

Análisis preliminar de un sistema de reconstrucción tridimensional multicaptor¹

Artículo de Investigación Científica - Fecha de recepción: 28 de marzo de 2013 - Fecha de aceptación: 25 de mayo de 2013

Manuel Barrera Amorocho

Ingeniero Mecánico. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. pochowar@hotmail.com

Gonzalo Torres Quintero

Ingeniero Mecánico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. pinchote1@hotmail.com

Carlos Contreras Pico

Físico. Magíster en Física. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, ricardocp07@gmail.com

Jaime Meneses Fonseca

Físico. Doctor en Física. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, jaimen@uis.edu.co

Para citar este artículo / to reference this article:

M. Barrera, G. Torres, C. Contreras, and J. Meneses, "Análisis preliminar de un sistema de reconstrucción tridimensional multicaptor," *INGE CUC*, vol. 9, no. 1, pp. 129-142, Jun, 2013.

RESUMEN

La reconstrucción tridimensional (3D) es una técnica cuyas aplicaciones van desde el campo industrial hasta la medicina estética. Estudios para su implementación y mejoramiento han sido analizados en todo el mundo, pero infortunadamente los resultados de dichos estudios están altamente protegidos y son de difícil acceso. Este trabajo trata específicamente de la reconstrucción tridimensional por medio de la técnica de proyección de franjas. Para ello se implementó un sistema multicaptor que consta de dos sistemas de proyección-observación. Adicionalmente, en este trabajo se realiza el empalme de dos reconstrucciones obtenidas independientemente por cada uno de los sistemas de proyección-observación; de esta manera resulta información metrológica en zonas de los objetos que se quieren reconstruir, que son de difícil acceso. Este proceso se lleva a cabo partiendo de referencias obtenidas mediante la realización de calibraciones rigurosas de los sistemas.

Palabras clave

Reconstrucción tridimensional, proyección de franjas, sistema multicaptor.

1 Artículo derivado del proyecto de investigación titulado: "Diseño y desarrollo de dispositivos de reconstrucción tridimensional aplicados a la exploración topográfica corporal y facial". Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander (UIS, Bucaramanga).

*Preliminary analysis of a multi-captor
three-dimensional reconstruction system*

ABSTRACT

The use of three-dimensional reconstruction's technique may range from industrial to aesthetic medicine fields. Studies for the implementation and refinement of this technique have been tested worldwide, but unfortunately, the results of these studies are highly protected and are difficult to obtain. The analysis developed in this research is specifically about three-dimensional reconstruction using the fringe projection technique. A multicaptor system was implemented in it consisting of two sets of projection-observation. Additionally, a splice between the two reconstructions obtained independently by each of the projection-observation systems was made; in this way, it was possible to obtain metrological information of the objects in zones in order to reconstruct them. This process is carried out based on references obtained through rigorous calibration processes of the systems.

Keywords

Three-dimensional reconstruction, fringe projection, multicaptor system.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el proceso de digitalización de la información toma gran fuerza, desde la medicina hasta la arqueología, pasando por un sinnúmero de campos en los cuales la información requiere ser tratada de manera no convencional. La extracción de información topográfica de un objeto: área, volumen, contorno, regiones cóncavas y convexas, detalles específicos en general, es un proceso requerido en diversos ámbitos. Debido a esta necesidad, ha venido aumentando el auge de la reconstrucción desde hace varios años; a manera de ejemplo se pueden encontrar aplicaciones médicas como: mediciones tridimensionales intraorales [1], control de las deformaciones de las paredes vasculares [2], medición de la forma del cuerpo humano para el tratamiento de radioterapia guiada [3], medición de las deformaciones de la espalda baja [4], medición de la topografía de la piel para uso en cosmetología [5], entre otras. Dentro de las aplicaciones industriales y científicas están: análisis de vibraciones [6], análisis de corrosión [7], medición de rugosidades sobre superficies [8], ingeniería inversa [9] y visualización del flujo de calor [10], entre otras.

Sin embargo, muchas de estas aplicaciones se realizan con dispositivos robustos, voluminosos y, por supuesto, con codificación de alta complejidad, haciendo difícil su programación y posterior uso, de tal manera que se limita a unas cuantas aplicaciones.

En este trabajo se presenta un dispositivo preliminar de reconstrucción tridimensional formado por dos sistemas de proyección-observación, que permite obtener información metrológica de los

objetos de estudio sobre áreas de difícil acceso o zonas ocultas que se presentan cuando se usa un solo módulo de proyección-observación.

RECONSTRUCCIÓN 3D POR EL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Un sistema típico de proyección de franjas está formado por un proyector y una cámara (Fig. 1). El proyector se usa para trazar un patrón sobre la superficie del objeto de estudio. Debido a la variación de altura de la superficie del objeto, el patrón proyectado se distorsiona, el patrón distorsionado se captura usando la cámara, la cual forma un ángulo específico con respecto a la dirección de proyección. Luego se calcula un mapa de fase bidimensional (2D) a partir de métodos de recuperación de fase, tales como el método de transformación de Fourier [11], el método de transformación de Hilbert [12] o la técnica de corrimiento de fase [13]. Por medio de un procedimiento de calibración que permite convertir el mapa de fase 2D a altura sobre la superficie de un objeto, que también es llamado mapeo fase-altura, se puede reconstruir el perfil de la superficie o la deformación del objeto.

La revisión bibliográfica permite establecer diferentes estrategias de modelación para realizar la calibración de un sistema de proyección de franjas. Básicamente, los montajes experimentales son de dos tipos: particulares y generalizados. En el primer caso la cámara y el proyector se ubican en posiciones específicas. Por ejemplo, [14] ubica el eje óptico de la cámara perpendicular al plano de referencia y el eje óptico del proyector forma un ángulo con respecto al eje óptico de la cámara; estos ejes se cruzan

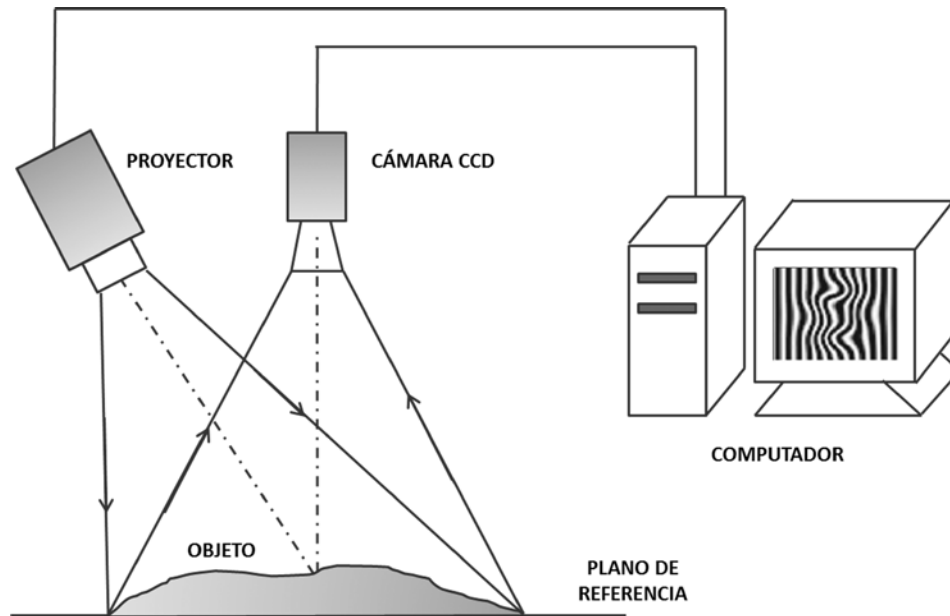


Fig. 1. Montaje experimental de un sistema de proyección de franjas

Fuente: Elaboración propia

sobre el plano de referencia. La pupila de entrada de la cámara y la pupila de salida del proyector se encuentran en un plano perpendicular al plano de referencia. Para esta situación la ecuación de conversión fase-altura depende de los parámetros del montaje y está dada por (1) [14]:

$$h(x, y) = \frac{I_0 \phi(x, y)}{\phi(x, y) + 2\pi f_0 d}, \quad (1)$$

donde d y I_0 son los parámetros del montaje óptico; d representa la distancia entre la pupila de entrada de la cámara y la pupila de salida del proyector, f_0 representa la frecuencia espacial del patrón de franjas proyectado. $\phi(x, y)$ es la fase relacionada con la forma del objeto. En algunos casos dichos parámetros se pueden medir, pero generan errores en la medición por la dificultad de de-

finir los ejes ópticos o las posiciones de las pupilas, etc. En otros casos [15] estos valores se determinan de manera indirecta, usando un objeto patrón de dimensiones conocidas. En los montajes experimentales generalizados la cámara y el proyector no tienen condiciones específicas, solo se busca que sus campos de observación se superpongan para explorar el objeto de estudio. La calibración del sistema de proyección-observación se realiza desplazando el plano de referencia en dirección perpendicular a incrementos conocidos, empleando motores de traslación con alta precisión, de esta manera, para cada píxel en el plano imagen de la cámara se obtienen datos experimentales de fases y alturas para el volumen de calibración. Estos se ajustan a partir del método de mínimos cuadrados, empleando polinomios o funciones fraccionales. El principal inconveniente se presenta debido al uso de motores de alta precisión.

Aunque la coordenada z de un punto sobre la superficie se determina a partir de la curva de calibración, las coordenadas transversales (x, y) se calculan en función del montaje experimental. En situaciones particulares, donde el eje óptico de la cámara es perpendicular al plano de referencia, se asume un modelo telecéntrico de observación y con el simple factor de ampliación geométrico se determinan las coordenadas transversales. En situaciones más exactas o generalizadas, debido al carácter no-telecéntrico en la proyección y observación se suele emplear la modelización del sistema usando proyección puntual, comúnmente llamada modelo pinhole. Este modelo emplea parámetros de calibración extrínsecos e intrínsecos, comúnmente usados en la calibración de cámaras CCDs. Se recurre tradicionalmente al uso de un patrón de calibración en forma de tablero de ajedrez y a un procedimiento de optimización no lineal.

ALGORITMO DE CORRIMIENTO DE FASE

Las técnicas de corrimiento de fase son de uso extendido en metrología óptica debido a que poseen las siguientes características: (i) medición punto a punto, (ii) es menos sensible a las variaciones de las características reflectantes de la superficie, por lo tanto se pueden usar para medir superficies muy complejas, (iii) es menos sensible a la luz del ambiente. Se han desarrollado una variedad de algoritmos de corrimiento de fase, que incluyen tres pasos (tres imágenes), cuatro pasos (cuatro imágenes) y algoritmos de mínimos cuadrados. Para sistemas de medición 3D en tiempo real, el algoritmo de corrimiento

de fase de cuatro pasos es uno de los más usados. En este caso la diferencia de fase se escoge igual a $\pi/2$. Para esta técnica, se usan cuatro imágenes cuyas intensidades se pueden representar como,

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)], \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2], \quad (3)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi], \quad (4)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2], \quad (5)$$

donde $I'(x, y)$ es la intensidad promedio, $I''(x, y)$ es la intensidad de modulación y $\phi(x, y)$ es la fase que debe ser recuperada. A partir de las ecuaciones (2)-(5) se puede obtener la fase, la cual está dada por (6).

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right), \quad (6)$$

y el contraste de las franjas, que está dado por (7).

$$I''(x, y) = \frac{\sqrt{(I_2 - I_4)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2}. \quad (7)$$

La ecuación (6) solo proporciona los valores de fase ubicados en el intervalo $[-\pi, +\pi)$. Si se usan múltiples franjas, se necesita un algoritmo de corrección de fase para obtener el mapa de fase 2D. Esta fase, frecuentemente considerada como fase relativa, es relativa a un punto en el mapa de fase.

La fase absoluta es el valor de la fase que es relativo a las fases predefinidas.

En la proyección de franjas digitales y los sistemas de corrimiento de fase, la fase obtenida a partir de las franjas generadas por una computadora puede ser considerada como la fase predefinida. Para obtener la fase absoluta, al menos un punto sobre una región específica debe tener el valor de fase conocido.

Una marca, ya sea un punto, una línea o cualquier otra característica visible se puede usar como referencia para convertir la fase relativa a la fase absoluta. La marca se traza por el proyector y se captura por medio de la cámara. Luego se usa un algoritmo que permita identificar las marcas. Debido a que la fase en la marca es predefinida, la fase relativa necesita ser desplazada para asegurar que el valor de la fase sea igual al valor predefinido. Se asume que el punto de referencia sobre las franjas generadas por la computadora tiene la fase absoluta 0, y en la imagen adquirida por la cámara, la fase relativa ϕ_0 , el mapa de fase relativo se puede convertir al mapa de fase absoluto por medio de (8).

$$\phi_a(x, y) = \phi(x, y) - \phi_0. \quad (8)$$

SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN 3D IMPLEMENTADO

El sistema que se implementó consta de dos sistemas de proyección-observación (Fig. 2); este está conformado por dos proyectores (el primero Mitsubishi SL-4U y el segundo Aigo-PT6216) y dos cámaras CCDs (UI-2310-M); el sistema de reconstrucción fue controlado a través de una interfaz desarrollada en el lenguaje de programación MATLAB®.

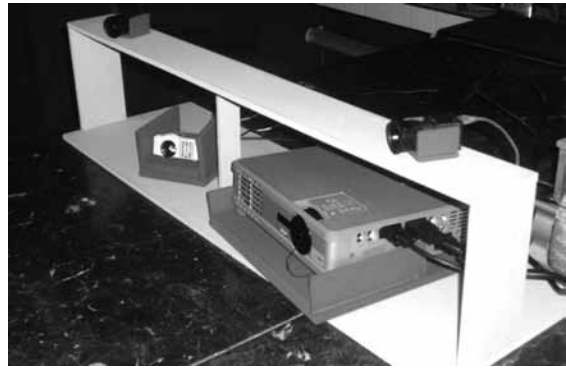


Fig. 2. Sistema de reconstrucción 3D implementado

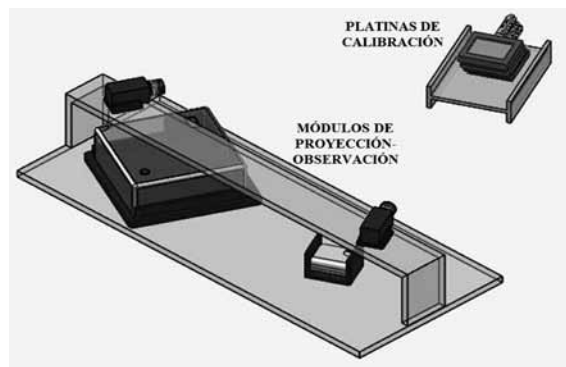


Fig. 3. Dispositivos de sujeción

Fuente: Elaboración propia

Diseño de los dispositivos de sujeción

El diseño de los dispositivos de sujeción de los sistemas de proyección y observación se realizó teniendo en cuenta el espacio de trabajo del sistema dual. El material que se escogió para los dispositivos de sujeción fue la madera del futuro debido a su baja densidad, a su dureza y a su bajo costo. Si bien los sistemas de sujeción no son de gran complejidad, cumplen a cabalidad con los requerimientos predefinidos, permitiendo ajustar (rotando sobre su propio eje) los elementos de los sistemas de proyección-observación. La disposición final de los dispositivos de sujeción se muestra en la Fig. 3.

CALIBRACIÓN DE LOS SISTEMAS INDEPENDIENTES

La calibración de los sistemas se utiliza, además de servir para verificar el posicionamiento de las cámaras y los proyectores, para crear referencias que posteriormente serán introducidas dentro del tratamiento de las imágenes del objeto que se va a reconstruir. Para llevar a cabo el procedimiento de calibración independiente se siguieron estos pasos:

(i) Se ubicó una tabla ajedrezada sobre las platinas de calibración, de tal manera que quedara perpendicular al eje óptico del sistema de adquisición (Fig. 4).

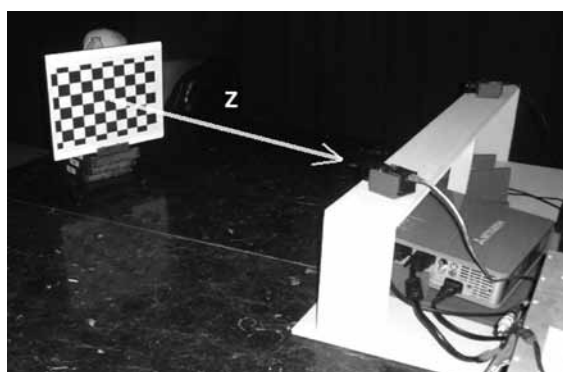


Fig 4. Posición de la tabla ajedrezada

(ii) Se adquirieron cinco imágenes de la tabla ajedrezada para su primera posición (en total la tabla se ubicó en 25 posiciones diferentes), las primeras cuatro imágenes corresponden a las franjas proyectadas sobre la tabla; la diferencia de fase de las franjas proyectadas fue de $\pi/2$, la quinta imagen corresponde a una sola franja proyectada sobre la tabla (Fig. 5); esta imagen se usa para calcular la fase absoluta.

(iii) Después de capturar las primeras cinco imágenes, se movió la tabla en dirección del eje Z (en nuestro caso cada 5

mm) el cual en cada sistema de proyección-observación se encuentra en dirección perpendicular a la tabla ajedrezada y al lente de la cámara (Fig. 4), la longitud total del desplazamiento de la tabla fue de 120 mm lo que corresponde a 25 posiciones para la tabla.

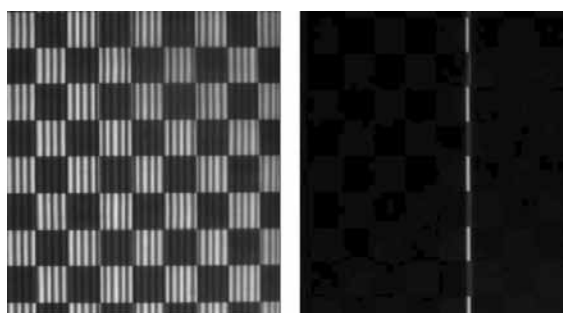


Fig. 5. Imágenes adquiridas para el procedimiento de calibración

Después de realizar los pasos anteriores se almacenan las respectivas matrices de calibración con las cuales es posible calcular el mapa de fase 2D.

Las matrices de calibración se construyeron a partir de las imágenes adquiridas para cada una de las 25 posiciones. Con estos datos se calculó el mapa de fase 2D para cada una de dichas posiciones (Fig. 6). Estos mapas de fase 2D permitieron construir la fase absoluta, la cual proporciona información 3D de un punto que pertenezca a un objeto de estudio que se ubique dentro de la región de calibración (12 mm) o por fuera de la misma.

El procedimiento descrito anteriormente se llevó a cabo para cada uno de los módulos de proyección-observación. Adicionalmente, se adquirió una imagen de la tabla ajedrezada (sin ningún patrón

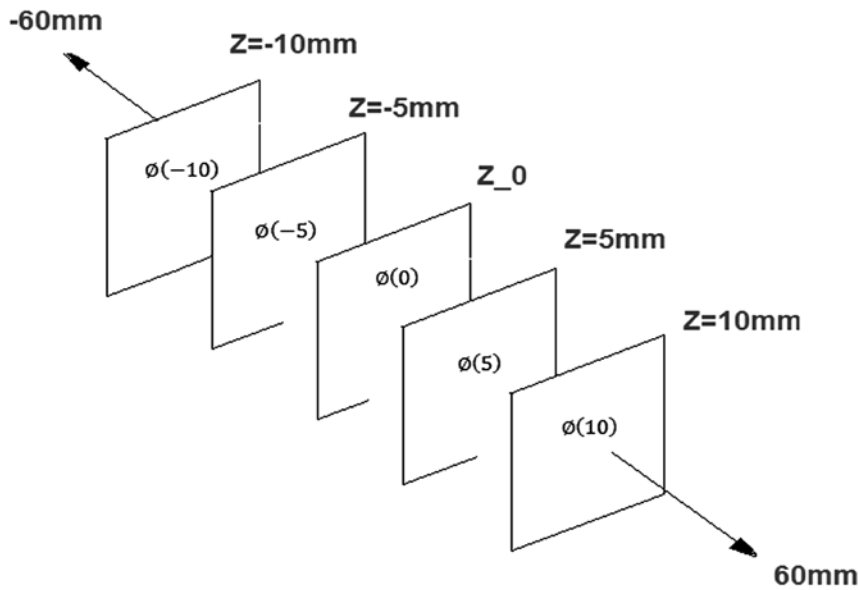


Fig. 6. Posiciones para el cálculo de la fase absoluta

Fuente: Elaboración propia

proyectado sobre la misma) ubicada en $Z = 0$ (para cada módulo independiente), esta imagen se utilizó durante el procedimiento de calibración estéreo del sistema, el cual permitió obtener las posiciones relativas entre los sistemas de observación; para llevar a cabo del procedimiento de calibración estéreo fue necesario realizar la calibración de cada una de las cámaras CCDs. Ambos procedimientos (calibración estéreo y calibración de las cámaras CCDs) se realizaron usando el software libre Camera Calibration Toolbox, el cual está disponible en: <http://www.vision.caltech.edu>

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los objetos reconstruidos presentaban características específicas de color, brillo y contraste, además de esto tenían dimensiones apropiadas, de tal manera que quedarán ubicados adecuadamente en el espacio de trabajo; este último com-

pletamente definido por el campo de observación de los sistemas de adquisición. El primer objeto reconstruido se muestra en la Fig. 7.



Fig. 7. Objeto reconstruido

En la Fig. 8 y la Fig. 9 se muestran las imágenes de las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto, adquiridas por cada uno de los sistemas de observación.

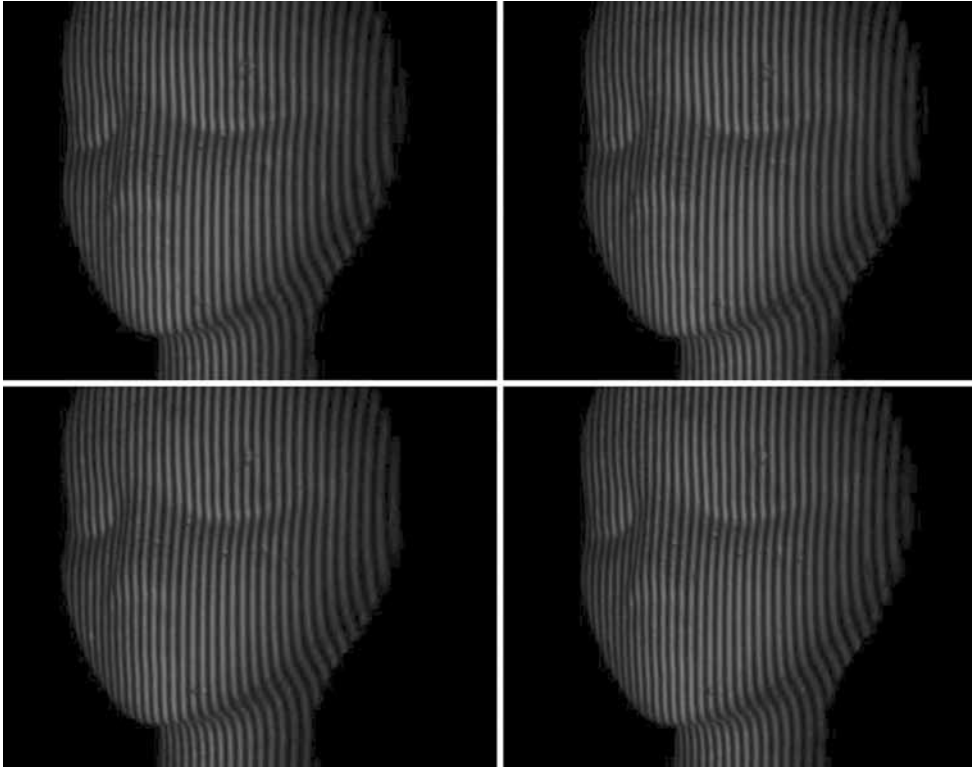


Fig. 8. Imágenes adquiridas por el sistema de observación derecho

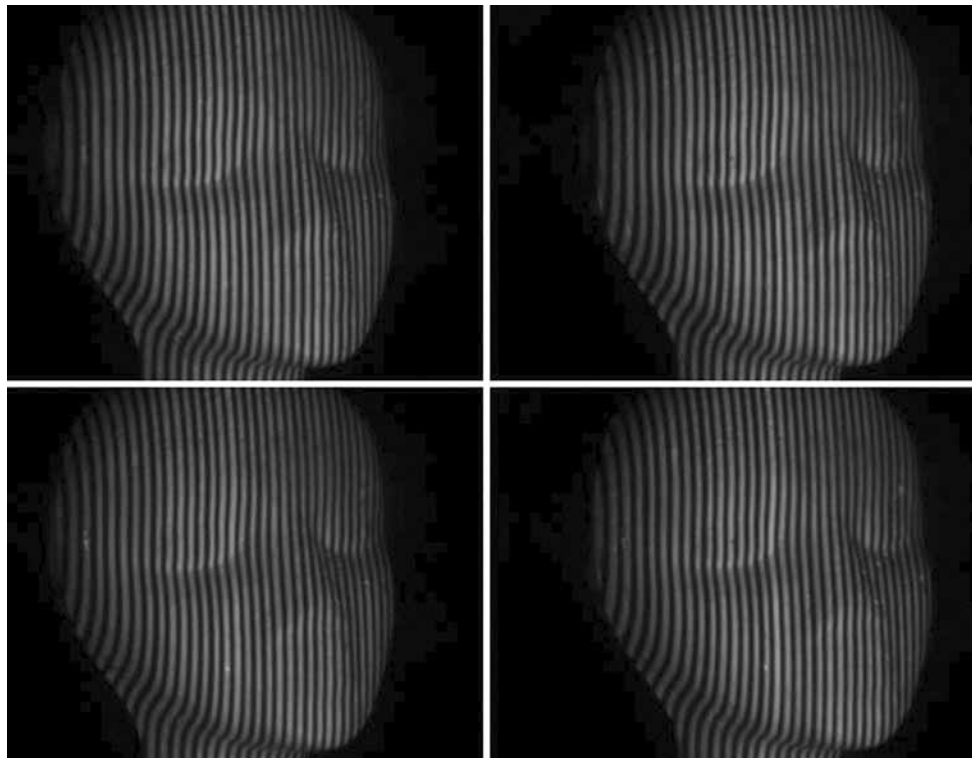


Fig. 9. Imágenes adquiridas por el sistema de observación izquierdo

Adicionalmente, con cada sistema de observación se adquirió la imagen que permite calcular la fase absoluta. Estas imágenes se muestran en la Fig. 10. En la Fig. 11 y la Fig. 12 se aprecian las reconstrucciones obtenidas por cada uno de los sistemas o módulos de reconstrucción; en cada una de estas reconstrucciones se puede apreciar que hay zonas del objeto que no pueden ser reconstruidas (las llamadas zonas ocultas); sin embargo, también se puede observar que las reconstrucciones son complementarias y las zonas que no son reconstruidas por un módulo sí lo son por el otro y viceversa.

En la Fig. 13 se muestra el empalme de las dos reconstrucciones, el cual se obtuvo utilizando los resultados del procedimiento de calibración estéreo, descrito anteriormente, el cual arrojó la matriz de rotación y el vector de traslación que permitieron posicionar relativamente los sistemas de observación. Por otra parte, en la Fig. 13 también se pueden apreciar pequeños detalles del objeto que el sistema de reconstrucción fue capaz de resolver, pero debido a que resultó muy complejo medir físicamente con alta precisión estos detalles, se hizo necesario diseñar una alternativa para cuantificar la precisión y la resolución del sistema de reconstrucción 3D desarrollado.



Fig. 10. Imágenes para el cálculo de la fase absoluta

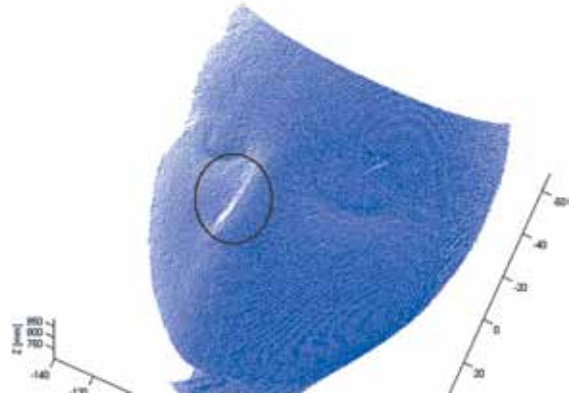


Fig. 11. Reconstrucción del sistema derecho

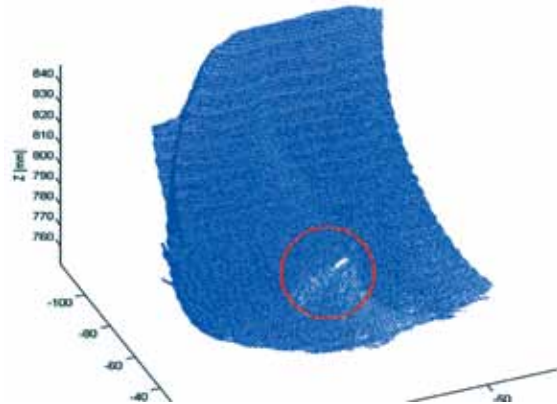


Fig. 12. Reconstrucción del sistema izquierdo

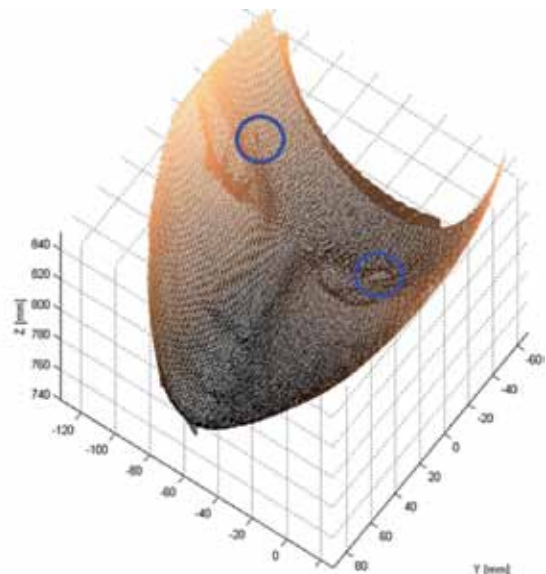


Fig. 13. Empalme de las reconstrucciones

La resolución de un sistema de reconstrucción 3D hace referencia a la capacidad que este tiene de resolver los detalles de un modelo. Para determinar la resolución global del sistema desarrollada en el presente trabajo se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos, los cuales se describen a continuación:

(i) Análisis cualitativo. Para determinar de forma cualitativa la resolución del sistema se revisó si sobre el empalme de las reconstrucciones se podían apreciar pequeñas variaciones de altura que están presentes sobre la superficie del objeto de estudio. En la Fig. 13 se pueden observar algunas de estas variaciones, lo que permitió deducir en primera instancia que nuestro sistema es capaz de resolver variaciones de altura cercanas a las 400 micras.

(ii) Análisis cuantitativo. Para cuantificar la resolución de los sistemas independientes se ubicaron tiras de cartulina sobre una tabla, como se muestra en la Fig. 14, con el objetivo de realizar la reconstrucción 3D de las mismas.

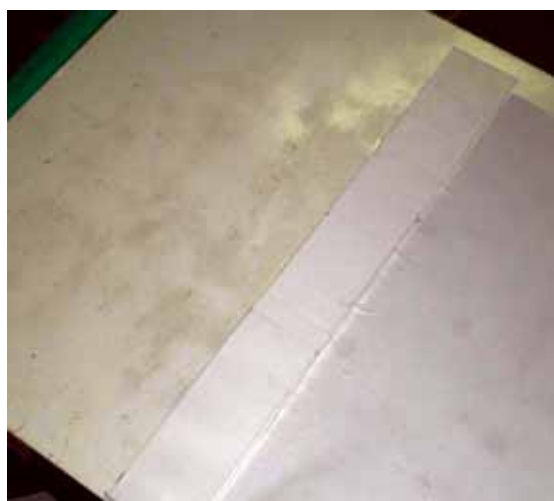


Fig. 14. Tabla con tiras de cartulina superpuestas

En la Fig. 15 se muestra la reconstrucción 3D de las tiras, obtenida por el sistema derecho; en esta se muestra la variación de altura entre la primera y la última tira, la cual es de 2,060 mm, esta medida deberá corresponder al cambio de altura debido al espesor de las nueve tiras de cartulina superpuestas sobre la tabla.

Para medir el espesor de cada tira de cartulina se realizaron veinte mediciones con un micrómetro con resolución de 10 micras. Realizando el muestreo de datos, hallando la desviación estándar y la media de las mediciones, se encontró que cada tira de cartulina tiene un espesor de 213 ± 4 micras, de tal manera que las nueve tiras superpuestas deben tener un espesor total de 1.917 micras, que corresponde a 1,917 milímetros. Comparando este resultado con la variación de altura proporcionada por la Fig. 15, que corresponde a 2,060 milímetros, se determinó que el error es del 4,64%. Además, se puede concluir que la resolución del sistema derecho se aproxima al valor de 213 micras.

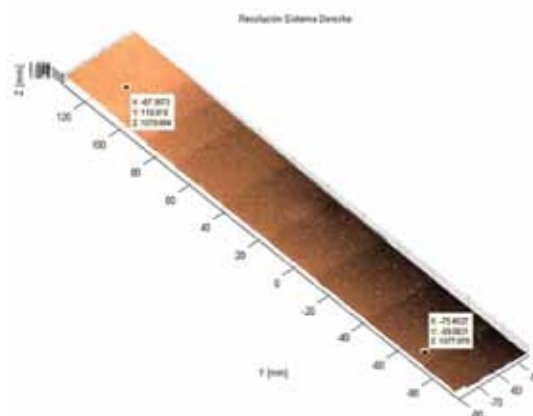


Fig. 15. Reconstrucción 3D de las tiras de cartulina obtenida por el sistema derecho

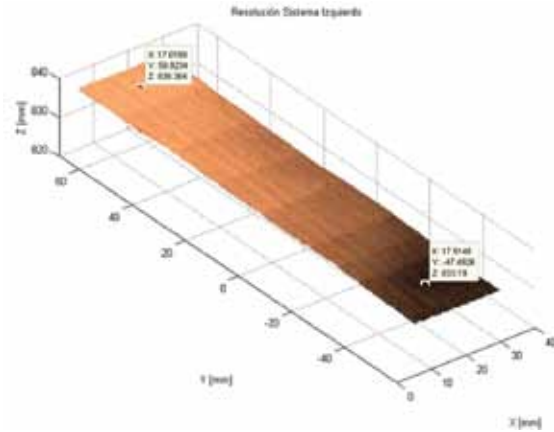


Fig. 16. Reconstrucción 3D de las tiras de cartulina obtenida por el sistema izquierdo

En la Fig. 16 se muestra la reconstrucción 3D de las tiras, obtenida por el sistema izquierdo; en esta se puede apreciar que la variación de altura entre la primera y la última tira es de 2,114 milímetros. De igual manera, esta variación deberá corresponder al espesor de las nueve tiras superpuestas sobre la tabla. Como ya se mencionó, el espesor de las nueve tiras corresponde a 1,917 milímetros; a partir de esto se determinó que en este caso el error es de 9,31% y que la resolución del sistema izquierdo también es cercana a 213 micras.

Por otra parte, para evaluar la precisión del sistema implementado, se analizó la reconstrucción 3D de las tiras de cartulina y se realizó un muestreo de los diferentes valores de Z para los mismos valores de X e Y (Fig. 17), determinando las variaciones en la coordenada Z . Para esto se seleccionaron aleatoriamente 20 puntos y se determinó, a partir de la desviación estándar, que el sistema tiene una precisión cercana a 76 micras. De igual manera, realizando el mismo procedimiento, se determinó que la precisión del sistema izquierdo es, aproximado a 83 micras.

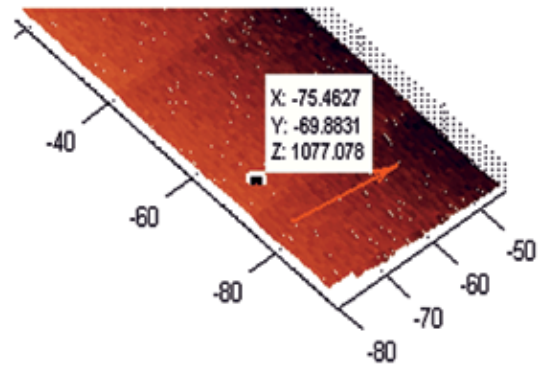


Fig. 17. Muestreo de datos para determinar la precisión del sistema derecho

CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema de reconstrucción 3D multicaptor formado por dos módulos de proyección-observación; este sistema permite obtener información topográfica de las zonas ocultas de los objetos de estudio debido a que las zonas del objeto que uno de los sistemas no puede reconstruir es reconstruida por el otro módulo y viceversa. Este procedimiento de reconstrucción se realiza sin necesidad de desplazar el objeto de estudio, lo que hace que el sistema sea robusto. El sistema desarrollado proporciona las bases que permitirán diseñar y construir, en el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), dispositivos de reconstrucción 3D formados por cuatro o más módulos de proyección-observación. Este tipo de sistemas proporcionarán información 3D alrededor de toda la superficie del objeto de estudio.

Se diseñó, desarrolló e implementó una interfaz en el lenguaje de programación MATLAB®, la cual permite controlar el sistema de reconstrucción 3D al mismo tiempo que agiliza y facilita la adquisi-

ción de los datos, la calibración independiente de los módulos, la calibración esteéreo del sistema, la segmentación de los datos y el empalme de las reconstrucciones obtenidas por los módulos independientes.

Se encontró que la resolución de los sistemas o módulos independientes es cercana a 213 micras y que las precisiones del sistema derecho y del sistema izquierdo son de 76 micras y 83 micras, respectivamente, lo que lleva a deducir que el sistema puede ser utilizado para realizar diversas aplicaciones, pero específicamente aplicaciones relacionadas con la medicina estética, en las cuales, por ejemplo, se evalúe la efectividad de un procedimiento estético en particular.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la misma institución.

REFERENCIAS

- [1] L. Chen and C. Huang, "Miniaturized 3D surface profilometer using digital fringe projection", *Meas. Sci. Techn.*, 16 (5) (2005), pp. 1061-1068.
- [2] K. Genovese and C. Pappalettere, "Whole 3D shape reconstruction of vascular segments under pressure via fringe projection techniques", *Opt. Laser Eng.*, 44 (12) (2006), pp. 1311-1323.
- [3] F. Lilley, M. J. Lalor and D. R. Burton, "Robust fringe analysis system for human body shape measurement", *Opt. Eng.*, 39 (1) (2000), pp. 187-195.
- [4] A. Hanafi, T. Gharbi and J. Cornu, "In vivo measurement of lower back deformations with Fourier-transform profilometry", *Appl. Opt.*, 44 (12) (2005), pp. 2266-2273.
- [5] S. Jaspers, H. Hopermann, G. Saueremann, U. Hoppe, R. Lunderstadt, J. Ennen, "Rapid in vivo measurement of the topography of human skin by active image triangulation using a digital micromirror device", *Skin Research and Technology*, 5 (3) (1999), pp. 195-207.
- [6] S. T. Yilmaz, U. D. Ozugurel, K. Bulut and M. N. Inci, "Vibration amplitude analysis with a single frame using a structured light pattern of a four-core optical fibre", *Opt. Commun.*, 249 (4-6) (2005), pp. 515-522.
- [7] P. S. Huang, F. Jin and F. Chiang, "Quantitative evaluation of corrosion by a digital fringe projection technique", *Opt. Laser Eng.*, 31 (5) (1999), pp. 371-380.
- [8] G. S. Spagnolo and D. Ambrosini, "Diffractive optical element based sensor for roughness measurement", *Sensors and Actuators A: Physical*, 100 (2-3) (2002), pp. 180-186.
- [9] J. Burke, T. Bothe, W. Osten and C. Hess, "Reverse engineering by fringe projection", *Proc. SPIE* 4778 (2002), pp. 312-324.
- [10] D. Ambrosini and D. Paoletti, "Heat transfer measurement by a diffractive optical element fringe projection", *Opt. Eng.*, 46 (9) (2007), 093606.
- [11] C. Quan, C. J. Tay, H. M. Shang and P. J. Bryanston-Cross, "Contour measurement by fibre optic fringe projection and Fourier transform analysis", *Opt. Commun.*, 118, (1995), pp. 479-483.
- [12] U. Paul Kumar et al., "Single frame digital fringe projection profilometry for 3D sur-

- face shape measurement”, *Optik - Int. J. Light Electron Opt.* (2012), doi: 10.1016/j.ijleo.2011.11.030.
- [13] C. Quan, X. Y. He, C. F. Wang, C. J. Tay and H. M. Shang, “Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting”, *Opt. Commun.*, 189, (2001), pp. 21-29.
- [14] M. Takeda and K. Mutoh, “Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes”, *Appl. Opt.*, 22 (24), (1983), pp. 3977-3982.
- [15] X. Chen, J. Chi, Y. Jin and J. Sun, “Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection”, *Opt. Laser Eng.*, 2009; 47(3-4): 310-319.