

Perfilometría con proyección de franjas FTP

Mayra Stefany Gómez Triana* and Juan Pablo Solís Ruiz†
(Dated: May 7, 2024)

En este trabajo presentamos la aplicación de la perfilometría con Transformada de Fourier para la caracterización tridimensional de superficies en diversas aplicaciones industriales. Discutimos los principios básicos de la técnica, su implementación experimental y los resultados obtenidos en la caracterización de diferentes tipos de superficies. Nuestros resultados demuestran la capacidad de la perfilometría de Transformada de Fourier para proporcionar mediciones precisas y detalladas de la topografía de la superficie, lo que la convierte en una herramienta valiosa para aplicaciones industriales y de investigación.

I. INTRODUCCIÓN

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

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

Un método comúnmente usado en procesamiento de franjas es la Perfilometría por Transformada de Fourier (FTP), propuesto por Takeda y Mutoh [1] en 1982, después Berryman y Pedraza [2] propusieron una modificación a la transformada por perfilometría de Fourier llevando a cabo algunos análisis locales y globales de la fase envuelta, con esto los algoritmos de desdoblamiento de fase (temporal y espacial) fueron introducidos y modificados

Para reconstruir el perfil 3-D con precisión, una de las cuestiones clave esenciales para la perfilometría por

transformada de Fourier es extraer con precisión el espectro de primer orden en el dominio espectral, lo que requiere un filtro de paso de banda adecuado para retener la máxima información del primer orden. Espectro y manténgalo separado del espectro de fondo y de otros espectros de orden superior. Las condiciones para separar estas regiones espectrales se han estudiado bien considerando las distancias mínimas entre las regiones. Para eliminar el espectro de fondo, se aplicó una transformada wavelet para separar los términos de iluminación de fondo de un patrón de franjas. Un método para obtener esta región espectral empleó la ventana de Hanning igualmente definida tanto para las frecuencias horizontales como para las verticales.

II. MARCO TEÓRICO

Las bases para perfilometría fueron sentadas por Takeda [1] en 1983. La idea principal de Takeda era proyectar un patrón de franjas con una frecuencia espacial conocida sobre un objeto y después usar la Transformada de Fourier en una dimensión para analizar el patrón de franjas proyectado. Una imagen de cualquier objeto con franjas proyectadas puede ser representada por la siguiente— ecuación:

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

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

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

$$\phi(x, y) = \phi_0(x, y) + \phi_z(x, y) \quad (2)$$

Donde $\phi_0(x, y)$ es la fase causada por el ángulo de la proyección con respecto al plano de referencia, y $\phi_z(x, y)$

* A01625609; Also at Tec de Monterrey

† A01067387; Also at Tec de Monterrey

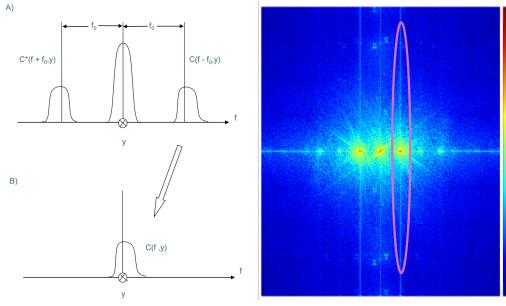


FIG. 1. Primer orden FT, contiene la fase con profundidad.

es la fase causada por la distribución de la altura del objeto.

En la Figura 2 tenemos un patrón de franjas proyectadas por un proyector, las franjas alcanzan al objeto en el punto H y cruzarán el plano de referencia en el punto DpHDc y CHF son similares.

$$\frac{h}{d} = \frac{l}{d-h} \quad (3)$$

Dejándonos la siguiente ecuación:

$$\phi(x, y) = \arctan\left(\frac{h(x, y)}{l}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

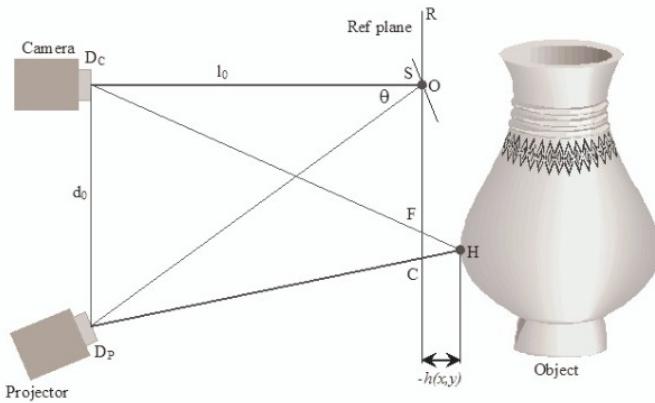


FIG. 2. Configuración experimental.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se estructuró en cuatro fases fundamentales que abarcan desde la proyección inicial de franjas hasta el procesamiento final de los datos obtenidos. A continuación, se detallan cada una de estas fases.

A. Proyección de franjas

Para la proyección, se implementó el arreglo mostrado en la Figura 3. La proyección de franjas se llevó a cabo mediante una rejilla de Ronchi impresa en un acetato, iluminada por una fuente de luz LED. La fuente de luz LED emite un frente de onda esférico con un grado de coherencia aproximado de 0.3[3]. El espectro del LED se muestra en la Figura 4[4]. El arreglo experimental para la proyección de franjas se describe en detalle en la Figura 2.



FIG. 3. Configuración experimental.

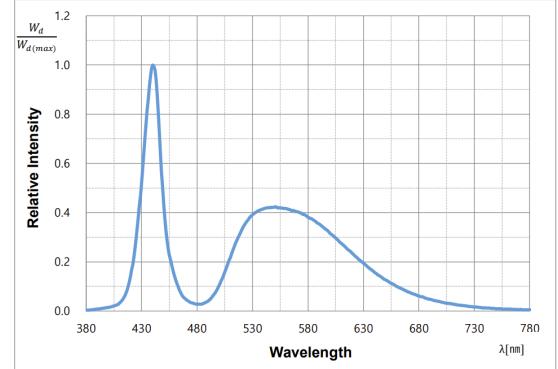


FIG. 4. Espectro de emisión LED blanco Samsung SPHWH1A1N3A0.

Entonces, una vez colocada la configuración experimental correctamente, se procedió a tomar fotografías de los objetos con las franjas proyectadas. El objetivo fue asegurar que los objetos tuvieran la mayor cantidad de franjas posible, una alta resolución y la menor cantidad de ruido [5]. Se capturaron imágenes tanto de las franjas con los objetos como de las franjas sin objeto, un ejemplo se muestra en la Figura 5.



FIG. 5. Ejemplo de imagen tomada por proyección de franjas.

B. Filtrado de Takeda

Ahora bien, como ya se mencionó previamente, para poder sacar la topografía de un objeto y extraer la fase de la imagen, se tiene que sacar la transformada de Fourier a la imagen tomada, para que a partir de ahí se pueda filtrar el primer orden de los tres picos que se forman. Takeda (1983)[1] menciona que con una ventana de Hanning se puede filtrar el primer orden. Sin embargo, Esquivel (2023)[6] y Chen (2010)[7] recomiendan usar filtro de pasabanda con forma rectangular o elíptica, ya que filtran el con un menor error. No obstante, para el método de filtrado espectral que se a realizar, se aplicará una ventana de Hann parcial, también conocida como ventana de Tukey, para filtrar el orden cero de Fourier. Posteriormente, se aplica una ventana cuadrada al primer orden, y de esa manera se realiza el filtrado espectral. Para este método se analizaron dos objetos, pero se desarrolló con un cargador Samsung mostrado en la Figura 6 para comprobar su funcionamiento de filtrado. También se muestran otras partes de la metodología, pero el filtrado de Takeda fue el elemento clave para la obtención de resultados consistentes. Los parámetros exactos de cada ventana variaron ya que cada imagen inducía diferente ruido y armónicos al Fourier.

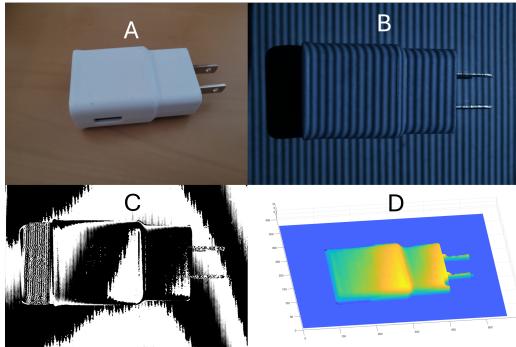


FIG. 6. Imagenes A-D muestran prototipo usado para desarrollo del metodo FTP.

C. Obtención de fase y desenvolvimiento

La obtención de fase del objeto se realizó mediante la transformada de Fourier inversa del espectro ya filtrado, como se indica en el proceso de FTP. En este caso, las fases discontinuas obtenidas estarán entre $-\pi$ y π . Se aplicó el algoritmo de desenvolvimiento de fase de Zixin Zhao (2024)[8], el cual utiliza la ecuación 5 de transporte de intensidad (TIE). Esta ecuación relaciona los cambios de intensidad con respecto a la fase, permitiendo aplicar un algoritmo robusto para corregir discontinuidades, dado que se conoce un cierto grado de continuidad en el flujo de la intensidad en la radiación.

$$-k \frac{\partial I(x, y)}{\partial z} = \nabla \cdot [I(x, y) \nabla \cdot \phi(x, y)] \quad (5)$$

D. Conversión fase a altura y postprocesado

Para la conversión de fase a altura se tomó como referencia la Figura 7 A partir de esto se hizo la conversión

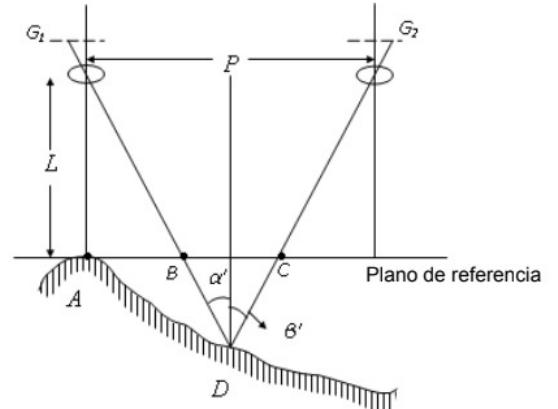


FIG. 7. Configuración experimental.

con la siguiente ecuación:

$$z(x, y) = \frac{NMbL}{P - NMb} \quad (6)$$

Después de la perfilometría inicial, se aplicó un proceso de postprocesamiento que involucró la sustracción de las franjas sin objeto del FTP para alinear el plano de referencia. Luego, se realizó una limpieza de imperfecciones fuera del área del objeto mediante la multiplicación con una capa binaria.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ERROR

Se tomaron dos objetos para analizarlos, corroborar la funcionalidad de lo códigos y compararlos con al altura

real. El primero fue la Figura 8, el cual se comparará con su resultado, Figura 9.



FIG. 8. Monita de yeso.

A continuación se observa una comparación entre los resultados obtenidos y el postprocesado Figura 9.

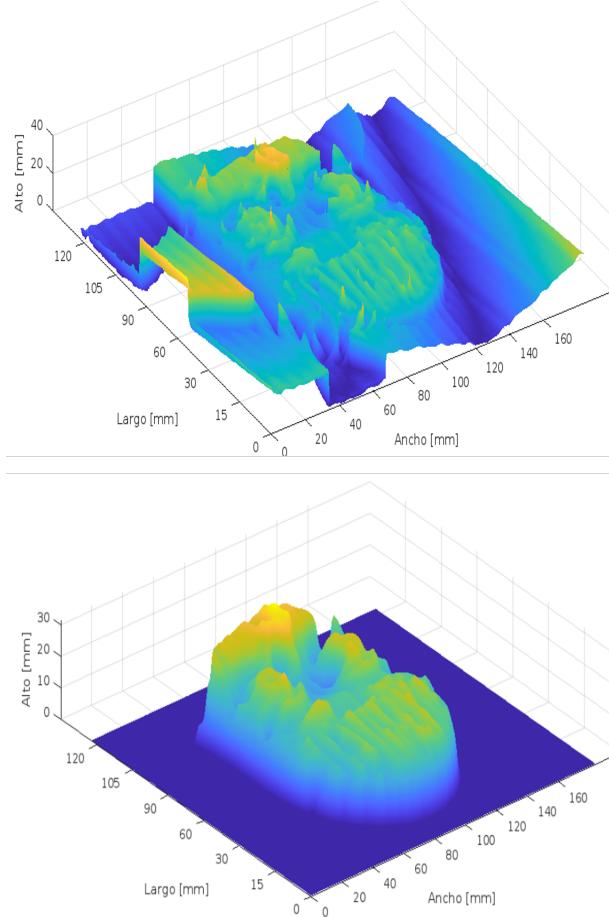


FIG. 9. FTP original y FTP postprocesado.

A partir de estos datos se obtuvieron, los errores:

Parte del objeto	Altura real (mm)	Altura FTP (mm)	Error %
Boca	24	26	8.3%
Cabello	24	22	8.3%
Costado	19	17	8.3%
Ojo	22	21	4.5%
Ceja	23	24	4.5%

TABLE I. Comparación entre la altura real y la altura reconstruida, junto con el error porcentual.

La siguiente figura, es una esfera de unicel Figura 10 y se comparó con su resultado, Figura 11



FIG. 10. Configuración experimental.

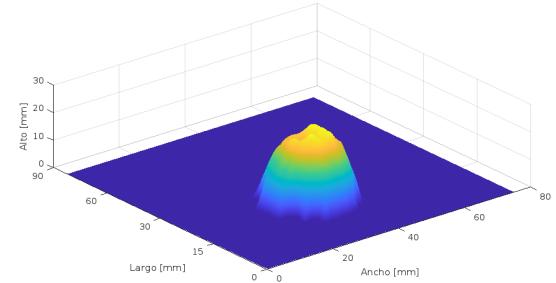


FIG. 11. Configuración experimental.

En este caso se realizó una sola medición y el error porcentual fue de 8.3%, por lo que el error final con las estimaciones de ambos objetos fue de 6.8%. Lo cual se considera un error aceptable y significativo para análisis dimensionales de mediana resolución.

V. CONCLUSIONES

La aplicación de metodologías adecuadas ha permitido realizar la reconstrucción 3D de objetos mediante la proyección de franjas. Durante el proceso experimental, se exploraron varios métodos de proyección, incluyendo el uso de un interferómetro. Sin embargo, nuestro principal desafío fue la generación de imágenes útiles para el análisis de Fourier, dado que una de las limitaciones del método radica en la alta definición requerida de las imágenes, así como en la necesidad de patrones claros y libres de ruido. A pesar de los desafíos mencionados, el método de Fourier destaca por su rapidez y la capacidad de obtener resultados valiosos incluso con imágenes que no son perfectas. Una aplicación sugerida para este

método es su implementación en las líneas de empaquetado de productos de retail, como ocurre en el caso de Amazon. Allí, algoritmos como ELAS se utilizan para estimar dimensiones y seleccionar tamaños adecuados de cajas para empacar objetos, aunque estos algoritmos son más lentos y requieren mayores recursos computacionales que el FTP. Por lo tanto, el FTP podría representar una mejora significativa en este contexto.

Este proyecto ha proporcionado una invaluable experiencia en investigación científica y ha permitido aplicar de manera efectiva los conocimientos adquiridos en el laboratorio de óptica. Se sugiere para futuras investigaciones mejorar la calidad de las imágenes utilizadas en el FTP y explorar el uso del análisis de componentes principales (PCA)[9] en el filtrado espectral para lograr una resolución aún mayor en las reconstrucciones 3D.

- [1] M. Takeda and K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-d object shapes, *Appl. Opt.* **22**, 3977 (1983).
- [2] J. C. Pedraza-Ortega, E. Gorrostieta-Hurtado, J. M. Ramos-Arreguin, S. L. Canchola-Magdaleno, M. A. Aceves-Fernandez, M. Delgado-Rosas, and R. A. Rico-Hernandez, A profilometric approach for 3d reconstruction using fourier and wavelet transforms, in *MICAI 2009: Advances in Artificial Intelligence*, edited by A. H. Aguirre, R. M. Borja, and C. A. R. Garcíá (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009) pp. 313–323.
- [3] D. S. Mehta, K. Saxena, S. K. Dubey, and C. Shakher, Coherence characteristics of light-emitting diodes, *Journal of Luminescence* **130**, 96 (2010).
- [4] Samsung Electronics Co., Ltd., HighPower LED C-SeriesGen3 3WWhite SPHWH1A1N3A0 - Product Family Data Sheet, Product Family Data Sheet (2022), Product Family Data Sheet Rev.1.8, 2022.05.26.
- [5] L. Chen and C. Quan, Fringe projection profilometry with nonparallel illumination: a least-squares approach, *Optics Letters* **30**, 2101 (2005).
- [6] S. Esquivel-Hernandez, R. Juarez-Salazar, and V. H. Diaz-Ramirez, First-order spectrum filtering in Fourier transform profilometry: a method comparison, in *Optics and Photonics for Information Processing XVII*, Vol. 12673 (SPIE Optical Engineering + Applications, 2023) p. 1267308, event: SPIE Optical Engineering + Applications, 2023, San Diego, California, United States.
- [7] L.-C. Chen, H.-W. Ho, and X.-L. Nguyen, Fourier transform profilometry (ftp) using an innovative band-pass filter for accurate 3-d surface reconstruction, *Optics and Lasers in Engineering* **48**, 182 (2010), fringe Projection Techniques.
- [8] Z. Zhao, Robust 2d phase unwrapping algorithm, MATLAB Central File Exchange (2024), retrieved May 7, 2024.
- [9] S. Feng, Q. Chen, C. Zuo, J. Sun, T. Tao, and Y. Hu, A carrier removal technique for fourier transform profilometry based on principal component analysis, *Optics and Lasers in Engineering* **74**, 80 (2015).

Anexos