

Proyección de franjas en metrología óptica facial¹

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 21 de agosto de 2012 - Fecha de aceptación: 27 de septiembre de 2012

Andrés L. González

Ingeniero Mecatrónico, Especialista en Telecomunicaciones, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Colombia, agonzalez3@unab.edu.co

Jaime E. Meneses

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

Jaury León

Físico, Magíster en Física, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Colombia, jleon544@unab.edu.co

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de una investigación teórico-experimental de la técnica de proyección de franjas. El trabajo se realiza para evaluar el desempeño de la técnica en procedimientos de metrología facial. El montaje experimental consta de un videoprojector y una cámara CCD; para recuperar la fase discontinua del patrón de franjas se usa el algoritmo “*Phase Shifting*” con cuatro imágenes y se aplica un procedimiento típico de “*Unwrapping*” para obtener la fase continua relativa. Para llegar a la fase continua absoluta, se incluye una etapa de triangulación lineal en la calibración del sistema. En los resultados se muestra cómo, con la información que se obtiene de la topografía superficial de la piel, se puede determinar la longitud y la profundidad media de las estrías cutáneas, lo cual evidencia el potencial de la técnica en aplicaciones biomédicas.

Palabras clave

Proyección de franjas, metrología facial, reconstrucción 3D, triangulación lineal.

1. Artículo derivado del proyecto titulado *Diseño y desarrollo de dispositivos de reconstrucción 3D aplicados a la exploración corporal* (No. 110250226846 ante Colciencias y No. 8186 ante la Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión de la Universidad Industrial de Santander).

Fringe projection for facial optical metrology

ABSTRACT

This paper presents the results of a theoretical and experimental research about fringe projection technique. The work is carried out to evaluate the performance of the technique in facial metrology procedures. The experimental assembly consists of a video projector and a CCD camera. Phase-shifting algorithm with four images is used in order to recover the discontinuous phase of fringe pattern. Unwrapping procedure is used to obtain the relative continuous phase. Absolute continuous phase is attained through a linear triangulation stage performed during calibration procedure. With the information obtained from skin topography is possible to determine length and depth of facial stretch marks, hence showing this technique's potential in biomedical applications.

Keywords

Fringe projection, facial metrology, 3D reconstruction, linear triangulation.

INTRODUCCIÓN

En diferentes procedimientos médicos y estéticos es de interés obtener información métrica, con resolución milimétrica, de la topografía cutánea del rostro humano. La precisión y confiabilidad que se espera de estas medidas, sumado a la dificultad para adquirir esta información, han motivado el desarrollo de este trabajo; cuya estrategia de investigación consiste en evaluar experimentalmente el desempeño de un método de reconstrucción 3D para realizar mediciones de estrías cutáneas en la región facial.

Los métodos de reconstrucción 3D que no requieren de contacto físico entre el sistema captor y el objeto que se desea reconstruir, han demostrado un mejor desempeño y mayor versatilidad si se comparan con otros métodos que dependen del contacto físico para adquirir información topográfica que permita una óptima reconstrucción 3D. Esta afirmación se deduce al considerar el tiempo de adquisición y características del objeto que se desea reconstruir como el tamaño, la forma y la dureza; esta consideración se acentúa si el objeto que se va a reconstruir es parte del cuerpo de un humano vivo. Particularmente, la dificultad de situar la cara de una persona en una misma posición, evitando cualquier gesto que altere la forma superficial de la piel durante cinco o más segundos consecutivos, es una limitante en el proceso de reconstrucción 3D, porque cualquier movimiento o variación de la forma durante la etapa de adquisición afecta significativamente todo el proceso de reconstrucción.

La técnica de proyección de franjas permite, en aproximadamente dos segundos, adquirir las imágenes necesarias para obtener una reconstrucción 3D con resolución micrométrica y precisión sub píxel. Esta es una de las principales razones por las que al consultar la literatura especializada, los antecedentes evidencian una amplia preferencia por esta técnica, cuando se requiere implementar métodos de reconstrucción 3D en aplicaciones biomédicas, en las que la métrica y la forma son el objeto de estudio. Dentro del impacto científico, se espera que con este trabajo se incentive el desarrollo de dispositivos de metrología óptica facial, que faciliten y respalden los resultados de los procedimientos médicos y estéticos en los que se pueden implementar, incrementando la tranquilidad y la confianza de pacientes potenciales; lo cual genera un impacto social positivo, al aumentar la demanda de los tratamientos y mejorar la calidad de vida de quienes se someten a ellos.

En la siguiente sección del artículo se resumen los conceptos fundamentales de la técnica de proyección de franjas incluyendo metodología y equipos. Posteriormente se describe el montaje experimental requerido para la ejecución de la técnica y al final se presentan los resultados del análisis metroológico facial, seguido por las conclusiones.

PROYECCIÓN DE FRANJAS

La técnica de proyección de franjas consiste en proyectar —sobre el objeto que se va a reconstruir— franjas paralelas blancas y negras, que se deforman por la topografía

superficial del objeto [1]. La Fig. 1 muestra un montaje típico empleado para ejecutar la técnica. El sistema consta de una unidad de proyección/adquisición y una unidad de procesamiento. La unidad de proyección/adquisición está conformada por un dispositivo de proyección (tradicionalmente un videoprojector) para proyectar las franjas y un dispositivo de observación para la adquisición de las imágenes (cámara CCD). Las imágenes adquiridas son procesadas por la unidad de control, que permite adicionalmente sincronizar las adquisiciones y calibrar el dispositivo.

Es ideal que el eje óptico de la cámara se ubique de forma perpendicular al plano de proyección donde se focalizan las franjas y la cámara; este plano se llama plano de referencia [2].

El proceso físico de codificación de la información topográfica se realiza de la si-

guiente manera: Cuando la proyección se realiza sobre una superficie plana se observan franjas paralelas y de paso constante; al proyectarlas sobre un objeto, las irregularidades de la superficie (relacionadas directamente con la topografía superficial del objeto) quedan evidenciadas con la deformación de las franjas [2], [3], tal y como se observa en la Fig. 2.

Considerando un sistema formador de imágenes no-telecéntrico, el ángulo entre los ejes de proyección y observación y la influencia de las aberraciones geométricas, la distribución en intensidad de las imágenes obtenidas con la cámara CCD sobre el plano de referencia tiene la forma dada por (1).

$$I(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(2\pi f_o x_o + \phi_o) \quad (1)$$

Donde I_o y A corresponden a la intensidad del fondo continuo y el contraste de las franjas, respectivamente. El término f_o es la frecuencia espacial media de las franjas y

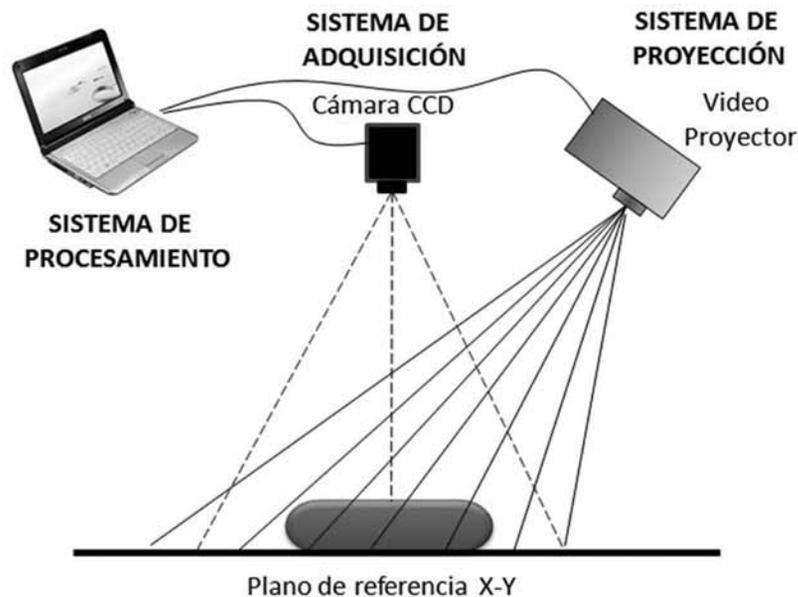


Fig. 1 Montaje experimental de proyección de franjas

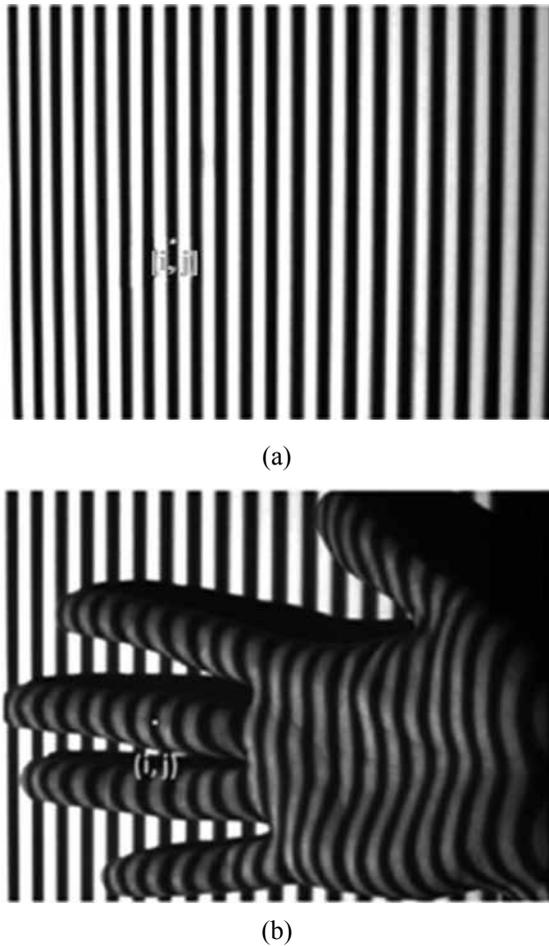


Fig. 2 Patrón de franjas proyectado sobre (a) un plano de referencia y (b) mano humana

ϕ_o es la fase inicial de las franjas, que corresponde a la deformación inicial sufrida por las franjas. Al ubicar sobre el plano de referencia un objeto, la ecuación se modifica de acuerdo con (2).

$$I(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(2\pi f_o x_o + \phi_o + \Delta\phi) \quad (2)$$

El término $\Delta\phi$ es la fase introducida por la topografía del objeto. La ecuación 2 se puede reducir como se muestra en (3).

$$I(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(\phi) \quad (3)$$

El término ϕ corresponde a la fase del patrón de franjas. De este modo, la deformación que genera un objeto al sistema de franjas altera directamente la función fase ϕ de la ecuación (3). Entonces el proceso de reconstrucción 3D, empleando la técnica de proyección de franjas, consiste en recuperar la función ϕ .

Para dicho cálculo se han desarrollado diversos métodos [4], uno de los más efectivos y el que se describe en este artículo es el método de Corrimiento de Fase (*Phase Shifting*) [5]. Para este método se determina la fase del objeto a partir de la intensidad luminosa de n imágenes digitalizadas, con su respectiva fase modificada en valores ϕ_i conocidos dentro de un intervalo de 2π , como se muestra en (4).

$$\phi_i = \frac{2\pi}{n} (i - 1) \quad (4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

La ecuación (3) se modifica como se muestra en (5).

$$I(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}[\phi - \phi_i] \quad (5)$$

A partir de las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales se tiene (6), (7) y (8).

$$\sum_{i=1}^n I_i * \text{Cos}(\phi_i) = \frac{nA}{2} * \text{Cos}(\phi) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i * \text{Sen}(\phi_i) = \frac{nA}{2} * \text{Sen}(\phi) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i = nI_o \quad (8)$$

Ordenando las ecuaciones se llega a (9) y (10).

$$\tan(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i * \text{Sen}(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^n I_i * \text{Cos}(\varphi_i)} \quad (9)$$

$$A = \frac{2}{n} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n I_i * \text{Sen}(\varphi_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n I_i * \text{Cos}(\varphi_i)\right)^2} \quad (10)$$

El procedimiento es comúnmente utilizado con $n = 4$ imágenes [5], lo cual implica un desplazamiento de fase igual a $\pi/2$. Así, adquiriendo las cuatro imágenes se puede calcular el valor de A y ϕ para cada punto (x_0, y_0) , usando (11) y (12).

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (11)$$

$$2A(x, y) = \sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_3 - I_1)^2} \quad (12)$$

Donde I_1 es la imagen correspondiente a un desplazamiento de fase $\varphi_1 = 0$, I_2 para un $\varphi_2 = \pi/2$, I_3 para un $\varphi_3 = \pi$, e I_4 para un $\varphi_4 = 3\pi/2$. La Fig. 3 muestra un ejemplo de estas imágenes.

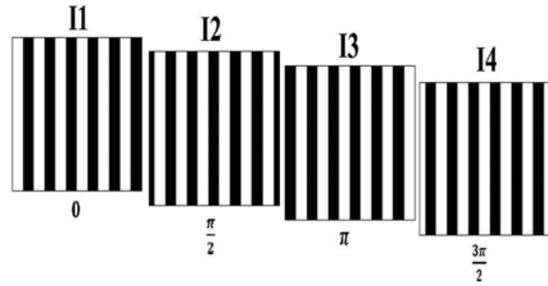
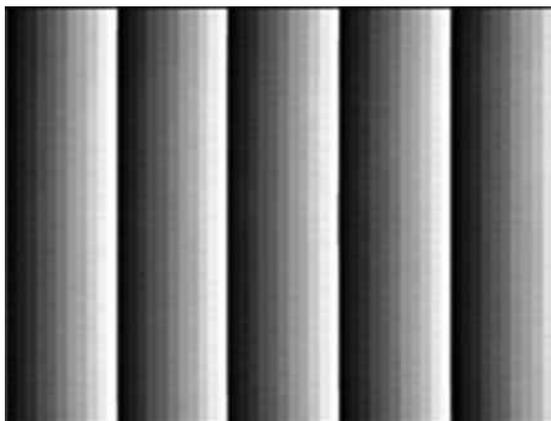
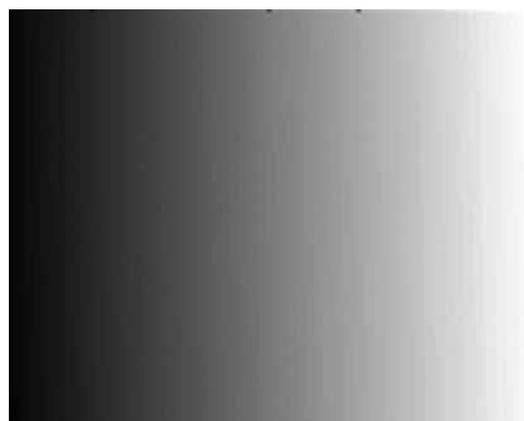


Fig. 3 Patrón de franjas con corrimiento de fase $\varphi_i = \pi/2$

Como se observa en (11), el uso de la función arco-tangente para el cálculo de la fase genera puntos de discontinuidad entre $-\pi$ y π , razón por la cual es necesario convertir dicha fase discontinua en una fase continua. En la Fig. 4(a) el valor de $-\pi$ corresponde al nivel de gris negro y $+\pi$ al nivel de gris blanco. Matemáticamente se demuestra que la transición entre $\pm \pi$ ocurre en el centro de una franja negra. Con el fin de obtener la fase continua es necesario identificar las discontinuidades y adicionar valores de $2\pi N$, siendo N una función escalón entera apropiada para eliminar las discontinuidades. Este procedimiento se conoce como “*Unwrapping*” y se usa para obtener la fase



(a)



(b)

Fig. 4 Imagen de la fase (a) discontinua y (b) continua

continua del patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia y la fase continua del mismo patrón de franjas proyectado sobre el objeto [6], [7]. Según (1) y (2), la diferencia entre las fases continuas sobre el plano de referencia y sobre el objeto permite obtener el $\Delta\phi$ que contiene información de la topografía superficial del objeto.

El proceso de reconstrucción 3D se completa al convertir la distribución de fase $\Delta\phi$ en valores de coordenadas Z para cada posición (X,Y) digitalizada por la cámara (Fig. 1). El proceso de conversión se puede realizar de dos maneras: 1. Usando los parámetros del montaje (ángulo de proyección, paso de proyección, factor de ampliación geométrica de la lente de la cámara) y determinar la ecuación teórica que asocia $\Delta\phi$ con Z ; 2. Usando un proceso de calibración que permite determinar una ecuación experimental que asocia $\Delta\phi$ con Z [2], [3]. Este procedimiento se explicará en la siguiente sección.

SISTEMA EXPERIMENTAL DE RECONSTRUCCIÓN 3D

En el procedimiento experimental se ha empleado: para la proyección de las franjas, un videoprojector Mitsubishi SL4U de 1700 lúmenes y resolución de pantalla de 800x600 píxeles; para la adquisición de las imágenes, una cámara CCD UEYE UI2310M con conexión USB 2.0, monocromática y resolución VGA de 640x480 píxeles, con lente Edmund Optics 8.5mm/F1.3. Para el procesamiento digital de las imágenes se usó el software Matlab versión

R2007a, instalado en un computador portátil Lenovo con procesador Intel core i3 y 3 GB de memoria RAM. Con el mismo software se diseñó un programa que se encarga de generar la imagen de las franjas y desplazarla controladamente $\phi_i = \pi/2$ para obtener las cuatro imágenes (Fig. 5).



Fig. 5 Montaje experimental de proyección de franjas

Calibración experimental

El proceso de calibración consiste en determinar el valor de la fase para cada píxel de la imagen en función de diferentes valores de Z . Esto se realiza desplazando el plano de referencia a intervalos regulares ΔZ en un rango de $\pm Z_{max}$. Para cada posición Z se calcula la fase continua, de esta manera cada píxel de la cámara tendrá una combinación de valores de fase contra posiciones Z . Un ajuste polinomial permite determinar la curva de calibración experimental.

Para la calibración del sistema se empleó un tornillo micrométrico de $10 \mu m$ de resolución con 16 cm de recorrido lineal, de los cuales se utilizaron 13 cm. Se usó como plano de referencia una lámina de acrílico blanco de dimensiones $40 \times 40 \times 0,4$ cm (Fig. 6).

En el proceso de calibración el plano de referencia se desplazó manualmente valores de $\Delta Z = 1000 \mu m$, en un recorrido lineal desde 6 cm hasta -6 cm, tomando como origen ($Z = 0$) la posición de focalización de la cámara. En cada posición ΔZ se proyectan sobre el plano y se almacenan cuatro imágenes de un patrón de franjas con un desfase, cada una de la anterior, de $\varphi_i = \pi/2$, para un total de 480 imágenes en los 12 cm de recorrido.

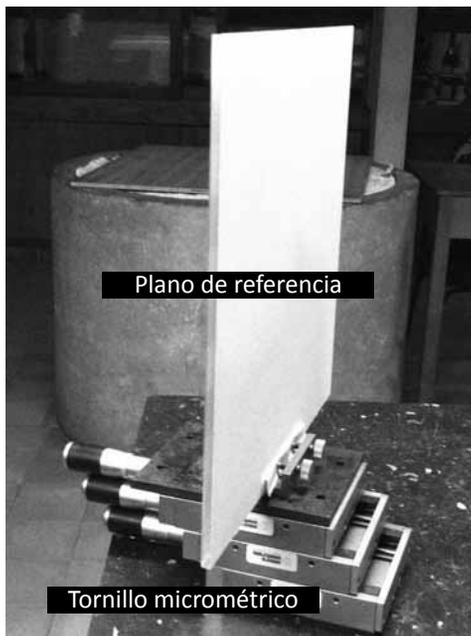
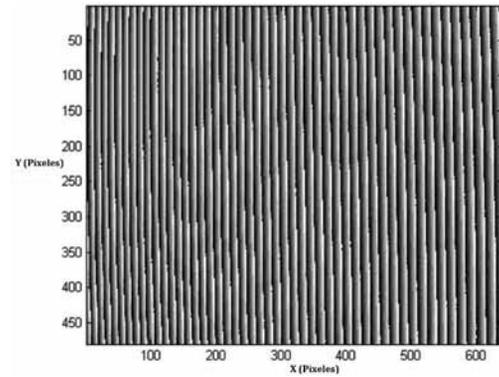
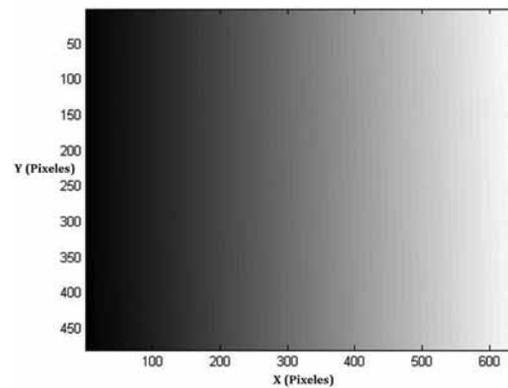


Fig. 6 Sistema de calibración experimental

Para cada posición ΔZ se obtiene su fase discontinua y, con el procedimiento “*Unwrapping*”, se recupera su respectiva fase continua (Fig. 7).



(a)



(b)

Fig. 7 Fase del patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia (a) discontinua, (b) continua

La curva de calibración experimental corresponde a un polinomio de orden 2, como se muestra en (13). Empleando regresión lineal por mínimos cuadrados para cada píxel de la imagen se determinan los coeficientes a , b y c de la ecuación de calibración polinomial:

$$\Delta\phi = \phi_z(x, y) - \phi_o(x, y) = a(x, y)Z^2 + b(x, y)Z + c(x, y) \quad (13)$$

Donde $\phi_z(x, y)$ es la fase continua para cada Z y $\phi_o(x, y)$ es la fase continua del plano de referencia en la posición $Z = 0$ cm. En conclusión, con (13) se puede calcular la altura Z de un píxel conociendo la fase en ese punto y restándosela a la fase del plano de

referencia en ese mismo punto. En la Fig. 8 se pueden observar los coeficientes de calibración.

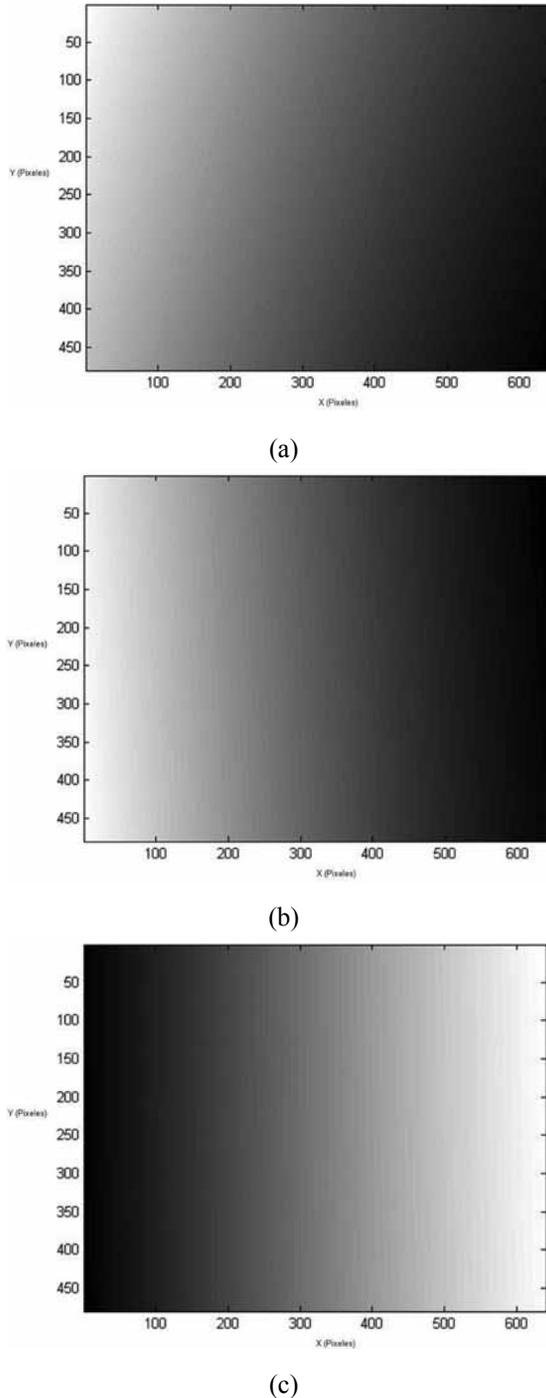


Fig. 8 Coeficientes de calibración (a) a, (b) b y (c) c, para reemplazar en (13)

Triangulación lineal

En el proceso de calibración se encuentra que al desplazar en dirección Z el plano de referencia, las franjas se desplazan paralelamente en el plano de la imagen en dirección perpendicular a las franjas. De esta manera, para un valor Z_0 las franjas tendrán una posición en el plano imagen y una fase determinada; desplazando el plano a un valor $Z_0 + \delta Z$ específica, una franja negra en esta posición se ubica encima de su vecina en la posición anterior Z_0 , obteniéndose la misma fase para otro valor de Z . Así, el valor δZ introduce un corrimiento de fase en el plano imagen de 2π . Este valor interviene en la resolución del método: valores pequeños de δZ se obtienen si el paso de las franjas es pequeño y si el ángulo de proyección es grande. De igual forma, debido a que el valor δZ introduce desplazamientos en la fase de 2π , el método de corrimiento de fase matemáticamente no puede determinar la fase real del objeto, de acuerdo con (14):

$$I(x_o, y_o) = I_0(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(\phi + 2\pi N) \quad (14)$$

Esto implica que el método de corrimiento de fase, y en general cualquier método de extracción de fase de un sistema de franjas, determina una fase relativa; la fase absoluta se obtendría si se conociera el valor de $2\pi N$ introducido en la fase por la posición global del objeto en dirección Z . Esto no sería un inconveniente si la ecuación experimental fuera lineal con Z ; el término $2\pi N$ definiría un valor global de Z que se perdería en la imagen reconstruida del objeto. Es decir, se pierde la posición global del objeto, pero no

se altera la forma del objeto. Una relación lineal entre la fase y la altura Z se obtiene si la proyección y observación son telecéntricas y si los sistemas formadores de imágenes no poseen aberraciones geométricas. Generalmente las lentes empleadas en la unidad de proyección y observación, aunque son diseñadas con buena calidad y poseen un mínimo de aberraciones geométricas, son no-telecéntricas. Con el fin de minimizar la influencia de la no-telecentricidad se emplean relaciones no lineales entre la fase y la altura, pero la incertidumbre de $2\pi N$ en la fase afecta la forma del objeto en la imagen reconstruida.

Para determinar la fase absoluta del sistema de franjas, es decir, determinar el valor de $2\pi N$ introducido por la posición global del objeto en Z , se debe determinar al menos un valor aproximado de Z para un punto del objeto. Conociendo un valor de Z de un punto del objeto, con la ecuación de calibración (13) se puede determinar el valor de la fase que debería tener; este valor sirve para determinar y corregir el valor de la fase obtenida con el método de corrimiento de fase. Esto se realiza utilizando un procedimiento adicional de triangulación lineal.

La triangulación lineal se basa en los principios de triangulación láser, con la diferencia de que se usa el mismo videoprojector como fuente de luz y no un láser. Para este caso el patrón es un fondo negro con una línea blanca del ancho de tres píxeles de la LCD del proyector (Fig. 9).

El proceso de calibración completa se realiza de la siguiente manera: Para cada posi-

ción Z en el rango $\pm Z_{max}$ se proyectan y adquieren las cuatro imágenes de franjas desplazadas $\pi/2$ y la imagen de la línea blanca. De esta manera, con las cuatro imágenes de franjas, se calcula la fase y la quinta sirve para asociar a cada píxel de la CCD un valor de Z . En la Fig. 10 se puede observar la imagen de las líneas blancas capturadas a lo largo de los 12 cm de calibración con un $\Delta Z = 3$ mm.

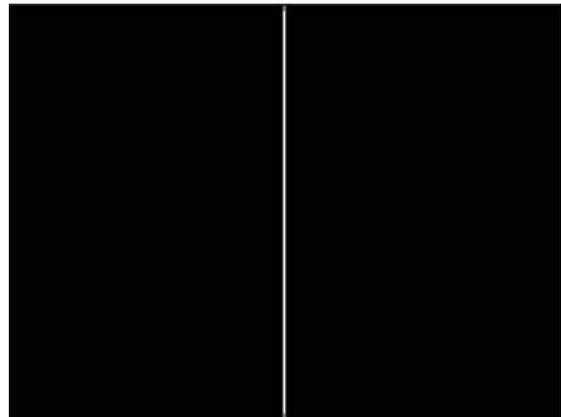


Fig. 9 Línea blanca para triangulación lineal

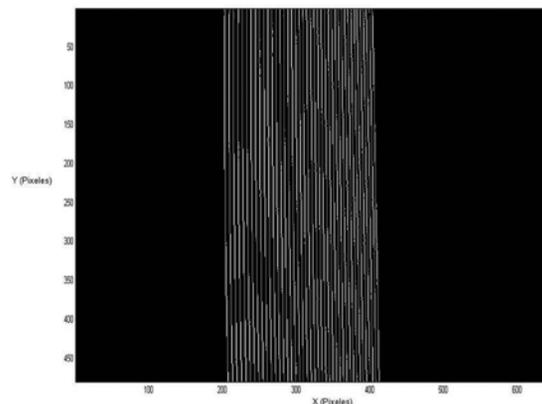


Fig. 10 Líneas blancas proyectadas en 12 cm con un $\Delta Z = 3$ mm

Al proyectar la línea sobre la superficie de un objeto, esta se deforma por su topografía; de esta manera, al superponer las coordenadas de la línea blanca deformada sobre

las líneas de calibración de la triangulación lineal, se obtienen intercepciones de las cuales se recupera el valor de Z para esos puntos del objeto.

Reconstrucción 3D

Después de calcular los coeficientes de (13) y concluir con el proceso de calibración de la coordenada Z , se procede con la reconstrucción 3D. El objeto seleccionado para la reconstrucción en este experimento, es un maniquí de rostro humano pintado completamente de blanco (Fig. 11).



Fig. 11 Objeto para reconstrucción 3D

En primer lugar es importante ubicar el objeto que se va a reconstruir dentro del espacio definido para la calibración en el anterior procedimiento; para este caso, 12 cm. Una vez ubicado el objeto, se proyectan sobre él las cuatro imágenes de las franjas con un desfase de $\varphi = \pi/2$ (Fig. 12). Estas imágenes son capturadas con la cámara CCD desde la aplicación desarrollada en Matlab.

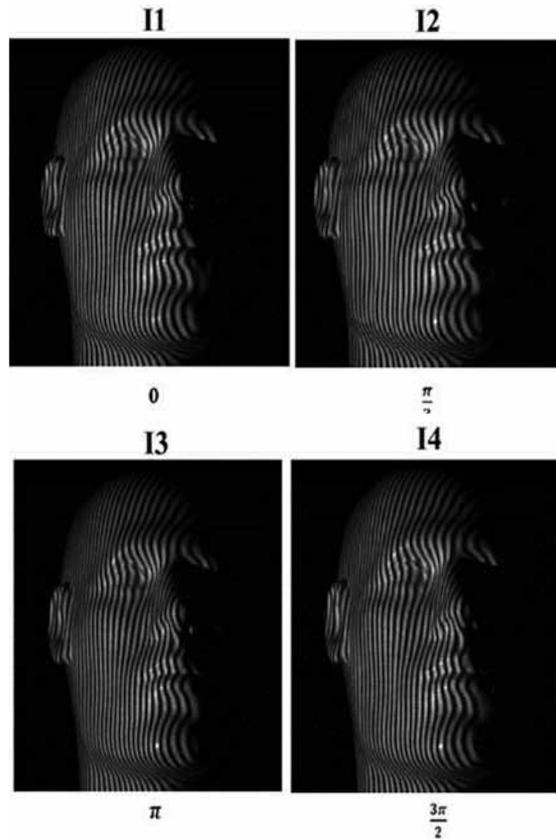


Fig. 12 Patrón de franjas desfasado y proyectado sobre un objeto

El siguiente paso es recuperar la fase de las imágenes del objeto. En la Fig. 13(a) se puede observar la fase discontinua recuperada de las imágenes del plano de referencia y en la Fig. 13(b) la fase discontinua recuperada de las imágenes del objeto.

Con esta fase y usando el procedimiento de “*Unwrapping*” se obtiene la fase continua [6]-[9] (Fig. 14).

La imagen de la línea blanca proyectada sobre el objeto se superpone sobre la imagen de las líneas blancas de la calibración lineal (Fig. 15).

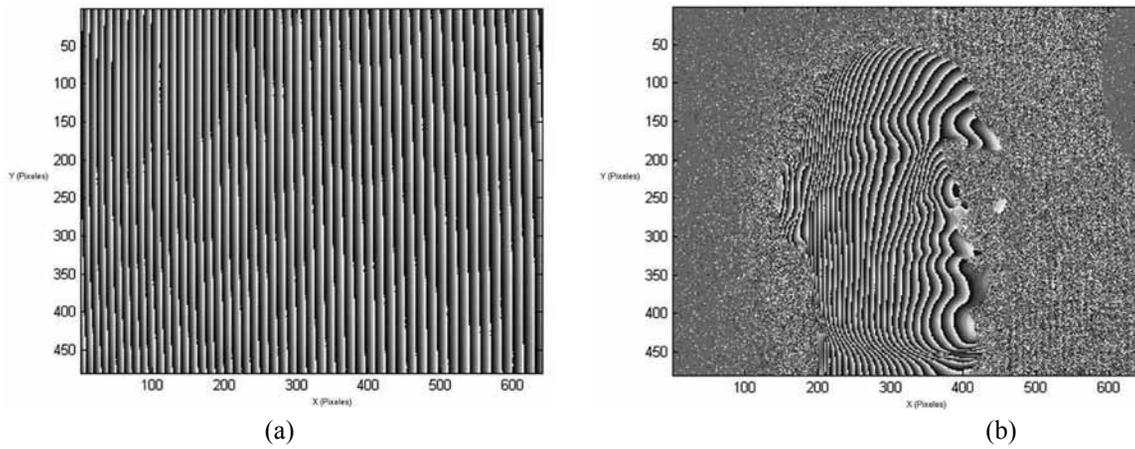


Fig. 13 Fase discontinua (a) del plano de referencia y (b) del objeto

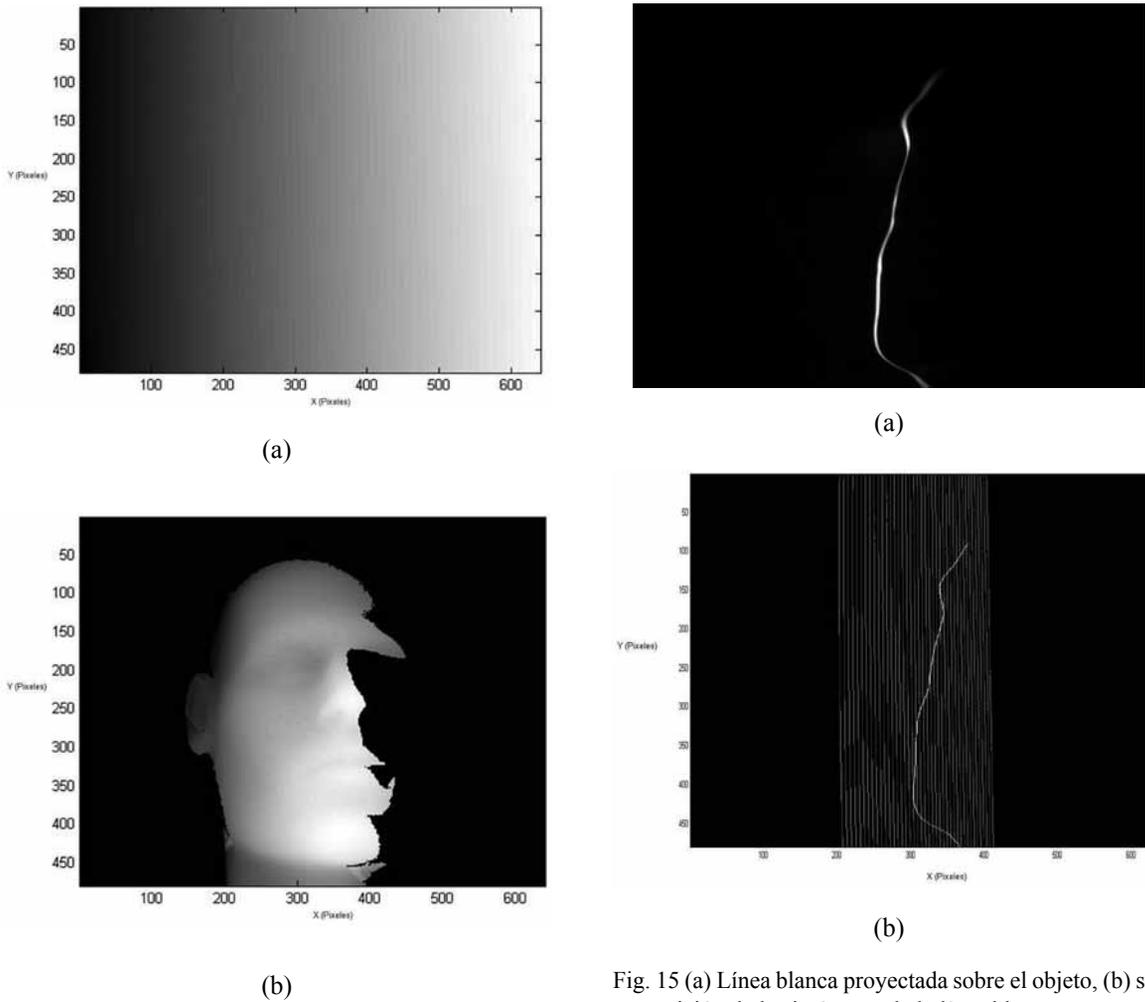


Fig. 14 Fase continua del (a) plano de referencia y (b) del objeto

Fig. 15 (a) Línea blanca proyectada sobre el objeto, (b) superposición de las imágenes de la línea blanca proyectada sobre el objeto y las líneas blancas proyectadas sobre el plano de referencia a lo largo del recorrido de calibración a un $\Delta Z = 5000 \mu m$

Se determinan las coordenadas en píxeles de un punto de superposición, obteniéndose para ese punto el valor Z . Con este valor, el de ϕ_0 y el de los coeficientes a , b y c de la calibración para este punto, se calcula ϕ_z . Al comparar ϕ_z con el valor ϕ de la fase continua en ese mismo punto, se determina el valor de $2\pi N$ que se debe adicionar a ϕ para obtener el mismo valor de ϕ_z . El valor $2\pi N$ calculado sirve para corregir toda la fase continua que se ha obtenido del objeto. Las coordenadas Z para cada punto se calculan usando (13), resolviendo la ecuación cuadrática, ya que se conoce $\Delta\phi$ y los coeficientes a , b y c para cada punto. Las Fig. 16 y 17 muestran imágenes 3D obtenidas del objeto mostrado en la Fig. 11.

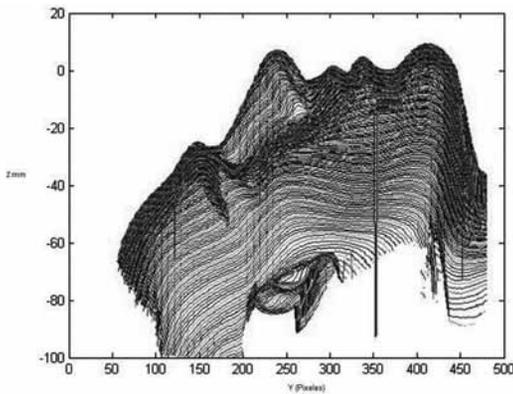


Fig. 16 Recuperación de la altura Z de los puntos de la superficie del objeto

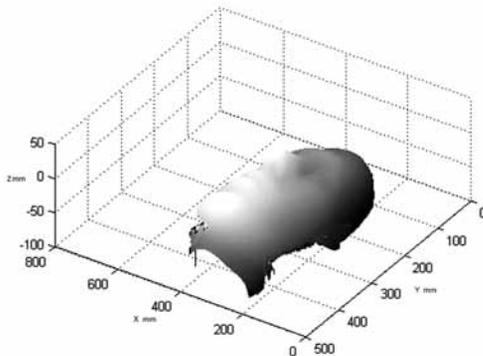


Fig. 17 Reconstrucción 3D del objeto

Análisis metroológico facial

Con el fin de realizar un análisis metroológico del estado superficial topográfico de la piel humana, en especial la región indicada en la Fig. 18, se construyó y calibró un sistema de proyección de franjas.

La unidad de proyección está conformada por una rejilla de difracción de 30 líneas por milímetro montada sobre un sistema de desplazamiento piezo-eléctrico. La lente de proyección focal de 12 mm proyecta las líneas de la rejilla que son desviadas sobre la superficie del objeto por un espejo circular.



Fig. 18 Campo de exploración topográfica

El sistema de desplazamiento piezo-eléctrico permite mover las franjas $\pi/2$, desfase necesario para el método de corrimiento de fase. La cámara CCD, de focal 12 mm, captura la imagen del sistema de franjas

deformado sobre el campo de exploración topográfica (Fig. 19).

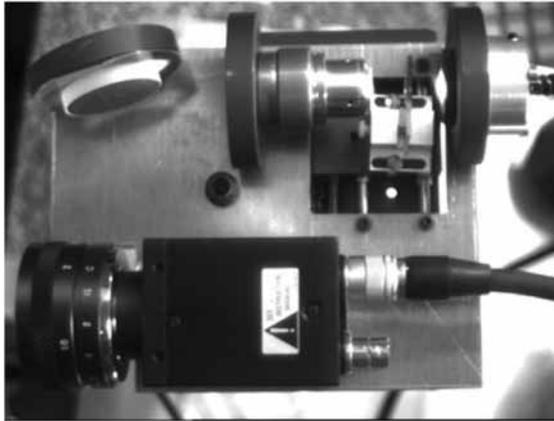


Fig. 19 Sistema óptico implementado

En este sistema, con campo de observación de $18 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, rango total de calibración en Z de $\pm 2 \text{ mm}$, y aunque las lentes empleadas son no-telecéntricas, el coeficiente a de (13) se aproxima a cero, al emplearse la aproximación lineal. Por esta razón, no es necesario el procedimiento de triangulación lineal. La Fig. 20 muestra una sección de la imagen de las franjas deformadas por la piel y la Fig. 21 muestra la fase continua obtenida después de hacer el “*Unwrapping*”.

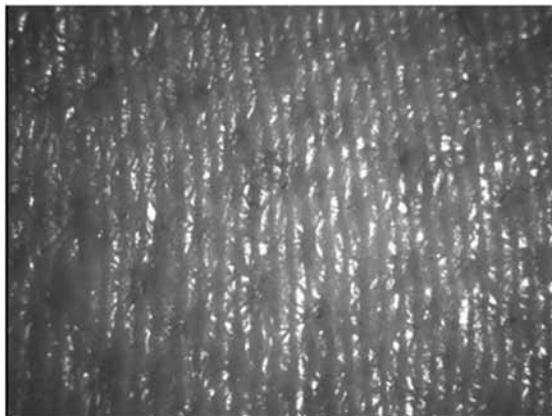
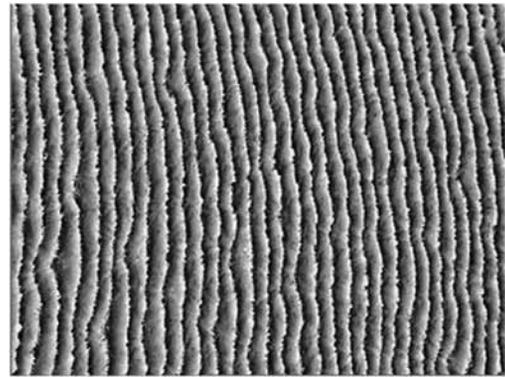


Fig. 20 Imagen del sistema de franjas deformado por la topografía de la piel humana



(a)



(b)

Fig. 21 Fase del patrón de franjas proyectado sobre la piel; (a) discontinua y (b) continua

En la Fig. 22 se puede observar la imagen de la reconstrucción 3D obtenida.

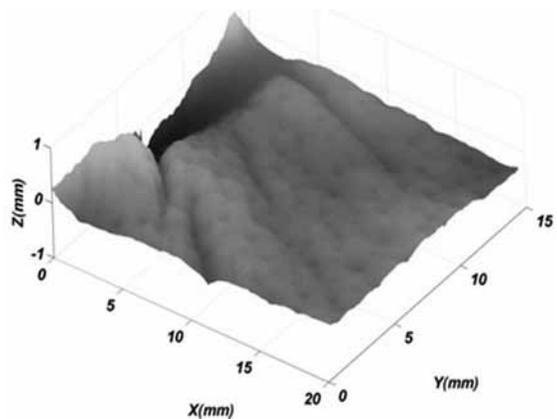
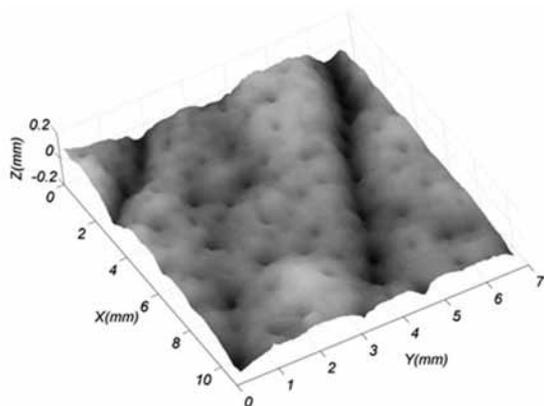
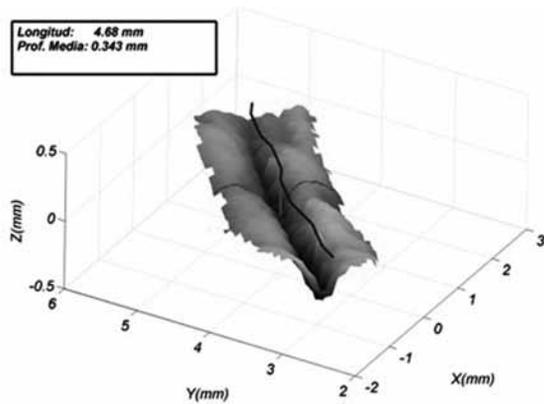


Fig. 22 Reconstrucción 3D del campo de exploración de la Fig. 18

Con el fin de extraer información topográfica de las estrías obtenidas de la superficie de la piel, se determinó su longitud y profundidad media. La Fig. 23 muestra la información topográfica resultante.



(a)



(b)

Fig. 23 Exploración metrológica sobre las imágenes 3D obtenidas

CONCLUSIONES

El montaje experimental, en el que se utiliza un videoprojector como fuente de iluminación, por medio del cual se proyecta un patrón de franjas “digitales”, es completamente funcional y además muy versátil,

pues permite diseñar y ajustar la resolución, la orientación, el paso y la intensidad del patrón de franjas que se va a proyectar.

Se comprobó la eficiencia del método de “Phase Shifting” con corrimiento de fase a cuatro imágenes. El procedimiento permite recuperar la fase de las imágenes capturadas de forma rápida y sencilla. Otro aspecto importante es la necesidad de controlar la iluminación del ambiente, pues una fuente de luz externa muy intensa puede saturar la cámara, deteriorando la calidad de las imágenes, o afectar la etapa de procesamiento, filtrándose como ruido en el tratamiento digital de la información.

En conclusión, se ha comprobado el potencial de la técnica de proyección de franjas para ser implementada en cualquier aplicación relacionada con la visión artificial o el procesamiento de imágenes biomédicas. La principal desventaja que presenta la técnica, es que solo permite reconstruir el perfil del objeto que es iluminado con la proyección de las franjas. Lograr una reconstrucción a 360° de observación usando esta técnica requiere de un montaje y un procesamiento complejo, que actualmente es objeto de estudio.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue realizada con recursos de Colciencias y del SENA, según proyecto titulado Diseño y desarrollo de dispositivos de reconstrucción 3D aplicados a la exploración corporal N° 110250226846 ante Colciencias y N° 8186 ante la Vicerrectoría de Investigaciones y Extensión de la Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS

- [1] J. Salvi, "Pattern codification strategies in structured light systems". Instituto de Informática, Universidad de Girona, España. 2001.
- [2] Z. Pérez G., "Aproximación Espacio-Temporal para la medida absoluta de la forma 3D de un objeto por proyección de franjas". Trabajo de grado. Escuela de Física. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [3] J. Meneses, "Système Optique Pour la Mesure des Déformations de la Voûte Plantaire Sous Charge Statique", Thèse. L'U.F.R Des Sciences Et Techniques De L'Université De Franche-Comté. 22 Septembre, 1998.
- [4] S. Henrik O. and J. M. Huntley. "Profilometry using temporal phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector", *Opt. Eng.* 36(2), 610-615. 1997.
- [5] K. G. Larkin, K. Hibino, B. F. Oreb and I. Farrant. "Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors". *J. Opt Soc. Am. A*, Vol 12, No. 4. 1995.
- [6] J. Meneses Jaime, T. Gharbi and H. Philippe, "Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram". *Applied Optics*, Vol. 44, No. 7, pp. 1207-1215, 2005.
- [7] Hong Hao, Wenyi Chen and Yushan Tan. "Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes". *Applied Optics*, Vol. 33, No. 20. 1994.
- [8] A. Baldi, F. Bertolino and F. Ginesu. "On the performance of some unwrapping algorithms". *Opt. Laser Eng.* 37, 313-330. 2002.
- [9] N. Egidi and P. Maponi, "A comparative study of two fast unwrapping algorithms". *Appl. Math. Comp.* 148, 599-629, 2004.