

RECONSTRUCCIÓN 3D DE OBJETOS INMERSOS EN AGUA, UTILIZANDO LA TÉCNICA DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Zavala-De la Rocha Laura M., Anguiano-Morales Marcelino, Salas-Peimbert Didia P., Trujillo-Schiaffino Gerardo, Garduño-Wilches Ismael A.
Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Tecnológico No. 2909, Chihuahua, Chih., México, 31310,
Tel. (614) 2012000
lmzavala@itchihuahua.edu.mx, manguiano@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN

En este artículo proponemos una solución a la problemática de la reconstrucción 3D de aquellos objetos de interés que se encuentran inmersos en un medio distinto al del sistema de perfilometría. Para ello utilizamos la técnica de proyección de franjas, en la cual un patrón de luz estructurada proyectado sobre el objeto de interés es deformado por la geometría del mismo; al demodularse dicho patrón obtenemos la información necesaria para reconstruirlo tridimensionalmente. Debido a los efectos de la refracción y atenuación de la luz en el agua, el modelo matemático tradicional de esta técnica no es válido bajo las condiciones mencionadas, por lo cual debe ser modificado tomando en cuenta dichas consideraciones.

Palabras Clave: proyección de franjas, perfilometría 3D, mediciones bajo el agua

ABSTRACT

In this paper, we propose a solution for the problematic of 3D reconstruction of objects immersed in a different medium to that of the profilometry system. We use fringe projection technique, in which a structured light pattern projected onto the object of study is deformed because of the object's geometry; this pattern has to be demodulated to obtain the necessary information for the 3D reconstruction. Because of the effects of refraction and attenuation of light in the water, the traditional mathematical model of this technique is not valid under the mentioned conditions, whereby it has to be adapted taking into account these considerations.

Keywords: fringe projection, 3D profilometry, underwater measurements

1. INTRODUCCIÓN

Proyección de franjas es una técnica óptica basada en luz estructurada, cuyas aplicaciones en el área de perfilometría 3D son muy variadas [1,2]. Esta técnica consiste en iluminar el objeto de interés con un patrón de franjas generado sintéticamente (Figura 1) por una fuente de luz modulada [3]; dicho patrón será deformado por la geometría del objeto y una cámara CCD registrará la imagen resultante para ser procesada posteriormente por medio de alguna técnica de análisis de patrones de franjas [4], siendo el objetivo extraer el mapa de fase que contiene la información de la topografía del objeto.

Inicialmente, el mapa de fase resultante se encuentra contenido

en un rango de $-\pi$ a π , inherente al uso de la función Arcotangente, siendo entonces necesario un algoritmo de desenvolvimiento que nos permita obtener un mapa de fase continuo. Finalmente, por medio de un modelo matemático apropiado, se obtiene la altura del objeto en unidades reales.

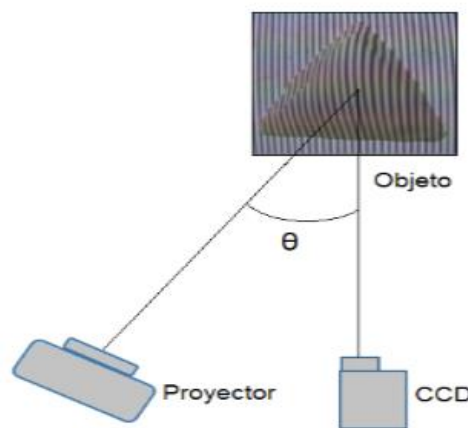


Figura 1. Configuración convencional de la técnica de proyección de franjas.

Generalmente, cuando la cámara y el objeto se encuentran en el mismo medio y, por lo tanto, el índice de refracción del medio que los rodea es el mismo para ambos, la técnica de proyección de franjas es relativamente sencilla de realizar. Sin embargo, si la cámara y el objeto se encuentran en distintos medios [5], esto es, en distintos índices de refracción, no es posible obtener mediciones óptimas utilizando el modelo matemático tradicional. Esto se debe a que el éxito de la reconstrucción 3D depende de varios factores a tomar en cuenta, y que deben ser considerados en nuestro modelo matemático para adaptarlo a una configuración heterogénea.

Los factores que afectan a un sistema de perfilometría 3D en una configuración heterogénea (aire-agua, en nuestro caso) están relacionados con dos fenómenos ópticos principales: refracción y atenuación de la luz. Debido a que la luz puede ser

refractada varias veces al atravesar diferentes medios, el camino óptico que recorre en una configuración heterogénea es mayor que el que recorre al atravesar un mismo medio, como ocurre en el caso de una configuración tradicional.

Los efectos que esto tiene en la imagen resultante, son muy conocidos: el tamaño aparente del objeto será mayor al tamaño real, siendo dependiente esta magnificación de las distancias entre el objeto y la lente de la cámara, así como del ángulo de observación de esta última y del índice de refracción del medio; así mismo, la diferencia entre la distancia aparente del objeto y su distancia real está relacionada también con estos parámetros, además de asociarse igualmente con el aparente desplazamiento lateral del objeto sobre el eje X y su deformación al ser observado desde distintos ángulos. En la Figura 2 se muestra la relación existente entre el ángulo de observación y la distancia aparente del objeto.

Otro fenómeno óptico importante a tomar en consideración es la atenuación [2,6], la cual se presenta como una reducción de la intensidad de la luz incidente al viajar por un medio, debido a la acción conjunta de la absorción y dispersión de la misma.

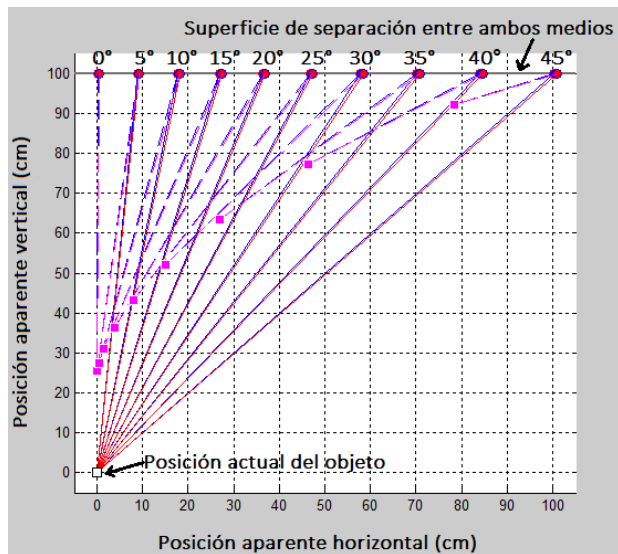


Figura 2. Relación entre el ángulo de observación y la distancia aparente del objeto.

Esta atenuación, debida a las características propias del medio, dificulta la detección de rasgos del objeto de interés al hacerlos menos visibles y, por lo tanto, dificultando su reconstrucción; además, es importante destacar que la atenuación es distinta para cada longitud de onda de la luz incidente.

2. TEORÍA

Como se mencionó previamente, la técnica de proyección de franjas consiste en la proyección de un patrón de franjas sobre

la superficie de un objeto de interés donde, por la geometría del mismo, dicho patrón será deformado; esta deformación se traduce en una diferencia de fase con respecto al mismo patrón proyectado sobre una superficie plana de referencia. Esta diferencia de fase contiene la información de la topografía del objeto.

En la Figura 3 observamos el esquema de esta técnica. El proyector se sitúa a una distancia D_1 del objeto, formando un ángulo Θ con el eje Z , el eje de observación sobre el cual se encuentra alineada la cámara CCD a una distancia D_2 del objeto en posición perpendicular al mismo; el objeto se ubica sobre el eje X y su área es abarcada en su totalidad por el campo de observación y el de proyección; esta área es representada en la Figura 3 por la variable x .

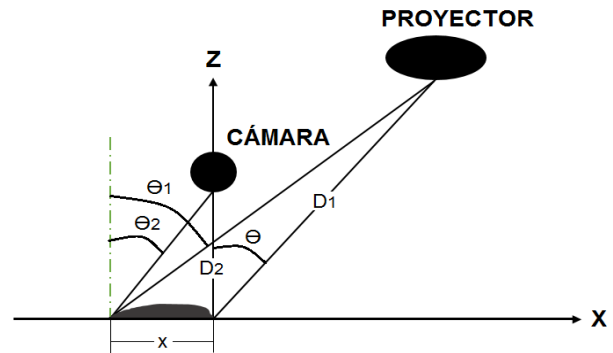


Figura 3. Geometría de la técnica de proyección de franjas.

La diferencia de fase denotada por $\psi(x)$ se expresa en la ecuación (1) en función de las distancias D_1 , D_2 , el ángulo Θ , el periodo del patrón de franjas P y la altura z del objeto [7]:

$$\psi(x) = \frac{z}{P \cos \theta} \left[\sin \theta + \frac{(D_2 - D_1 \cos \theta)x}{D_1 D_2} \right] \quad (1)$$

Para el caso en el cual el medio que rodea al objeto de interés es distinto al del sistema de perfilometría, se propuso una adaptación de la ecuación (1) tomando en cuenta los efectos de la refracción de la luz en el agua, lo cual se expresa de la siguiente manera:

$$\psi(x) = \frac{z}{P} \left[\tan \theta' + \frac{(D_2 - D_1' \cos \theta')x}{D_1' \cos \theta' D_2} + \frac{\Delta x}{D_2} \right] \quad (2)$$

donde

$$\Delta x = N(\tan \theta i - \tan \theta r) \quad (3)$$

En la Figura 4 se observa cómo se incrementa el camino óptico que sigue el haz de luz del proyector al atravesar el agua, siendo menor cuando el medio que rodea al sistema es el aire.

Estos nuevos parámetros presentes en el sistema deben tomarse en cuenta en nuestro modelo matemático, de manera que el resultado obtenido corresponda a la realidad.

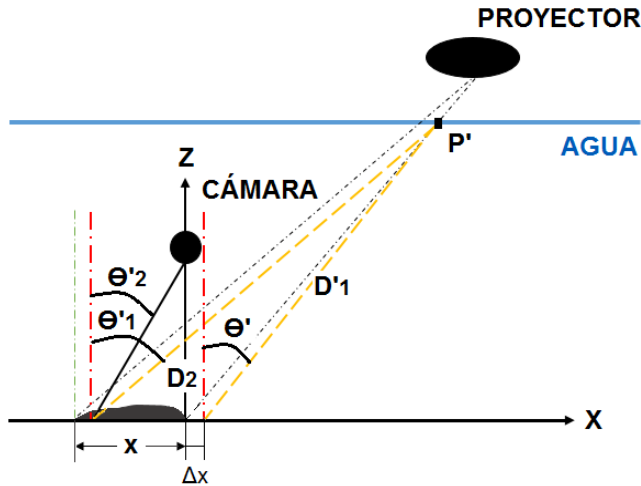


Figura 4. Configuración heterogénea de la técnica de proyección de franjas.

3. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

La primera etapa de esta investigación consistió en la implementación de la técnica de proyección de franjas en su configuración convencional (aire-aire), validando la ecuación (1) con objetos de prueba de distintas dimensiones.

En la Figura 5 se muestran algunas etapas de la reconstrucción 3D de un objeto con forma de cruz, la cual se llevó a cabo mediante el método de Takeda [8,9], en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 5a se muestra la imagen del objeto con un patrón de franjas deformado por la superficie del mismo; después de realizar el filtrado el objeto, se obtiene la fase envuelta como se muestra en la Figura 5b; la fase desenvuelta se presenta en la Figura 5c; una vez obtenida la fase desenvuelta, se obtiene la forma geométrica reconstruida del objeto como se muestra en la Figura 5d y, por último, se calcula la altura del objeto despejando la altura z de la ecuación (1), cuyo perfil se ve representado en la Figura 5e.

La segunda etapa consistió en añadir agua al arreglo experimental (Figura 6), obteniendo una imagen del mismo objeto con los efectos de la magnificación y atenuación de la luz.

Debido a que en esta configuración el eje de observación se sitúa perpendicularmente al objeto, no se presenta el desplazamiento lateral ni la deformación asociada, pero sí la

magnificación. El cálculo de la altura del objeto en el agua con la ecuación (1), se muestra en la Figura 7.

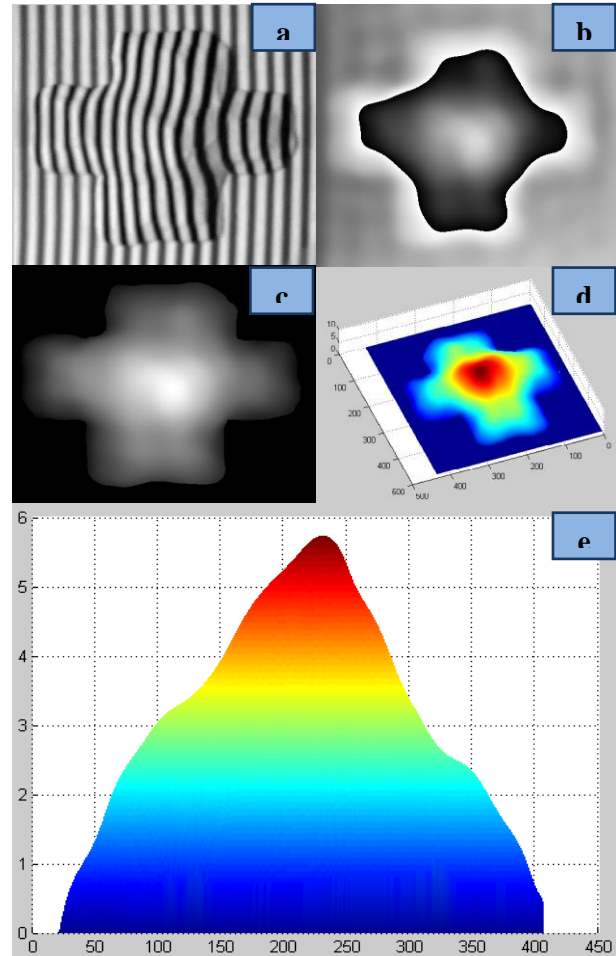


Figura 5. a) Imagen con un patrón de franjas deformado por la superficie del objeto; b) Fase envuelta; c) Fase desenvuelta; d) Forma geométrica reconstruida del objeto; e) Perfil de la altura del objeto.

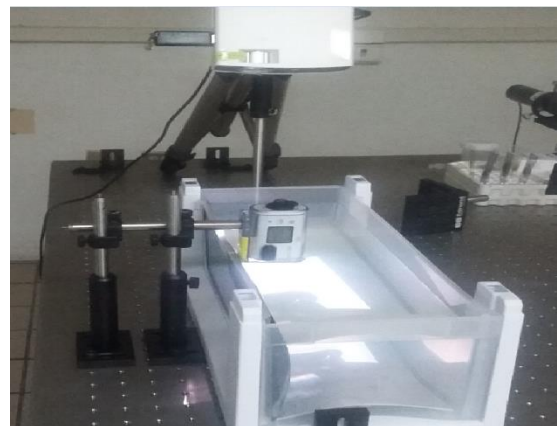


Figura 6. Arreglo experimental de la técnica de proyección de franjas en su configuración heterogénea.

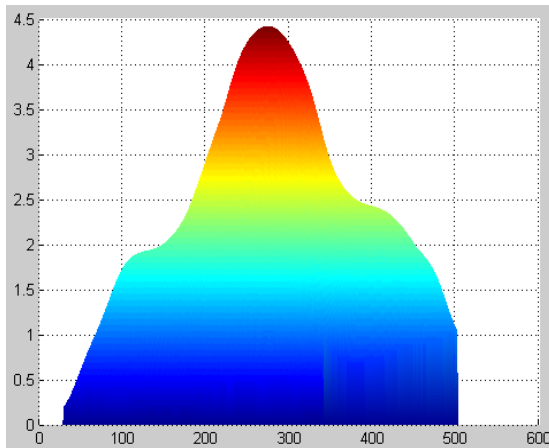


Figura 7. Altura del objeto obtenida con la ecuación (1).

Comparando las Figuras 5e y 7, podemos comprobar que el uso de la ecuación (1) para calcular la altura de un objeto en configuración heterogénea, proporciona resultados inexactos y por lo tanto no es válida bajo estas condiciones. Finalmente, aplicando la ecuación (2) para el cálculo de la altura del objeto en el agua (Figura 8), obtenemos mediciones de mayor exactitud.

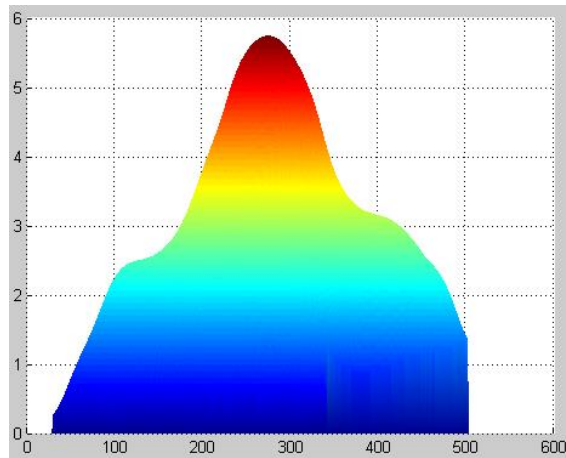


Figura 8. Altura del objeto obtenida con la ecuación (2).

Las diferencias observadas entre la fase obtenida en el aire y la obtenida en el agua se deben principalmente a la atenuación de la luz al atravesar el agua, lo cual, como se mencionó en la sección 1, hace menos visibles los rasgos del objeto, lo cual se aprecia en la Figura 9.

Como una etapa posterior de esta investigación, se pretende validar el modelo matemático propuesto con distintos objetos de prueba. Es necesario señalar que la cámara utilizada para esta investigación es una *action camera* comercial, cuya

resolución es muy inferior a la de una cámara CCD, con la desventaja adicional de presentar una fuerte distorsión de barril.

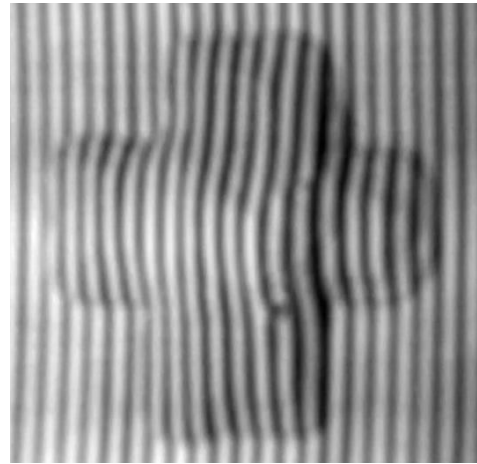


Figura 9. Imagen del objeto bajo el agua.

A pesar de estas y otras limitaciones propias del arreglo experimental, se ha logrado una buena implementación de la técnica de proyección de franjas con óptimos resultados que pueden mejorarse con equipo más sofisticado. Posteriormente corresponde introducir nuevos parámetros al sistema, como sería la atenuación de la luz debida a la absorción producida al añadir al agua alguna sustancia apropiada, así como experimentar con distintos ángulos de observación de la cámara con el objetivo de corregir el desplazamiento lateral asociado.

4. REFERENCIAS

- [1] Fu, Y. and Luo, Q. "Fringe projection profilometry based on a novel phase shift method." *Optics Express*, Vol. 19, October 2011, pp. 21739-21747.
- [2] Rodríguez-Vera, R., Pinto-Preciado, J.E., Aguayo, D.D., and Rayas, J.A. "Three-dimensional Underwater Measuring by Structured Light Projection." *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics in Proc. of Society for Experimental Mechanics Series*, Vol.3, 2014, pp. 77-83.
- [3] Geng, J. "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial." *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 3, March 2011, pp. 128-160.
- [4] Abdul-Rahman, H. "Three-Dimensional Fourier Fringe Analysis and Phase Unwrapping." Ph.D. thesis, Liverpool John Moores University, United Kingdom, 2007.
- [5] Sarafraz, A. "Topographic Reconstruction Through a Wavy Interface Using a Structure Light Technique." Ph.D. Thesis, University of Miami, Florida, 2012.
- [6] Bazeille, S., Quidu, I. and Jaulin, L. "Color-based underwater object recognition using water light attenuation." *Intelligent Service Robotics*, Vol. 5, Jan. 2012, pp. 109-118.
- [7] Gasvik, K. J. *Optical Metrology*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2002, pp. 180-277.
- [8] Takeda, M., Ina, H. and Kobayashi, S. "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry." *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 72, Jan. 1982, pp. 156-160.
- [9] Gonzalez, R.C., Woods, R.E. and Eddins, S.L. "Frequency Domain Processing" in *Digital Image Processing Using MATLAB*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2003, pp. 108-1