

Sistema de proyección de franjas y su implementación en un sistema optomecatrónico de reconstrucción 3D

Investigación en Curso

Andrés González
Maestría en Telemática –
Facultad de Ingeniería de Sistemas
agonzalez3@unab.edu.co

Jauri León
Grupo de Investigación en
Ciencias Aplicadas - UNAB
jleon544@unab.edu.co

Jaime Meneses
Grupo de Óptica y Tratamiento
de Señales – UIS
jaimen@uis.edu.co

Universidad Autónoma de Bucaramanga

RESUMEN

En la actualidad, la reconstrucción 3D es una herramienta útil y fundamental para diferentes disciplinas en ingeniería y medicina. Las diferentes técnicas de reconstrucción 3D se apoyan en conceptos de óptica física, visión por computador y tratamiento digital de señales, con el fin de obtener una imagen digital lo más idéntica posible al objeto real reconstruido. En la técnica de proyección de franjas, se proyectan sobre el objeto a reconstruir franjas paralelas blancas y negras y la adquisición de las imágenes se hace mediante una Cámara CCD. De esta forma, sujeto a previa calibración de todo el sistema, las diferentes imágenes son procesadas mediante software y de esta manera se obtiene una imagen tridimensional reconstruida. Este estudio hace parte de un trabajo de investigación donde se busca la estrategia para implementar la técnica en el desarrollo de dispositivos biomédicos de antropometría óptica.

ABSTRACT

Advances in digital electronics and computing have favored the development of 3D reconstruction, today it is a useful and important tool for different disciplines in engineering and medicine. The different 3D reconstruction techniques are based on concepts of physical optics, computer vision and digital signal processing in order to obtaining a digital image identical to the reconstructed real object. In fringe projection technique, black and white fringe are projected onto the object that will be reconstructed. Image acquisition is done using a CCD camera. Thus, different images are captured in two dimensions that must be processed by software for obtain a reconstructed three dimensional image.

Área de Conocimiento

Ingenierías, Ciencias de la Salud.

Palabras Clave

Proyección de franjas, Reconstrucción 3D, Triangulación lineal, Metrología Óptica, Optomecatrónica.

Este material es presentado al *VI Encuentro Institucional de Semilleros de Investigación UNAB*, una actividad de carácter formativo. La Universidad Autónoma de Bucaramanga se reserva los derechos de divulgación con fines académicos, respetando en todo caso los derechos morales de los autores y bajo discrecionalidad del grupo de investigación que respalda cada trabajo para definir los derechos de autor.

1. INTRODUCCIÓN

La reconstrucción tridimensional es un proceso en el que objetos reales son reproducidos digitalmente conservando sus características físicas (dimensiones, volumen y forma), empleando un dispositivo de sensado tridimensional. Es una herramienta que se ha incorporando a diferentes disciplinas como la visión artificial, visión de robots, diagnóstico médico, labores de inspección, entre otras. Dentro de las diversas clasificaciones de los métodos de reconstrucción tridimensional se pueden identificar claramente dos grupos: aquellos que requieren de contacto físico entre el dispositivo de sensado con el objeto a digitalizar y los que no. La necesidad de contacto es una limitante a la hora de reconstruir objetos frágiles y delicados; además el tiempo que requiere un brazo palpador o una microfresa para recorrer toda la superficie del objeto a reconstruir es considerable y las dimensiones del objeto pueden ser alteradas con el contacto.

Por otra parte, los métodos de reconstrucción tridimensional basados en técnicas ópticas son rápidos, no requieren de contacto físico, proporcionan medidas y dimensiones de alta precisión, son más económicos que otros y se ajustan a las dimensiones del objeto a medir. La técnica de proyección de franjas es un método de reconstrucción tridimensional basado en conceptos de triangulación óptica, que permite obtener la topografía superficial de un objeto mediante la recuperación de la fase de un patrón de franjas proyectadas sobre él.

Este artículo presenta un estudio experimental de la técnica de proyección de franjas desarrollado en conjunto por el Semillero de Investigación en Optomecatrónica del Grupo de Investigación en Ciencias Aplicadas GINCAP de la Universidad Autónoma de Bucaramanga y el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales GOTS de la Universidad Industrial de Santander.

2. PROYECCION DE FRANJAS

La técnica de proyección de franjas consiste en proyectar sobre el objeto a reconstruir franjas paralelas blancas y negras, que se deforman por la topografía superficial del objeto. La Figura 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 Video Proyector) para proyectar las franjas y un dispositivo de observación (cámara CCD) para la adquisición de las imágenes. Las imágenes adquiridas son procesadas por la

unidad de control, que permite adicionalmente sincronizar las adquisiciones y calibrar el dispositivo. El proceso físico de codificación de la información topográfica se realiza de la siguiente 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.

Ahora si se considera 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:

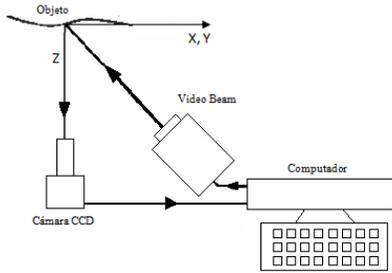


Figura 1. Montaje experimental de proyección de franjas

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

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 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 así:

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

El término $\Delta\phi$ es la fase introducida por la topografía del objeto.

La ecuación 2 se puede reducir así:

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

El término ϕ corresponde a la fase del patrón de franjas. De esta forma 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 aplica el método de Corrimiento de Fase (Phase Shifting). En este caso 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 .

$$\phi_i = \frac{2\pi}{n}(i - 1) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

De esta forma la ecuación (3) se puede escribir como:

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

A partir de las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales y considerando el procedimiento comúnmente

utilizado con $n = 4$ imágenes, lo cual implica un desplazamiento de fase igual a $\pi/2$, se puede calcular el valor de A y ϕ para cada punto (x_o, y_o) obteniéndose usando el resultado señalado en (6) y (7).

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (6)$$

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

Donde I_1 es la imagen correspondiente a un desplazamiento de fase $\phi_1 = 0$, I_2 para un $\phi_2 = \pi/2$, I_3 para un $\phi_3 = \pi$, e I_4 para un $\phi_4 = 3\pi/2$ (Ver Figura 3).

Como se observa en la ecuación (6), el uso de la función arcotangente 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 (Ver Figura 4).

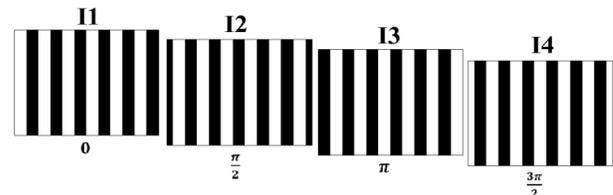


Figura 3. Patrón de franjas con corrimiento de fase $\phi_1 = \pi/2$.

En la Figura 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 franjas 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 continua del patrón de franjas proyectado sobre el plano de referencia y la fase continua del mismo patrón de franjas proyectado sobre el objeto. Según las ecuaciones (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.

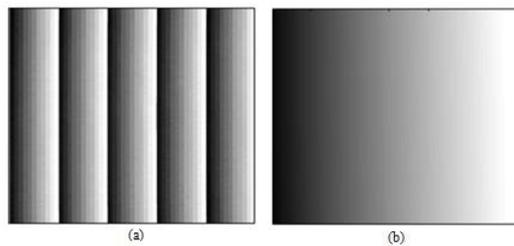


Figura 4. Imagen de la fase a) discontinua y b) continua.

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. 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 geométrico 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 . Este procedimiento se explicará en la sección siguiente.

3. SISTEMA EXPERIMENTAL DE RECONSTRUCCIÓN 3D

En el procedimiento experimental se usó: para la proyección de las franjas un Video Proyector; para la adquisición de las imágenes una cámara CCD, y para el procesamiento digital de las imágenes se usó el software Matlab. 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. Veamos ahora el proceso de calibración y el concepto de triangulación.

3.1. Calibración Experimental

El proceso de calibración consiste en determinar el valor de la fase para cada pixel 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 pixel 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 12 cm. Una lámina de acrílico blanco de dimensiones $40 \times 40 \times 0.4$ cm se utilizó como plano de referencia.

En el proceso de calibración el plano de referencia se desplazó manualmente valores de $\Delta Z = 1000\mu m$, en un recorrido lineal desde $6cm$ hasta $-6cm$, 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 de $\phi_i = \pi/2$, para un total de 480 imágenes en los 12 cm de recorrido. Para cada posición ΔZ se recupera su fase discontinua y, con el procedimiento “unwrapping”, su respectiva fase continua.

La curva de calibración experimental corresponde a un polinomio de orden 2. Empleando regresión lineal por mínimos cuadrados para cada pixel de la imagen se determinan los coeficientes a, b y c de la ecuación de calibración polinomial (Ver Figura 5):

$$\Delta\phi = \phi_z(x, y) - \phi_o(x, y) = a(x, y)Z^2 + b(x, y)Z + c(x, y) \quad (8)$$

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 la ecuación (9) se puede calcular la altura Z de un pixel conociendo la fase en ese punto y restándosela a la fase del plano de referencia en ese mismo punto.

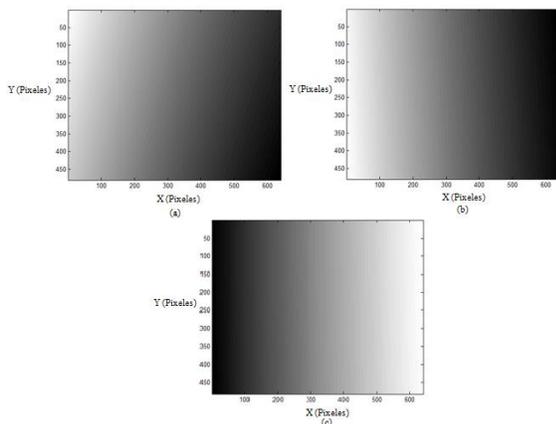


Figura 5. Planos de calibración. Coeficientes: (a) a, (b) b y (c) c de la ecuación (9).

3.2. 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_o las franjas tendrán una posición en el plano imagen y una fase determinada. Desplazando el plano a un valor $Z_o + \delta Z$ específica, una franja negra en esta posición $Z_o + \delta Z$ se ubica encima de su vecina en la posición anterior Z_o , 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 ya que:

$$I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(\phi) = I_o(x_o, y_o) + A(x_o, y_o) * \text{Cos}(\phi + 2\pi N) \quad (9)$$

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, y 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 son no-telecéntricas, aunque son diseñadas de buena calidad, con un mínimo de aberraciones geométricas. 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 (9) 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 laser lineal, con la diferencia que se usa el mismo video proyector como fuente de luz y no un laser. Para este caso el patrón es un fondo negro con una línea blanca del ancho de tres pixeles de la LCD del proyector.

El proceso de calibración completa se realiza de la siguiente manera: Para cada posición Z en el rango $\pm Z_{\max}$ se proyectan y adquieren las 4 imágenes de franjas desplazadas $\pi/2$ y la imagen de la línea blanca. De esta manera con las 4 imágenes de franjas se calcula la fase y la quinta sirve para asociar a cada pixel de la

CCD un valor de Z. 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.

4 RECONSTRUCCIÓN 3D

Después de calcular los coeficientes de la ecuación (9) 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. En primer lugar es importante ubicar el objeto a reconstruir dentro del espacio definido en el anterior procedimiento para la calibración, para este caso 12 cm. Una vez ubicado el objeto, se proyectan sobre él las 4 imágenes de las franjas con un desfase de $\varphi = \pi/2$. Estas imágenes son capturadas con la cámara CCD desde la aplicación desarrollada en Matlab. El siguiente paso es recuperar la fase de las imágenes del objeto y con el procedimiento de “unwrapping” se obtiene la fase continua. La imagen de la línea blanca proyectada sobre el objeto, se superpone sobre la imagen de las líneas blancas de la calibración lineal. Se determinan las coordenadas en pixeles de un punto de superposición, obteniéndose para ese punto el valor Z. Con este valor, el valor de ϕ_0 y los coeficientes a, b y c de la calibración para este punto, se calcula ϕ_z , y al compararlo con el valor ϕ de la fase continua en ese mismo punto se calcula 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 obtenida del objeto. Las coordenadas Z para cada punto se calculan usando la ecuación (9), ya que se conoce $\Delta\phi$ y los coeficientes a, b y c para cada punto (Ver Figura 6).

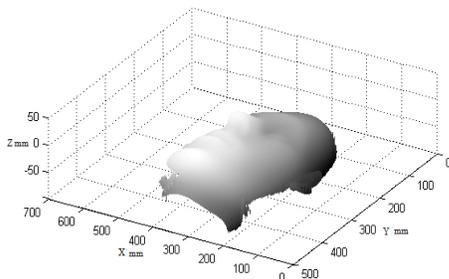


Figura 6. Reconstrucción 3D.

5. CONCLUSIONES

El montaje experimental, en el que se utiliza un Video Proyector 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.

En conclusión, se ha comprobado el potencial de la técnica de proyección de franjas para ser implementada en aplicaciones relacionadas con la visión artificial o el procesamiento de imágenes biomédicas. La principal desventaja que se encontró de la técnica, es que solo se puede reconstruir el perfil del objeto que es iluminado con la proyección de las franjas. Lograr una reconstrucción a 360° de observación con la técnica de proyección de franjas requiere de un montaje y un procesamiento mucho más complejo, que actualmente es objeto de estudio.

6. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Nombre del Semillero	Optomecatrónica
Tutor del Proyecto	Jauri León Téllez
Grupo de Investigación	GINCAP
Línea de Investigación	Óptica y Tratamiento digital de señales
Fecha de Presentación	Marzo de 2013

7. REFERENCIAS

- [1] Salvi Joaquin. “Pattern codification strategies in structured light systems”. Instituto de Informática, Universidad de Girona, España. 2001.
- [2] Meneses Jaime, Système Optique Pour La Mesure des Déformations De la Voûte Plantaire Sous Charge Statique, Thèse. L’U.F.R. Des Sciences Et Techniques DeL’Université De Franche-Comté. 22 Septembre, 1998.
- [3] Henrik O. Saldner, Jonathan M. Huntley. “Profilometry using temporal phase unwrapping phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector”, Opt. Eng. 36(2) 610-615. 1997.
- [4] K.G. Larkin, K. Hibino, B.F. Oreb, I. Farrant. “Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors”. J. Opt Soc. Am. A, Vol 12, N° 4. 1995.
- [5] Meneses Jaime, Gharbi Tijani, and Philippe Humbert. Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram. Applied Optics, Vol. 44, No. 7, pp. 1207-1215, 2005.
- [6] Hong hao, Wenyi Chen, Yushan Tan. “Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes”. Applied Optics Vol 33, N° 20. 1994.
- [7] A. Baldi, F. Bertolino, F. Ginesu. “On the performance of some unwrapping algorithms”. Opt. Laser Eng. 37, 313-330. 2002.
- [8] N. Egidi, P. Maponi. “A comparative study of two fast unwrapping algorithms”. Appl. Math. Comp. 148, 599-629. 2004.