejora de un algoritmo y su implementación, haciendo uso de Perfilometría Wavelet 2D, para obtener una mejor reconstrucción 3D del objeto.

Existe una etapa dentro del presente proyecto de investigación en la cual se analiza la parte matemática de las Transformadas Wavelets para determinar la ventaja del uso en cada una de las citadas en nuestra metodología. La mejora en la disminución del tiempo de procesamiento de la reconstrucción en el tratamiento de las imágenes seleccionadas es un punto crucial, el cual, en este caso estará determinado no solo por el equipo utilizado sino también, por el algoritmo que se implementará para la mejora de dicha reconstrucción.

La participación del proyecto va desde el análisis matemático de las transformadas, hasta la mejora e implementación del algoritmo en Matlab; partiendo de la investigación anterior para llevar a cabo la reconstrucción 3D de objetos aplicando el método de Perfilometría Wavelet 2D.

Los resultados obtenidos, serán comparados con otros métodos ya establecidos para su análisis. Entre las aportaciones de este trabajo de investigación se encuentra la selección de parámetros, los cuales fueron definidos para las Wavelets: Shannon, Morlet y B-Spline en 1D. Considerando, que el uso de los parámetros adecuados es de vital importancia para la obtención de una mejor reconstrucción, este trabajo muestra dicha selección. Además, de ello, otro punto

importante a considerar con respecto de una buena reconstrucción es la correcta selección del tipo de Wavelet con respecto de la forma del objeto, factor que, sumado a la selección de los parámetros adecuados, permite la mejora de la reconstrucción 3D del objeto.

1.3 Justificación

El análisis preliminar, permite observar cómo algunas Transformadas Wavelets han sido utilizadas de manera unidimensional en la mayoría de los casos. Por otro lado, la Transformada Wavelet bidimensional recientemente está siendo aplicada en reconstrucción 3D, por lo que su uso no ha sido explorado tanto como en 1D.

Considerando lo anterior y dado que la Transformada Wavelet tiene un mejor desempeño que Fourier, la idea central de este proyecto de investigación es llevar a cabo un análisis del proceso de reconstrucción tridimensional utilizando Perfilometría Wavelet 2D y algoritmos de desdoblamiento de fase robustos, aportando una mejora del algoritmo para obtener una mejor reconstrucción 3D.

1.4 Objetivos

Objetivo general.

Obtener la reconstrucción tridimensional de objetos mediante la integración de una etapa de pre-procesamiento de imágenes y un algoritmo de desdoblamiento de fase robusto en la Perfilometría Wavelet 2D, con la finalidad de llevar a cabo una mejor reconstrucción 3D de objetos reales, a través de la implementación de un algoritmo desarrollado en Matlab, haciendo uso de las transformadas Wavelet 2D, optimizando su desempeño al reducir el tiempo de procesamiento.

Objetivos específicos.

- a) Pre-procesamiento de Imágenes (filtros y uso de técnica de histograma)
- b) Análisis de la Transformada Wavelet Compleja 2D.
- c) Estimación y/o determinación de la frecuencia f_0 .
- d) Implementación de algoritmos de extracción de bordes.
- e) Obtención del mapa de fase.
- f) Algoritmos de desdoblamiento de fase.
- g) Análisis de resultados para realizar validación con otros métodos.

1.5 Hipótesis

Este trabajo de investigación pretende a través del desarrollo e implementación de algoritmos robustos de desdoblamiento de fase en la Perfilometría Wavelet 2D y el uso de algoritmos de pre-procesamiento de imágenes mejorar la reconstrucción 3D de objetos.

1.6 Alcances y limitaciones

El proyecto tiene como alcance cubrir en su totalidad los objetivos establecidos, mostrados a continuación, utilizando como herramienta de desarrollo el software Matlab.

- Desarrollo e implementación de algoritmos de pre-procesamiento de la imagen que contiene el patrón de franjas a analizar.
- Digitalización de objetos creados en computadora, utilizando Perfilometría Wavelet 2D.
- Captura de objetos reales con patrón de franjas proyectados, para llevar a cabo el proceso de reconstrucción 3D, utilizando Perfilometría Wavelet 2D.
- Mejora e implementación de algoritmos robustos de desdoblamiento de fase
- Publicación de al menos 1 artículo en un congreso internacional arbitrado.
- Publicación de al menos 1 artículo en una revista indexada por el Journal Citation Reports (JCR).

1.7 Estructura de la tesis

Este trabajo de investigación se desarrolla dentro de 6 capítulos. El capítulo 1 se enfoca a los tipos de técnicas de procesamiento de imágenes, así como el trabajo realizado por otros autores con respecto de la Perfilometría Wavelet 1D y 2D (estado del arte). En este capítulo también se incluyen los objetivos, la descripción del problema, sus alcances y limitaciones y la justificación del porqué del desarrollo de este trabajo de investigación.

En el capítulo 2 se presenta el concepto de pre-procesamiento de imágenes, así como las técnicas utilizadas para este propósito. Se incluyen ejemplos de algunos de los diferentes métodos de estos pre-procesamientos de imágenes, además de sus características.

En el capítulo 3 se introducen las técnicas de reconstrucción 3D. Así como, los conceptos, características y usos, de la Transformada Wavelet y la Perfilometría Wavelet 1D. Los algoritmos de desdoblamiento de fase, además de la metodología en diagrama de bloques, también son presentados en este capítulo.

En el capítulo 4 se introduce la Transformada Wavelet 2D y el Método de Perfilometría Wavelet 2D propuesto, también se presentan las características de las Wavelet Paul, Fan y Morlet, su definición matemática y las características de cada una de ellas.

En el capítulo 5 se muestran los resultados dentro del trabajo de investigación, tanto con objetos virtuales, así como reales realizados, implementando la metodología propuesta, validando de esta forma el método propuesto, un análisis de dichos resultados se incluye como parte de este capítulo. Las conclusiones y el trabajo futuro se incluyen en el capítulo 6.

Dirección General de Bibliotecas U.A.Q

Capítulo II

Dirección General de Bibliotecas UAQ

2 Pre-Procesamiento de Imágenes.

2.1 Introducción

El pre-procesamiento de imágenes es un método que se realiza con la finalidad de mejorar la calidad de la imagen de entrada, sin perder las características de la imagen original. Estas imágenes son representadas regularmente por matrices, las cuales contienen los valores de los píxeles de dicha imagen (intensidad). El objetivo del pre-procesamiento de imágenes es mejorar las características de la misma, para su procesamiento posterior, de aquí que existen técnicas enfocadas a esta mejora en la calidad de la imagen o en la corrección de algunos de los factores que la constituyen, tales como la intensidad o radiometría con la finalidad de hacer más accesible su análisis o procesamiento.

El pre-procesamiento de imágenes es clasificado en cuatro tipos, dependiendo del tamaño de la vecindad de píxeles utilizados para el cálculo de un nuevo brillo de píxel.

El suavizado es un proceso que permite reducir (minimizar) el ruido en una imagen al igual que otros factores no deseados que se presentan debido al resultado del muestreo, transmisión y cuantificación e incluso por perturbaciones presentes en el sistema óptico de captura, y se lleva a cabo a través de las transformaciones del brillo de los píxeles.

Por otro lado, el realzado es un proceso el cual, ayuda a hacer visibles detalles que no son distinguidos en la imagen, y que son importantes, este proceso puede ser llevado a cabo a través del análisis y la modificación del histograma, describiendo las transformaciones geométricas.

Además, de estos procesos basados en el histograma, existen otras técnicas enfocadas en correcciones radiométricas, las cuales tienen la finalidad de modificar los niveles de intensidad en la imagen para facilitar su análisis antes de aplicar cualquier proceso sobre ella.

2.2 Suavizado

Es una técnica directa en el dominio espacial. De una imagen, se obtiene otra imagen suavizada, la cual es el resultado del promedio de los valores de intensidad de sus píxeles, incluyendo el entorno de vecindad ya definido. Y está representado como:

$$f(i, j) = \frac{1}{P} \sum_{(m, n) \in S} g(m, n) \quad (2.2.1)$$

donde, (i, j) representan los pixeles de $g(m, n)$, y S es el conjunto de coordenadas de los puntos en el entorno de vecindad.

El suavizado Gaussiano, es un caso particular de suavizado, el cual, incluye dentro de este promedio el uso de la desviación estándar y una media. Y está representado como:

$$G(i, j) = e^{-(i^2 + j^2)/2\sigma^2} \quad (2.2.2)$$

Además del suavizado Gaussiano, se tiene también los filtros binomiales obtenidos a través del uso del triángulo de Pascal. Como se muestra en la Figura 2.2.1 a continuación:

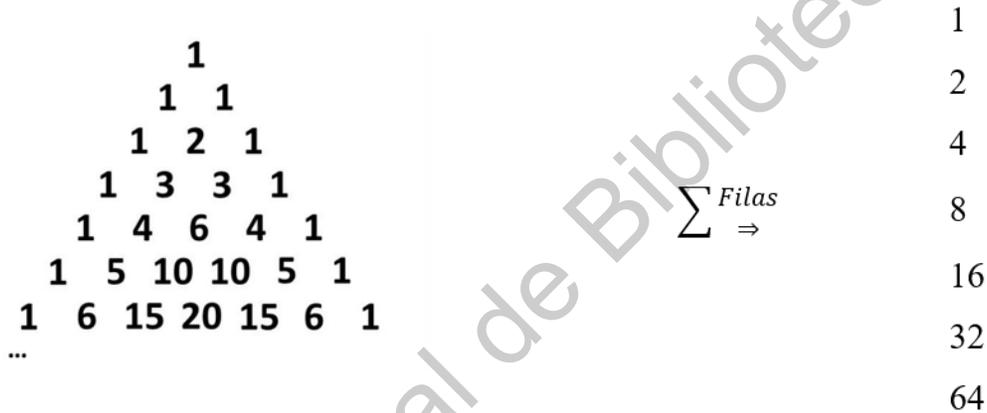


Figura 2.2.1. Triángulo de Pascal a la izquierda y la suma de los valores de las filas de dicho triángulo a la derecha.

El triángulo de Pascal es una forma más rápida de discretizar, es decir, las filas del triángulo de Pascal forman discretizaciones de la campana de Gauss en 1D. Al utilizar estas filas y realizar la extensión en 2D, se forma la campana de Gauss en 2D. Por lo tanto, el utilizar el triángulo de Pascal en 2D es equivalente a realizar un filtro Gaussiano en 2D.

Aplicando dicho filtro, podemos apreciar el suavizado que genera el filtrado Gaussiano. Ver Figura 2.2.2

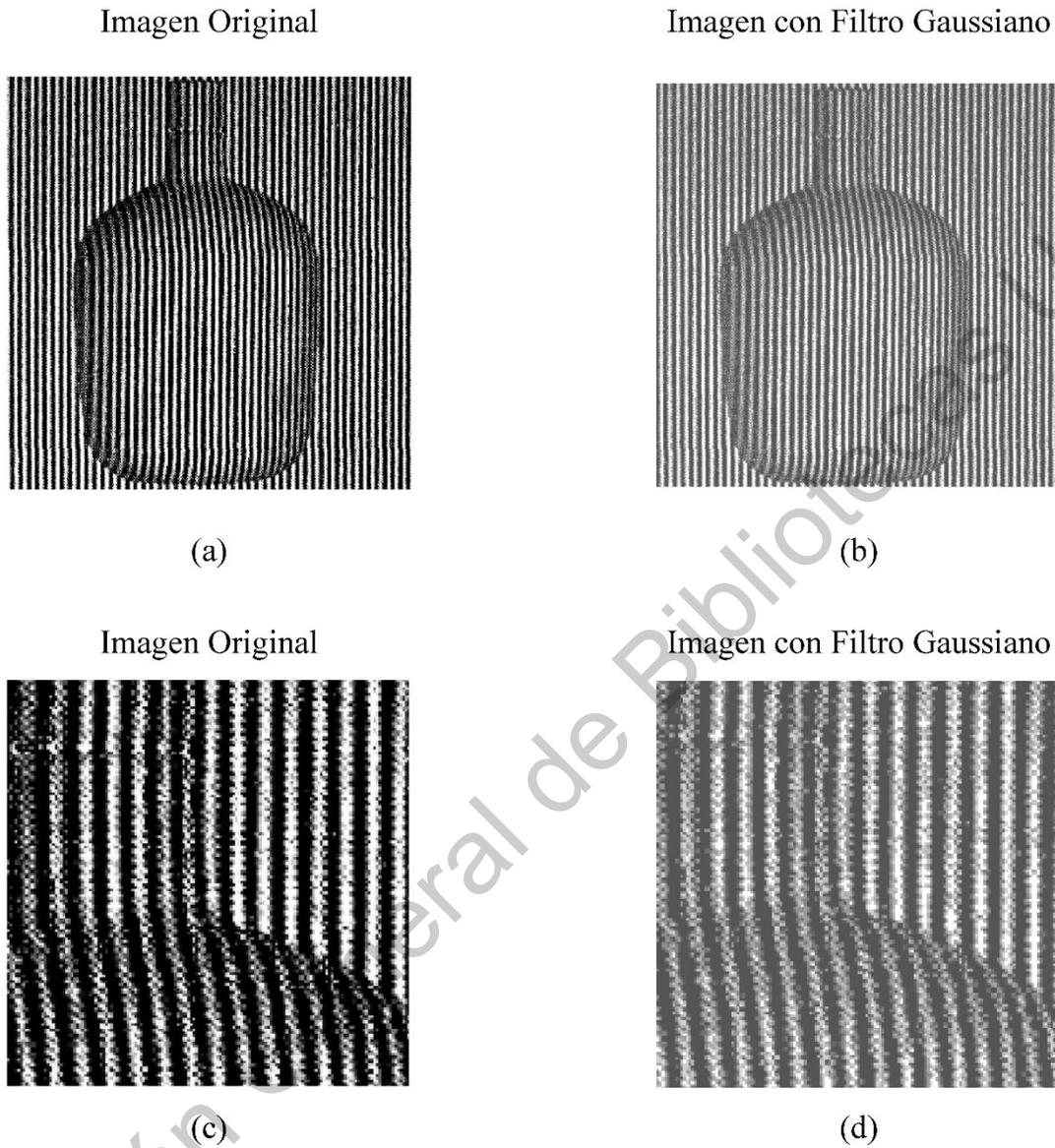


Figura 2.2.2. Filtro Gaussiano. (a) Muestra la imagen original, y el inciso (b) muestra la misma imagen con el filtro Gaussiano, el inciso (c) muestra un acercamiento de la imagen original y el inciso (d) acercamiento de la imagen original ya con filtro Gaussiano, y donde se aprecia el suavizado.

Otro tipo de suavizado es aquel, donde se preservan los bordes y se suaviza la imagen. En este caso, para mantener los bordes, es necesario utilizar el filtro de la mediana, el cual es un algoritmo sofisticado propuesto por Nagao y Matsuyama (1980). Este algoritmo resuelve el conflicto entre la degradación de bordes y la eliminación del ruido. El ruido es eliminado sin desdibujar el borde, lo cual se logra al aplicar el promedio solo en la vecindad más homogénea. La varianza es utilizada como una medida de homogeneidad dentro de un área con bordes como se muestra en la Figura 2.2.3.

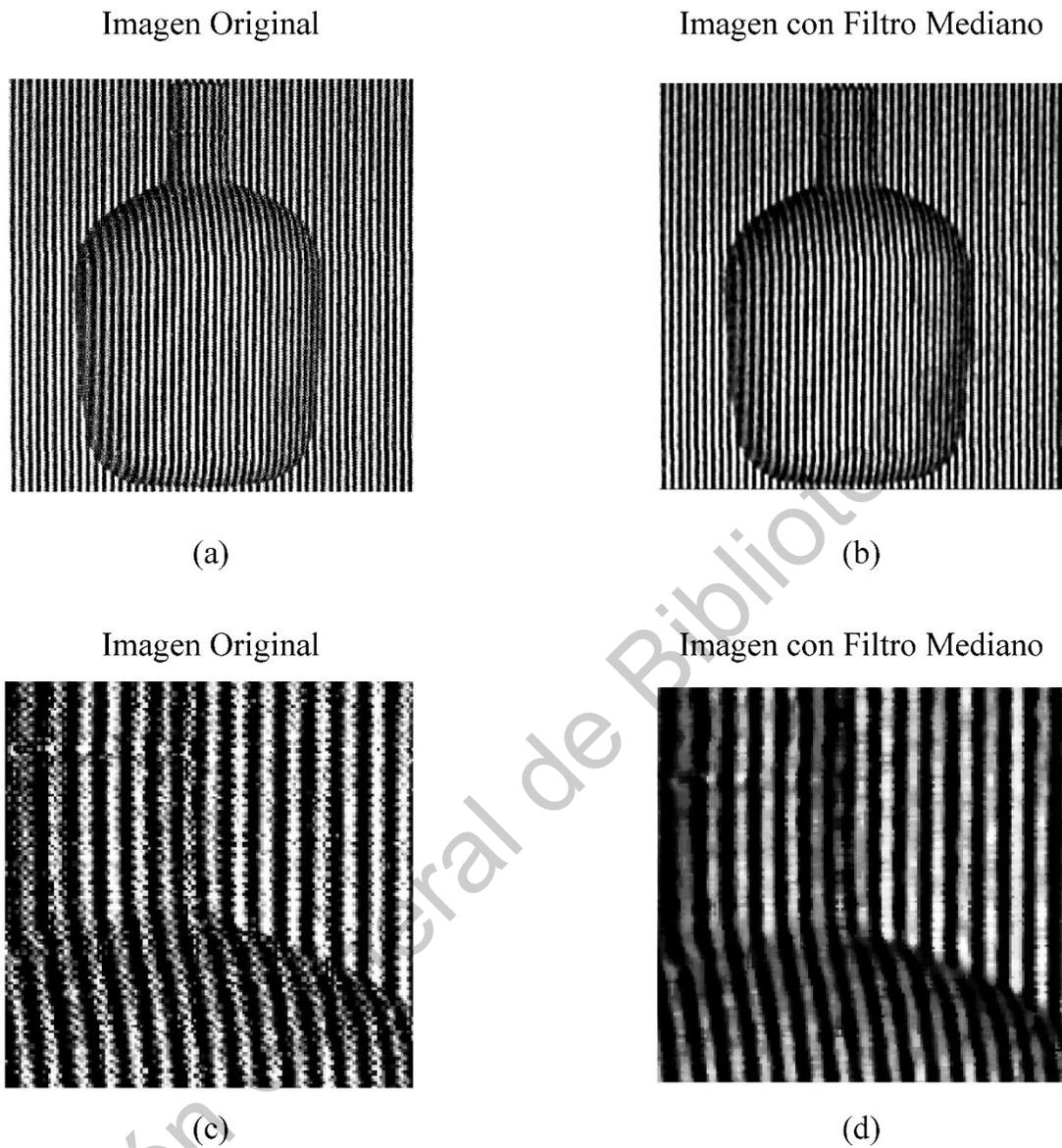


Figura 2.2.3. Filtro Mediano. (a) Muestra la imagen original, el inciso (b) muestra la misma imagen con el filtro mediano, el inciso (c) muestra un acercamiento de la imagen original y el inciso (d) acercamiento de la imagen original ya con filtro mediano, donde se puede apreciar el realzado de los bordes

2.3 Histograma

Permite variar la distribución de los niveles de grises o color de la imagen y por ende su contenido. Estas manipulaciones van enfocadas a la calidad de la imagen con la finalidad de eliminar los efectos de las sombras y/o reflejos, a través de un incremento en el contraste.

El histograma está representado por una función discreta basada en el número de píxeles que contiene la imagen en función de los niveles de intensidad. Sus propiedades estadísticas son las siguientes:

- **Media:** Nivel medio de los valores de grises y es la media quien proporciona la información general sobre el brillo de la imagen.
- **Varianza:** Mide la dispersión alrededor de la media
- **Energía:** Tiene un valor de 1 en la imagen con un único valor de grises, la energía es inversamente proporcional al número de nivel de grises.
- **Entropía:** También está relacionado con el número de grises de la imagen y en este caso es directamente proporcional a este número, es decir a mayor número de grises mayor entropía.

El histograma es una técnica de pre-procesamiento muy útil en el tratamiento de imágenes. Las distribuciones de grises son representadas en una gráfica, (en esta técnica), la cual, muestra la frecuencia de los valores de cada píxel, así como sus aspectos más importantes al observar la distribución de dichas frecuencias para la imagen seleccionada dentro del histograma. A continuación, la Figura 2.3.1 muestra esta técnica aplicada a la imagen abajo.

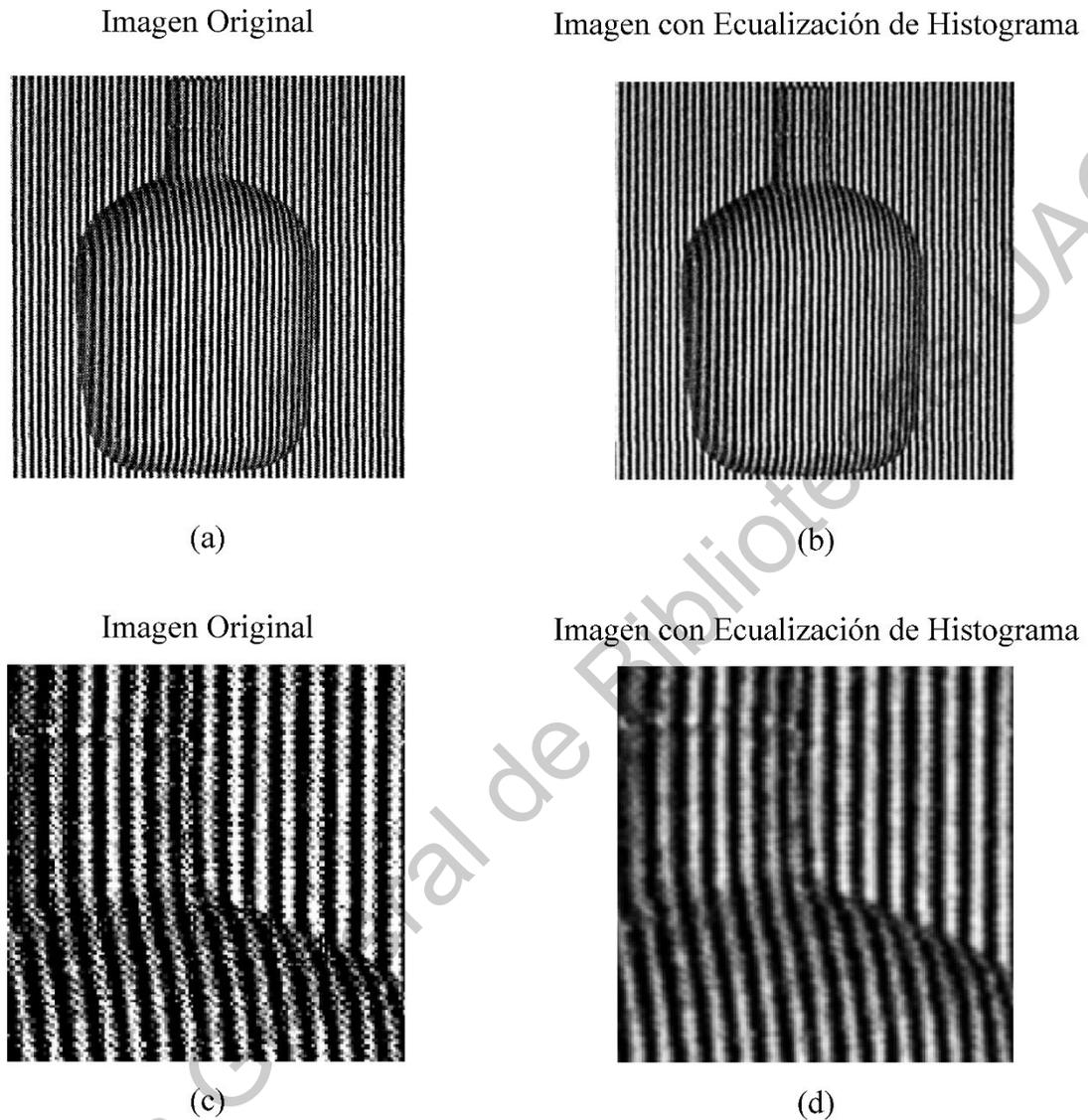


Figura 2.3.1. Ecuación Histograma. (a) Muestra la imagen original, el inciso (b) muestra la misma imagen con el filtro con ecuación de histograma, el inciso (c) muestra un acercamiento de la imagen original y el inciso (d) acercamiento de la imagen original ya con filtro con ecuación de histograma

El brillo y contraste, en general ambos varían en función de la distribución de grises en la imagen y la localización en la que esta concentración de grises está ubicada en la imagen, modificándose en función de la expansión de los niveles de grises, su compresión o desplazamiento, como se puede apreciar en la Figura 2.3.2.

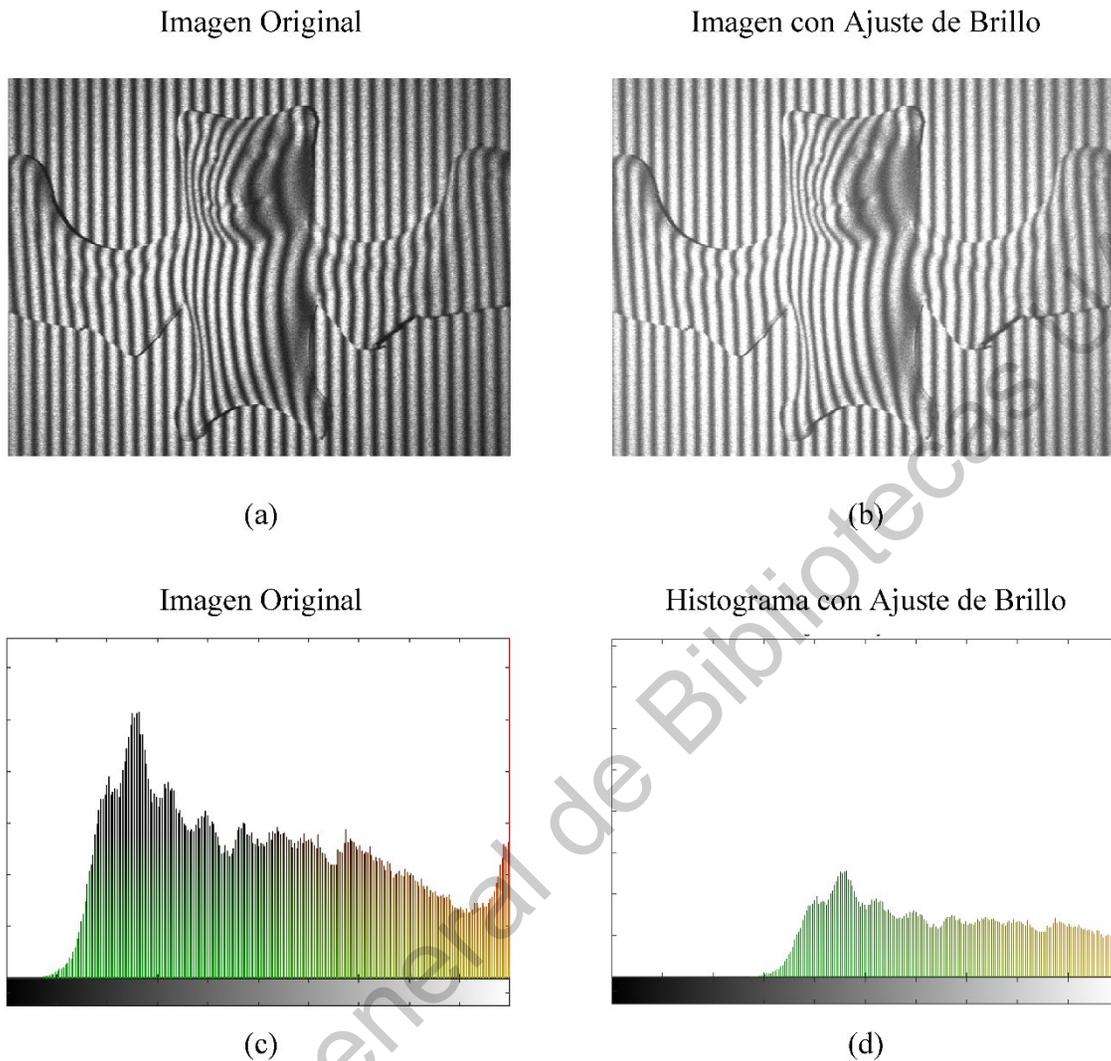


Figura 2.3.2. Ajuste Brillo. (a) Muestra la imagen original, el inciso (b) muestra la misma imagen con ajuste de brillo, el inciso (c) muestra el histograma de la imagen original y el inciso (d) es como se visualiza el histograma con el ajuste de brillo.

En el caso del contraste en vez de sumarle un valor, se le resta a la imagen, y en este caso en el histograma el desplazamiento de todos los valores se presenta hacia la izquierda, lo cual da como efecto que la imagen resultante se oscurece con respecto a la imagen original. Este proceso se utiliza principalmente en aquellas imágenes que están saturadas de brillo, como se muestra en la Figura 2.3.3.

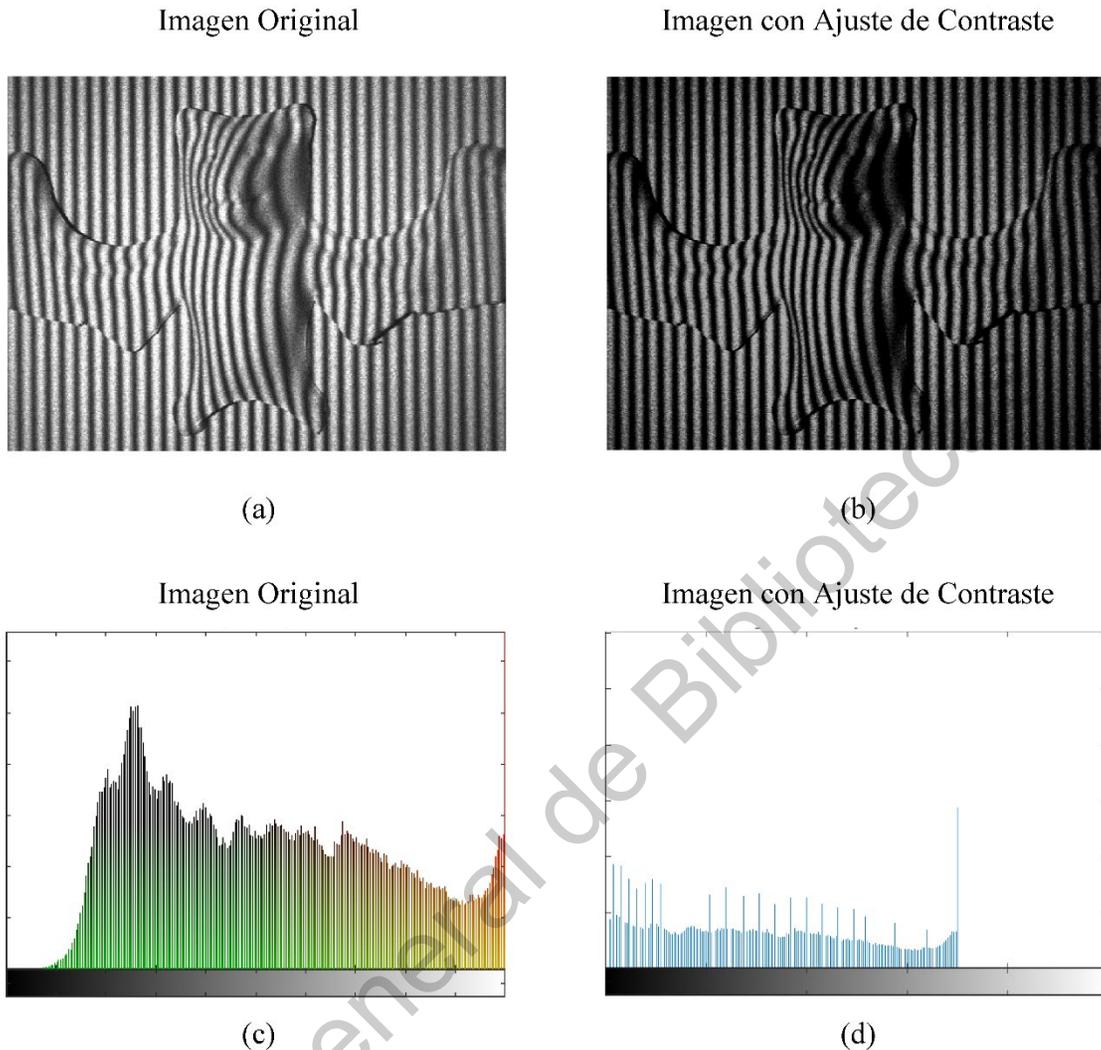


Figura 2.3.3. Ajuste Contraste. (a) Muestra la imagen original, el inciso (b) muestra la misma imagen con ajuste de contraste, el inciso (c) muestra el histograma de la imagen original y el inciso (d) es como se visualiza el histograma con el ajuste de contraste

Por otro lado, la corrección gamma está enfocada en obtener una relación lineal entre los valores de intensidad del píxel, dado que la intensidad de los píxeles en un monitor es no lineal. Los valores trabajados con la corrección gamma, en realidad son los valores reales de intensidad de los píxeles.

La corrección se hace posible, cuando se convierte este valor de intensidad, al valor del voltaje. De esta forma, al desarrollar este proceso se obtiene una relación lineal entre la intensidad del píxel y la intensidad en la pantalla del monitor.

Además del brillo y contraste, la corrección gamma, también dentro de la parte de histograma se puede ver: desplazamiento, contracción, e igualación del histograma, entre otros, mostrado en la Figura 2.3.4.

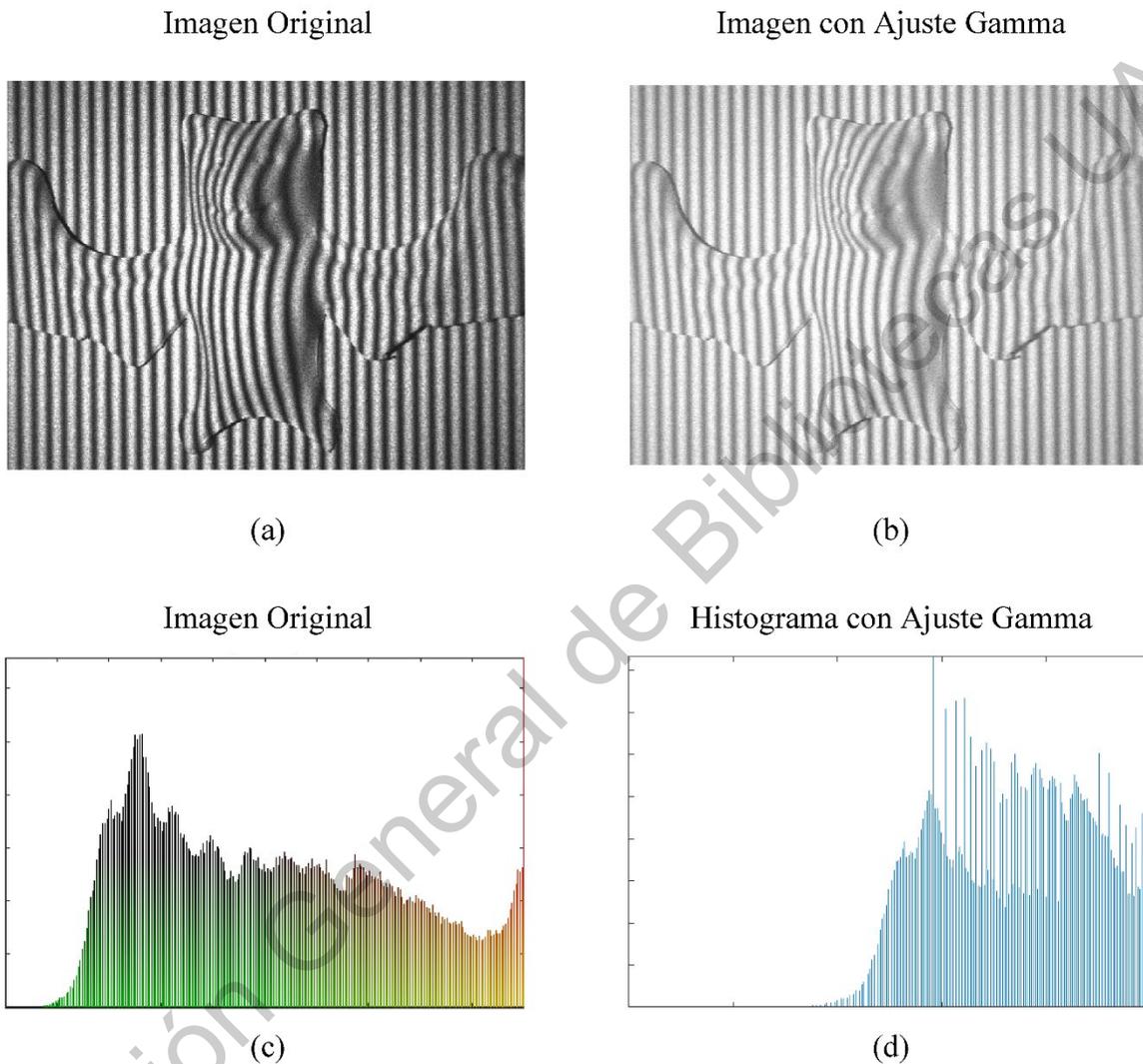


Figura 2.3.4. Ajuste Gamma. (a) Muestra la imagen original, el inciso (b) muestra la misma imagen con corrección gamma, el inciso (c) muestra el histograma de la imagen original y el inciso (d) es como se visualiza el histograma con corrección gamma.

El objetivo principal de las técnicas de pre-procesamiento es la de eliminar ruido, corregir errores que se presentan en la etapa de adquisición y preparar la imagen para que tenga un mejor desempeño el algoritmo principal.

Capítulo III

Dirección General de Bibliotecas UAQ

3 Perfilometría Wavelet 1D.

3.1 Introducción

Basándose en la geometría de múltiples vistas, la reconstrucción tridimensional es el proceso donde un objeto real es reproducido en forma digital conservando sus características físicas de forma, dimensión y volumen. Para llevar a cabo esta reconstrucción se requiere un proceso de pasos de extracción de los puntos de dicho objeto y el emparejamiento de estos.

Este proceso puede reproducirse partiendo de las partes geométricas de la imagen como sus vértices y aristas, generando un sistema de ecuaciones los cuales son resueltos por diferentes métodos numéricos, a través de sistemas computacionales.

La gama de aplicaciones para la reconstrucción tridimensional es muy amplia; dentro de las cuales podemos mencionar las militares, física, médica, las relacionadas con el tráfico, las ciencias naturales, la astronomía, arqueología, medicina, estereoscopia, Ruiz (2015), existiendo también casos no tan usuales como son la geodesia, la química, la cristalografía entre otras.

3.2 Técnicas de Reconstrucción 3D

Hoy por hoy, el proceso de reconstrucción tridimensional ha sido beneficiado por el avance tecnológico, el cual provee más calidad, a través de algoritmos útiles para su desarrollo a un bajo costo computacional.

Al proceso mediante el cual un objeto real es reproducido en la memoria de una computadora, se le llama reconstrucción 3D. Por otro lado, además de los diferentes tipos de reconstrucción, en la visión artificial existen diferentes métodos de mallado 3D, donde el objetivo principal es desarrollar algoritmos para obtener la relación de los conjuntos de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie, los cuales pueden ser triángulos, cuadrados o cualquier otra forma geométrica. Estos algoritmos, se debaten entre el costo computacional y la calidad del mallado obtenido. Palos (2012)

El avance en las técnicas de reconstrucción 3D ha progresado mucho en los últimos años, siendo éstas cada vez más eficientes y mejor dirigidas, con costos computacionales variantes, pero obteniendo mejor calidad con los algoritmos hoy en día desarrollados, mayormente implementadas en Wavelet 1D, abriendo un campo de oportunidad para desarrollar mejoras en Wavelet 2D.

La demanda industrial está enfocándose más cada día a sistemas de reconstrucción 3D por la inminente demanda de la calidad en la producción, con la finalidad de minimizar las fallas o errores de la superficie de objetos diversos. Así mismo, la creación de moldes en 3D para piezas

históricas, por ejemplo, donde la importancia de obtener el reflejo de la pieza original y sin degradaciones es primordial. Destacando así, el beneficio que tienen el desarrollo de los sistemas para la reconstrucción tridimensional y su implementación, incrementando en la medida del avance tecnológico la calidad y precisión para la obtención de mejores resultados.

3.3 Transformada Wavelet 1D

Con el avance tecnológico, se han desarrollado también herramientas matemáticas que se adhieren mejor a las necesidades comunes de nuestros tiempos. Así bien, el procesamiento de señales se ha venido trabajando desde los años 80's. Este análisis se ha apoyado en técnicas como la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet.

Dentro del procesamiento de señales comúnmente podemos encontrar fenómenos oscilantes, localizados en el tiempo, así también se encuentran ondas perdurables que presentan amplitudes casi estacionarias, las cuales muestran patrones de frecuencias variables en el tiempo.

El procesamiento de las señales analizadas con la Transformada 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 (1983), nos da las frecuencias presentes en la señal, más no nos indica el tiempo en que estas señales ocurren, para poder cubrir este hueco dentro de la Transformada de Fourier surgió el análisis por ventaneo, el cual toma pequeños intervalos de la señal analizada generando así un espectrograma que nos proyecta una gráfica de tiempo versus frecuencia, el cual nos brinda una relación del contenido de la frecuencia y el tiempo en el que ésta ocurre; sin embargo, este método muestra una limitante, la cual está determinada por el ancho de la ventana utilizada.

Si nos basamos en la representación de tiempo - frecuencia; en inicio, esto es un problema no natural ya que debido al principio de incertidumbre de Heisenberg no pueden existir señales que a la vez sean casi monocromáticas e instantáneas, es decir, es imposible conocer exactamente la frecuencia y el tiempo exacto en el que ocurre esta frecuencia en la señal. Chacón et al (2016)

Por otro lado, si tratamos sólo fenómenos aislados en el tiempo, no existe complicación, dado que estos fenómenos pueden analizarse de forma separada y con base en sus respectivos dominios temporales extrayendo la información en frecuencia que nos brinda el uso de la Transformada de Fourier –FFT-; es decir, podemos tratar ondas con patrones relativamente simples, moduladas por funciones relativamente largas.

El esquema cambia cuando nos enfrentamos a señales donde conviven múltiples fenómenos localizados en el tiempo y en frecuencia, sobreponiéndose bajo complejas estructuras.

Siendo la Transformada Wavelet una extensión del análisis de Fourier, desarrollada en los años 80's, donde su objetivo es convertir en números la información contenida en una señal. Tales números representan los coeficientes, los cuales se pueden manipular, almacenar, transmitir, analizar o utilizar para reconstruir la señal original. La Transformada Wavelet es eficiente para el análisis de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad, brindando un análisis de multiresolución a través de ventanas dilatadas, donde las frecuencias de mayor rango, (frecuencias altas), se obtienen a través de ventanas angostas y las frecuencias de menor rango, (frecuencias bajas), a través de ventanas anchas. Debnath, (2002)

La Transformada Wavelet es una onda de duración limitada con promedio de valor cero.

El análisis Wavelet descompone sonidos e imágenes dentro de componentes de onda de duración variable, estas ondas son vibraciones localizadas de una señal de sonido o variaciones de detalle localizadas en una imagen. Walker, (2002).

La Transformada representa una señal tanto en tiempo como en frecuencia simultáneamente, además permite la compresión y procesamiento de patrones e imágenes, teniendo como ventaja información en tiempo frecuencia para cada punto de la señal, es ajustable y adaptable, así mismo satisface condiciones del análisis de multiresolución.

El análisis de multiresolución es el corazón del análisis Wavelet. Multiresolución es la descomposición de una señal en sub-señales de diferentes tamaños de niveles de resolución. Por lo tanto, la Transformada Wavelet descompone la imagen original hasta obtener una imagen de resolución baja a través de la abstracción de los detalles más finos de la imagen. Walker, (2002).

En la Figura 3.3.1 se muestran las representaciones espectrales en los diferentes dominios.

El proceso de transformada wavelet de una señal se llama análisis y el inverso de este proceso para reconstruir dicha señal se llama síntesis. Zapotitla, (2016).

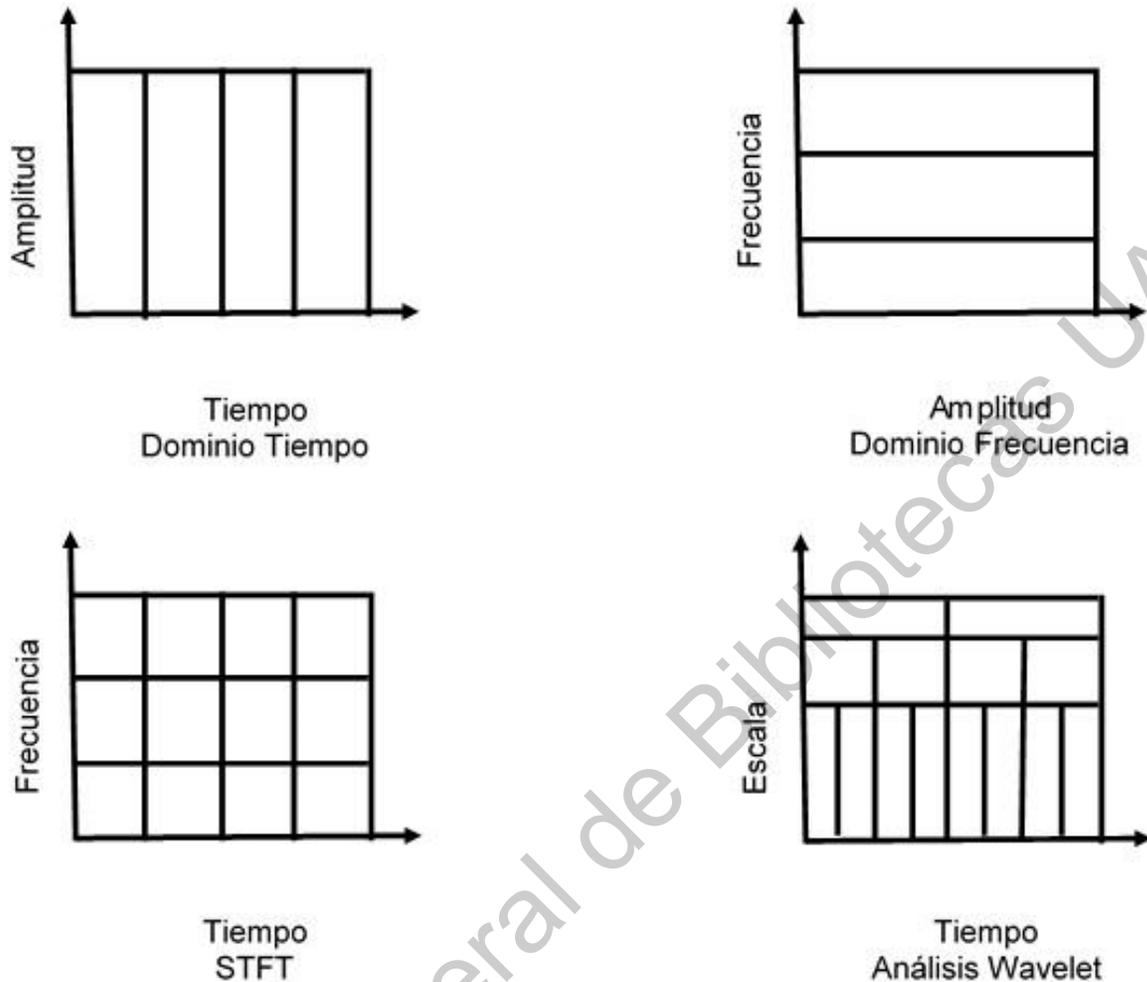


Figura 3.3.1. Dominios. Representaciones espectrales en diferentes dominios

Dentro de sus aplicaciones, la Transformada Wavelet ha sido usada en una amplia variedad de tareas fundamentales en el procesamiento de señales, de las cuales tenemos: el análisis de señales electrocardiográficas, sísmicas, de sonido, de radar, de compresión, de eliminación de ruido.

Otras aplicaciones importantes de las Wavelets han sido, la compresión de la base de datos de huellas digitales del FBI, en películas animadas, en el estándar de compresión de imágenes digital denominado JPEG-2000, entre otras.

En la Transformada Wavelet podemos encontrar dependiendo de la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados, tres tipos: Transformada Wavelet Continua –CWT-, Transformada Wavelet Semi Discreta –SWT- y Transformada Wavelet Discreta –DWT-.

La palabra Wavelet tiene como significado onda pequeña, donde:

Onda define que la condición de la función es de naturaleza oscilatoria, y pequeña se refiere a una función de longitud finita –compactamente soportada-.

3.4 Proyección de Patrón de Franjas

Un patrón de franjas es proyectado sobre un objeto. Este patrón de franjas sinusoidal genera una deformación sobre la forma de dicho objeto, misma que es capturada por una cámara digital. Esta deformación proporciona la profundidad de la superficie, la cual es codificada en la fase de dicha franja distorsionada. Además, dicha deformación de franjas es cuantificada por su propia distribución de fase, esta distribución de fase proporciona la medida del perfil del objeto Zuo, et al. (2016). La Figura 3.4.1 muestra el proceso de proyección de franjas.

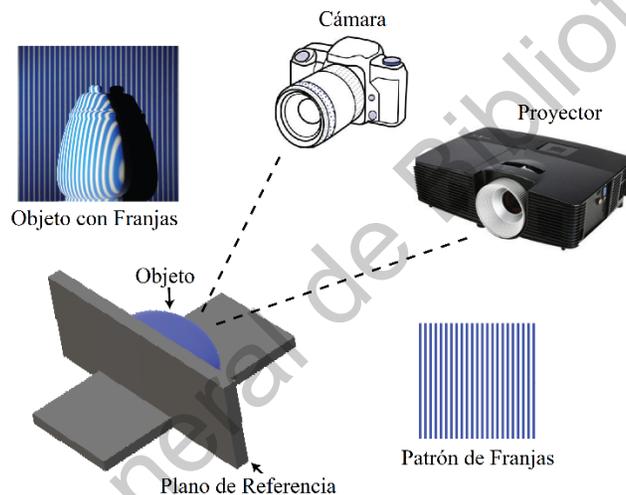


Figura 3.4.1. FPP. Proyección de Franjas. (Creación propia)

3.5 Composición de un Patrón de Franjas

El patrón de franjas puede ser generado de diferentes formas. El método más usado puede ser creado por un software en computadora, la Figura 3.5.1 es un ejemplo de un patrón de franjas sinusoidal. Sus ventajas son: flexibilidad, fácil control y alto contraste (Digital Light Processing, DLP), y puede ser modelado sencillo o múltiple (en una imagen gris o de color) Zhang, Z. (2012).

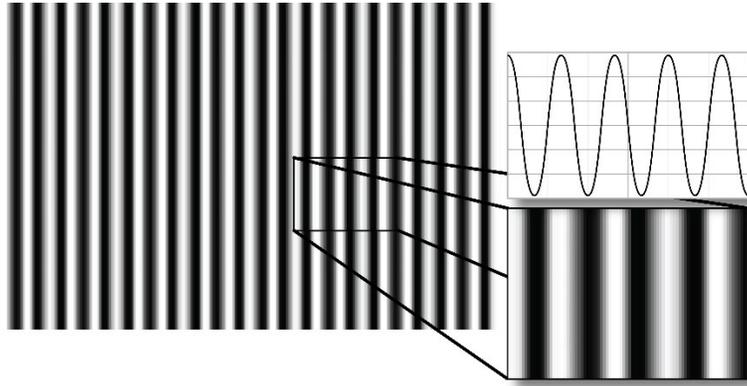


Figura 3.5.1. Patrón de franjas sinusoidal. (Creación propia)

Un factor importante para considerar, si se desea obtener una reconstrucción 3D de calidad y que impacta el desempeño de dicha reconstrucción es la sombra, la cual es adquirida al momento de la captura. del objeto. Los factores implícitos que generan las sombra son:

- El ángulo de incidencia por un lado de la proyección, que define la región de la sombra.
- La proyección del patrón de franjas puede generar la sombra.
- La forma del objeto es también un factor que genera sombra.

Por esta razón, para optimizar el sistema de captura es necesario considerar el ángulo que se forma entre la cámara y el proyector, la densidad de las franjas, así como el número de los patrones de franjas, además del hardware utilizado. Todos estos elementos forman parte del diseño del sistema de la captura del objeto. Por ello, el ángulo debería ser menor a 90 grados, para buenos resultados (12 a 15 grados), esta distancia afecta la distorsión de las franjas. El número de pixeles recomendados para generar una franja es mayor a 10 pixeles.

Con respecto al número de franjas, a mayor número de franjas existe una mejor reconstrucción, Zhang, S. (2016). Aunque este número dependerá del tamaño del objeto, por ello hay un límite entre el tamaño del objeto y el número de franjas a ser proyectado.

3.6. Perfilometría Wavelet 1D

La Perfilometría por Transformada Wavelet (WTP), es aplicada en el análisis de proyección de patrones de franjas. y ha sido implementado en las últimas décadas debido a sus propiedades y su análisis de multi-resolución. El término de Perfilometria Wavelet fue utilizado por primera vez por Zhong, et al., (2004).

El análisis WTP, permite obtener la información embebida en la fase, la cual contiene la altura del objeto. Da, et al (2012), Li, et al. (2012), Van, (2011).

Para obtener la información de la fase existen dos métodos: el método de fase gradiente, y el método de estimación de fase. Gdeisat demuestra en Gdeisat, et al, (2009) que el método de estimación de fase brinda un mejor desempeño, haciendo uso de la técnica de proyección de patrones de franjas con o sin ruido.

La extracción de fase se realiza renglón por renglón de un patrón de franjas. Esta extracción produce un arreglo bidimensional complejo (2D), compuesto por una parte real $\Re\{W(s, b)\}$ y una imaginaria $\Im\{W(s, b)\}$. Gdeisat, et al, (2009). De aquí que el módulo y la fase pueden ser calculados por:

$$abs(S, b) = |W(s, b)| \quad (3.6.1)$$

$$\varphi(s, b) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im\{W(s, b)\}}{\Re\{W(s, b)\}} \right) \quad (3.6.2)$$

Esta parte real e imaginaria son mostradas en la Figura 3.6.1.

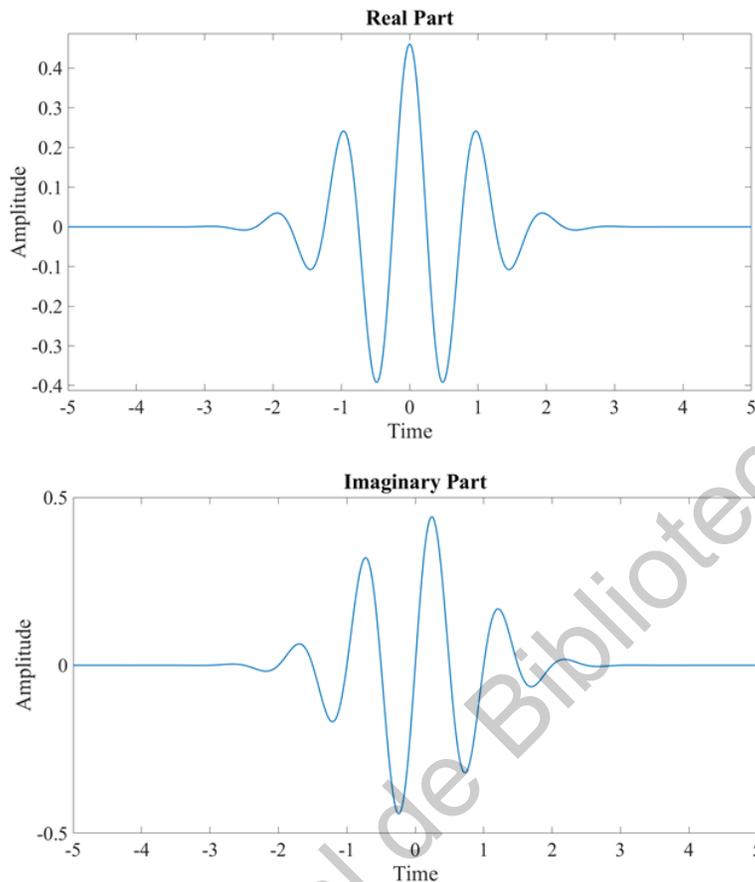


Figura 3.6.1. Wavelet Compleja. Parte Real (arriba) e Imaginaria (abajo) Wavelet Morlet Compleja. (Creación propia)

La Transformada Wavelet Compleja surge de la necesidad de obtener la información de la fase. La Transformada Wavelet Continua (CWT) es un filtro de valor complejo, que separa analíticamente señales puras en componentes complejos, con una parte real y una parte imaginaria, en el dominio de la transformación. Estos componentes son usados para obtener la información de la fase (parte imaginaria) y la amplitud (parte real) de la señal, la cual es requerida para describir la localización de la energía de la fuente de oscilación. Quan, et al. (2005). Las wavelets complejas no tienen componentes de frecuencia negativas. Ruiz, (2015).

En la actualidad, la Perfilometría Wavelet es uno de los métodos más usados para el proceso de reconstrucción tridimensional, como ya se ha mencionado anteriormente.

La Figura 3.6.2 presenta un objeto digitalizado con un patrón de franjas proyectado. De este objeto se ha seleccionado un renglón, como se muestra en la Figura 3.6.2 (a). Estos renglones representan el valor de intensidad, donde a cada uno de ellos le corresponde el mismo valor en la parte de la fase. La Figura 3.6.2 (b) muestra el perfil del renglón seleccionado.

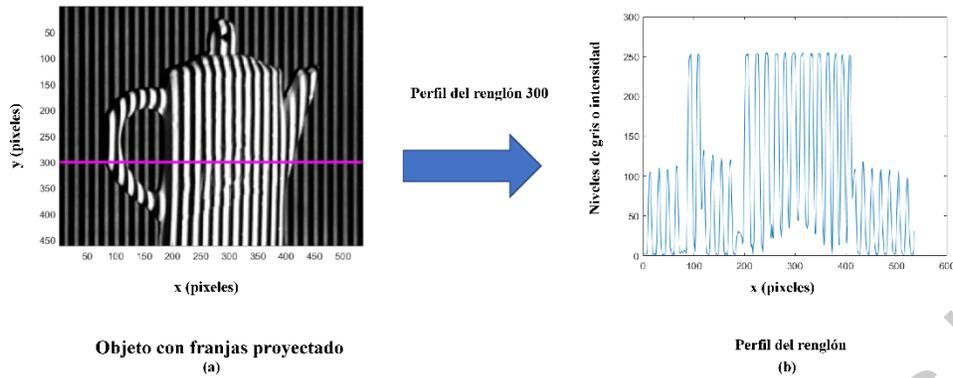


Figura 3.6.2. Proyección de franjas.

Al aplicar la Transformada Wavelet a estos perfiles del patrón de franjas proyectado, se obtiene la parte real y la parte imaginaria, mostrada en la Figura 3.6.3 (a) y (b), respectivamente.



Figura 3.6.3. Perfil. Transformada Wavelet aplicada.

El perfil de la fase se obtiene de la parte imaginaria del perfil del renglón; brindándonos el valor de amplitud mayor en cada posición de los coeficientes de la Transformada Wavelet, así bien con esta información el patrón de franjas proyectado es recuperado, obteniendo la información deseada.

El resultado de este proceso se muestra en la Figura 3.6.4, y se obtiene mediante la comparación de la información arrojada por el barrido de todos y cada uno de los renglones del objeto digitalizado con el patrón de franjas, obteniendo una imagen que contiene información de la profundidad del objeto en cada punto, llamado mapa de fase.

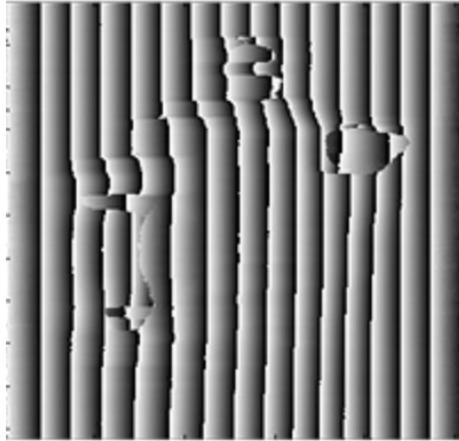


Figura 3.6.4. Mapa de fase.

Aplicando un algoritmo de desdoblamiento de fase, es cómo se obtiene la fase desenvuelta de la imagen reconstruida 3D, como se observa en la Figura 3.6.5.

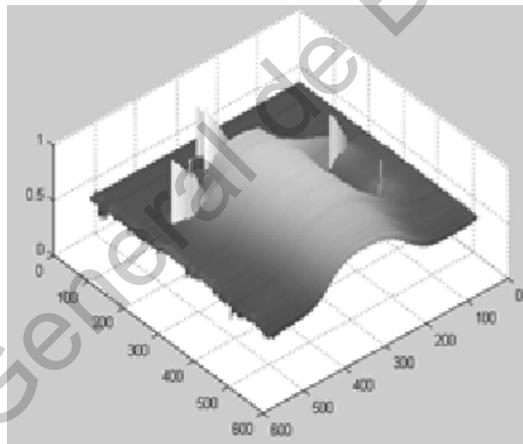


Figura 3.6.5. Reconstrucción 3D.

La Transformada Wavelet es una transformación bidimensional, es decir, con los dos parámetros de tiempo y escala, así el resultado de la transformada es la descomposición de la señal en el tiempo en una serie de coeficientes s y τ reales o complejos, Figura 3.6.6.

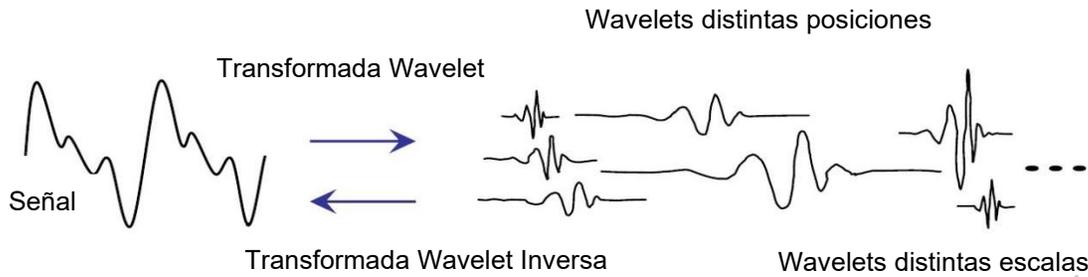


Figura 3.6.6. Transformada Wavelet y su Inversa. (<http://www.dicis.ugto.mx/profesores>)

Partiendo de estos coeficientes se puede reconstruir la señal original a través de la Transformada Wavelet inversa, la cual está determinada por:

$$f(t) = \frac{1}{k_\psi} \iint c(\tau, s) \frac{\psi(\tau, s)}{\tau^2}, d\tau ds \quad (3.6.3)$$

donde ψ satisface la condición de un valor medio cero, con K_ψ entonces tenemos que:

$$k_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{w}, dw < \infty \quad (3.6.4)$$

siendo $\psi(w)$ la Transformada Wavelet de $\psi(t)$

3.7 Uso de la Transformada Wavelet 1D

Los componentes de la CWT, en función de la escala y traslación se obtienen multiplicando la señal con la función de la onda desplazada y escalada, integrada a lo largo del tiempo de la señal. Arellano, (2004). La función de la Transformada Wavelet está definida por:

$$W_f(S, \tau) = \int f(t) \psi_{S,\tau}^*(t) dt \quad (3.7.1)$$

Siendo esta función, la suma para todo t de la señal multiplicada por la escala de una versión desplazada de la función madre $\psi(t)$, la cual está definida por:

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (3.7.2)$$

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

Se entiende como escalamiento el alargamiento o la compresión de la Wavelet madre, denotado como s dentro de la función. Cuando el factor de escala es más pequeño, la compresión de la Wavelet es mayor. La Figura 3.7.1 muestra el escalamiento de la señal.

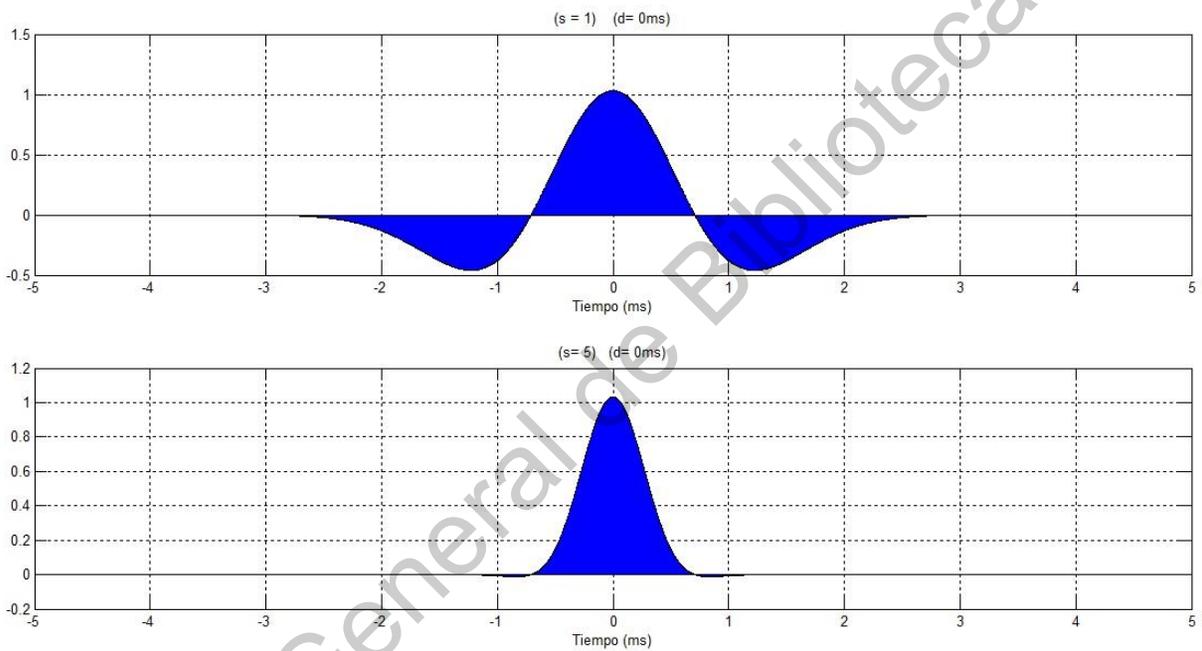


Figura 3.7.1. Escala. Escalamiento Wavelet con $s=1$ en la parte superior y con $s=5$ en la parte inferior. (Creación propia)

El concepto de traslación Wavelet, es cuando la señal se adelanta o atrasa en el tiempo. El factor de traslación está definido por τ . La Figura 3.7.2 muestra el desplazamiento de la señal.

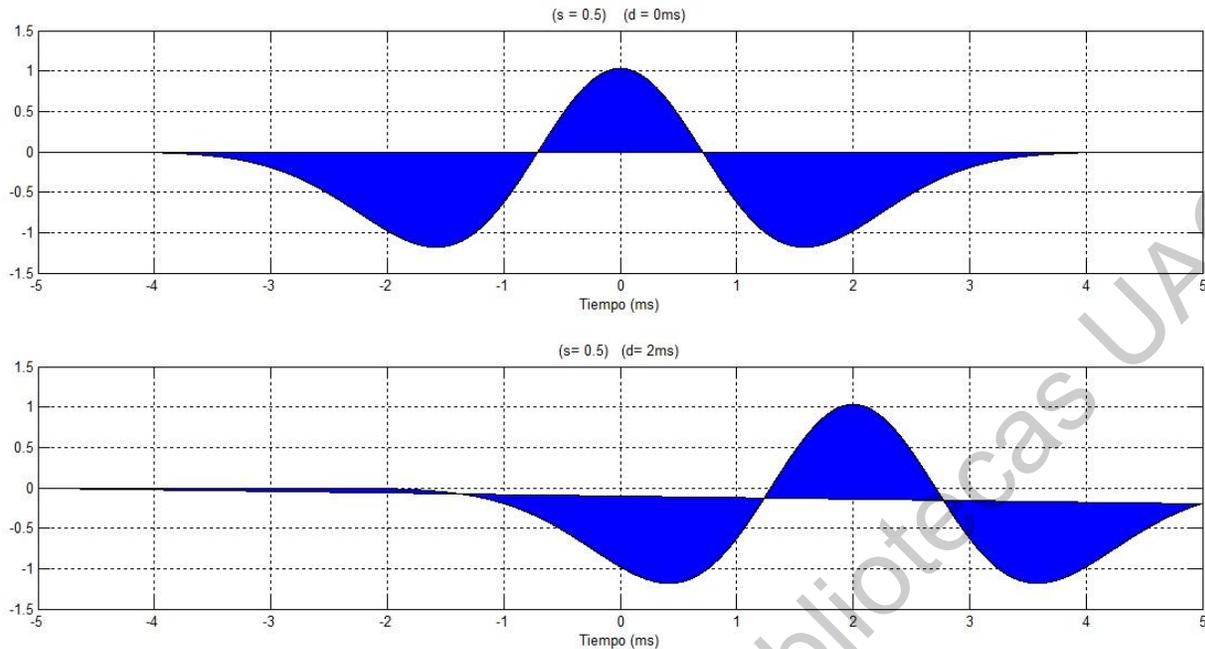


Figura 3.7.2. Traslación. Desplazamiento Wavelet. En la parte superior se muestra un desplazamiento, $d= 0$, y en la parte inferior un desplazamiento con $d= 2$. (Creación propia)

Dentro de las funciones Wavelets $\psi_{s,\tau}(t)$, obtenidas de la Transformada Wavelet madre $\psi(t)$, tanto el factor de escala s , como el de factor de traslación τ , son diferentes, pero todas tienen la misma forma. Se dice que una Wavelet es dilatada cuando su factor de escala se encuentra dentro de $s > 1$ y cuando el valor de escala está dentro de $s < 1$ es contraída. De igual forma el factor de traslación se logra matemáticamente en el tiempo con una función de la forma $f(t - d)$ donde, d es el desplazamiento.

3.8 Algoritmos de Desdoblamiento de Fase

Algunas técnicas de análisis de patrón de franjas utilizan una función arco tangente, la cual extrae la fase envuelta dentro del intervalo $(-\pi, \pi)$. La fase desenvuelta es una técnica usada para el desdoblamiento (o desdoblamiento) de la fase en el procesamiento de imágenes. Existen técnicas que han sido propuestas para resolver este problema, así muchos algoritmos de desdoblamiento de fase desarrollados varían en precisión y requerimientos computacionales y se pueden clasificar en dos categorías, los cuales son: algoritmos locales y algoritmos globales.

Los algoritmos de desdoblamiento de fase local desenvuelven el mapa de fase mediante un camino que conecta a todos los píxeles dentro del mapa de fase envuelta, y dependiendo de la elección de la ruta que tome el algoritmo para conectar dichos píxeles la fase desenvuelta puede producir dos respuestas diferentes. Existen dos tipos de desdoblamiento de fase en esta categoría,

los que definen la calidad de cada pixel denominados algoritmos de fase desenvuelta de calidad-guiada y los que tratan de prevenir la propagación de errores mediante la identificación de los residuos, conocidos como métodos de equilibrio de residuos.

Los algoritmos de desenvolvimiento de fase global se basan en términos de minimización de una función global para estimar la fase gradiente y son tres tipos: cuadrados mínimos no ponderados, cuadrados mínimos ponderados y los métodos de la norma Zhang, et al. (2017)

En general el desenvolvimiento de fase es el paso, donde la fase absoluta es recuperada de las fases de módulos 2π medidas, durante la obtención de las imágenes de los objetos. Los algoritmos de desenvolvimiento de fase aplicados en este trabajo son descritos a continuación:

Ghiglia, es un algoritmo con un enfoque de minimización global para el desenvolvimiento de fase, cuya solución utiliza una transformación de coseno 2D y su inverso está dirigido a manejar de manera robusta las inconsistencias de la ruta tales como el corte de fase. Ghiglia, et al, (1994).

Constantini, utiliza un enfoque de minimización global con un método novedoso basado en enteros para reducir la propagación de error. Este método aprovecha la estructura de la red y utiliza un criterio de error de L1, ofrece una eficiencia alta al reconocer este error como un problema de minimización de costos de flujo de la red. Costantini, (1998).

Bioucas, es otro enfoque de minimización de energía resuelto como un problema de optimización de enteros. La contribución de este método llamado PUMA por los autores, radica en el uso de técnicas de corte de gráficos para enmarcar el problema como un problema de flujo máximo y corte mínimo. Bioucas-Dias, et al. (2005).

Herráez, es un algoritmo de desdoblamiento de fase de seguimiento de ruta en contraste con los algoritmos de minimización de energía. La contribución de este método es la elección de la función de confiabilidad, que utiliza segundas diferencias y selección de ruta en función de la confiabilidad del borde en lugar de la confiabilidad del pixel. Herráez, et al, (2002).

Itoh, es una función simple e implementada en Matlab utilizada para desenvolver la fase. Itoh, (1982)

Capítulo IV

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4 Perfilometría Wavelet 2D.

4.1 Introducción

La Transformada Wavelet Continua 2D, (CWT 2D) se ha utilizado en una amplia gama de problemas. El principal uso, es el análisis de imágenes, particularmente para determinar las características específicas en bordes, contornos y límite entre zonas de diferente luminosidad, dependiendo de la finalidad requerida es el tipo de wavelet implementada.

El análisis de la CWT 2D es muy similar a la CWT 1D en cuanto a las ideas básicas. Así bien, si la Transformada Wavelet Continua de una función 1D $\psi(x)$, es una función de dos variables, la CWT 2D entonces, es una transformada que incrementa su dimensionalidad en uno. En el contexto bidimensional, la Transformada Wavelet se define como el producto tensor de las wavelets unidimensionales Arellano, (2004). $\Phi(x, y) = \phi(x)\phi(y)$; 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, nos permite realizar análisis para señales bidimensionales, y se clasifica en dos métodos:

- Estimación de fase. Kadooka, et al. (2003)
- Estimación de frecuencia. Sciammarella, et al. (2005)

4.2 Transformada Wavelet 2D

El patrón de franjas $f(x, y)$ en la Transformada Wavelet bidimensional, 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.

Por lo tanto, matemáticamente tenemos:

$$S(a, b, s, \theta) = \frac{1}{s} \int \int \psi \left[\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}, r_\theta \right] f(x, y) dx dy \quad 4.2.1$$

El resultado de la transformada 2D, es un arreglo complejo de 4 dimensiones, determinado por la traslación en el eje x por a y en el eje y por b , el vector de escala s y el ángulo del vector θ .

Se dice que una wavelet ψ es direccional, si el respaldo efectivo de su transformada de Fourier $\hat{\psi}$ 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.

$$c_\psi \equiv (2\pi)^2 \int_{\mathbb{R}^2} d^2\vec{k} \frac{|\hat{\psi}(\vec{k})|^2}{|\vec{k}|^2} < \infty, \quad (4.2.2)$$

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

Por otro lado, la Transformada Inversa en 2D está representada como:

$$f(x, y) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty W_\psi(s, \tau_x, \tau_y) \frac{\psi_{s, \tau_x, \tau_y}(x, y)}{s^3} d\tau_x d\tau_y ds \quad (4.2.3)$$

donde,

$$\psi_{s, \tau_x, \tau_y}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x - \tau_x}{s}, \frac{y - \tau_y}{s}\right) \quad (4.2.4)$$

representa la Transformada Wavelet básica 2D.

Las características de las wavelets son muy importantes, y dependiendo del tipo de información que se requiera obtener de la imagen, es el tipo de análisis wavelet a utilizar, por ejemplo hay dos posibilidades; si se está o no interesado en la detección de características orientadas a una imagen como son las regiones donde la amplitud es regular a lo largo de una dirección y tiene una fuerte variación a lo largo de la dirección perpendicular, entonces la wavelet isotrópica es la adecuada, debido a que realiza un análisis puntual, es decir; cuando las características no orientadas están presentes o son relevantes en la señal se puede elegir una wavelet isotrópica 2D, la más familiar es la wavelet Mexican Hat. Figura 4.2.1.

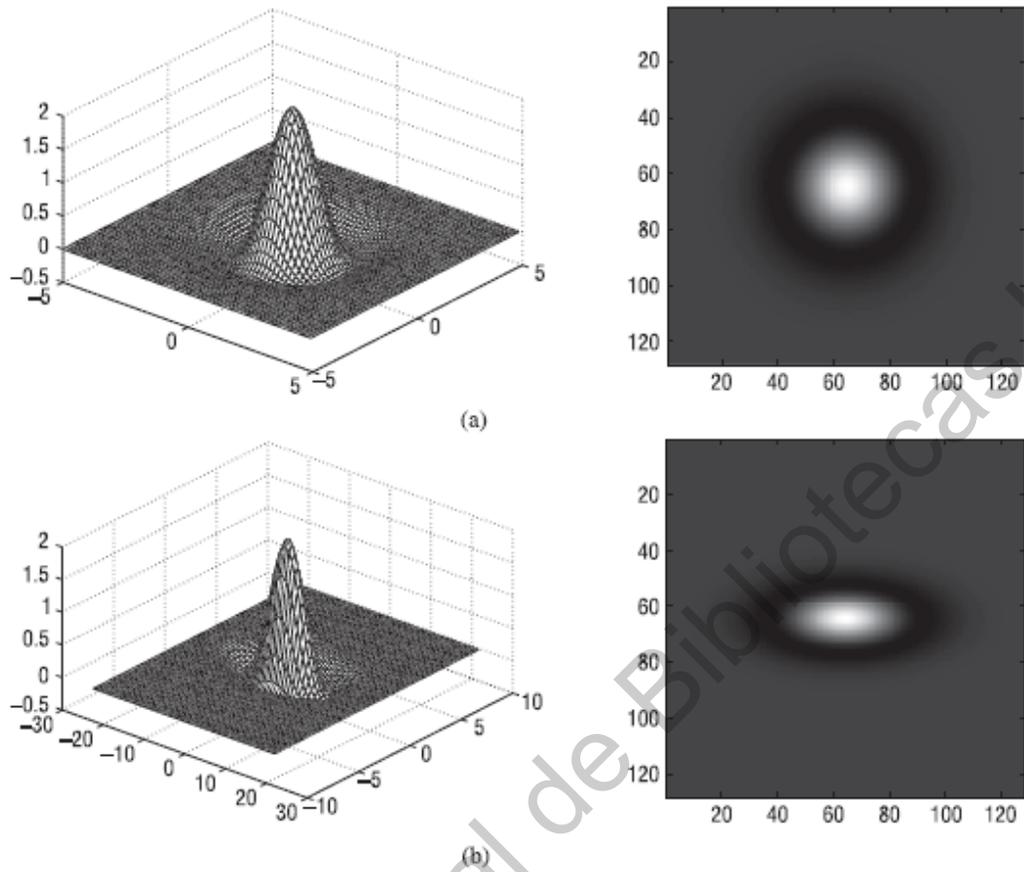


Figura 4.2.1. Wavelet 2D. La Transformada Mexican Hat 2D con una vista en perspectiva 3-D (izquierda) y los niveles de grises (derecha): (a) wavelet isotrópica, (b) wavelet anisotrópica. (Antoine, 2008)

4.3 Método Propuesto de Perfilometría Wavelet 2D

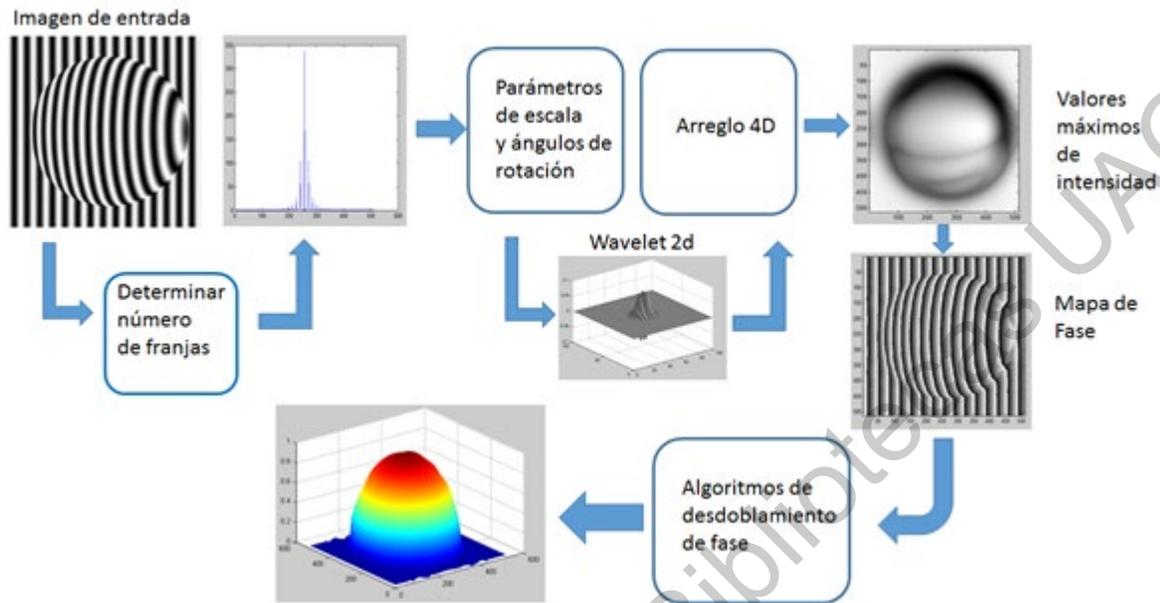


Figura 4.3.1. Metodología propuesta.

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 aquellos parámetros que mejoren el desempeño global de la metodología propuesta.

La Figura 4.3.1 muestra la metodología propuesta, la cual consiste en 7 pasos. Como primer paso se considera el cargar una imagen, la cual contiene 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. Éste tiene un número finito de franjas, las cuales corresponden a la frecuencia espacial f_0 . Posteriormente la imagen es redimensionada a un valor de 512x512 píxeles 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 $-f_0$ o bien el valor de f_0 . Como tercer paso tenemos 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.

En el cuarto paso, se aplica la Transformada Wavelet 2D; en este caso se trabajó con la wavelet Morlet. 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. Después se procesa este arreglo en el quinto paso, en donde se va a extraer una matriz compleja y de esta matriz se considera la parte real y los valores de intensidad, 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 sinusoidal 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 seis. Este mapa de fase tiene la característica de que los valores se encuentran entre los rangos de $-\pi$ a π . Estos valores de fase envueltos contienen la altura del objeto y es necesario utilizar algoritmos de desdoblamiento de fase para recuperar esa información. En el séptimo paso se utilizan diferentes tipos de algoritmos de desdoblamiento de fase con el propósito de aplicarlos al mapa de fase para ser desenvuelto, y con ello, 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 observar cuales objetos y bajo qué circunstancias se pudieron reconstruir mejor.

4.4 Uso de la Transformada Wavelet 2D Fan y Paul

La Wavelet Fan, puede presentar un mejor desempeño en las variaciones de patrón de franjas Gdeisat et al (2010). La Wavelet Fan Compleja 2D está dada por:

$$\psi_F(x, y) = \sum_{j=0}^{N_0-1} \exp [ik_0 (x \cos \theta_j + y \sen \theta_j)] \exp \left(\frac{-1}{2} \sqrt{x^2 + y^2} \right) \quad (4.4.1)$$

Otra wavelet compleja es la Wavelet Paul, definida por:

$$\psi_P(x, y) = \frac{2^n n! \left(1 - i \frac{x^2 + y^2}{2} \right)^{-n+1}}{2\pi \sqrt{\frac{(2n)!}{2}}} \quad (4.4.2)$$

4.5 Uso de la Transformada Wavelet 2D Morlet

Cuando el objetivo es detectar características orientadas a una imagen, como la detección de bordes o el filtrado direccional, habrá que usar una wavelet con rotación no invariante, donde la mejor selectividad angular se obtendrá si ψ es direccional, es decir, que el soporte esencial de ψ en el espacio de frecuencia espacial esté contenido en un cono convexo con vértice en el origen; la wavelet anisotrópica típica es la wavelet Morlet 2D. Antoine, et al. (2008).

La Transformada Compleja Morlet 2D, se deriva de la Wavelet Gabor y está dada por:

$$\psi_M(x, y) = \exp(ik_0(x \cos \theta + y \sin \theta)) \exp\left(-\frac{1}{2}\sqrt{x^2 + y^2}\right) \quad (4.5.1)$$

donde x, y son los índices de los ejes x y y respectivamente y θ es el ángulo de orientación con respecto al eje x y k_0 es la condición de admisibilidad.

La Wavelet Morlet, es un prototipo de una wavelet direccional. En la Figura 4.5.1 se muestra la Wavelet Morlet 2D compleja, mostrando tanto la parte real como la imaginaria.

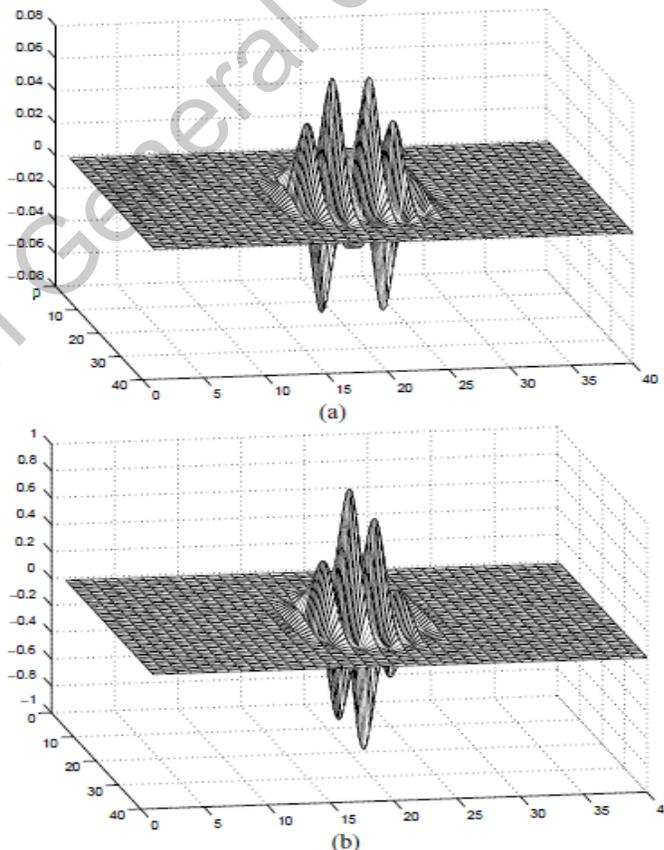


Figura 4.5.1. Morlet 2D en el dominio de la posición: (a) parte real, (b) parte imaginaria wavelet 2D.

En la Transformada Wavelet Morlet Compleja Figura 4.5.1, el módulo de la wavelet truncada ψ_G es una gaussiana, alargada en el eje x si $\epsilon > 1$ y su fase es una constante a lo largo de la dirección ortogonal \vec{k}_0 , y lineal en \vec{x} , $\text{mod}(2\pi/|\vec{k}_0|)$, a lo largo de la dirección \vec{k}_0 . Por lo tanto, la fase de $\psi_G(x)$ como una función de \vec{x} brinda líneas rectas, perpendiculares a \vec{k}_0 con intensidad periódicamente variable y linealmente de 0 a 2π

Hay muchas formas de diseñar wavelets de uno u otro tipo, de hecho; pueden ser obtenidas por un procedimiento general. El punto de partida es una función de escala, la cual está dada por $\varphi(x)$, cuya integral sobre el plano no se anula. Por lo tanto, las wavelets pueden ser construidas derivando la función de escala o de la diferencia de la función de escala. La función Gaussiana es un ejemplo de una función de escala fácil de usar. Antoine, et al. (2008).

Capítulo V

Dirección General de Bibliotecas UAQ

5 Resultados Experimentales

5.1 Introducción

La técnica implementada en la reconstrucción 3D de objetos ha brindado buenos resultados gracias a sus propiedades, tanto en 1D, así como en 2D. La primera, entregando un arreglo complejo de 2 dimensiones y la segunda un arreglo complejo de 4 dimensiones.

La forma de onda de la wavelet permite no limitarse a funciones seno y coseno, pues es una onda irregular y puede ser asimétrica. La variación de los coeficientes da 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, derivando con ello, diferentes tipos, tales como: Paul, Shannon, B-Spline, Mexican Hat, Morlet, Fan, entre otras.

La Transformada Wavelet 1D, es más utilizada dentro de las técnicas de reconstrucción 3D siendo eficiente y obteniendo mejor calidad al implementar algoritmos más desarrollados, abriendo con ello 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.

En los puntos siguientes, se muestran los resultados obtenidos de la implementación del método propuesto tanto para objetos creados por computadora, así como objetos reales. Implementando la Wavelet 2D.

5.2 Objetos Creados por Computadora

Para las pruebas con los objetos virtuales se implementó una variación en el número de franjas, las cuales fueron 16, 32 y 64, aplicando a este objeto virtual la Wavelet 2D (Morlet, Fan y Paul), así como un algoritmo de desdoblamiento de fase simple.

La Figura 5.2.1 muestra en la fila (a), el objeto virtual original, la fila (b) es la reconstrucción con la Morlet Compleja 2D, mientras que el inciso (c), representa la misma figura con la misma variación de franjas (16, 32, 64) pero con la Fan 2D, finalmente la fila (d) es la reconstrucción del mismo objeto virtual con la wavelet Paul.

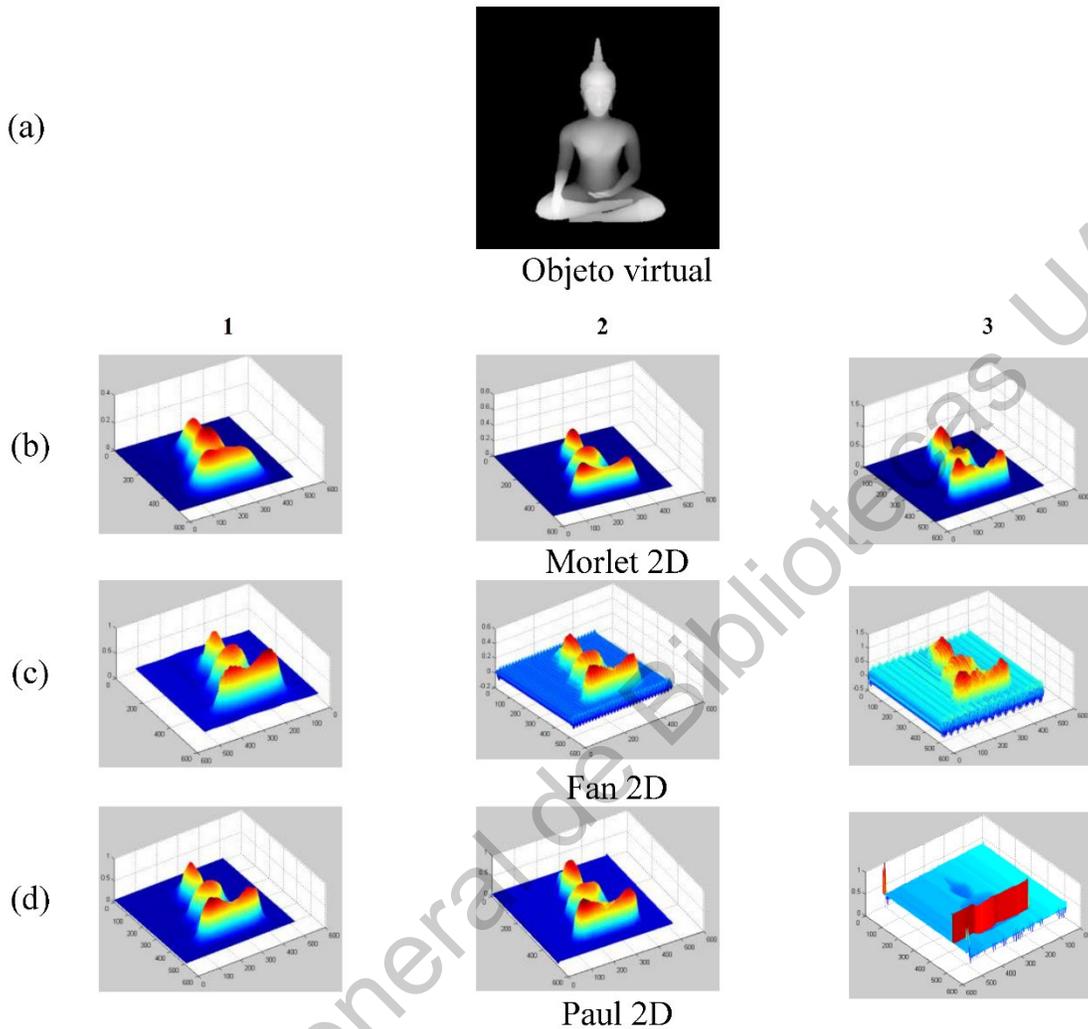


Figura 5.2.1. Objeto virtual y su reconstrucción 3D (a), implementando Wavelet Morlet y su reconstrucción 3D (b), Fan y su reconstrucción 3D mostrada en (c) y Paul y su reconstrucción 3D (d), con variación de franjas 16, para la columna (1), 32 columna (2), y 64 columna (3)

5.3 Objetos Reales

Para los objetos reales, se muestran dos tipos de resultados: Sin preprocesamiento y con preprocesamiento.

Los objetos sin preprocesamiento, son el resultado de la captura original de dicho objeto. Estos objetos contienen en ellos, la sombra generada al momento de la captura. Por otro lado, los objetos con preprocesamiento son aquellos en donde la sombra del objeto original ha sido detectada y removida.

En las pruebas con objetos reales, solo la Wavelet Morlet Compleja 2D fue implementada.

Los mapas de fase obtenidos fueron desenvueltos haciendo uso de cinco algoritmos de desdoblamiento de fase robustos 2D, para obtener la reconstrucción 3D del objeto. Estos resultados son mostrados en la Figura 5.3.1 y la Figura 5.3.2.

La Figura 5.3.1 muestra la reconstrucción 3D de un objeto real, sin sombra, misma que fue removida del objeto original, (ver Anexo B). Este objeto fue reconstruido utilizando la Wavelet Morlet 2D aplicando los siguientes algoritmos de desdoblamiento de fase: Itoh, Ghiglia, Constantini, Herráez y Bioucas, dando un mejor resultado Bioucas, seguido de Ghiglia.

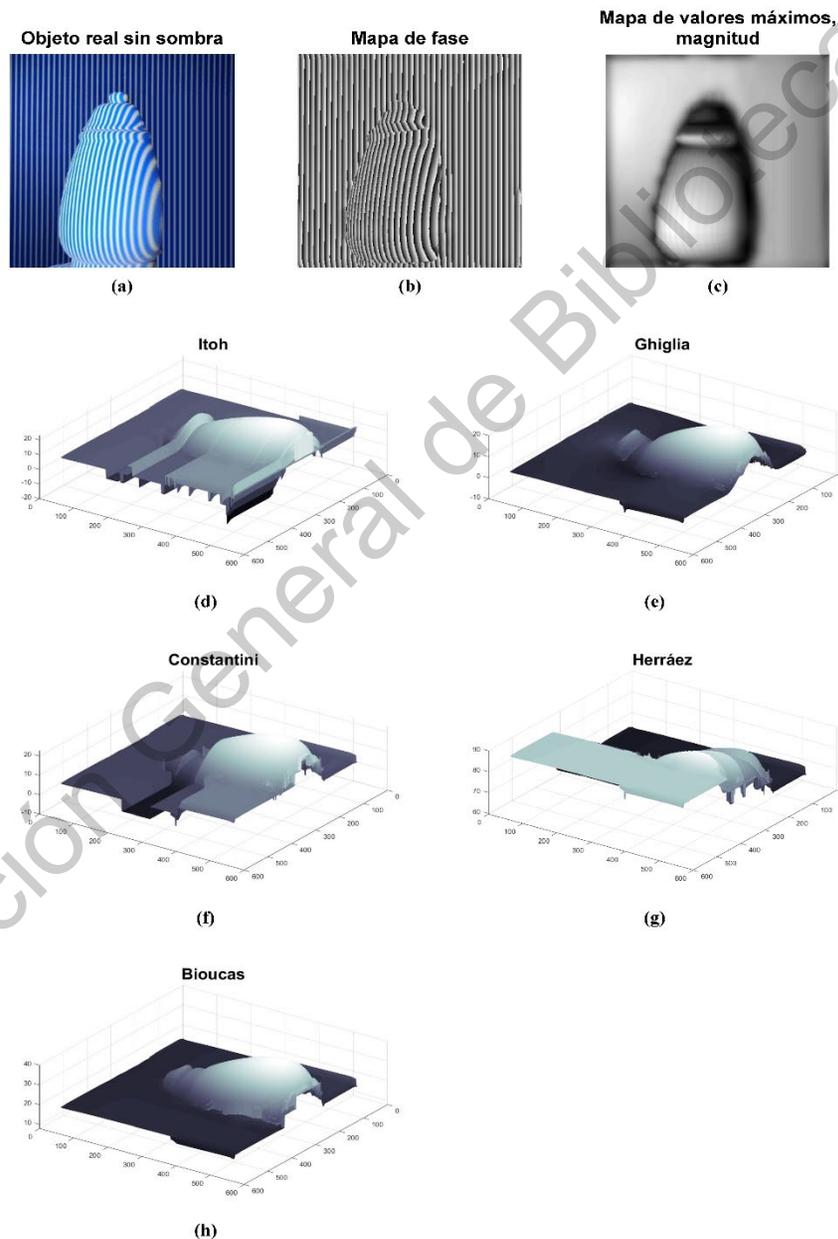


Figura 5.3.1. Bombonera. (a) Objeto real sin sombra, aplicando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra el mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Itoh, (e) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia, (f) fase desenvuelta con algoritmo Constantini, (g) fase desenvuelta con algoritmo Herráez, y (h) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas.

La Figura 5.3.2 muestra la reconstrucción de un objeto real, con sombra, este objeto fue reconstruido utilizando la Wavelet Morlet 2D aplicando los siguientes algoritmos de desdoblamiento de fase: Itoh, Ghiglia, Constantini, Herráez y Bioucas, dando un mejor resultado Ghiglia, seguido de Bioucas.

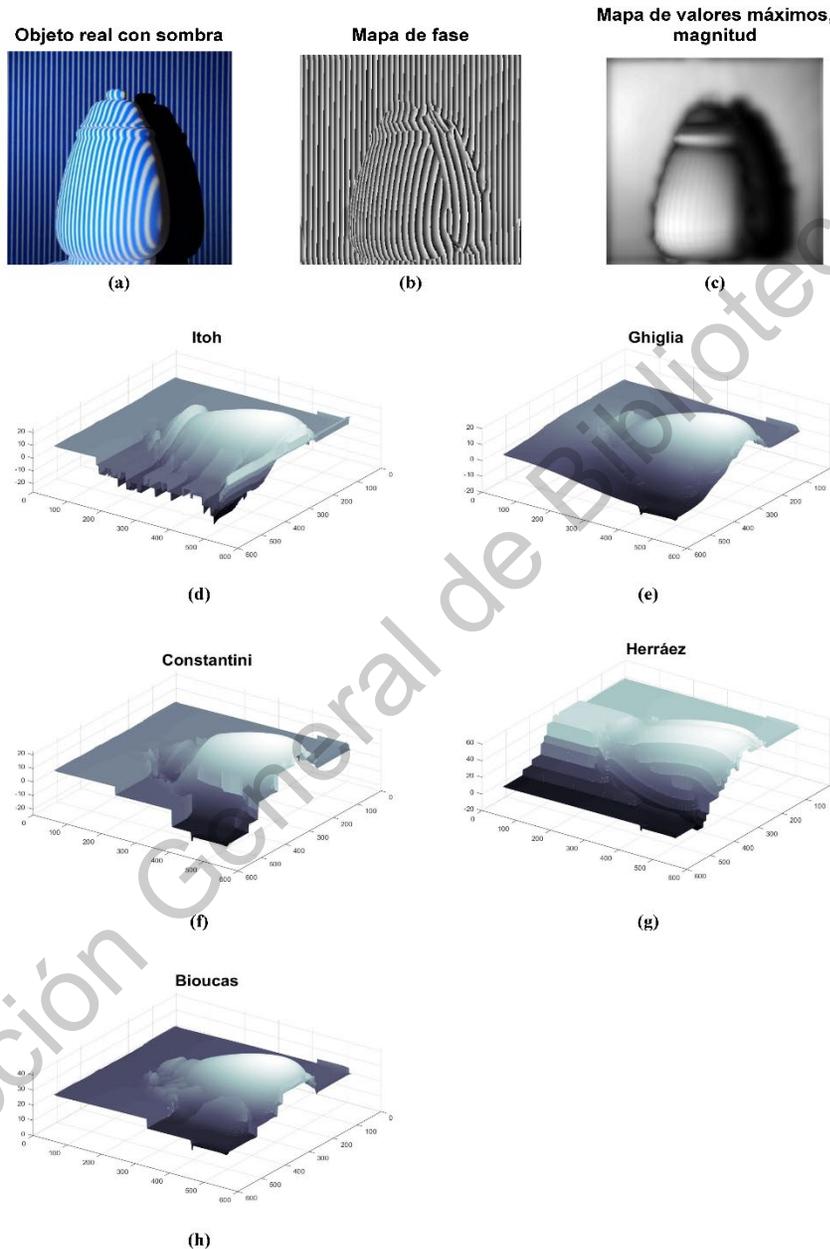


Figura 5.3.2. Bombonera. (a) Objeto real con sombra, aplicando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra el mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Itoh, (e) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia, (f) fase desenvuelta con algoritmo Constantini, (g) fase desenvuelta con algoritmo Herráez, y (h) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas.

Las Figura 5.3.3 a la 5.3.8 muestran las reconstrucciones de un objeto real, tanto sin sombra (removida), como con sombra (objeto original), utilizando la Wavelet Morlet 2D, mostrando las reconstrucciones que presentaron una mejor reconstrucción, siendo estas Bioucas y Ghiglia.

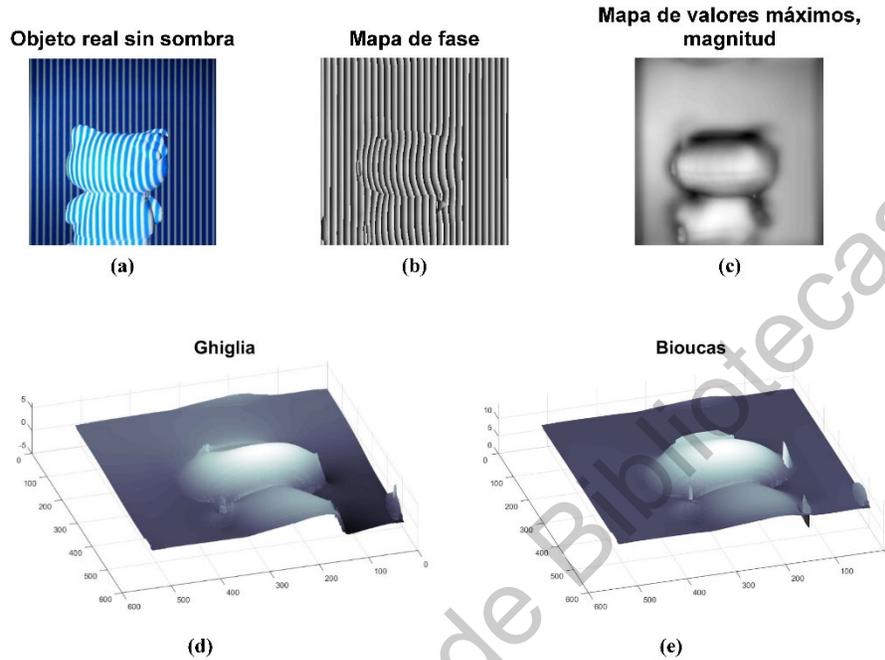


Figura 5.3.3. Kitty. (a) Objeto real sin sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

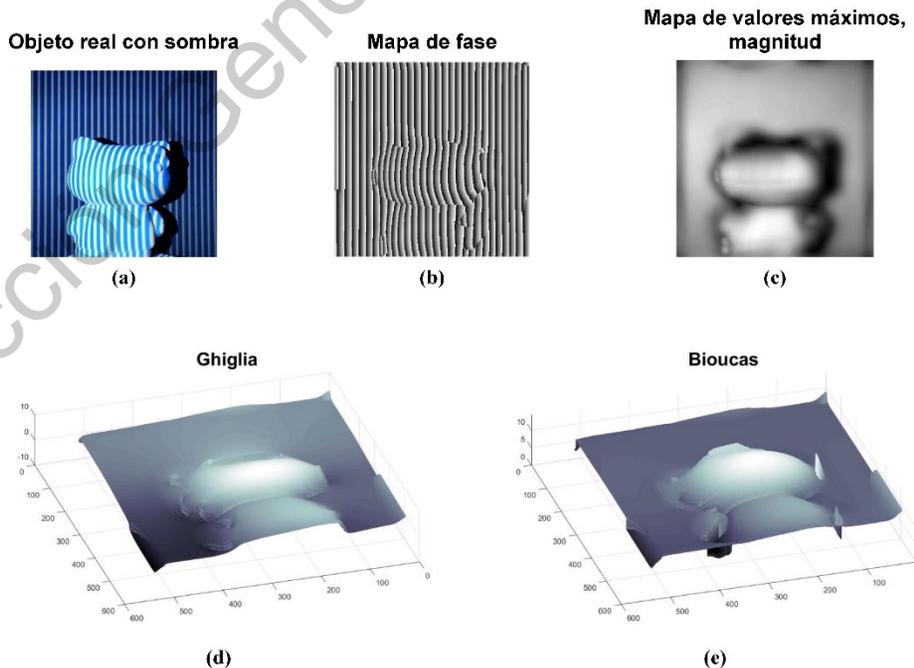


Figura 5.3.4. Kitty. (a) Objeto real con sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

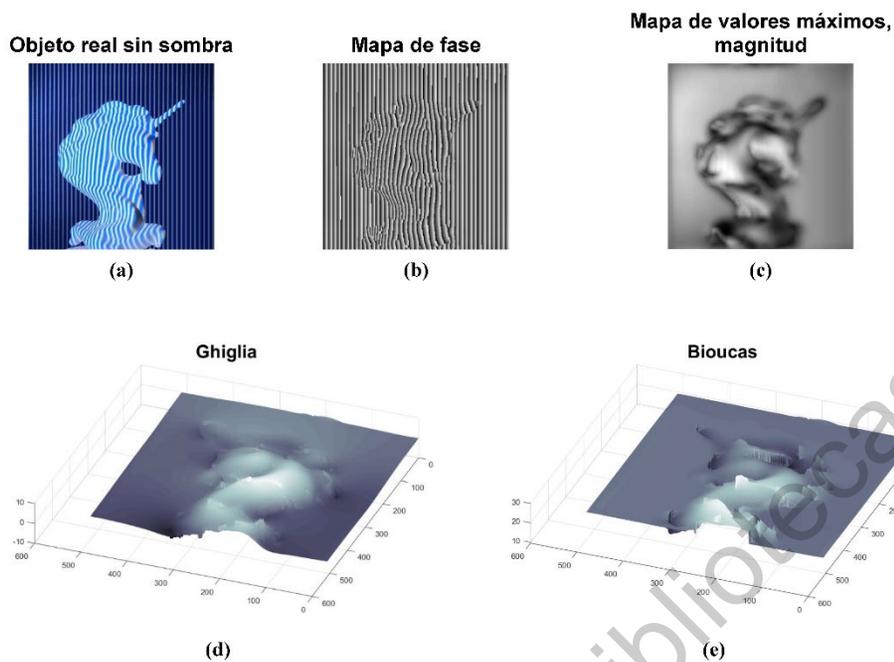


Figura 5.3.5. Unicornio. (a) Objeto real sin sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

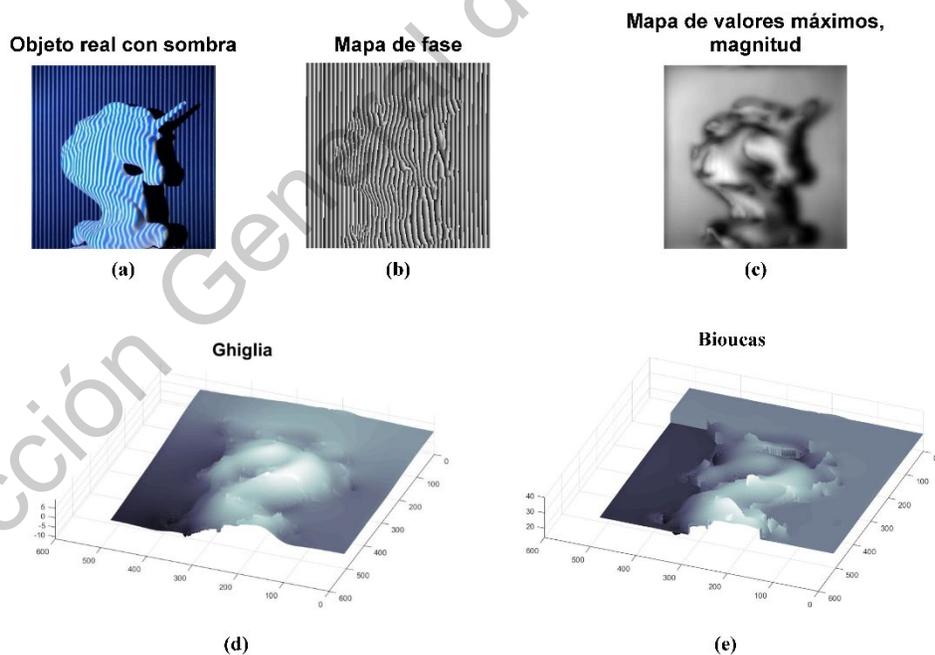


Figura 5.3.6. Unicornio. (a) Objeto real con sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

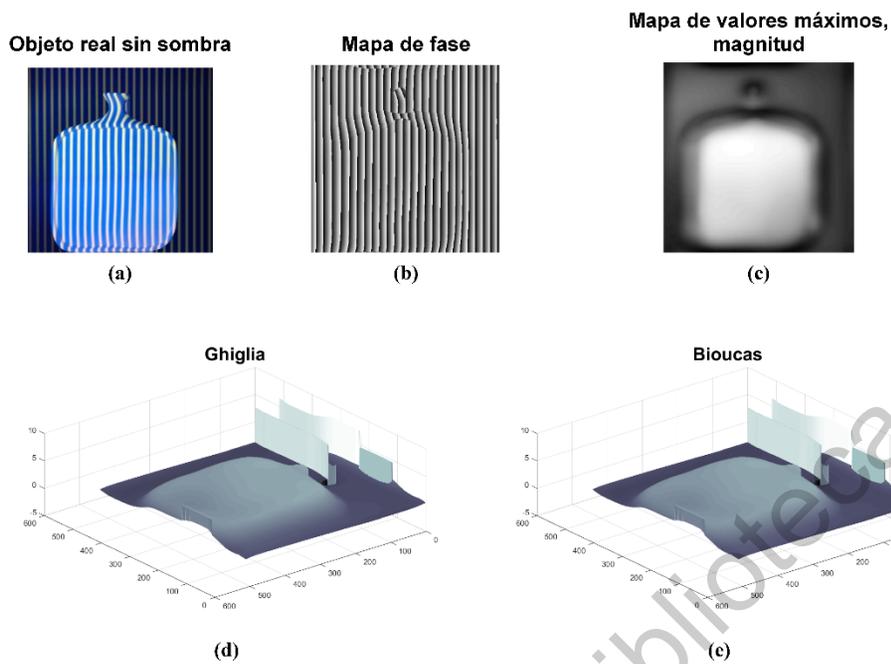


Figura 5.3.7. Licorera. (a) Objeto real sin sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Ghiglia y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

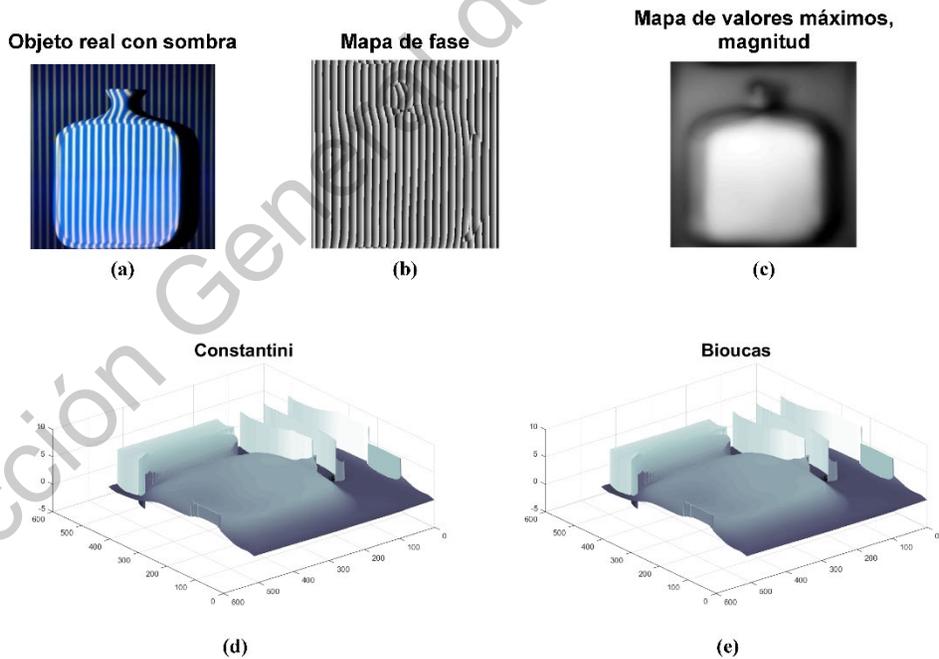


Figura 5.3.8. Licorera. (a) Objeto real con sombra utilizando Wavelet Morlet 2D, (b) muestra mapa de fase, o fase envuelta, (c) muestra el mapa de magnitud del objeto, (d) fase desenvuelta con algoritmo Constantini y (e) fase desenvuelta con algoritmo Bioucas

5.4 Análisis y Discusión de Resultados

De los resultados mostrados con respecto del objeto virtual, se observa que la reconstrucción 3D usando las wavelets Paul, Fan y Morlet presentan un buen desempeño, es decir, la reconstrucción 3D obtenida para cada una de las wavelets implementadas, tiene una similitud precisa, (sobre todo la wavelet Morlet) con el objeto original. Sin embargo, este resultado podría mejorar si al momento de desenvolver la fase (etapa final del proceso), se implementaran algoritmos robustos de desdoblamiento de fase, a diferencia de lo expuesto por Gdeisat en el 2010 Gdeisat et al, (2010). Por esta razón, y con la finalidad de validar la importancia del uso de algoritmos robustos, la metodología presentada, propone el uso de algoritmos robustos de desdoblamiento de fase, además, de algoritmos simples para llevar a cabo este análisis, para el proceso de reconstrucción 3D, obteniendo con ello mejores resultados.

En los objetos reales mostrados anteriormente, se utiliza un algoritmo simple y cuatro algoritmos robustos de desdoblamiento de fase. En esta parte del proceso, la reconstrucción 3D de estos objetos se obtiene aplicando la Perfilometría Wavelet 2D, partiendo del hecho, que el mejor desempeño de la reconstrucción lo proporciona la Morlet 2D, lo cual coincide con las pruebas del objeto virtual anteriormente presentadas.

Además, el uso de un algoritmo para detectar las sombras generadas en el momento de la captura de objetos reales es aplicado, con la finalidad de eliminar el ruido y mejorar el proceso de reconstrucción 3D. El método propuesto de eliminación y detección de sombras utiliza patrones de franjas de colores y morfología matemática para condicionar los contornos de las regiones de estas. La información del contorno de la sombra se usa para interpolar el patrón de franjas del plano de fondo en la escena capturada donde se detectan las sombras Lei, et al, (2018). (Para más detalle ver Anexo B).

El patrón de franjas es generado al combinar, para los canales R y G dos patrones sinusoidales, y para el canal B la ausencia de color, dicha combinación crea el patrón de franjas propuesto para ser proyectado sobre el objeto y con ello facilitar el proceso de detección de sombra.

Finalmente, y tomando en consideración las pruebas anteriores, es claro que el método funciona mejor cuando la sombra es eliminada, antes del proceso de Perfilometría Wavelet y adicional a esto, el uso de algoritmos robustos de desdoblamiento de fase.

Capítulo VI

Dirección General de Bibliotecas UAQ

6 Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1 Conclusiones

El presente trabajo de investigación se enfoca en el método de Perfilometría Wavelet 2D, utilizando las wavelets Fan, Paul y Morlet, llevando a cabo una comparación del desempeño de las transformadas para objetos virtuales, seleccionando la que brinda un mejor desempeño para ser aplicada a objetos reales.

Al realizar este análisis en imágenes virtuales, con este tipo de transformadas, visualmente se observa, que la reconstrucción que muestra un mejor desempeño es la que se obtiene al aplicar la transformada Morlet 2D, en comparación con Fan y Paul.

Las pruebas aplicadas a objetos virtuales pueden ser controladas, es decir, que los factores involucrados dentro del proceso de reconstrucción 3D pueden mejorarse, tales como:

- El número de franjas proyectado sobre el objeto, el cual es de suma importancia dentro de la reconstrucción 3D, dado que, a mayor número de franjas, mayor distorsión y mejor reconstrucción, (este número de proyección de franjas tendrá como límite el tamaño del objeto).
- La selección de un objeto ideal sin sombra, o variaciones que pudieran en su momento generar algún tipo de ruido y brindar una reconstrucción 3D limitada.
- Así como, el proceso de la selección de la wavelet de acuerdo con sus características. El tipo de wavelet se elegirá basándose en la información que se requiera obtener de la imagen, como se menciona en el capítulo IV.
- El proceso de instrumentación es otro factor importante a ser considerado.

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la captura de diferentes objetos, lo cual permitió entender la importancia de este factor.

Para la adquisición del objeto, se requiere que éste sea opaco para evitar que la luz sea reflejada, otro elemento importante, es el ángulo en el que el objeto es colocado con respecto del proyector y la cámara, además de la distancia involucrada entre ellos. Al considerar estos aspectos al momento de la adquisición del objeto se puede mejorar en gran medida la calidad de la reconstrucción con respecto de los objetos reales. Por otro lado, la forma del objeto puede generar artefactos que interferirán con la calidad de la reconstrucción, independientemente de cómo se lleve a cabo la adquisición del objeto, por ejemplo, si el objeto es plano y se coloca adherido a la superficie no generará una sombra significativa, pero si el objeto tiene una forma diferente, en el momento de la adquisición, la sombra que genere este objeto será parte de la captura, lo cual

interferirá con una buena reconstrucción, independientemente del algoritmo de desdoblamiento utilizado.

Para este trabajo de investigación se consideraron varios aspectos importantes, para trabajar con objetos reales.

La experimentación con los objetos reales mostrados en el capítulo anterior permite observar que el preprocesamiento del objeto, (eliminación de la sombra), es de vital importancia, dado que, con ello, se logra eliminar parte del ruido obtenido durante el proceso de la captura del objeto, brindando una mejor reconstrucción 3D del mismo.

Por otro lado, se observó la importancia del uso de algoritmos robustos de desdoblamiento de fase. Al implementar un algoritmo 2D de desdoblamiento de fase, tanto a la fase envuelta como al mapa de intensidad, es posible verificar la ventaja que brinda el uso de estas herramientas, las cuales presentan una gran mejora dentro del proceso de reconstrucción 3D.

Entre los algoritmos implementados, se observa, de acuerdo con los resultados obtenidos, que el algoritmo que presenta un mejor desempeño es Bioucas (PUMA) Bioucas-Dias, et al, (2005), seguido por Ghiglia. Ghiglia, et al, (1994).

Por otro lado, la comparación cuantitativa con respecto a la reconstrucción entre los objetos reales y virtuales no es posible debido a que la información de la altura del objeto real y su profundidad no son conocidas, esto es un factor necesario para hacer posible esta comparación. Por lo que los resultados presentados fueron evaluados solo de forma cualitativa.

Concluyendo, este trabajo de investigación presenta, el desarrollo e implementación de un algoritmo de detección y eliminación de sombra, así como el uso de algoritmos 2D de desdoblamiento de fase, con la finalidad de mejorar la reconstrucción 3D de objetos, mostrando resultados cualitativos, presentados en el capítulo anterior.

6.2 Recomendaciones para Trabajo Futuro

La publicación de un artículo enfocado a la parte educativa, donde se muestren las características e importancia del uso de la Transformada Wavelet. Esto con la finalidad de llevar a las aulas, el concepto básico de lo que una Transformada Wavelet es y sus aplicaciones. Se pretende dar continuidad en el trabajo con 2D, dado que un aspecto importante a considerar es la estimación de los mejores parámetros para la Wavelet 2D, a través de métodos heurísticos o bien, implementando el uso de métodos numéricos para las Wavelets 2D más usadas en reconstrucción 3D.

Referencias

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Abid, A. Z. A. (2008). Fringe pattern analysis using Wavelet Transforms. John Moores University, Liverpool.

Abid, A. Z., Gdeisat, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J., Abdul-Rahman, H. S., & Lilley, F. (2008, April). Fringe pattern analysis using a one-dimensional modified Morlet continuous wavelet transform. In *Optical and Digital Image Processing* (Vol. 7000, p. 70000Q). International Society for Optics and Photonics.

Antoine, J. P., Murenzi, R., Vandergheynst, P., & Ali, S. T. (2008). *Two-dimensional wavelets and their relatives*. Cambridge University Press.

Arellano, P. (2004). Missing information in remote sensing: wavelet approach to detect and remove clouds and their shadows. *ITC*.

Arreguín, J. M. R., Soto, J. E. V., & Arreguín, C. A. R. *Innovaciones en Mecatrónica*.

Bailich, M., Bahich, M., Amar, S., Bellach, B., & Rahmoun, M. (2019). Multidirectional wavelet-based fringe analysis for surface diagnosis by optical profilometry. *Procedia computer science*, 148, 627-636.

Balla, P., Kocsis, P., Eigner, G., & Antal, Á. (2016, June). Surface reconstruction with Wavelet transformation. In *2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)* (pp. 201-206). IEEE.

Besl, P. (1988). Optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*, 1(2), 127-152.

Bioucas-Dias, J. M., & Valadao, G. (2005, June). Phase unwrapping via graph cuts. In *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis* (pp. 360-367). Springer, Berlin, Heidelberg.

Chacón Murguía, M. I. (2016). *Percepción Visual-Aplicada a la Robótica*. Alfaomega Grupo Editor.

Costantini, M. (1998). A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 36(3), 813-821.

Da, F., & Huang, H. (2012). A fast, accurate phase unwrapping method for wavelet-transform profilometry. *Optics Communications*, 285(4), 421-432.

Debnath, L., & Shah, F. A. (2002). *Wavelet transforms and their applications* (pp. 12-14). Boston: Birkhäuser.

Dehaeck, S., Tsoumpas, Y., & Colinet, P. (2015). Analyzing closed-fringe images using two-dimensional Fan wavelets. *Applied optics*, 54(10), 2939-2952.

Gdeisat et al 2010. 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 *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1236, No. 1, pp. 112-117). AIP.

Gdeisat, M. A., Abid, A., Burton, D. R., Lalor, M. J., Lilley, F., Moore, C., & Qudeisat, M. (2009). Spatial and temporal carrier fringe pattern demodulation using the one-dimensional continuous wavelet transform: recent progress, challenges, and suggested developments. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(12), 1348-1361.

Gdeisat, M. A., Burton, D. R. & Lalor, M. J., (2006). Spatial carrier fringe pattern demodulation by use of a two-dimensional continuous wavelet transform. *Applied optics*, 45(34), 8722-8732

Ghiglia, D. C., & Romero, L. A. (1994). Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *JOSA A*, 11(1), 107-117.

Herráez, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J., & Gdeisat, M. A. (2002). Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. *Applied optics*, 41(35), 7437-7444.

Huang, L., Kemao, Q., Pan, B., & Asundi, A. K. (2010). Comparison of Fourier transform, windowed Fourier transform, and wavelet transform methods for phase extraction from a single fringe pattern in fringe projection profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2), 141-148.

Itoh, K. (1982). Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Applied optics*, 21(14), 2470-2470.

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.

Kemao, Q. (2007). Two-dimensional windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: principles, applications and implementations. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(2), 304-317.

Lei, T., Jia, X., Zhang, Y., Liu, S., Meng, H., & Nandi, A. K. (2018). Superpixel-based Fast fuzzy C-means clustering for color image segmentation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.

Li, S., Chen, W., & Su, X. (2008) Reliability-guide pase unwrapping in wavelet transform profilometry. *Applied optics*, 47(18), 3369-3377.

Li, S., Su, X., & Chen, W. (2012). Hilbert assisted wavelet transform method of optical fringe pattern phase reconstruction for optical profilometry and interferometry. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 123(1), 6-10.

Lopez, C. V., Pedraza, J. C., Ramos, J. M., Silva, E. G., & Hurtado, E. G. (2016, October). Parameter Characterization of Complex Wavelets and its use in 3D Reconstruction. In *Mexican International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 471-481). Springer, Cham.

López, T. (2012). Estudio comparativo entre tipos de transformada wavelet para su uso en reconstrucción tridimensional (Doctoral dissertation, Doctoral dissertation).

Molleda, J. (2008). Técnicas de Visión por Computador para la Reconstrucción en Tiempo Real de la Forma 3D de Productos Lamina-dos (Doctoral dissertation, Tesis Doctoral. Departamento de Informática, Universidad de Oviedo, Gijón España).

Nagao, M., & Matsuyama, T. (1979). Edge preserving smoothing. *Computer graphics and image processing*, 9(4), 394-407.

Ortega, J. C. P., Moreno, J. W. R., Rodriguez, L. B., Hurtado, E. G., Jimenez, T. S., Arreguin, J. M. R., & Rivas, A. (2007, November). Image processing for 3D reconstruction using a modified fourier transform profilometry method. In *Mexican International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 705-712). Springer, Berlin, Heidelberg.

Palos Cuesta, J. O. R. G. E. (2012). Desarrollo de un procedimiento para la creación de imágenes 3D a partir de imágenes 2D (Doctoral dissertation).

Pedraza-Ortega, J. C., Efrén Gorrostieta-Hurtado, E., Delgado-Rosás, M., Canchola-Magdaleno, S., Ramos-Arreguin, J. M., Aceves Fernandez, M., & Sotomayor-Olmedo, A. (2009). A 3D Sensor Based on a Profilometrical Approach. *Sensors*, 9(12), 10326-10340.

Quan, C., Tay, C. J., & Chen, L. (2005). Fringe-density estimation by continuous wavelet transform. *Applied optics*, 44(12), 2359-2365.

Ruiz, S.G. (2015). Transformada Wavelet en Hidráulica. UNAM.

Sciammarella, C. A., Patimo, C., Manicone, P. D., & Lamberti, L. (2005, September). Fringe pattern information retrieval using wavelets. In *Wavelets XI* (Vol. 5914, p. 59140A). International Society for Optics and Photonics.

Takeda, M., & Mutoh, K. (1983). Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied optics*, 22(24), 3977-3982.

Van Fleet, P. J. (2011). *Discrete wavelet transformations: An elementary approach with applications*. John Wiley & Sons.

Walker, J. S. (2002). *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC press.

Wang, J., & Yang, Y. (2018). A wavelet ridge extraction method employing a novel cost function in two-dimensional wavelet transform profilometry. *AIP Advances*, 8(5), 055020.

Wang, Y. P., Lee, S. L., & Toraichi, K. (1999). Multiscale curvature-based shape representation using B-spline wavelets. *IEEE Transactions on Image Processing*, 8(11), 1586-1592.

Wang, Y., & Zhang, S. (2012). Novel phase-coding method for absolute phase retrieval. *Optics letters*, 37(11), 2067-2069.

Wang, Z., & Ma, H. (2006). Advanced continuous wavelet transform algorithm for digital interferogram analysis and processing. *Optical Engineering*, 45(4), 045601.

Watkins, L. R. (2007). Phase recovery from fringe patterns using the continuous wavelet transform. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(2), 298-303.

Yagnik, J., Siva, G. S., Ramakrishnan, K. R., & Rao, L. K. (2005, November). 3D shape extraction of human face in presence of facial hair: A profilometric approach. In TENCON 2005-2005 IEEE Region 10 Conference (pp. 1-5). IEEE.

Zapotitla, R.J. (2016). Integración de métodos potenciales por deconvolución de Euler y propagación elástica 3D para la exploración de yacimientos subdalinás. UNAM.

Zhang, S. (2016). High-Speed 3D imaging with digital fringe projection techniques. CRC Press.

Zhang, Y., Hu, J. Y., Li, J. L., & Wang, H. Q. (2017) The application of WTP in 3-D reconstruction of train wheel surface and tread defect. *Optik*, 131, 749-753.

Zhang, Z. H. (2012). Review of single-shot 3D shape measurement by phase calculation-based fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(8), 1097-1106.

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.

Zhong, J., & Weng, J. (2004). Spatial carrier-fringe pattern analysis by means of wavelet transform: wavelet transform profilometry. *Applied optics*, 43(26), 4993-4998.

Zuo, C., Huang, L., Zhang, M., Chen, Q., & Asundi, A. (2016). Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review. *Optics and Lasers in Engineering*, 85, 84-103.

Apéndice A

Dirección General de Bibliotecas UAQ

7 Apéndice A

La caracterización de parámetros para la Wavelet 1D, Lopez, et al, (2016). se basó en métodos heurísticos, tomando dos objetos virtuales diferentes, los cuales fueron procesados con Shannon, B-Spline, y Morlet, cada una de ellas con la variación de los parámetros de la frecuencia central, la variación del número de franjas proyectadas sobre el objeto (128, 64, 32, 16, 8 y 4), la escala (multiresolución), con variaciones de 8,16, 32 y 64 y la traslación, variando desde 0.5 hasta 2, con incrementos de 0.5 entre ellos. Todos estos factores fueron utilizados implementando todas sus combinaciones posibles. La Tabla A.1 muestra el total de resultados para cada una de las wavelets con ambos objetos.

CWT	Wavelet (MatLab)	Orden (m*)	Traslación (fb)	Frecuencia Central (fc)	Franjas (f)	Escala (e)	Total de combinaciones
B-Spline	Fbsp	1 a 5	0.5 a 2	0.5 a 2	4 a128	8 a 128	4,788
Morlet	Cmor	n/a	0.5 a 2	0.5 a 2	4 a128	8 a 128	948
Shannon	Shan	n/a	0.5 a 2	0.5 a 2	4 a128	8 a 128	989

Tabla A 1. Total de combinaciones de caracterización de parámetros 1D

*Solo utilizado en B-Spline

La implementación de estas combinaciones, hicieron posible seleccionar los parámetros que brindan el error mínimo para cada una de las wavelets. Tablas A.2 y A.3

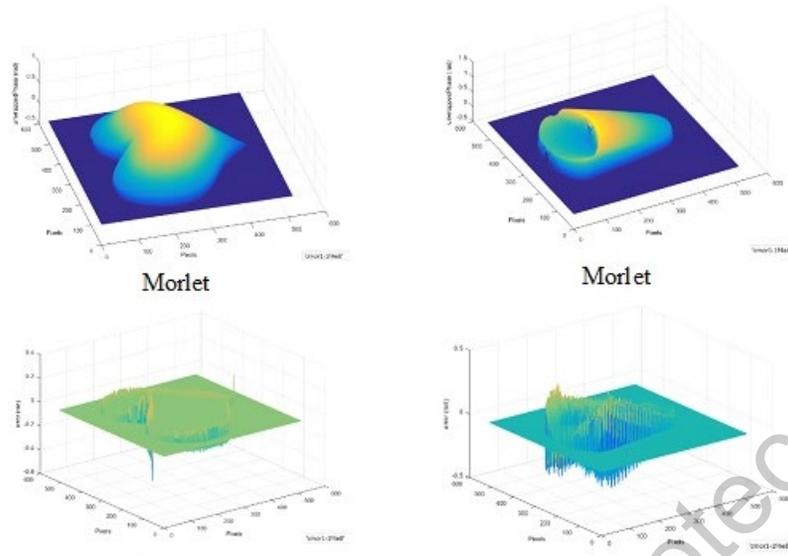
CWT	wavelet	m	fb	fc	Franjas	Escala
B-Spline	Fbsp	3	1.5	2	f128	e16
Morlet	Cmor	n/a	1	1	f128	e8
Shannon	Shan	n/a	2	2	f128	e8

Tabla A.2 Parámetros para error mínimo reconstrucción 3D. Objeto 1

CWT	wavelet	m	fb	fc	Franjas	Escala
B-Spline	Fbsp	3	1	0.5	f128	e8
Morlet	Cmor	n/a	1	1	f128	e8
Shannon	Shan	n/a	2	2	f128	e8

Tabla A.3 Parámetros para error mínimo reconstrucción 3D. Objeto 2

La Figura A.1 muestra los objetos 1 y 2 reconstruidos con Morlet 1D aplicando los mejores parámetros



Error mínimo

Figura A.1. Error mínimo obtenido con Morlet 1D y sus mejores parámetros para objetos los 1 y 2.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Apéndice B

Dirección General de Bibliotecas UAQ

8 Apéndice B

Un algoritmo de detención y eliminación de sombras fue desarrollado, con la finalidad de mejorar el desempeño del proceso de reconstrucción 3D. El método propuesto se lleva a cabo desde la captura del objeto, la proyección del patrón de franjas de color resultante es formado por la composición de un patrón sinusoidal de franjas (blanco y negro) en el canal rojo y en el canal verde, dejando sin franjas el canal azul, (RGB). Figura B.1 muestra el patrón de franjas obtenido de la composición mencionada anteriormente.

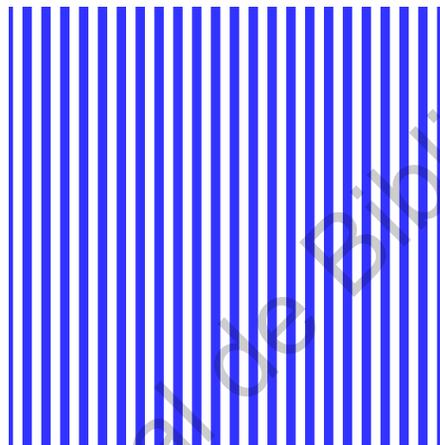


Figura B.1. Patrón de Franjas de Color.

La finalidad de la creación de este patrón sinusoidal de color es facilitar la detención de la sombra creada por el objeto, dado que la sombra está compuesta por valores de baja intensidad.

Para la identificación y eliminación de sombra, se identificaron primero las regiones de sombra a través del agrupamiento rápido difuso basado en super píxeles (SFFCM) Lei, et al, (2018). Este método trabaja primero en mejorar los contornos al aplicar una operación de reconstrucción de gradiente morfológico de escala múltiple (MMGR). Posterior a esto se obtiene un histograma de color para cada super píxel, para después aplicar un algoritmo de agrupamiento difuso mejorado y así utilizar los niveles de color del histograma resultante. Las Figuras B.2 y B.3 muestran un objeto con sombra y con la sombra removida respectivamente.



Figura B.2. Vaca. Objeto con sombra.



Figura B.3. Vaca. Objeto con sombra removida.

El método de eliminación de sombra fue implementado en el capítulo V, para obtener una mejor reconstrucción 3D del objeto.

Apéndice C

Dirección General de Bibliotecas UAQ

9 Apéndice C



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO FACULTAD DE LENGUAS Y LETRAS

A QUIEN CORRESPONDA:

La que suscribe, Directora Provisional de la Facultad de Lenguas y Letras, hace **CONSTAR** que la C.

LÓPEZ TORRES CLAUDIA VICTORIA

Presentó el examen de Manejo de la Lengua el día catorce de octubre de dos mil diecisiete, en el cual obtuvo la siguiente calificación:

8-

Se extiende la presente a petición de la parte interesada, para los fines escolares y legales que le convengan, en el Campus Aeropuerto de la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro., el día veinticinco de enero de dos mil dieciocho.



Atentamente,
“Enlazar Culturas por la Palabra”

LIC. LAURA PÉREZ TÉLLEZ



LPT/evm*CL*FLL-Consecutivo.-027

Campus Aeropuerto, Anillo Vial Fray Junípero Serra S/N, Querétaro, Qro. C.P. 76140
Tel. 01 (442) 192 12 00 Dirección Ext. 61010, Secretaría Administrativa 61300, Posgrado 61140,
Licenciatura 61070, Centro de Lenguas 61050, Secretaría Académica 61100 y Planeación 61110

Apéndice D

Dirección General de Bibliotecas UAQ

10 Apéndice D

10.1 Productos Académicos Obtenidos

- I. López-Torres Claudia, Salazar-Colores Sebastián, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Aceves-Fernández Marco, Gorrostieta-Hurtado Efrén. Reconstrucción 3D, usando Perfilometría de Transformada Wavelet y variación de número de franjas (Congreso Informática 2018).

Reconstrucción 3D, usando Perfilometría de Transformada Wavelet y variación de número de franjas

López Torres Claudia Victoria¹, Salazar Colores Sebastián², Pedraza Ortega Jesús Carlos³, Ramos Arreguin Juan Manuel⁴, Aceves Fernández Marco Antonio⁵, Gorrostieta Hurtado Efrén⁶

azul.cielo.2007@gmail.com¹, s.salazarcolores@gmail.com², caryoko@yahoo.com³, jsistdig@yahoo.com.mx⁴, marco.aceves@gmail.com⁵, efrengorrostieta@gmail.com⁶

Resumen

El proceso de proyección de luz estructurada dentro de la reconstrucción 3D, hace uso de métodos como Perfilometría de Fourier y Perfilometría Wavelet. En el caso de la Perfilometría Wavelet, su análisis se enfoca en su mayoría al desempeño de las Wavelets utilizadas para la reconstrucción, y aunque la experimentación menciona que el número de franjas proyectadas sobre los objetos considerados es determinante, no se ha establecido aún un análisis de la variación de dichas franjas y su efecto en la reconstrucción 3D de los objetos. Este trabajo implementa una metodología con variación de franjas proyectadas en diferentes objetos con la finalidad de mostrar la diferencia con respecto de la reconstrucción dependiendo del número de franjas utilizado, apoyándose del uso de la Wavelet Morlet, la cual, debido a sus características, presenta un buen desempeño, independientemente del tipo de objeto a reconstruir.

Palabras clave: Morlet, Perfilometría Wavelet, Proyección de franjas, Reconstrucción 3D.

1. Introducción

El procesamiento de imágenes, hoy en día es un tema que resulta de gran importancia. Dentro de este tema resalta la técnica de reconstrucción tridimensional (3D), la cual está enfocada en reproducir un objeto real en forma digital, sin perder las características de dicho objeto, las cuales son: dimensión y volumen. La forma en la que este proceso es llevado a cabo es extrayendo los puntos del objeto de interés y el emparejamiento de esos puntos.

Dentro del sistema de reconstrucción 3D, se utilizan dos técnicas para la digitalización del objeto a reconstruir, las cuales son: técnicas de contacto y de no

contacto Molleda (2008), siendo más utilizadas las de no contacto, en la cual sobresale el uso de luz estructurada, debido a que es una técnica no invasiva, y con un mejor tiempo de procesamiento y mayor resolución con respecto a otras técnicas.

Dentro de la técnica de luz estructurada, se encuentra el método de proyección de franjas, que se genera a través de la proyección de un patrón de franjas, el cual es emitido por un proyector sobre un objeto, para ser capturado posteriormente por una cámara, con la finalidad de obtener la distorsión generada por dichas franjas sobre el objeto Asundi y Wensen, (1998). Esta distorsión de franjas es

- II. López-Torres Claudia, Blanco-Silva Elías, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Vargas-Soto Emilio, Cíntora-García Mayra. METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN DE DISTORSIÓN GEOMÉTRICA Y RECONSTRUCCIÓN 3D DE UN OBJETO MEDIANTE PERFILOMETRÍA WAVELET 1D (Pistas Educativas 2018).

Pistas Educativas, No. 128 (SENIE 2017), febrero 2018, México, Tecnológico Nacional de México en Celaya

**METODOLOGÍA PARA LA CORRECCIÓN DE DISTORSIÓN
GEOMÉTRICA Y RECONSTRUCCIÓN 3D DE UN OBJETO
MEDIANTE PERFILOMETRÍA WAVELET 1D**

Claudia Victoria López Torres

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
azul.cielo.2007@gmail.com

Gonzalo Elías Blanco Silva

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
gblanco25@alumnos.uaq.mx

Jesús Carlos Pedraza Ortega

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
caryoko@yahoo.com

Juan Manuel Ramos Arreguín

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
jramos@mecamex.net

José Emilio Vargas Soto

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
emilio@mecatronica.net

Mayra Azucena Cíntora García

Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario
Mayra.12.1@hotmail.com

Resumen

Los métodos de reconstrucción 3D con base al análisis de patrones de franjas, son ampliamente usados para la obtención de profundidad de objetos basándose en una o más imágenes, debido a que son técnicas no invasivas con alta velocidad de procesamiento. Sin embargo, son susceptibles a errores ocasionados

Pistas Educativas Vol. 39 - ISSN: 2448-847X
Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-120613261600-203
<http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>

~999~

- III. López-Torres Claudia, Pedraza-Ortega J. Carlos, Talavera-Velázquez Dimas, Gorrostieta-Hurtado Efrén, y Vargas-Soto Emilio, Análisis de la Perfilometría Wavelet 2D en su Desempeño para la Reconstrucción 3D de Objetos (La Mecatrónica en México 2017).

La Mecatrónica en México, Mayo 2017, Vol. 6, No. 2, páginas 36 – 45.
Disponible en línea en www.mecamex.net/revistas/LMEM
ISSN: 2448-7031, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

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

- IV. López-Torres Claudia, Moya-Morales Juan Carlos, Ramos-Arreguín Carlos, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Aceves-Fernández Marco. Efecto de la Variación del Parámetro de Escala en la WTP 2D y su efecto en la Reconstrucción 3D de Objetos. (Congreso Mecatrónica 2017).

Innovaciones en Mecatrónica
ISBN: 978-607-9394-11-0, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2017



Efecto de la variación del parámetro de escala en la WTP 2D y su efecto en la Reconstrucción 3D de objetos.

López Torres Claudia Victoria¹, Moya Morales Juan Carlos¹, Ramos Arreguín Carlos Alberto¹, Pedraza Ortega Jesús Carlos², Aceves Fernández Marco Antonio²

¹ Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Juriquilla, Avenida de las Ciencias s/n, 76229, Querétaro, Querétaro; México.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, 76010, Querétaro, Querétaro México

Resumen

El procesamiento de imágenes ha sido muy explotado en las últimas décadas, y durante este tiempo se han enfrentado diferentes factores tanto internos, como externos que han sido cruciales en el proceso de reconstrucción 3D de objetos. Estas variantes pueden ser tanto externas como internas. Dentro del proceso de captura del objeto y la distorsión que éste pueda presentar en el momento de la captura, existen además, otro tipo de factores que pueden apoyar a mejorar la reconstrucción del objeto, tal es el caso de variaciones dentro de la transformación del método. En este trabajo se toma un objeto con un patrón de franjas distorsionado, dicho patrón es corregido para implementar posteriormente, la Perfilometría Wavelet, usando la transformada Morlet 2D, haciendo una variación en su parámetro de escala con la finalidad de mejorar dicha reconstrucción, esta variación en este parámetro permite visualizar los cambios que se presentan en el mapa de fase del objeto a reconstruir, la variación influye en la calidad del mapa de fase, es decir, si la variación de escala es menor, (seleccionando intervalos pequeños), el mapa de fase presentará menos cambios abruptos. Para obtener la fase desenvuelta se usan dos algoritmos sencillos de desdoblamiento de fase. Al aplicar estos algoritmos se puede observar una diferencia con la misma variación de escala. Con ello se analiza también el desempeño de cada uno de estos algoritmos. Finalmente se puede apreciar con la metodología empleada una mejora en la reconstrucción 3D del objeto.

Palabras clave: Variación de escala, Perfilometría, Transformada Wavelet Morlet 2D, Reconstrucción 3D, Mapa de fase.

1. Introducción

La obtención de una mayor precisión y calidad en la medición de objetos 3D ha sido posible gracias al desarrollo científico (métodos matemáticos) y tecnológico (mejora en equipo de cómputo) en las últimas décadas, haciendo accesibles herramientas de cómputo más sofisticadas y con una base teórica más sólida. Las técnicas ópticas de no contacto, incluyen la implementación de métodos básicos de procesamiento digital de imágenes para conseguir resultados satisfactorios. Si se requiere aumentar la precisión es necesario utilizar métodos que proporcionen esa precisión o bien mejorar los existentes. Este proceso de mejora incluye, la modificación del método original, o bien de la adición de etapas que mejoren las características de las imágenes, para que el algoritmo de procesamiento de imágenes tenga un mejor desempeño. Además de la calidad, la consistencia perceptual de los objetos involucrados son factores que pueden afectar los resultados obtenidos dentro del proceso, dependiendo de las circunstancias de captura de dichos objetos [1].

Estos factores pueden ser internos, los cuales involucran: el sistema de captura como funciones de transferencia [2] [3], factor de escala y enfoque [4] [5], incluso la posición del objeto con respecto al sistema de captura. Por otro lado también se involucran factores externos, los cuales refieren al entorno

- V. López-Torres Claudia, Quintanar-Pérez María Eugenia, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Blanco-Silva Gonzalo Elías, Ramos-Arreguín Juan Manuel, & Gorrostieta-Hurtado Efrén. Propuesta de reconstrucción 3d de objetos basado en la selección de los mejores parámetros de la Wavelet Morlet (Research in Computing Science 2017).

ISSN 1870-4069

Propuesta de reconstrucción 3d de objetos basado en la selección de los mejores parámetros de la Wavelet Morlet

Claudia Victoria López¹, María Eugenia Quintanar Pérez³,
Jesús Carlos Pedraza Ortega², Gonzalo Elías Blanco Silva¹,
Juan Manuel Ramos Arreguín², Efrén Gorrostieta Hurtado²

¹ Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

² Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México

³ Instituto Tecnológico de Querétaro, Querétaro, México

azul.cielo.2007@gmail.com, mequintanar@hotmail.com, caryoko@yahoo.com,
gblanco25@alumnos.uaq.mx, jramos@mecamex.net, efrengorrostieta@gmail.com

Resumen. Entre los métodos de proyección de luz estructurada para el proceso de reconstrucción 3D, se encuentran el de Perfilometría de Fourier y Perfilometría Wavelet, siendo el primero el más utilizado. Este trabajo muestra una comparativa entre el desempeño de la Perfilometría Wavelet y la de Fourier, implementando la selección de los mejores parámetros para la wavelet Morlet, considerando el análisis de la estimación de fase mediante la frecuencia espacial f_0 , la cual es establecida por el número de franjas y sirve como parámetro para llevar a cabo el filtrado en esa frecuencia dentro de la Wavelet Morlet. La metodología aplicada utiliza la selección de objetos reales y virtuales, así como la determinación de la frecuencia espacial en caso de no tenerla como parámetro de entrada. Se llevaron a cabo pruebas primero con objetos virtuales y se obtuvieron los parámetros en donde el error en la reconstrucción 3D es menor. Los resultados obtenidos con estos parámetros fueron implementados para la reconstrucción 3D en objetos reales.

Palabras clave: reconstrucción 3D, wavelet Morlet, parámetros, perfilometría de Fourier.

3D Object Reconstruction Proposal Based on the Morlet Wavelet best parameter selection

Abstract. Among the structured light projection methods for the 3D reconstruction process, there are the Fourier and Wavelet based Profilometry, being Fourier the most used. In this work we present a comparative between Fourier and Wavelet Profilometry performance by means of the selection of the best parameters of the Morlet Wavelet. Analyzing the phase estimation by using the f_0 spatial frequency, which is established by the fringe numbers and serves as

- VI. López-Torres Claudia, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Blanco-Silva Elías, Moya-Morales Juan Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Rivas-Velázquez Ángel Rolando. Análisis de la Perfilometría por Transformada Wavelet para el uso en el proceso de Reconstrucción 3D de Objetos (Proyectos Institucionales y de Vinculación 2016).

PROYECTOS INSTITUCIONALES Y DE VINCULACIÓN

Año IV, No. 08 Julio-Diciembre 2016
ISSN: 2448-6906

P.I. 23 – P.F. 31

ANÁLISIS DE LA PERFILOMETRÍA POR TRANSFORMADA WAVELET PARA SU USO EN EL PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN 3D DE OBJETOS

Claudia Victoria López Torres, Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega, Elías Blanco, Juan Carlos Moya, Dr. Juan Manuel Ramos-Arreguín, M.C. Ángel Rolando Rivas-Velázquez

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Universidad s/n, Ciudad de Universitaria, 66455 Monterrey, Nuevo León, México

RESUMEN.

En el proceso de reconstrucción 3D de objetos y en particular donde se tienen proyección de luz estructurada existe el método de Perfilometría por Transformada Wavelet. Sin embargo no se había propuesto un análisis donde se pudieran considerar más de un tipo de wavelet y sus efectos en el proceso de reconstrucción 3D. En este trabajo se consideraron tres tipos de wavelets: B-Spline, Morlet, y Shannon, las cuales son utilizadas en el proceso de reconstrucción 3D de objetos. Los coeficientes de escalamiento y desplazamiento se consideraron en cada wavelet, así como el número de franjas f_0 . Este valor es indispensable para llevar a cabo el filtrado en esta frecuencia en particular. Se consideró y aplicó la metodología a objetos virtuales y se obtuvo el error. Posteriormente se utilizó la misma metodología a objetos reales y se encontró los mejores resultados se obtuvieron con la wavelet B-Spline tanto con objetos virtuales, así como reales.

Palabras clave:

Perfilometría, Wavelet, Morlet, Shannon, B-Spline, reconstrucción 3D.

ABSTRACT.

In the process of 3D reconstruction of objects and in particular where they have structured light projection exists the method of Waveform Transform Profileometry. However, an analysis was not proposed where more than one type of wavelet and its effects could be considered in the 3D reconstruction process. In this work three types of wavelets were considered: B-Spline, Morlet, and Shannon, which are used in the 3D reconstruction of objects. The scaling and displacement coefficients were considered in each wavelet, as well as the number of f_0 bands. This value is indispensable to carry out the filtering on this particular frequency. The methodology was considered and applied to virtual objects and the error was obtained. Subsequently the same methodology was used to real objects and the best results were obtained with the B-spline wavelet with both virtual and real objects.

Keywords:

Profileometry, Wavelet, Morlet, Shannon, B-Spline, 3D reconstruction.

- VII. López-Torres Claudia, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Blanco-Silva Gonzalo Elías, & Gorrostieta-Hurtado Efrén. Parameter Characterization of Complex Wavelets and its use in 3D Reconstruction (MICA I Mexican International Conference on Artificial Intelligence 2017).

Parameter Characterization of Complex Wavelets and its use in 3D Reconstruction

Claudia Victoria Lopez^(✉), Jesus Carlos Pedraza,
Juan Manuel Ramos, Elias Gonzalo Silva,
and Efrén Gorrostieta Hurtado

Universidad Autonoma de Queretaro, Queretaro, Mexico
azul.cielo.2007@gmail.com

Abstract. Fringe projection is an optical method used to perform three-dimensional reconstruction of objects by applying structured light and phase detection algorithms. Some of these algorithms make use of the wavelet transform, which is a function that splits a signal into sub-signals with different scales at different levels of resolution. However, despite the above characteristics, the use and implementation of the wavelet transform requires good parameterization of the many variables involved for each wavelet function (scale and translation coefficient variation), in addition to analyze different wavelet functions such as Morlet, Paul Mother, and Gaussian, among others. Based on these requirements, the present paper aims to develop an in-depth analysis of the most suitable parameters for the Shannon, B-Spline and Morlet Wavelets that ensure the most efficient 3D reconstruction. The experimental results are presented using a set of virtual objects and can be applied to a real object for the purpose of validation.

Keywords: Wavelet transform · Profilometry · Morlet · B-Spline · Shannon · 3D reconstruction

1 Introduction

In the past 30 years, many investigations in Computer Vision have made inference of 3D information in scenes, meaning extracting the useful depth information in 2D images [1]. This dimensional measurement has different applications, such as industrial inspection of manufactured parts, reverse engineering (digitization of complex, free-form surfaces), object recognition, 3D map building, biometrics, and clothing design, among others. For this kind of investigations there are two different techniques, which are of contact or non-contact [2]. We choose the non-contact technique, since nondestructive and noninvasive testing systems play a key role in many industrial applications [3].

In particular, optical methods such as fringe projection, projecting a line of light and projection of a beam have been used to reconstruct the 3D shape of fixed and rotated objects. These structured light techniques make the system very reliable and the acquired data are easier to understand and interpret. Specifically, in the fringe projection method, the object surface is obtained by applying a phase detection algorithm

- VIII. López-Torres Claudia, Blanco-Silva Elías, Sotomayor-Olmedo Elías, Ramos-Arreguín Juan Manuel, Rivas-Araiza Edgar, Gorrostieta-Hurtado Efrén, Pedraza-Ortega Jesús Carlos. Book 3D Reconstruction: Techniques, Analysis and New Developments, COMPARATIVE STUDY BETWEEN DIFFERENT WAVELET TRANSFORM FOR ITS USE IN 3D RECONSTRUCTION (Nova Science Publishers 2016).

In: 3D Reconstruction
Editor: Josephine Weber

ISBN: 978-1-53610-242-0
© 2016 Nova Science Publishers, Inc.

Chapter 4

**COMPARATIVE STUDY BETWEEN DIFFERENT
WAVELET TRANSFORM FOR ITS USE IN
3D RECONSTRUCTION**

*Claudia Victoria Lopez-Torres¹,
Elias Blanco-Silva¹, Artemio Sotomayor-Olmedo²,
Juan Manuel Ramos-Arreguin², Edgar Rivas-Araiza²,
Efren Gorrostieta-Hurtado²
and Jesus Carlos Pedraza Ortega²*

¹Facultad de Informatica, Universidad Autónoma de Queretaro,
Las Campanas, Santiago de Querétaro, Qro., Mexico

²Facultad de Ingenieria, Universidad Autónoma de Queretaro,
Las Campanas, Santiago de Querétaro, Qro., Mexico

ABSTRACT

Considering the importance that 3D reconstruction techniques have acquired in the last 20 years, and the valuable characteristics of the wavelet transform for non-stationary signal analysis, we present a comparative study among different types of wavelet transforms. The aim of this study is to obtain the wavelet transform that provides the better performance for the 3D reconstruction process. A sinusoidal fringe pattern is projected on the object, and by the shape of the object the pattern is distorted. Then the distorted fringe pattern is captured and the

- IX. López-Torres Claudia, Salazar-Colores Sebastián, Kells Kevin, Pedraza-Ortega Jesús Carlos, Ramos-Arreguín Juan Manuel. Improving 3D Reconstruction Accuracy in Wavelet Transform Profilometry by Reducing Shadow Effects (IET Image Processing 2019).

2/10/2019

Gmail - Decision on your Paper - IET Image Processing



Jesus Carlos Pedraza Ortega <caryoko22@gmail.com>

Decision on your Paper - IET Image Processing

1 mensaje

RVT -Review Management System <editorialoffice_1@iet-review.rivervalleytechnologies.com>
Responder a: iet_ipr@theiet.org
Para: caryoko22@gmail.com

2 de octubre de 2019,
7:28

Dear Dr Jesus Carlos Pedraza Ortega,

IPR-2019-0854.R1

'Improving 3D Reconstruction Accuracy in Wavelet Transform Profilometry by Reducing Shadow Effects'

Thank you for submitting your paper to IET Image Processing. The peer review process is now complete. I am pleased to say that the reviewers and I found your paper interesting and worthy of publication. My decision is therefore to accept your paper as it stands.

The IET now offers authors an Open Access publication option alongside our standard Subscription Access. The standard Subscription Access option involves you assigning copyright to the publisher. If you choose the Open Access option you will retain the copyright for your work by selecting one of four Creative Commons Licences. Please be aware that if you choose an Open Access licence there is an Article Processing Charge (APC) of \$2,000 USD. The APC may be covered by the same funding that you would receive for your research, and some institutions have funding set aside to fund open access publishing. Please see our Author Guide for more information: [IET Digital Library Author Guide](#)

You will be contacted shortly asking you to take a decision and sign either a copyright or Open Access licence form.

Yours sincerely

Professor Farzin Deravi
Editor-in-Chief
IET Image Processing

The screenshot displays the IET Digital Library interface. At the top, the browser address bar shows the URL: digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-ipr.2019.0854?originator=ietauthorOffprint&identity=501497×tamp=202010.... The page header includes the IET logo, a search bar, and navigation links for 'Shopping cart', 'Subscribe', 'Contacts', and 'Help'. Below the header, a navigation menu highlights 'Journals & magazines' among other categories like 'Conferences', 'eBooks', 'Reference', 'Subjects', 'Collections', and 'About'. The main content area features the article title: 'Improving 3D Reconstruction Accuracy in Wavelet Transform Profilometry by Reducing Shadow Effects'. The authors listed are Claudia Victoria Lopez Torres, Sebastián Salazar-Colores, Kevin Kells, Jesus Carlos Pedraza Ortega, and Juan-Manuel Ramos Arreguin. The article is marked as an 'ACCEPTED MANUSCRIPT' and is 16.57MB in size. It was received on 19/07/2019, accepted on 02/10/2019, revised on 19/09/2019, and published on 22/10/2019. The source is 'IET Image Processing', 8 pages long, with a print ISSN of 1751-9659 and an online ISSN of 1751-9667. The article is available online from 23 October 2019. On the right side, the user is logged in as Jesus Carlos Pedraza Ortega, with options for 'Logon options' and 'Logout'. There are also social sharing icons and a 'Tools' section with options like 'Add to favourites', 'Create email alert', 'Get permissions', and 'Export citations'. A 'Key' section explains content types: Free content, Open access content, Subscribed content, and Trial content. At the bottom right, there is a 'Subscribe to access' button.

Dirección General de Bibliotecas U.A.Q

IET Research Journals

Improving 3D Reconstruction Accuracy in Wavelet Transform Profilometry by Reducing Shadow Effects

IET Journals
The Institution of
Engineering and Technology

ISSN 1751-8644
doi: 0000000000
www.ietdl.org

Improving 3D Reconstruction Accuracy in Wavelet Transform Profilometry by Reducing Shadow Effects

Claudia-Victoria López-Torres¹, Sebastián Salazar Colores¹, Kevin Kells², Jesús-Carlos Pedraza-Ortega³, Juan-Manuel Ramos-Arreguin³

¹ Facultad de informática, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias S/N, Juriquilla, Querétaro, México

² Centre for Business Analytics and Performance, Telfer School of Management, University of Ottawa, Canada

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n, Querétaro, México

* E-mail: caryoko@yahoo.com

Abstract: Wavelet Transform Profilometry (WTP) is a 3D reconstruction method based on the structured light technique of fringe pattern projection (FPP), widely used because it is a non-invasive, high-performance 3D reconstruction method. The presence of shadows created by the object in the image capture process is an obstacle in obtaining accurate 3D reconstructions, as they add noise to the phase data, leading to artifacts in object reconstruction, even when using robust phase unwrapping algorithms. Since shadows present diverse intensities and shapes, detecting and eliminating their effects are challenging tasks. This work presents a novel method to detect shadow regions and reduce their effects in 3D reconstruction. The proposed method uses coloured fringe patterns to detect the shadows and mathematical morphology to condition the outlines of the shadow regions. The shadow outline information is used to interpolate the background-plane fringe pattern onto the captured scene where the shadows are detected. The Mean Squared Error (MSE) of the reconstructed objects is reduced to 25% of the MSE without shadow removal, on average, when using the Bioucas phase-unwrapping method. When using the Ghiglia phase-unwrapping method, the MSE reduction is to 8.3%, on average, of the MSE in the shadow case.

1 Introduction

There are several techniques for measuring 3D surface shape, classified as *contact* and *non-contact* techniques. Since non-contact techniques are non-invasive, they have been intensively studied in recent years. In particular, the use of structured light patterns has achieved the most promising results in terms of speed and accuracy [1], [2].

Fringe Projection Profilometry (FPP), specifically, is a structured light pattern technique which detects the surface elevation of the object to be reconstructed through the distortion of a fringe pattern [3], [4]. However, during the capture process, shadows are generated by object occlusion. These shadow regions are detected as noise, generating large errors in the accuracy of the 3D reconstruction.

One of the most widely used FPP methods is called Fourier Transform Profilometry (FTP) [5], introduced by Takeda in 1983 [6], in which a fringe pattern is projected onto an object, and the spatial frequency of the scene is captured to obtain the object's 3D information.

More recently, another technique derived from FTP was proposed called Wavelet Transform Profilometry (WTP) [7], which improves the characterisation of non-stationary local signals. Wavelet transform is a mathematical tool that decomposes a signal into sub-signals with different resolution levels [8].

Although most research carried out using WTP is performed using greyscale fringe patterns [9], [10], [11], there has been some research using colour fringe patterns—the approach used in this paper. For example, to obtain the height of the object, [12] used the relationship between the height and the colour generated in a colour space, although no shadow detection or elimination strategy is proposed as in the present work. Skydan et al. [13] implemented a method that works in the RGB space, projecting fringe patterns at multiple angles using multiple projectors to avoid creating shadows. The present paper proposes a method of detecting and eliminating the shadows instead. The phase unwrapping algorithm used in [13], Herrera [14], was one of five different algorithms evaluated in the

present paper; the results using the Bioucas [15] and Ghiglia [16] algorithms were superior. In [4], the Haar wavelet analysis used the sharp variations in intensity at the shadow boundaries, together with the mean and standard deviation of fringe intensity between fringe peaks, to detect shadow boundaries, even under conditions with random noise present. However, [4] proposes that phase unwrapping and reconstruction not take place in shadow areas, rather than the novel approach of replacing shadow areas with background reference pixels, as proposed in the present paper. The simple, rectangular object used in [4] was not evaluated for the final reconstruction quality after phase unwrapping, while the present paper uses six non-trivial objects and presents numerical and visual results for each. In [17], two methods are proposed for shadow detection using photometric stereo; however, these involve the use of two cameras and employ pixel-intensity comparisons. No reconstruction results are presented that include shadow detection and elimination. The present paper presents qualitative and quantitative 3D reconstruction results with shadow elimination using a single camera and a single, colour fringe pattern projection.

There are also moving-picture research studies focused on the detection and elimination of shadows, such as [18], which uses the Daubechies complex wavelet, making use of the wavelet coefficient variation to detect shadows. In [19], a method is proposed that combines the Daubechies complex wavelet and Zernike moments as characteristics of the object, implementing an algorithm for object tracking that takes advantage of the Daubechies complex wavelet characteristics. In [20], a shadow detection method is proposed using the illumination invariance property of ratio edges under different lighting conditions. These methods provide insights into shadow detection by focusing on dynamic objects in moving pictures, although they do not involve 3D reconstruction of these objects, which is the focus of the present work.

In this paper, a different method for handling 3D reconstruction is proposed using WTP, applying a colour fringe pattern projection to differentiate fringe pattern minima from shadow minima, and using a Super-pixel based Fast Fuzzy Clustering Method (SFFCM) [21],