

RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR TRIANGULACIÓN DINÁMICA UTILIZANDO LÍNEAS MÚLTIPLES DE COLOR.

Quiroz Garcia Carlos Ivan, Zendejas Hernandez Edgar, Trujillo Schiaffino Gerardo, Salas Peimbert Didia Patricia, Anguiano Morales Marcelino, Corral Martínez Luis Francisco.
Tecnológico Nacional de México/I.T. Chihuahua, División de Estudios de Posgrado e Investigación,
Av. Tecnológico 2909, Chihuahua, Chih., México, 31310, Tel. +52 (614) 2012000
ci.quiroz.garcia@gmail.com

RESUMEN.

En este artículo se presenta un sistema de perfilometría por triangulación dinámica para la digitalización y reconstrucción computacional de objetos tridimensionales. El sistema aquí propuesto proyecta un conjunto de 3 líneas de color rojo, verde y azul respectivamente, mediante las cuales se obtiene la topografía del objeto. La proyección y captura de las líneas se realiza por medio de un proyector DLP y una cámara CCD. El procesamiento digital de imágenes y el procesamiento de la información adquirida se realizan por medio de un software desarrollado con ese fin. Se presenta el modelo matemático, el montaje experimental y los resultados obtenidos.

Palabras Clave: Perfilometría, triangulación, triangulación dinámica.

ABSTRACT.

In this paper, a dynamic triangulation profiling system is presented for the digitalization and computational reconstruction of three-dimensional objects. The system proposed projects a set of 3 lines in red, green, and blue respectively, through which the topography of the object is obtained. The projection and capture of the lines is done by means of a DLP projector and a CCD camera. The digital processing of images and the processing of acquired information are carried out through software developed for this purpose. The mathematical model, experimental set-up, and results obtained are presented.

Keywords: Profilometry, triangulation, dynamic triangulation.

1. INTRODUCCIÓN

La perfilometría tridimensional óptica hace uso de diversas técnicas de luz estructurada mediante las cuales es posible obtener la topografía de una superficie sin necesidad de contacto físico[1].

Por lo general, estas técnicas proyectan algún patrón de luz sobre la superficie u objeto bajo prueba[2]. Este patrón sufre deformaciones en función de la geometría de la superficie y mediante el análisis adecuado de estas deformaciones es posible obtener las características topográficas del objeto[3].

La gran mayoría de los escáneres tridimensionales están conformados por una unidad de proyección, generalmente un proyector o un láser, una cámara y una computadora o algún otro tipo de unidad de procesamiento.

La perfilometría por triangulación basa su principio de operación en proyectar un haz de luz, usualmente una línea,

punto o borde, este haz de luz se deforma debido a la geometría del objeto y mediante la unidad de adquisición este haz deformado es capturado para posteriormente analizarlo. A través de geometría simple es que se correlacionan las deformaciones en el haz de luz con la altura y forma del objeto[4]. Generalmente la perfilometría por triangulación utiliza bases giratorias o monturas móviles mediante las cuales se gira o desplaza el objeto o el sistema de captura-proyección con el fin de obtener reconstrucciones completas del objeto. En la figura 1 podemos observar la geometría de análisis utilizada en esta técnica.

Los puntos E_c y E_p corresponden a la pupila de entrada de la lente de la cámara y a la pupila de salida de la lente del proyector respectivamente. Por su parte el ángulo θ_1 es un valor constante que se obtiene al medir el ángulo existente entre el haz proyectado y el haz capturado.

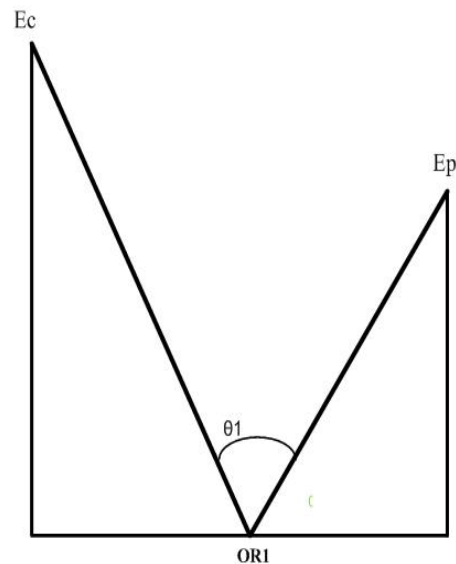


Fig.1. Geometría de análisis utilizada en perfilometría por triangulación.

Cheng et al[5] proponen un método automatizado para obtener la topografía en 360 grados de objetos difusos en la que utilizan una base giratoria en la que se coloca el objeto para así poder

moverlo y poder obtener la reconstrucción completa del su superficie.

La técnica aquí propuesta (perfilometría por triangulación dinámica) aprovecha la simplicidad del análisis geométrico de la perfilometría por triangulación pero propone que en lugar de hacer uso de elementos móviles se haga uso de un proyector mediante el cual se proyectará no una, sino 3 líneas que se desplazarán a lo largo de la superficie a analizar, esto con el fin de obtener el modelo tridimensional del objeto sin la necesidad de mover el objeto o el sistema de captura-proyección.

Debido a las características antes mencionadas, se ha optado por nombrar a esta técnica perfilometría por triangulación dinámica de líneas múltiples.

Además de esto se presenta una configuración del sistema de proyección diferente a las normalmente utilizadas en la que tanto el proyector como la cámara se colocan de manera ortogonal al plano de referencia, esto permite disminuir los problemas de distorsión que normalmente se presentan en estos escáneres.

2. TEORÍA

2.1. Perfilometría por triangulación dinámica

La perfilometría por triangulación dinámica o PTD recibe este nombre debido a que el triángulo que se forma entre el proyector, la cámara y el patrón proyectado se modifica cada vez que el patrón se desplaza sobre la superficie del objeto, como se muestra en la figura 2.

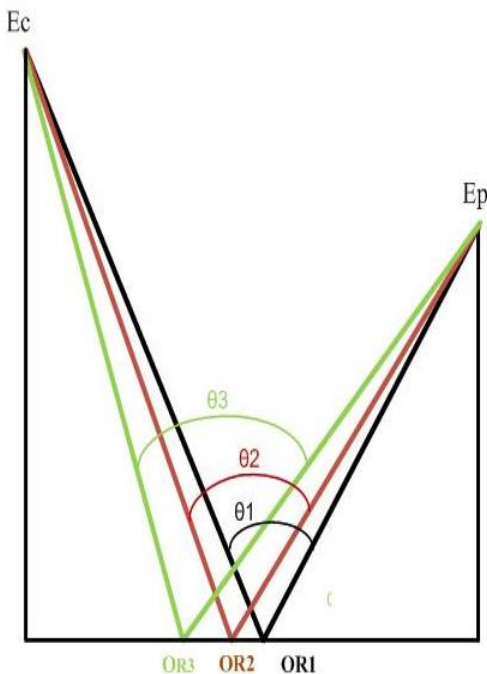


Fig. 2. Geometría de análisis utilizada en perfilometría por triangulación dinámica.

Al igual que en la perfilometría triangular, el punto Ec y Ep corresponden a la pupila de entrada de la lente de la cámara y a la pupila de salida del proyector. En este caso podemos observar como el ángulo θ cambiará de valor en función del desplazamiento de la línea proyectada.

Usualmente el patrón utilizado es un punto o una línea que recorre por completo la superficie del objeto. Respecto al sistema de coordenadas utilizado en la PTD el eje X y el eje Y se encuentra en el plano de referencia y el eje Z es perpendicular al mismo.

De acuerdo con el trabajo desarrollado por Zendejas[6], una línea es proyectada desde el punto Ep hasta la superficie del objeto y del plano de referencia. La línea se verá deformada en las zonas en las que se encuentra el objeto y como consecuencia se desplazará del punto de referencia O_R al punto Z_{pr} como se observa en la fig. 3.

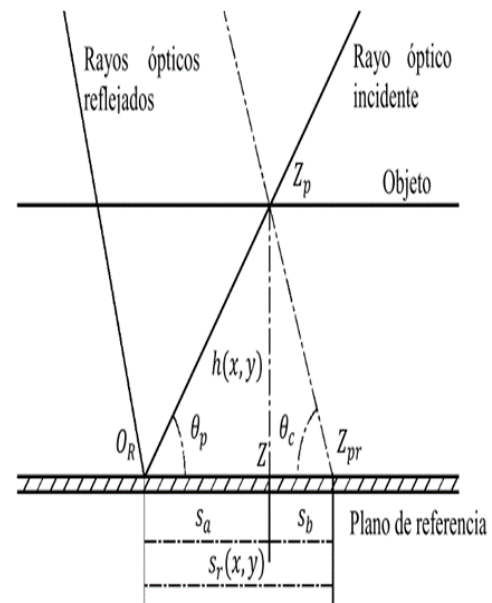


Fig. 3. Parámetros utilizados en triangulación dinámica.

Al capturar esta información por medio de una cámara, se generan en el plano imagen los puntos O'_R y Z'_{pr} , este desplazamiento será proporcional a la altura del objeto y se expresa como:

$$S(x, y) = Z'_{pr} - O'_R \quad (1)$$

El resultado que se obtiene al resolver la expresión anterior viene dado en píxeles, por tanto es necesario realizar la conversión a milímetros multiplicando a $S(x, y)$ por un factor de conversión k como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_R(x, y) = k \times S(x, y) \quad (2)$$

El factor de conversión k es una constante que resulta de la relación entre píxeles y milímetros y es obtenida utilizando los parámetros de la cámara y los parámetros del montaje:

$$k = \frac{(Tamaño\ de\ píxel)(Hc)}{f} \quad (3)$$

El término f corresponde a la longitud focal de la lente de la cámara y Hc a la distancia entre la lente y el plano de referencia. Por medio de un análisis matemático en los triángulos semejantes $\Delta EcZprOc \sim \Delta ZpZprZ$ y $\Delta EpOrOp \sim \Delta ZpOrZ$ que se encuentran en la figura 3 y 4 se obtiene la altura del objeto por medio de la siguiente fórmula:

$$h(x, y) = \frac{S_R(x, y)(HcHp)}{XcHp + XpHc} \quad (4)$$

Donde Hp corresponde a la distancia entre el proyector y el plano de referencia, Xc es la distancia entre la línea proyectada y el punto O_c que corresponde al centro de la lente de la cámara y Xp representa la distancia existente entre la línea proyectada y el punto O_p correspondiente al centro del proyector. En la figura 4 podemos observar el diagrama del trazo de rayos que permite determinar dichos parámetros.

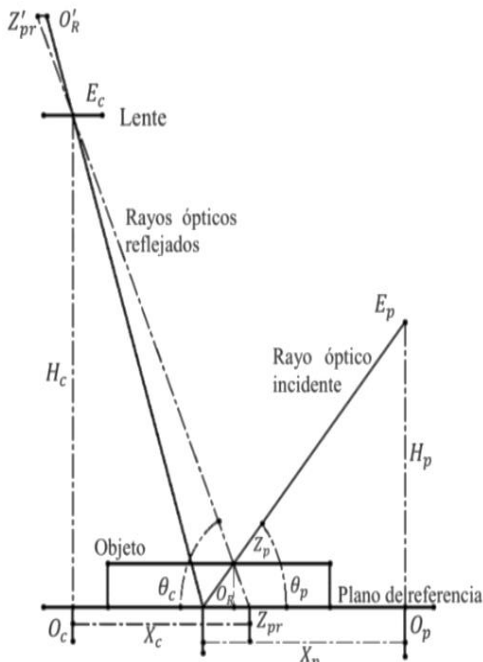


Fig.4. Trazo de rayos del montaje experimental.

2.2. Configuraciones comunes del sistema de proyección

Varias configuraciones del sistema de proyección se pueden encontrar en la literatura, Ribbens et al[7] las clasifican en 3

configuraciones en función de las diferencias que presentan entre la alineación de la unidad de proyección y la cámara con el plano de referencia.

La primera configuración propone colocar la unidad de proyección de forma perpendicular al plano de referencia y la cámara con un ángulo α como se observa en la Fig. 5.

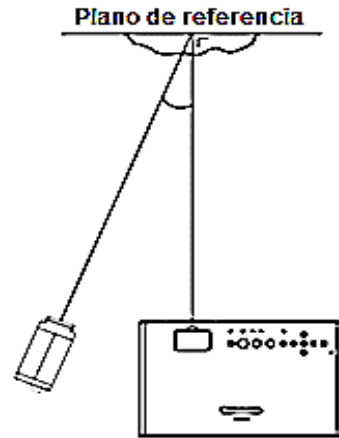


Fig.5. Configuración 1.

Esta configuración presenta un inconveniente, la relación existente entre los píxeles de la cámara y unidades reales es difícil de calcular, razón por la cual es necesario calibrar la cámara y conocer la posición exacta de la cámara para así poder calcular correctamente las coordenadas X y Y.

La segunda configuración, Fig. 6, coloca la cámara de manera perpendicular al plano de referencia y el proyector es el que se coloca con un ángulo α .

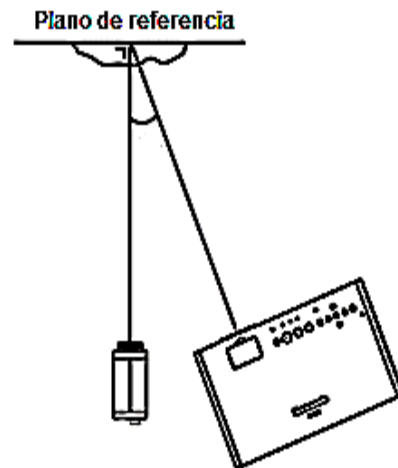


Fig.6. Configuración 2.

Esta configuración no presenta el problema de relación entre píxeles y unidades reales debido a la posición de la cámara, por

lo tanto, en esta configuración la relación de píxeles a unidades reales se realiza de manera directa.

La última configuración, mostrada en la figura 7, propone colocar tanto la cámara como el proyector a un cierto ángulo, debido a esto, es sumamente complicado obtener la relación de píxeles a unidades reales.

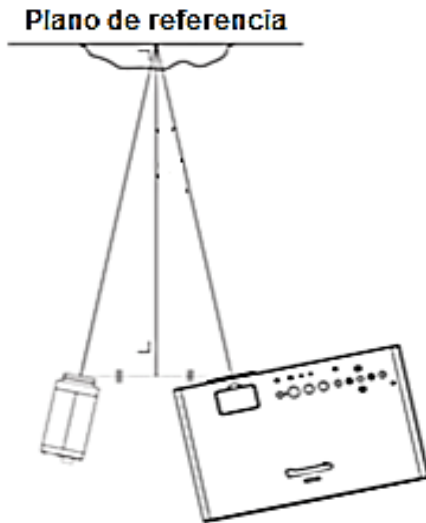


Fig.7 Configuración 3.

2.3. Configuración del sistema de proyección propuesta

La configuración aquí propuesta se observa en la Fig. 8, en esta configuración se coloca la cámara y el proyector de manera ortogonal al plano de referencia.

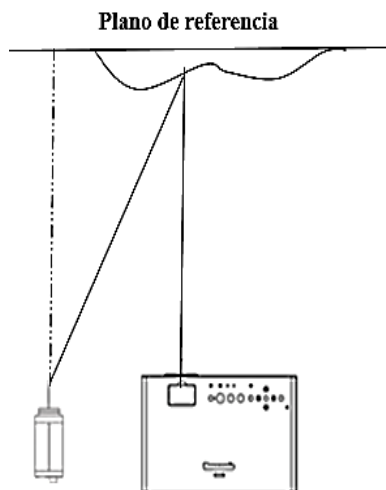


Fig.8. Configuración propuesta.

El colocar ambos elementos de esta forma reduce en gran medida problemas relacionados con la distorsión que se genera al colocar alguno de estos elementos con algún ángulo entre ellos y el plano de referencia.

Giesko et al[8] mencionan que parte fundamental del principio de triangulación está basado en la medición del ángulo de visión del patrón proyectado sobre la superficie del objeto. Evidentemente la configuración que se propone no cuenta con este ángulo en alguno de sus dos elementos.

En vez de colocar el proyector o la cámara a un determinado ángulo, es la proyección la que se genera con un cierto ángulo. Esta característica en particular permite que sea posible generar una proyección con un ángulo variable y por lo tanto hacer uso de la perfilometría por triangulación dinámica.

3. IMPLEMENTACIÓN

Haciendo uso del principio de perfilometría por triangulación dinámica es posible hacer uso de 3 líneas que, de manera simultánea, se proyecten sobre la superficie a analizar con el fin de obtener su topografía utilizando un menor número de capturas, esto da como resultado que el tiempo requerido para realizar la reconstrucción tridimensional del objeto sea menor. El software utilizado se desarrolló utilizando LabVIEW®.

3.1. Montaje experimental

El montaje utilizado se presenta en la Fig. 9. Se puede observar que la distancia entre la cámara y el proyector con el plano de referencia son diferentes para cada uno de los elementos, esto debido a que se buscó que la relación del campo de visión de la cámara y el área de proyección se mantuviera 1:1.

La cámara utilizada (Chameleon CMLN-13S2C-CS) tiene una resolución de 1296x964 píxeles, en conjunto con la cámara se utilizó una lente doble gauss Edmund 54857. El proyector utilizado fue un Toshiba TDP-FF1A con tecnología DLP.

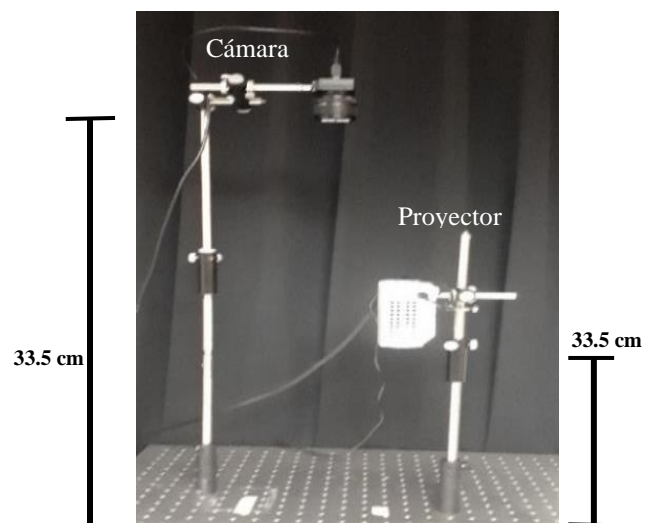


Fig. 9. Montaje experimental.

3.2. Proyección y adquisición de líneas

Las 3 líneas que se proyectan sobre el objeto tienen la característica de ser de 3 colores diferentes, en este caso rojo, verde y azul, esto con el fin de poder hacer diferencia entre cada una de ellas al momento de procesar la información. La disposición de las líneas en el área de proyección se define de tal modo que el área total se divida en 3 secciones, correspondiéndole a cada una de estas secciones una de las líneas.

Para iniciar con el proceso de proyección y adquisición de las imágenes se define el número de capturas que se desean realizar, cuanto mayor es este número, más información del objeto es posible adquirir y por lo tanto se mejora la calidad de la reconstrucción generada.

El tamaño del desplazamiento de las líneas se calcula en función del número de capturas que se realicen, entre más capturas se realicen mucho más pequeño será el desplazamiento de la línea, esto permite obtener muchos más detalles de la topografía del objeto.

Para adquirir la información se desarrolló un algoritmo que primero proyecta el patrón de 3 líneas sobre el objeto, después realiza la captura y finalmente realiza un desplazamiento de las 3 líneas. Este ciclo se repite hasta que se cumple con el número de capturas solicitadas. En la Fig. 10 podemos ver el patrón de 3 líneas proyectado sobre el objeto bajo prueba.



Fig.10. Proyección de patrón de 3 líneas sobre el objeto.

3.3. Análisis de líneas

Para realizar el análisis de las líneas en cada una de las imágenes capturadas, se desarrolló un algoritmo que detecta las 3 líneas contenidas en la imagen para luego generar una máscara que luego se aplica con el fin de eliminar la información no deseada y así evitar problemas en procesamientos posteriores.

Luego de aplicar la máscara se analiza la imagen resultante para identificar cada una de las líneas, cabe mencionar que al estar trabajando con líneas de 3 colores, es necesario elegir un método adecuado para detectar de manera adecuada cada uno de los 3 colores correspondientes a las líneas. Para este fin se decidió utilizar el modelo de color HSL pues permite identificar los colores por medio del plano de matiz ya que a cada color le corresponde un rango específico. La identificación de cada línea se realizó umbralizando cada una de las imágenes 3 veces,

una para cada línea. En cada una de estas operaciones se establece un rango adecuado que permite identificar los colores correspondientes a las 3 líneas.

Cuando la información correspondiente a las líneas es obtenida se aplica una corrección a las líneas debido a que gran parte del éxito de esta técnica se centra en que las líneas proyectadas sean completamente horizontales. La corrección aplicada modela las líneas proyectadas obteniendo la pendiente de la línea, de este modo compensa la imagen para simular un borde horizontal.

Con la imagen compensada se genera el mapa de alturas de cada una de las imágenes capturadas para finalmente fusionar toda la información y así obtener el mapa de alturas de todo el objeto. En la Fig. 11 podemos observar la reconstrucción obtenida.

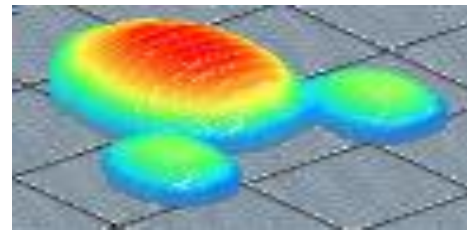


Fig.11. Reconstrucción tridimensional generada.

4. CONCLUSIONES

Se presenta una técnica novedosa de perfilometría 3D en la que se utilizan 3 líneas de color que se desplazan sobre un objeto para obtener la información topográfica del mismo. A esta técnica se le denomina perfilometría tridimensional por triangulación dinámica de líneas múltiples.

Se demuestra que por medio de la configuración del sistema de proyección propuesto es posible implementar la técnica de perfilometría por triangulación dinámica para múltiples líneas. Una de las mayores ventajas de esta técnica es que no se necesitan de elementos móviles con los que se mueva el sistema de proyección o el objeto ya que los desplazamientos de las líneas se realizan mediante la proyección y no de manera mecánica.

Al proyectar múltiples líneas el tiempo de adquisición de imágenes se reduce ya que en un menor número de capturas se adquieren mayor número de líneas, esto permite generar reconstrucciones en un menor tiempo en comparación con los escáneres tradicionales de una sola línea.

Como trabajo a futuro se propone agregar 3 líneas más al patrón proyectado, esto se con el fin de reducir aún más el tiempo que se necesita para que las líneas recorran el objeto completamente.

Se busca también desarrollar una etapa de pre-procesamiento de la imagen en la que se adquieran las dimensiones generales del objeto con el fin de proyectar el patrón de líneas solamente en el área comprendida por el objeto, esto permitirá aprovechar al 100% la totalidad de las líneas.

5. REFERENCIAS

- [1] N. Tornero-Martínez, G. Trujillo-Schiaffino, D. P. Salas-Peimbert, M. Anguiano-Morales, L. F. Corral-Martínez, and I. A. Garduño-Wilches, "3-D Surface Profilometry by Direct Color-Fringe Identification and an Orthogonal Setup," in *Imaging and Applied Optics 2018*.
- [2] T. Yoshizawa, *Handbook of optical metrology: Principles and applications*, 1st ed. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, 2009.
- [3] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128–160, Jun. 2011.
- [4] K. Harding, *Handbook of Optical Dimensional Metrology*, 1st ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013.
- [5] X.-X. Cheng, X.-Y. Su, and L.-R. Guo, "Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 10, pp. 1274–1278, Apr. 1991.
- [6] E. Zendejas *et al.*, "Perfilómetro tridimensional basado en la fusión de datos obtenidos por corrimiento de fase y triangulación," in *Congr. Int. Ing. Electrón. Mem. ELECTRO*, 2016, vol. 38, pp. 94–98.
- [7] B. Ribbens, S. Vanlanduit, J. J. J. Dirckx, and P. Cools, "Fringe projection simulation software for 3D shape measurements," in *10th IMEKO Symposium Laser metrology for precision measurement and inspection in industry 2011*, 2011, vol. 2156, pp. 185–191.
- [8] T. Giesko, A. Zbrowski, and P. Czajka, "Laser Profilometers for Surface Inspection and profile measurement," pp. 97–108, 2007.