



“TOPOMETRIA Y ASOCIACION DE COLOR REAL DE LOS OBJETOS”

Tesis presentada por:

ING. YOLANDA YANET LOPEZ DOMINGUEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN OPTOMECASTRONICA

Asesor:

DRA. AMALIA MARTINEZ GARCIA

Agosto de 2010, León, Guanajuato.

.....

RESUMEN

.....

Los sistemas de reconstrucción tridimensional han cobrado mucha popularidad en los últimos años, ya que el modelado de objetos tiene múltiples aplicaciones. Existen muchas para obtener la información tridimensional de un objeto, entre ellas, la técnica de proyección de franjas.

En esta tesis se presenta el uso del método de proyección de franjas para obtener la topografía de un objeto. Utilizando un método propuesto en el cual se proyectan franjas en rojo, verde y azul y utilizando la técnica de corrimiento de fase (phase shifting) se recupera la topografía del objeto, así como la mayor información posible sobre el color real y la textura de dicho objeto. Una vez obtenida las dimensiones reales, la información correspondiente al color y a la textura se superpone a la reconstrucción tridimensional obtenida. Esto tiene muchas ventajas, una de ellas, por ejemplo en el método de prototipado rápido, en la obtención de algún modelo para prótesis, en donde la asociación del color real en la duplicación de componentes es de gran importancia. También se puede utilizar la información de la topografía en términos volumétricos y el color, para estudios en inflamaciones y cicatrices post-operatorias para evaluar el proceso de recuperación.

En la primera parte de presenta una revisión de las técnicas de reconstrucción tridimensional, haciendo énfasis en la técnica de proyección de franjas. Se presentan también las técnicas para obtener la fase de las franjas. En la segunda parte se presenta el arreglo experimental, los resultados, conclusiones y trabajo a futuro.

.....
INDICE
.....

CAPITULO I: INTRODUCCION ----- 1

CAPITULO II: TECNICAS DE RECUPERACION 3D

2.1 Introducción ----- 6

2.2 Técnica de Moiré ----- 7

2.3 Moiré por sombreado ----- 10

2.4 Moiré por proyección ----- 13

2.5 Proyección de franjas ----- 15

Referencias ----- 19

CAPITULO III: MEDICION DE FASE

3.1 Introducción ----- 21

3.2 Teoría de Fourier ----- 22

3.3 Método de desplazamiento de fase (Phase shifting) ----- 25

3.4 Método de la transformada de Fourier (Takeda) ----- 28

3.5 Desenvolvimiento de fase ----- 32

3.6 Ventajas y desventajas ----- 33

Referencias ----- 34

**CAPITULO IV: PARTE EXPERIMENTAL: TOPOMETRIA Y
ASOCIACION DE COLOR**

4.1 Introducción -----	36
4.2 Arreglo experimental de proyección de franjas -----	38
4.3 Medición de la fase -----	43
4.4 Obtención de la topografía -----	46
4.5 Resultados -----	48
Referencias -----	54

CAPITULO V: CONCLUSIONES 56

5.1 Trabajo a futuro -----	58
5.2 Visita a empresas e instituciones -----	59

APENDICE A: PLAN DE NEGOCIOS ----- 64

APENDICE B: CODIGO DEL PROGRAMA ----- 69

.....

INDICE DE FIGURAS

.....

CAPITULO II: TECNICAS DE RECONSTRUCCION 3D

2.1	Palpador mecánico en la obtención de topometría -----	7
2.2	Interferencia entre dos ondas planas -----	8
2.3	Esquema de la interferometría de moiré -----	9
2.4	Esquema de moiré por sombreado -----	10
2.5	Patrón de moiré por sombreado de una superficie convexa -----	13
2.6	Esquema de moiré por proyección -----	14
2.7	Geometría de la técnica de proyección de franjas -----	16
2.8	Franjas proyectadas sobre un objeto -----	18

CAPITULO III: MEDICION DE FASE

3.1	Gráfica de una función en el plano complejo -----	24
3.2	Patrón de franjas con un corrimiento de cuatro pasos -----	28
3.3	Espectro de Fourier del interferograma -----	30
3.4	Espectro seleccionado y trasladado al origen -----	30

CAPITULO IV: PARTE EXPERIMENTAL: TOPOMETRIA Y ASOCIACION DE COLOR

4.1	Geometría del método de proyección de franjas -----	39
-----	-----------------------------------------------------	----

4.2 Patrón de franjas generado por computadora -----	41
4.3 Arreglo experimental para proyección de franjas -----	42
4.4 Patrón de franjas en rojo, verde y azul generado por computadora -----	42
4.5 Imágenes de franjas proyectadas sobre el objeto de prueba con desplazamiento de cuatro pasos -----	44
4.6 Fase envuelta de las franjas de referencia -----	44
4.7 Fase envuelta de las franjas proyectadas sobre el objeto -----	45
4.8 Fase desenvuelta de las franjas de referencia -----	46
4.9 Fase desenvuelta de las franjas proyectadas sobre el objeto -----	47
4.10 Topografía del objeto bajo prueba -----	47
4.11 Franjas RGB proyectadas sobre el objeto -----	49
4.12 Objeto bajo prueba con franjas proyectadas y fase desenvuelta de las franjas RGB -----	50
4.13 Objeto original bajo prueba -----	51
4.14 Topografía resultando con asociación de color y textura -----	51
4.15 Objeto bajo prueba y franjas proyectadas en RGB -----	53
4.16 Topografía obtenida con color y textura -----	53
CAPITULO V: CONCLUSIONES	56
5.1 Pruebas físicas a la suela -----	60
5.2 Ejemplo de hematoma en el codo -----	60
5.3 Visita al Ciatec -----	62
5.4 Visita al Ciatec -----	62

Introducción

La reconstrucción tridimensional (3D) de objetos, es un proceso mediante el cual los objetos reales son reproducidos digitalmente en sus tres dimensiones (alto, ancho y profundidad) en una computadora. En los últimos años, la investigación en el desarrollo de las técnicas de reconstrucción tridimensional ha dado lugar a escáneres comerciales en 3D [1] con los cuales se pretende tener sistemas ópticos fáciles de manejar en la obtención de topografía de objetos diversos.

La técnica de proyección de franjas es una técnica óptica que permite la cuantificación de la topografía de macro-superficies [2] así como de micro-superficies [3]. La obtención de la topografía de un objeto tiene muchas aplicaciones en varios campos tales como la medicina (ej. fabricación de prótesis), la arqueología (ej. preservación digital de piezas arqueológicas), industria metal-mecánica (ej. control de calidad de piezas, ingeniería inversa), comercio electrónico (ej. representación tridimensional de objetos a través de la red), aplicaciones ergonómicas (ej. personalización de ropa, trajes, equipos que dependan de la variabilidad del cuerpo humano), etc. Adicionalmente de la topografía, hay características muy importantes en un objeto, que es el color y la textura. En el campo de la medicina, por ejemplo, la textura y el color real proporcionan mayor información acerca de las características específicas de un paciente. Dicha información puede ser utilizada para obtener la topografía y

asociación del color real de órganos humanos para su posterior duplicación, o bien, para la manufactura de prótesis e implantes a la medida del paciente.

Una de las desventajas de la técnica de proyección de franjas se presenta en superficies con pendientes pronunciadas o con discontinuidades en su topografía, ya que esto causa que se pierda la continuación de las franjas en los patrones obtenidos. El problema anterior hace difícil la obtención de la fase de las franjas proyectadas. Como una solución planteada en la literatura, se propone la proyección de franjas a color evitando así la ambigüedad de desenvolvimiento de fase [4]. Con el desarrollo de cámaras CCD de color y proyectores digitales, los canales primarios rojo, verde y azul han sido utilizados para modular la información de la fase para así reducir el tiempo de adquisición [5]. Se han propuesto diversas técnicas, entre ellas la de Huang [6], que propuso una técnica de proyección de franjas a colores usando tres patrones, una en cada canal de color, con un corrimiento de fase de $2\pi/3$. Skydan [7] propone otro método en el cual se proyectan tres patrones de franjas en los tres canales de color primarios usando tres diferentes proyectores y a diferentes puntos de observación. Zhang [8] en cambio, propone proyectar franjas en blanco y negro con un desplazamiento de fase de 3 pasos y utiliza una cámara a color para la obtención de la textura. En este caso, se utiliza un filtro Bayer para convertir la imagen a color y así recuperar la textura.

En este trabajo se propone utilizar un método proyectando franjas en rojo, verde y azul para obtener la mayor información posible del color, utilizando solamente un proyector y una cámara CCD a color. Para obtener la topografía del objeto se utiliza un algoritmo de corrimiento de fase de 4 pasos, ya que es relativamente rápido y proporciona resultados bastante satisfactorios.

En el **capítulo 2** se hace una revisión de los conceptos básicos del efecto moiré y se describen algunas técnicas basadas en este fenómeno, entre ellas moiré por sombreado, moiré por proyección y proyección de franjas. También se presentan algunos métodos basados en proyección de franjas que realizan la asociación de color de los objetos.

En el **capítulo 3** se presenta una descripción de las técnicas de detección de fase: el método de la transformada de Fourier (también conocido como método de Takeda) y método de desplazamiento de fase (phase shifting). Se explica el algoritmo utilizado para desenvolver la fase de las franjas proyectadas y obtener la topografía del objeto.

En el **capítulo 4** se presenta el arreglo experimental basado en la técnica de proyección de franjas, se describe su funcionamiento y sus componentes, el proceso llevado a cabo para obtener la topografía y los resultados obtenidos con el método propuesto.

En el **capítulo 5** se presentan las conclusiones, algunas aplicaciones y el trabajo a futuro por realizarse. También se analizan algunas fuentes de error dado el uso de franjas de color. Se presenta también un pequeño resumen de las visitas realizadas a una empresa, a una institución de investigación y a una institución de salud. La finalidad de las visitas es conocer sus problemáticas y encontrar soluciones con las técnicas estudiadas. Las instituciones contactadas mostraron interés de realizar trabajos en conjunto.

Apéndice A: Se presenta el plan de negocios, ya que en un futuro se piensa en comercializar el sistema.

Apéndice B: Se presenta el código del software realizado para llevar a cabo todo el proceso de obtención de topografía.

REFERENCIAS

1. L. Gordon, “3D Scanning to Go”, Z Corporation.
2. Amalia Martínez, J. A. Rayas, H. J. Puga, Katia Genovese, “Iterative estimation of the topography measurement by fringe projection method with divergente illumination by considering the pitch variation along the x and z directions”, Optics and Lasers in Engineering, a publicarse en el 2010.
3. J. A. Rayas, R. Rodríguez Vera, Amalia Martínez, “Three-dimensional micro-topography by talbot-projected fringes”, fifth symposium Optics in Industry, edited by Eric Rosas, Rocío Cardoso, Juan C. Bermudez, Oracio Barbosa García, Proc. Of SPIE, Vol. 6046 (SPIE, Bellingham, WA January 2006), pp. 60461 y-1 to 60461 y-6.
4. Wei Hung Su, “Color-encoded fringe projection for 3D shape measurement”, Optics Express, October 2007, Vol. 15, No. 20, pp. 13167.
5. Z H Zhang, C E Towers, D P Towers, “Phase and colour calculation in colour fringe projection”, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, May 2007, Vol. 9, pp. S81 – S86. Online at www.stacks.iop.org/JOptA/9/S81
6. Huang P S, Hu Q Y, Jin F, Chiang F P “Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three dimensional surface contouring”, Optical Engineering, January 1999, Vol. 38, No. 6, pp. 1065-71.
7. Skydan O A, Lalor M J, Burton D R “Using colored structured light in 3D surface measurement”, Optics and Lasers in Engineering, July 2005, Vol. 43, No. 7, pp. 801 – 14.

8. Song Zhang, Shing-Tung Yau, "Simultaneous three-dimensional geometry and color texture acquisition using a single color camera", *Optical Engineering*, December 2008, Vol. 47, No. 12, pp. 123604.

Técnicas de recuperación 3D

2.1 INTRODUCCIÓN

La tecnología de recuperación de información 3D ha estado sujeta a investigación de manera considerable en los últimos años proponiéndose muchos sistemas diferentes con ese fin. Una clasificación común consiste en dispositivos de contacto y de no contacto. Los dispositivos de contacto normalmente son caros, lentos y además requieren de una calibración cada vez que se desgastan los sensores de medición de contacto. Un ejemplo de este tipo de sistemas son los robots palpadores (figura 2.1). En cuanto a los dispositivos de medición libres de contacto están la técnica de proyección de franjas, interferometría Talbot, interferometría de moteado, interferometría de moiré, entre otros. Las técnicas ópticas presentan mayores ventajas con respecto a los dispositivos de contacto puesto que son técnicas no invasivas y no destructivas, además de campo completo.

En la sección siguiente se presenta una revisión teórica de algunas técnicas basadas en el efecto moiré.



Figura 2.1 Palpador mecánico en la obtención de topometría.

2.2 TÉCNICA DE MOIRÉ

La figura 2.2 es una ilustración de la interferencia de dos ondas planas. También se puede ver como dos rejillas en contacto con un pequeño ángulo entre las rejillas. El resultado que se puede ver es un patrón de franjas de menor frecuencia que el de las rejillas individuales. Este es un ejemplo del efecto moiré y las franjas resultantes son llamadas franjas de moiré [1]. La descripción matemática de los patrones de moiré resultantes de la superposición de dos rejillas senoidales es la misma que del patrón de interferencia formado por ondas electromagnéticas. El efecto moiré es por consiguiente referido como interferencia mecánica. En la figura 2.2 las variables n_1 y n_2 representan los vectores de propagación de la luz de los frentes de onda. Los ángulos θ_1 y θ_2 señalan el ángulo de los vectores de

propagación con respecto a la normal del plano xy . El periodo correspondiente a las franjas de moiré o a las franjas generadas por la interferencia de los dos frentes de onda es representado por la variable d .

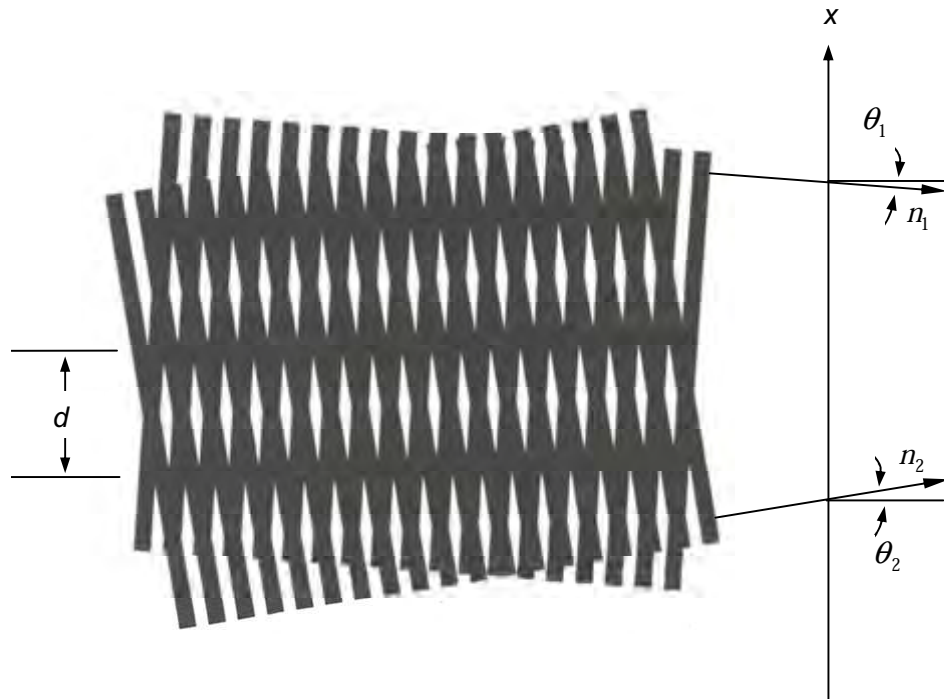


Figura 2.2 Interferencia entre dos ondas planas.

El fenómeno de moiré puede ser observado en nuestra vida cotidiana; puede verse en la superposición de cortinas o telas de malla muy fina, en la ropa, enrejados, cepillos, etc.

El moiré es una técnica de medición que se remonta muchos años atrás y actualmente las técnicas utilizando rejillas o franjas son ampliamente utilizadas debido a sus múltiples aplicaciones, ya que se pueden resolver problemas en óptica, movimiento de onda, análisis de esfuerzos, criptografía, matemáticas y psicología de percepción, etc.

Los métodos moiré pueden ser divididos en dos categorías: 1) métodos para medir desplazamientos en plano y 2) métodos para medir desplazamientos fuera de plano y obtención de topografía.

En el caso de la medición de componentes de desplazamientos en plano la técnica se conoce como interferometría de moiré [2,3]. En esta técnica se tiene la superposición de una rejilla espécimen (grabada en el objeto de interés) y una rejilla virtual (figura 2.3).

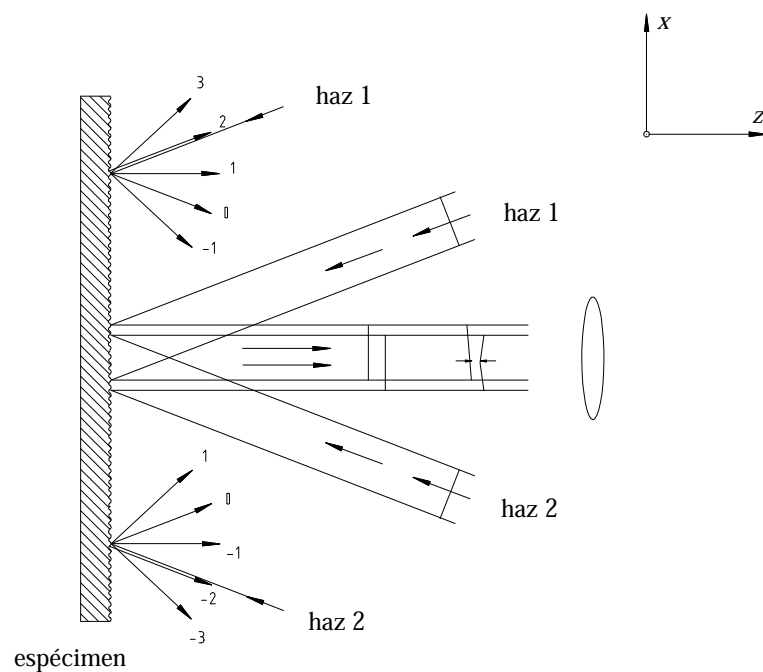


Figura 2.3 Esquema de la interferometría de moiré.

Entre las características de la interferometría de moiré se tiene: (a) se puede medir desplazamientos en plano hasta con una sensibilidad máxima de $4 \text{ franjas}/\mu\text{m}$; (b) es una técnica en tiempo real y de campo completo; (c) adicionalmente, tiene alta razón de señal a ruido: los patrones de franjas tienen

alto contraste y excelente visibilidad y (d) rango dinámico grande: el método es compatible con un gran rango de desplazamientos, esfuerzos y gradientes.

En el caso de mediciones de desplazamientos fuera de plano y obtención de la topografía de objetos, se utiliza el moiré por sombreado [1,4] o moiré por proyección [4,5].

2.3 MOIRÉ POR SOMBREADO

Este efecto se da cuando se forman franjas de moiré entre una rejilla y su propia sombra, por lo que se conoce como moiré por sombreado [1,6]. La sombra de la rejilla es distorsionada por la forma del objeto, por lo que se pueden observar franjas de moiré por las rejillas distorsionadas y las de referencia. El principio del método se muestra en la figura 2.4.

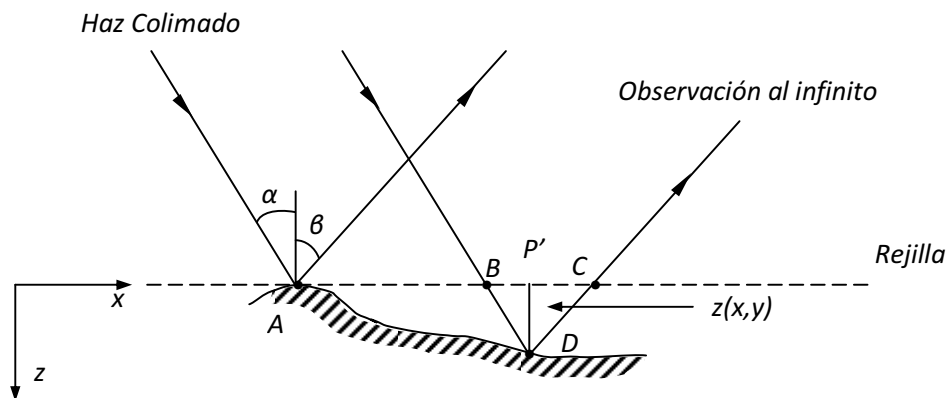


Figura 2.4 Esquema de moiré por sombreado.

En la figura se puede ver un arreglo con iluminación y observación oblicuas. Como se puede ver, se coloca una rejilla de referencia en el objeto.

Sin perder generalidad, el punto A hace contacto con la rejilla, α es el ángulo de iluminación con respecto a la normal de la superficie de la rejilla (eje z) y β es el ángulo de observación.

Los elementos de la rejilla contenidos en la distancia AB ocuparán una distancia AD en la superficie del objeto. Los elementos en AD formarán un patrón de moiré con los elementos de la rejilla contenidos en la distancia AC .

Sea p el número de elementos en AB y q el número de elementos en AC , entonces:

$$AB = pa \quad y \quad AC = qa. \quad (2.1)$$

Por geometría, tenemos:

$$BC = AC - AB = (q - p)a = Na, \quad (2.2)$$

donde N es el orden de las franjas de moiré y $N=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Tenemos que:

$$BC = BP' + P'C, \quad (2.3)$$

$$\tan \alpha = \frac{BP'}{Z} \quad , \quad \tan \beta = \frac{P'C}{Z}, \quad (2.4)$$

$$BC = z(\tan \alpha + \tan \beta), \quad (2.5)$$

$$z = \frac{Na}{\tan \alpha + \tan \beta}. \quad (2.6)$$

Dada la relación $N = \frac{\phi}{2\pi}$, la ecuación 2.6 puede escribirse como:

$$z(x, y) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{a}{\tan \alpha + \tan \beta}, \quad (2.7)$$

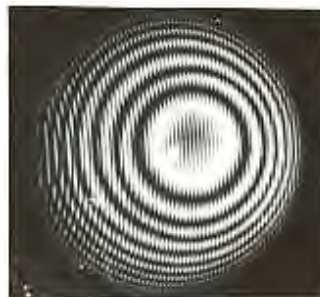
donde $z(x, y)$ es la profundidad medida desde la rejilla.

Las franjas de moiré son contornos de igual profundidad medidos desde la rejilla (figura 2.5). Cuando la observación es a lo largo de la normal de la rejilla ($\beta = 0$).

$$z(x, y) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{a}{\tan \alpha}. \quad (2.8)$$

Si en cambio, la rejilla es iluminada normalmente y observada a cierto ángulo, entonces ($\alpha = 0$):

$$z(x, y) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{a}{\tan \beta}. \quad (2.9)$$



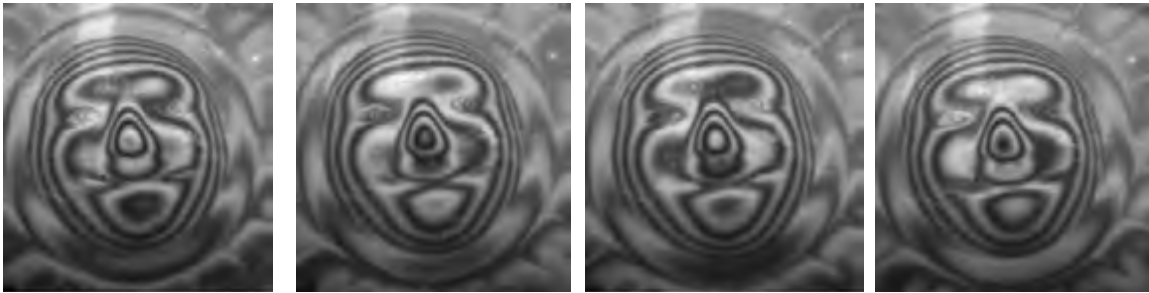


Figura 2.5 Patrón de moiré por sombreado para una superficie convexa.

2.4 MOIRÉ POR PROYECCIÓN

La interferometría de moiré también puede ser implementada proyectando franjas de interferencia o una rejilla sobre un objeto y luego observar a través de una segunda rejilla ubicada enfrente del observador (figura 2.6).

La diferencia entre moiré por proyección y moiré por sombreado, es que en moiré por proyección son necesarias dos rejillas. La orientación del plano de referencia puede ser cambiada arbitrariamente usando diferentes periodos de rejilla para observar el objeto [6].

Se examinan dos casos:

- Los ejes ópticos de la proyección y de la observación son paralelos.
- Los ejes ópticos están inclinados uno con respecto al otro.

De la figura 2.6 se forma la imagen de la rejilla G_1 de periodo a en el plano de referencia donde su periodo es Ma , siendo M la amplificación del sistema de proyección. Si la superficie del objeto fuera plana y localizada en este plano de referencia, la rejilla proyectada debería tener un periodo constante. Se forma la imagen de esta rejilla en la rejilla de referencia G_2 .

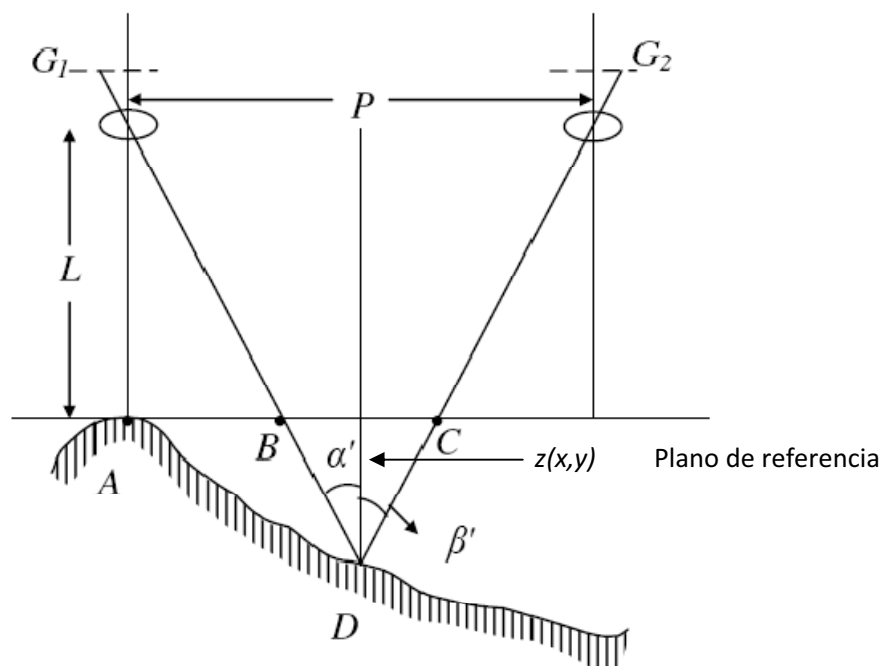


Figura 2.6 Esquema de moiré por proyección.

Si los sistemas de proyección y de formación de imágenes son idénticos el periodo de la rejilla imagen será igual al de G_2 y los elementos de las rejillas estarán paralelas entre sí dada la alineación inicial. Entonces no se forma un patrón de moiré. Sin embargo, si la superficie es curva, el periodo de la rejilla proyectada en la superficie varía y se formará un patrón de moiré.

De acuerdo a lo descrito en la sección de moiré por sombreado, podemos decir que:

$$z(x, y) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{a}{\tan \alpha + \tan \beta}. \quad (2.10)$$

Esta implementación hace que moiré por proyección sea igual a moiré por sombreado, aunque moiré por proyección puede resultar más complicado. Sin embargo, tiene la ventaja de poder obtener contornos o superficies de objetos mucho más grandes que el moiré por sombreado.

2.5 PROYECCIÓN DE FRANJAS

La figura 2.7 muestra la geometría óptica de donde se puede obtener la relación para la altura del objeto bajo estudio para el caso de proyección de franjas. Se proyecta una rejilla donde las líneas son paralelas al eje y , el eje z coincide con la dirección de observación y el plano xy ($z = 0$) el cual es el plano de referencia, es decir la altura es igual a 0 en este plano. La normal de la rejilla proyectada hace un ángulo α con respecto al eje óptico. La superficie es entonces iluminada incoherentemente con una rejilla cosenoidal y observada por una cámara CCD en la normal del plano xy . La distribución de intensidad observada en la normal del plano xy es:

$$I_1(x, y) = K \left\{ 1 + \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_1 \tan \alpha) \right] \right\}, \quad (2.11)$$

donde $p = p_0 / \cos \alpha$, $K = \text{una constante}$, $z_1 = z_1(x, y)$ y $p_0 = \text{periodo de la rejilla proyectada}$.

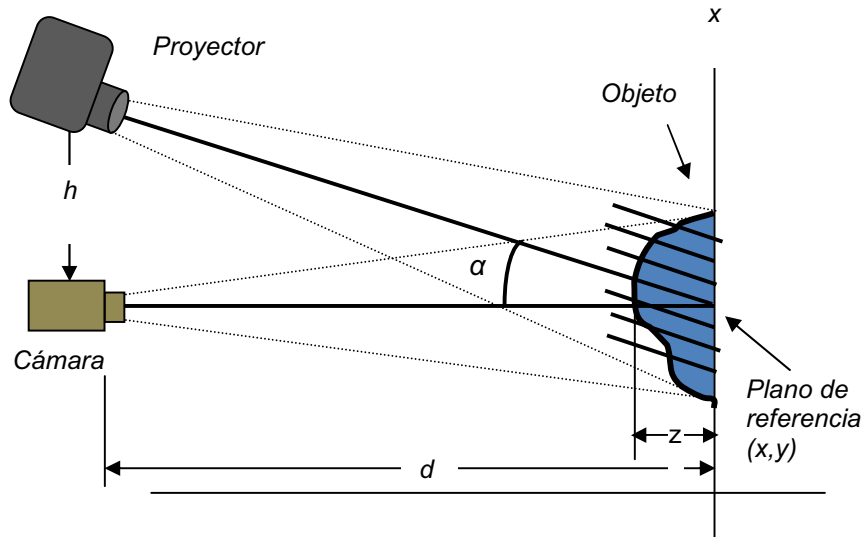


Figura 2.7 Geometría de la técnica de proyección de franjas.

Si se tiene ahora una segunda superficie $z_2 = z_2(x, y)$, la cual puede representar una desviación con respecto a una superficie de referencia z_1 la cual es plana. Su intensidad para esta segunda superficie es representada por:

$$I_2(x, y) = K \left\{ 1 + \cos \left[\left(\frac{2\pi}{p} \right) (x - z_2 \tan \alpha) \right] \right\}. \quad (2.12)$$

Estas distribuciones de intensidad son representadas por señales de voltaje V_1 y V_2 en la PC, y son proporcionales a las funciones de intensidades I_1 e I_2 respectivamente. Haciendo contorno electrónico de moiré, la imagen de video resultante es proporcional a:

$$V_1 - V_2 \propto |I_1 - I_2| = \cos\left[\left(\frac{2\pi}{p}\right)(x - z_1 \tan \alpha)\right] - \cos\left[\left(\frac{2\pi}{p}\right)(x - z_2 \tan \alpha)\right]. \quad (2.13)$$

Sustituyendo p en función de p_0 , la ecuación anterior llega a ser:

$$V_1 - V_2 \propto |I_1 - I_2| = \cos\left[\left(\frac{2\pi}{p_0}\right)(x \cos \alpha - z_1 \operatorname{sen} \alpha)\right] - \cos\left[\left(\frac{2\pi}{p_0}\right)(x \cos \alpha - z_2 \operatorname{sen} \alpha)\right]. \quad (2.14)$$

De la identidad trigonométrica $\cos A - \cos B = 2 \operatorname{sen} \frac{1}{2}(A + B) \operatorname{sen} \frac{1}{2}(A - B)$, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$|I_1 - I_2| = \operatorname{sen} \left[\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \alpha \right] \times \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{p_0} \left(x \cos \alpha - \frac{(z_2 + z_1)}{2} \operatorname{sen} \alpha \right) \right]. \quad (2.15)$$

La ecuación anterior representa el patrón de franjas proyectado originalmente (desplazado en fase) modulado en amplitud por el factor $\operatorname{sen} \left[\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \alpha \right]$. Esta función de modulación corresponde a las franjas de moiré, teniendo un mínimo cuando:

$$\frac{\pi}{p_0} (z_2 - z_1) \operatorname{sen} \alpha = n\pi, \quad (2.16)$$

donde n es un entero. El intervalo de contorno estará dado entonces por:

$$\Delta z = \frac{p_0}{\text{sen } \alpha}. \quad (2.17)$$

En función de la fase y recordando que $p = p_0 / \cos \alpha$, la ecuación anterior queda expresada como:

$$z(x, y) = \frac{\phi}{2\pi} \frac{p}{\tan \alpha}, \quad (2.18)$$

Donde $z(x, y)$ es la profundidad medida desde la rejilla, ϕ es la diferencia de fase entre la rejilla en el plano de referencia ($z = 0$) y la fase de la rejilla deformada, p es el periodo de la rejilla en el plano de referencia, α es el ángulo formado entre la normal de la rejilla proyectada y la normal del plano de referencia [1,6].

En la figura 2.8 podemos ver como se ven las franjas proyectadas sobre la superficie de un objeto.

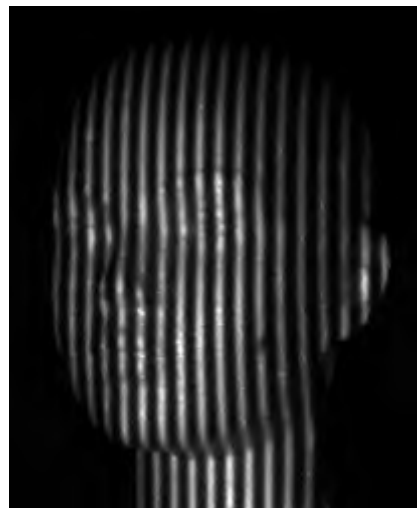


Figura 2.8.- Franjas proyectadas sobre un objeto.

Cuando la rejilla se desplaza axialmente se obtienen patrones de moiré existiendo un desplazamiento en fase para sus franjas. Utilizando la técnica de desplazamiento de fase (phase stepping) se puede calcular la topografía del objeto [7].

Las técnicas de contorneado de proyección de franjas, moiré por sombreado y moiré por proyección son similares entre sí. Todas ellas utilizan la proyección de un patrón de líneas o franjas de interferencia sobre un objeto y luego se observa el contorno de las líneas desde una dirección diferente. La mayor sensibilidad de estas técnicas se da cuando se observan las líneas desde un ángulo de 90° con respecto a la dirección de proyección [6]. La precisión de las medidas de superficie y de profundidad dependerá del número de franjas proyectadas. Así, el número de franjas proyectadas suele ser tantas como pueda medir el sistema. Una vez que la altura o profundidad de la superficie haya sido calculada, la superficie de referencia puede ser restada digitalmente para obtener finalmente la profundidad relacionada al objeto deseado.

Estas técnicas pueden ser aplicadas para medición de desplazamientos, análisis de deformaciones y topometría de superficies.

REFERENCIAS:

1. Kjell J. Gasvik, “Moiré Methods. Triangulation”, Optical Metrology, Third Edition, Editorial Wiley, Cap.7, pp. 173-192.
2. D. Post, B. Han, P. Iju, “High Sensitivity Moiré”, Springer-Verlag, 1994.
3. Amalia Martínez García, Iluminación esférica en interferometría de moiré, Tesis doctoral, Diciembre de 2001, Centro de Investigaciones en Óptica, León, Gto. México.



4. K. Patorski and M. Kujawinska, "The Moiré Fringe Technique", Elsevier, 1993.
5. O. Kafri and I. Glatt, "The Physics of Moiré Metrology", Wiley & Sons Inc., 1990.
6. D. Malacara, "Moiré and Fringe projection technique", Optical Shop Testing, Second Edition, John Wiley & Sons Inc. New York. Cap. 16.
7. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Phase-shifting interferometry", Interferogram Analysis For Optical Testing, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 7.

Medición de fase

3.1 INTRODUCCIÓN

Durante varias décadas se han venido desarrollando técnicas de análisis de franjas. El desarrollo de nuevos métodos de análisis ha colocado a las técnicas interferométricas como una herramienta de medida práctica. Se comienza con la generación de franjas mediante alguna técnica interferométrica, los datos de las franjas son capturados y almacenados, posteriormente, los resultados derivados del proceso anterior pasan a la etapa de análisis. La distribución de la fase en el interferograma es el objetivo principal de las medidas interferométricas.

En esta tesis se presenta el método de Fourier o método de Takeda y el método de desplazamiento de fase (phase shifting). Ambos métodos necesitan de un proceso de desdoblamiento de fase lo cual será explicado brevemente más adelante en este capítulo.

El análisis de franjas mediante el método de Fourier es generalmente menos preciso que el de interferometría de desplazamiento de fase (phase shifting interferometry), normalmente por más de un orden de magnitud. También requiere más cuidado en la manipulación de formas complejas y variaciones en la visibilidad de las franjas. Estos detalles pueden provocar que no se haga un análisis de las franjas de forma eficiente. Sin embargo, este

método tiene la ventaja de necesita una sola imagen de las franjas, que puede ser adquirida en un breve intervalo de tiempo [1].

Por otro lado, la interferometría de desplazamiento de fase, requiere de múltiples imágenes, que requieren de mayor tiempo en ser capturadas y en el cual, las franjas deben permanecer estables. Sin embargo, el análisis de las franjas de muchas imágenes proporciona mayor exactitud y precisión.

Para tener una idea más clara de lo que significa la fase envuelta y desenvuelta, es necesario dar un repaso por la teoría de Fourier y de las funciones complejas.

3.2 TEORÍA DE FOURIER

La transformada de Fourier es una herramienta matemática muy importante para el procesamiento digital de interferogramas [2].

Las funciones complejas son una herramienta importante para entender la teoría de Fourier. Estas pueden ser representadas en un plano complejo, en donde la parte real de la función es graficada en el eje horizontal (x) y la parte imaginaria en el eje vertical (y).

Una función compleja puede escribirse de esta forma:

$$g(x) = Re\{g(x)\} + iIm\{g(x)\}, \quad (3.1)$$

donde $Re(g)$ es la parte real de g y $Im(g)$ es la parte imaginaria de g .

La fase del número complejo es el ángulo con respecto al eje horizontal de la línea que parte del origen al valor de la función que está siendo graficada. Por lo tanto, la fase de cualquier función compleja $g(x)$ se obtiene con:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im} \{g(x)\}}{\text{Re} \{g(x)\}} \right]. \quad (3.2)$$

Esta fase tiene un efecto de envolvimiento, ya que si ambas partes (real e imaginaria) son negativas, el radio será el mismo como cuando ambas partes son positivas. Por lo tanto, la fase está comprendida dentro de los límites $0 \leq \phi \leq \pi$. La magnitud de la función compleja está dada por:

$$g(x) = [(\text{Re}\{g(x)\})^2 + (\text{Im}\{g(x)\})^2]^{1/2}, \quad (3.3)$$

la cual siempre es positiva. La función compleja también puede ser escrita como:

$$g(x) = \text{Am}(g(x)) \exp(i\phi), \quad (3.4)$$

donde $\text{Am}(g(x))$ es la amplitud de la función compleja. En términos de la magnitud, la función puede escribirse de esta forma:

$$g(x) = |g(x)| \exp(i\phi), \quad (3.5)$$

en donde la fase tiene un valor entre 0 y 2π .

En la figura 3.1a, podemos observar que la función compleja pasa por el origen. En la figura 3.1b, se observa la amplitud y la fase contra la posición s a

lo largo de la función y en la figura 3.1c se observa la gráfica de la magnitud y la fase en función de la distancia s .

Podemos observar de la misma figura que cuando la función pasa por el origen, la amplitud y su derivada (pendiente) así como la fase, son continuas. Por otro lado, vemos que ni la derivada de la magnitud ni su correspondiente fase son continuas. Para evitar esta discontinuidad, tanto en la derivada de la función como en la fase, se usa la amplitud en lugar de la magnitud. En este caso, la derivada de la función $g(x)$ y la fase serán continuas para todos los valores de x . Esta amplitud es equivalente a la coordenada radial en coordenadas polares. Un cambio en el signo de la amplitud es equivalente a un cambio de π en la fase [2].

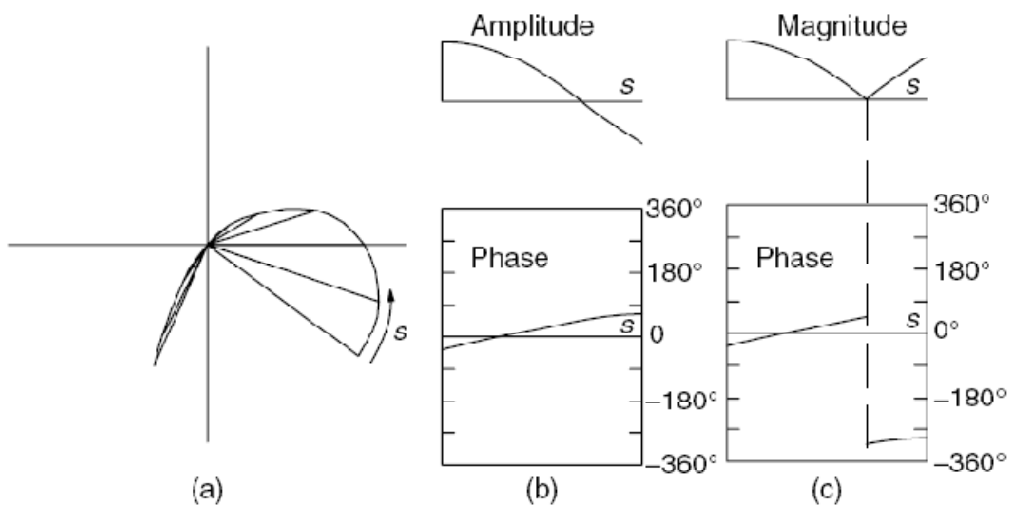


Figura 3.1 a) Gráfica de una función que pasa por el origen en el plano complejo. b) Amplitud y fase vs s . c) Magnitud y fase vs s .

Una función periódica real e infinitamente extendida, con una frecuencia fundamental f_1 , puede ser descompuesta en una suma de funciones senoidales reales con frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental. Por lo tanto, cuando la variable de frecuencia se vuelve continua, la función que aparece en la ecuación 3.5 puede escribirse como una integral del producto de funciones base y ciertos coeficientes de peso, donde la frecuencia de separación f_1 se convierte en f . Esto nos lleva al concepto de transformada de Fourier.

Sea $g(x)$ una función continua de una variable real x . La transformada de Fourier de $g(x)$ es $G(f)$, se define por:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)e^{-i2\pi fx} dx. \quad (3.6)$$

Esta función transformada de Fourier $G(f)$ es también llamado Espectro de Amplitud de $g(x)$, y su magnitud es el espectro de Fourier de la función $g(x)$. $2\pi fx$ es el ángulo, también conocido como espectro de fase. Esta transformada de Fourier de la función $g(x)$ puede ser representada como $F\{g(x)\}$.

Dada $g(f)$, la función $g(x)$ puede ser obtenida realizando la transformada inversa de Fourier, definida como:

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{i2\pi fx} df. \quad (3.7)$$

3.3 METODO DE DESPLAZAMIENTO DE FASE (PHASE SHIFTING)

La integración de las computadoras en los sistemas de medición ha tenido grandes efectos en los últimos años. En interferometría se ha desarrollado la interferometría de desplazamiento de fase (PSI por sus siglas en inglés, Phase Shifting Interferometry) [3].

En interferómetros de desplazamiento de fase, el frente de onda de referencia es movido a lo largo de la dirección de propagación con respecto al frente de onda que está siendo analizado, cambiando así la diferencia de fases. Midiendo los cambios de intensidad para varios desplazamientos de fase, es posible determinar la fase de una onda relativa a la onda de referencia para cada punto medido de ese frente de onda. La intensidad $I(x, y)$ en el punto (x, y) cambia con la fase y está dado por:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi], \quad (3.8)$$

donde $a(x, y)$ describe las variaciones de la intensidad de fondo en el patrón de franjas, $b(x, y)$ describe la amplitud de las franjas, $\phi(x, y)$ es la información de la fase buscada y $\Delta\phi$ es un desplazamiento de fase introducido.

La ecuación 3.8 contiene tres incógnitas, a , b y ϕ , por lo que se requieren como mínimo tres mediciones de intensidad para determinar la fase. Las mediciones pueden tener cualquier fase, mientras éstas sean conocidas. Se asume entonces que la primera medición es en la fase $\Delta\phi_1$, la segunda en $\Delta\phi_2$, la tercera en $\Delta\phi_3$ y así sucesivamente. La posición cero de estas fases ($\Delta\phi_n$) será considerada el origen de las coordenadas [4].

La fase puede ser desplazada de diferentes maneras, entre ellas: moviendo un espejo con un transductor lineal, rotando una placa de vidrio, moviendo una rejilla de difracción, cambiando la frecuencia de una fuente de luz láser, o cambiándolas desde una computadora [5].

La ventaja de esta técnica es que se obtiene mayor exactitud en la medición, es insensible a las variaciones espaciales de intensidad, detectores de sensibilidad y al ruido en patrones fijos.

PHASE-STEPPING DE CUATRO PASOS

Un algoritmo de detección de fase de muestreo está definido por el número de puntos de muestreo, sus posiciones de fase y sus pesos de muestreo asociados. Aunque tres pasos son suficientes para determinar las tres constantes desconocidas; sin embargo, pequeños errores de medición pueden tener un gran efecto en los resultados. En este caso, el método de cuatro pasos puede obtener mejores resultados.

Los valores de intensidad son medidos utilizando cuatro diferentes valores de fase: $\Delta\phi_1 = 0^\circ$, $\Delta\phi_2 = 90^\circ$, $\Delta\phi_3 = 180^\circ$ y $\Delta\phi_4 = 270^\circ$.

$$I_1 = a + b \cos(\phi) \quad (3.9)$$

$$I_2 = a + b \cos(\phi + 90^\circ)$$

$$I_3 = a + b \cos(\phi + 180^\circ)$$

$$I_4 = a + b \cos(\phi + 270^\circ)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se encuentra que la fase ϕ está dada por:

$$\tan \phi = -\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}. \quad (3.10)$$

En la figura 3.2 se muestra un patrón de franjas con un desplazamiento de cuatro pasos.

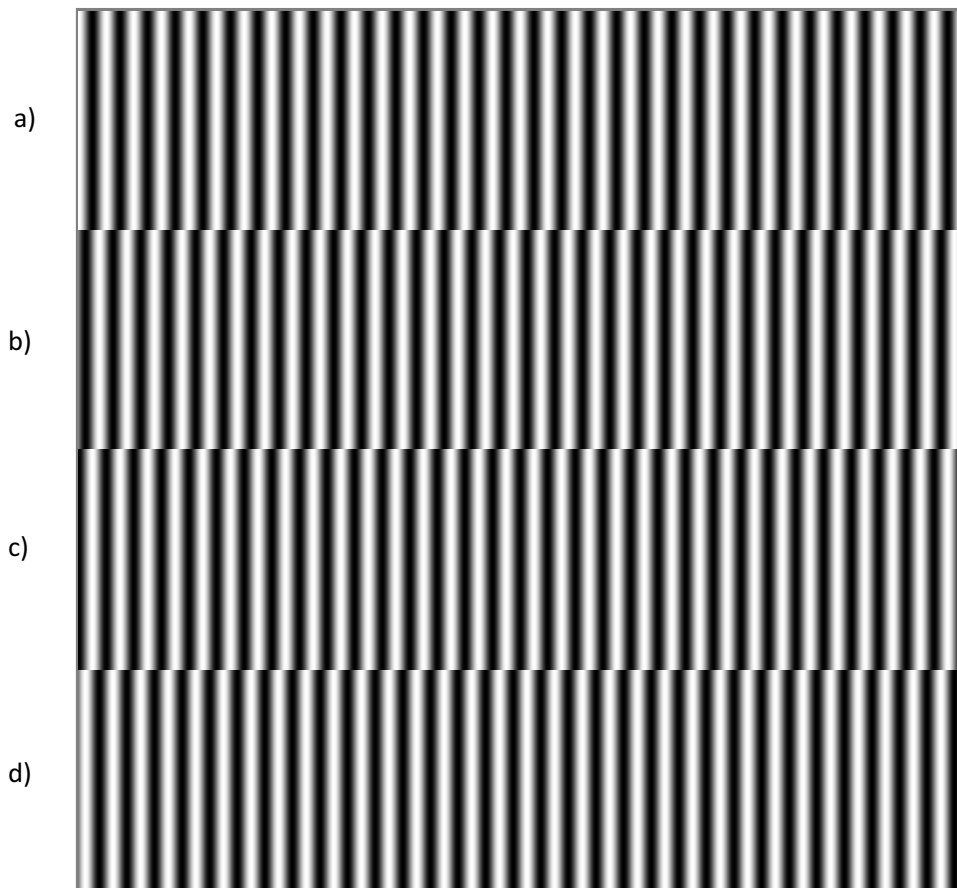


Figura 3.2 Patrón de franjas con un corrimiento de cuatro pasos. a) 0, b) $\pi/2$, c) π , d) $3\pi/2$.

3.4 METODO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER (TAKEDA)

Este método fue desarrollado por Takeda *et. al.* [6], el cual se basa en la transformada de Fourier para el análisis de interferogramas. Una de las

principales características de esta técnica es que solamente necesita de un interferograma, es decir, una sola imagen de las franjas para recuperar la forma del objeto.

Utilizando la ecuación 3.8, que representa la intensidad de un patrón de franjas, ésta se puede reescribir así:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi f_0 x], \quad (3.11)$$

donde $\phi(x, y)$ es la información de fase que se desea encontrar y f_0 es la frecuencia de la portadora.

Utilizando:

$$\cos \theta = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}, \quad (3.12)$$

en la ecuación 3.11 se llega a:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{2\pi f_0 x} + c(x, y)^* e^{-i2\pi f_0 x}, \quad (3.13)$$

donde * denota el conjugado y

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) e^{i\phi(x, y)}. \quad (3.14)$$

El primer paso es obtener la transformada de Fourier del interferograma ($g(x, y)$) con respecto a x , utilizando la ecuación 3.6 (Transformada de Fourier). Con esto, se obtiene $G(f, y)$:

$$G(f, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + C^*(f_x + f_0, y). \quad (3.15)$$

En la figura 3.3, la ecuación 3.13 representa el espectro de Fourier formado por un lóbulo central y dos lóbulos que representan las altas frecuencias de la imagen con las franjas.

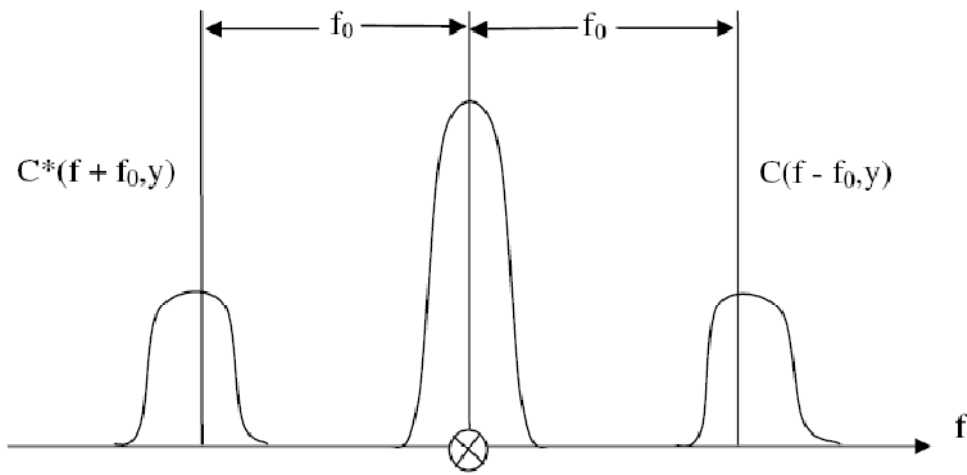


Figura 3.3 Espectro de Fourier del interferograma (Ecuación 3.13)

Después de esto se aplica un filtro de frecuencia, en los alrededores de la frecuencia de la señal portadora, para seleccionar uno de los dos espectros y trasladarlo al origen (figura 3.4), para así eliminar la portadora y obtener $C(f, y)$.

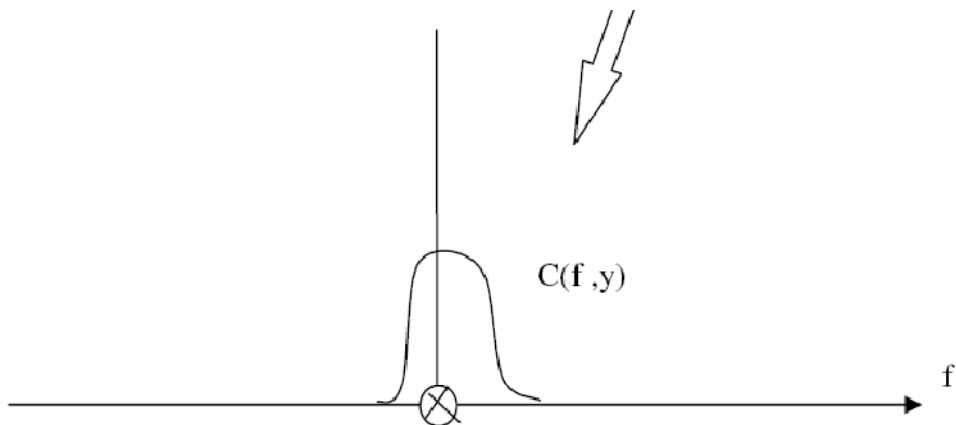


Figura 3.4 Espectro seleccionado y trasladado al origen.

El siguiente paso es calcular la transformada inversa de Fourier, utilizando la ecuación 3.7. El resultado es la función compleja $c(x, y)$. Para obtener la fase, existen dos formas diferentes de hacerlo [7].

La primera es calculando el logaritmo complejo de $c(x, y)$:

$$\log[c(x, y)] = \log \left[\frac{1}{2} b(x, y) \right] + i\phi(x, y). \quad (3.16)$$

La fase se obtiene extrayendo la parte imaginaria la cual está separada de la variación de amplitud $b(x, y)$ en la parte real.

La otra forma de obtener la fase es utilizando la ecuación 3.2, en donde Re y Im representan la parte real e imaginaria de $c(x, y)$.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{Im(c(x, y))}{Re(c(x, y))} \quad (3.17)$$

La fase obtenida está directamente relacionada con la cantidad que deseamos medir del objeto, normalmente la profundidad z .

Después de esto, se procede al desenvolvimiento de fase y como último paso, es conveniente multiplicar la imagen por una máscara binaria para así evitar picos o ruidos indeseados en los alrededores del objeto debido al uso de la transformada de Fourier.

3.5 DESENVOLVIMIENTO DE FASE

Debido a que los dos métodos mencionados anteriormente para hallar la fase envuelta utilizan la función arco tangente para obtener la fase, los resultados estarán dados en un rango de $[-\pi, \pi]$. Es necesario entonces utilizar un método de desenrollamiento de fase (Phase-Unwrapping) [7,8] para eliminar esos saltos y así poder obtener la topografía del objeto bajo prueba.

El principio básico del desenrollamiento de fase es “integrar” la fase envuelta ϕ (obtenida en unidades de 2π) a lo largo de un camino de datos, en este caso, a lo largo de las filas y columnas de la matriz de fase envuelta. En cada pixel, el gradiente de la fase se calcula por diferenciación:

$$\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n-1} \quad (3.18)$$

En donde n es el número de pixel. Si $|\Delta\phi|$ excede cierto umbral, en este caso de π , entonces hubo un cambio brusco de fase, es decir, el borde de la fase de esa franja tiene una discontinuidad de 2π . Este salto de fase se corrige sumando o restando 2π dependiendo del signo de $\Delta\phi$. Si $\Delta\phi$ es positivo, entonces se le suma 2π , de lo contrario, se le restará 2π .

En caso de que la diferencia entre los dos puntos no exceda el umbral, se suma la diferencia actual más el punto anterior de la fase desenrollada.

El principio más común usado para corregir los saltos de fase de 2π , está basado en el hecho de que la diferencia de fase entre dos puntos cualesquiera medidos integrando la fase a lo largo de un camino entre los dos puntos, es independiente de la ruta escogida mientras la ruta no pase a través de una discontinuidad de fase [7].

Este método es solamente adecuado para imágenes en las que se considera que el patrón de franjas está libre de ruidos, ya que de lo contrario, el algoritmo detectará cambios bruscos de fase o discontinuidad que probablemente sean solo ruido.

Para patrones de franjas que presentan mayor ruido, existen otros métodos que se enfocan en resolver los problemas de inconsistencia de la fase.

3.6 DISCUSIÓN DE VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Se resume en esta parte del capítulo algunas ventajas y desventajas de las técnicas presentadas [9]. Estas técnicas, entre otras proporcionan un análisis automático de un patrón de franjas obtenido a partir de una gran variedad de métodos ópticos que pueden aplicarse en eventos estáticos o dinámicos.

El método de corrimiento de fase logra una mayor precisión que se debe a que las pruebas son llevadas sobre varias imágenes, no así el método de Fourier ya que solo utiliza un simple interferograma en el cual se realiza todo el procedimiento para el cálculo de la fase.

Por otro lado, la simplicidad en el equipo óptico necesario para realizar el método de Fourier, lo hace práctico a diferencia del método de desplazamiento de fase ya que los requerimientos de equipo son considerablemente más grandes, haciendo de esta técnica una de las más costosas.

Como ya se ha mencionado, el método de Fourier es de fácil aplicación, ya que no se usa componentes en movimiento, y resuelve los problemas con un simple análisis espectral de Fourier del patrón de franjas.

Desde el punto de vista de automatización, los procedimientos con tres patrones de franjas ofrecen una facilidad computacional, además, los algoritmos

propuestos se resuelven con mucha rapidez, debido a la sencillez del proceso. En cambio el método de Fourier es más difícil para una automatización total, la complejidad en sus operaciones lo hace ser demasiado lento para algunas aplicaciones. Tiene el mérito adicional de ser insensible a distorsiones externas, como vibración, turbulencias en el aire, etc. En el caso del método de desplazamiento de fase, como se necesita de varios patrones con diferentes cambios de fase producidos por algún piezoeléctrico, estos cambios deben ser controlados con mucha exactitud para reducir errores en el valor de la fase del frente de onda. La estabilidad mecánica del arreglo experimental en esta técnica deberá ser muy alta.

La interferometría de Fourier presenta sensibilidad en la detección de variaciones de fase menores a 2π y puede aplicarse a interferometría de sub-longitud de onda.

Los métodos mencionados necesitan del proceso de desenvolvimiento de fase “unwrapping”, debido a que en estas técnicas se aplica la función arcotangente para calcular el valor de la fase, dando como resultado un valor de fase en forma discontinua.

Una observación general es que el método óptimo dependerá del tipo particular de patrón de franjas que se tenga que analizar, así como de las condiciones ambientales en que se realiza el experimento.

REFERENCIAS

1. D. Malacara, “Interferogram Evaluation and Wavefront Fitting”, Optical Shop Testing, Second Edition, John Wiley & Sons Inc. New York. Cap. 13.

2. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Fourier Theory Review", Interferogram Analysis For Optical Testing, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 2.
3. D. Malacara, "Phase-shifting interferometry", Optical Shop Testing, Second Edition, John Wiley & Sons Inc. New York. Cap. 14.
4. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Phase-detection algorithms", Interferogram Analysis For Optical Testing, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 6.
5. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Phase-shifting interferometry", Interferogram Analysis For Optical Testing, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 7.
6. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am., vol.72 (1982), pp. 156-160.
7. K. J. Gasvik, "Fringe Analysis", Optical Metrology, Third Edition, Editorial Wiley, Cap.11, pp. 290-295.
8. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Phase unwrapping", Interferogram Analysis For Optical Testing, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 11.
9. Laura Ortega González, "Técnicas de análisis de franjas en interferometría", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica, Salamanca Gto. 1994.

Parte experimental: Topometría y asociación de color

4.1 INTRODUCCIÓN

El método de luz estructurada, también categorizado como triangulación activa, considera la proyección de franjas cosenoidales [1-3]. La información de profundidad del objeto es codificada en un patrón de franjas deformadas capturado por un sensor de adquisición de imágenes. Aunque está relacionado a las técnicas de proyección moiré, la forma es decodificada directamente de las franjas deformadas grabadas de la superficie de un objeto difuso en vez de usar una rejilla de referencia para crear las franjas de moiré.

El método de luz estructurada tiene los siguientes méritos: fácil implementación, el cambio de fase así como la densidad de franjas y dirección de éstas, se puede llevar a cabo sin el movimiento de partes optomecánicas solamente por el uso del control de una computadora sobre un LCD (Liquid Crystal Display) y medición de campo completo de forma rápida. Dada esas ventajas, se ha empezado a comercializar el método de luz estructurada.

Sin embargo, para hacer que este método sea aún más aceptado en la industria, se tiene que resolver otros problemas, entre ellos, el de sombreado, el cual es inherente a todas las técnicas de triangulación. Un registro múltiple de diferentes vistas haría posible información a 360° [4-6].

También se tiene interés por la asociación del color real una vez obtenida la topografía [7].

Con el desarrollo de cámaras CCD a colores y de proyectores DLP (Digital Light Processing), los canales primarios rojo, verde y azul han sido utilizados como portadoras para modular la fase y así reducir el tiempo de adquisición. En los últimos años se han propuesto diversas técnicas basadas en la proyección de franjas de color codificados. Huang et. al. [8] propuso una técnica de proyección de franjas a colores usando tres patrones, una en cada canal de color, con un corrimiento de fase de $2\pi/3$. La información del color de la superficie 3D es obtenida con una imagen del objeto.

Skydan [9] propone otro método en el cual se proyectan tres patrones de franjas en los tres canales de color primarios usando tres diferentes proyectores y a diferentes puntos de observación, para así poder evitar los efectos de sombreado sobre el objeto.

Zhang [7] propone el método de proyectar franjas en rojo, verde y azul a diferentes frecuencias. Sin embargo, al capturar las imágenes con una cámara CCD a color, se presentan efectos de acoplamiento entre los canales de color, es decir, cuando se capture una imagen para cierto color de franjas, inevitablemente se filtrará información de los otros dos canales de color. Zhang soluciona este problema desarrollando un sistema de ecuaciones para cada patrón de franjas, tomando en cuenta la intensidad la información de la fase, de la iluminación de fondo, de la intensidad de modulación, etc.

En este capítulo se explica ampliamente el arreglo experimental del método de proyección de franjas, en el cual se utiliza un proyector multimedia para proyectar las franjas y una cámara CCD de colores para obtener las imágenes del objeto con las franjas proyectadas.

Se presenta un método, en el cual se proyectan franjas en RGB (Red-Green-Blue) en lugar de franjas en blanco y negro, con el objetivo de obtener la mayor información posible sobre el color real y la textura del objeto bajo prueba.

Se explicará también el método utilizado para obtener la información de la fase de las franjas proyectadas, en este caso, se utilizó el método de desplazamiento de fase de cuatro pasos. Una vez obtenida la fase envuelta, se utiliza un algoritmo para el desenvolvimiento de la fase [10] y finalmente, obtenemos la topografía del objeto.

4.2 ARREGLO EXPERIMENTAL DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Como se ha explicado anteriormente, este método consiste en proyectar franjas sobre la superficie del objeto bajo prueba. En la figura 4.1 se puede observar el arreglo geométrico de esta técnica. Conociendo los parámetros como h y d que representan la distancia entre el proyector-cámara y la distancia entre la cámara-objeto bajo prueba respectivamente, podemos encontrar la relación de altura del objeto. Con estos datos, podemos calcular entonces el ángulo de proyección α . Como la cámara está en la normal del plano xy , el ángulo de observación es cero ($\beta = 0$).

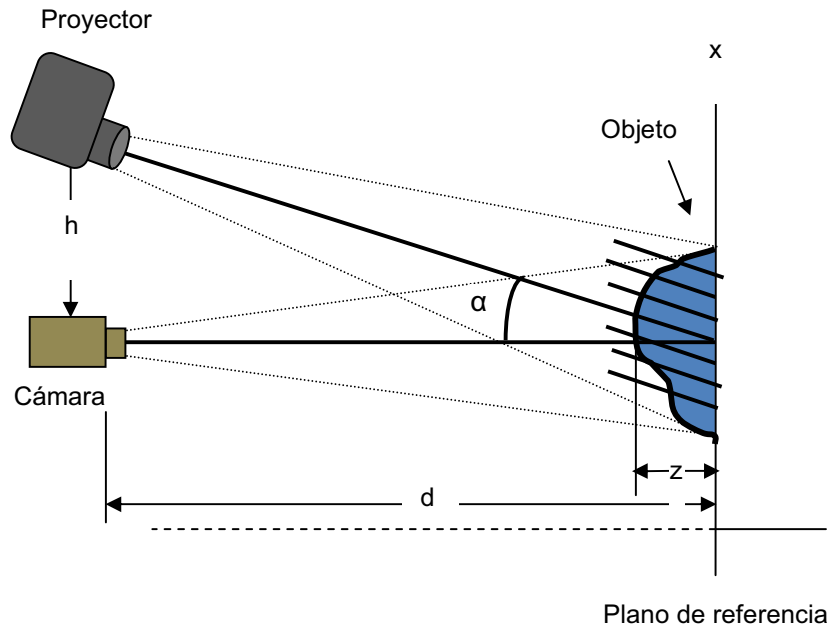


Figura 4.1 Geometría de la técnica de proyección de franjas.

Las franjas que se proyectan son de perfil senoidal y pueden ser generadas digitalmente en una computadora o bien puede utilizarse una rejilla de Ronchi. En este caso, las franjas fueron generadas por computadora, ya que una de sus ventajas es el poder generar las franjas del tamaño deseado (en pixeles) y en la resolución deseada.

Algoritmo para generar las franjas en programación C:

- Generar una variable x que vaya de 0 a 2π , con incrementos de $2\pi / 20$, ya que cada franja será de 20 pixeles. $x = 0 : \frac{2\pi}{20} : 2\pi - \frac{2\pi}{20}$

- La variable y contendrá el seno de la función x más el ángulo de desplazamiento de las franjas. Para el método de desplazamiento de fase de 4 pasos, se calcularán cuatro variables y .

$$y_1 = \sin(x)$$

$$y_2 = \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y_3 = \sin(x + \pi)$$

$$y_4 = \sin\left(x + \frac{3\pi}{2}\right)$$

- Como la resolución de la pantalla de la computadora utilizada en este arreglo es de 1280 x 800 pixeles, se decidió proyectar una imagen con relación de 1 a 1; por lo tanto, generamos una imagen de este tamaño repitiendo el arreglo y (que contiene una franja senoidal) tantas veces sean necesarias para formar una imagen del tamaño deseado.

$$I_1 = \text{repmat}(y, 1280, 40)$$

- I_1 contiene una rejilla digital con franjas senoidales de 20 pixeles cada uno.

Obtenemos cuatro patrones de franjas como el de la figura 4.2, cada una con su correspondiente desplazamiento. Se puede observar en la figura 4.2 que las franjas están en escala de grises, ya que el degradado va desde el negro hasta el blanco, pasando por los grises. Por lo tanto, la topografía que se obtendrá como resultado final estará también en escala de grises.

Como el objetivo de este trabajo es obtener la topografía asociando el color y la textura del objeto, se propone un método en el cual se proyectan franjas a colores con su correspondiente desplazamiento, para luego obtener la fase.

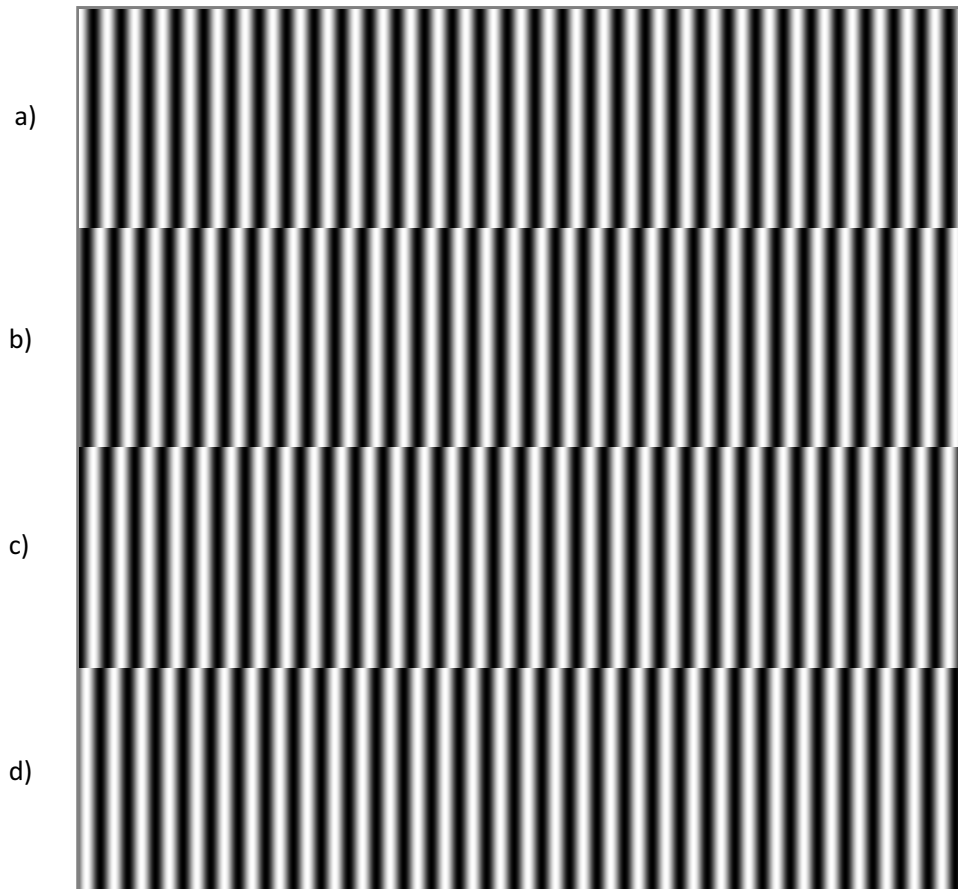


Figura 4.2 Patrón de franjas generado por computadora.

Una imagen a colores está compuesta de 3 canales, el rojo (1), verde (2) y azul (3), ya que estos tres colores primarios son suficientes para generar cualquier otro color usando diferentes combinaciones [11].

Por lo tanto, para generar las franjas a color, simplemente se habilita el canal del color deseado.

Para el rojo, se deshabilitan los canales 2 y 3 (verde y azul):

$$I_1(:,2) = 0, \quad I_1(:,3) = 0$$

Para el azul, se deshabilitan los canales 1 y 2 (rojo y verde):

$$I_1(:,1) = 0, \quad I_1(:,2) = 0$$

Para el verde, se deshabilitan los canales 1 y 3 (rojo y verde):

$$I_1(:,1) = 0, \quad I_1(:,3) = 0$$

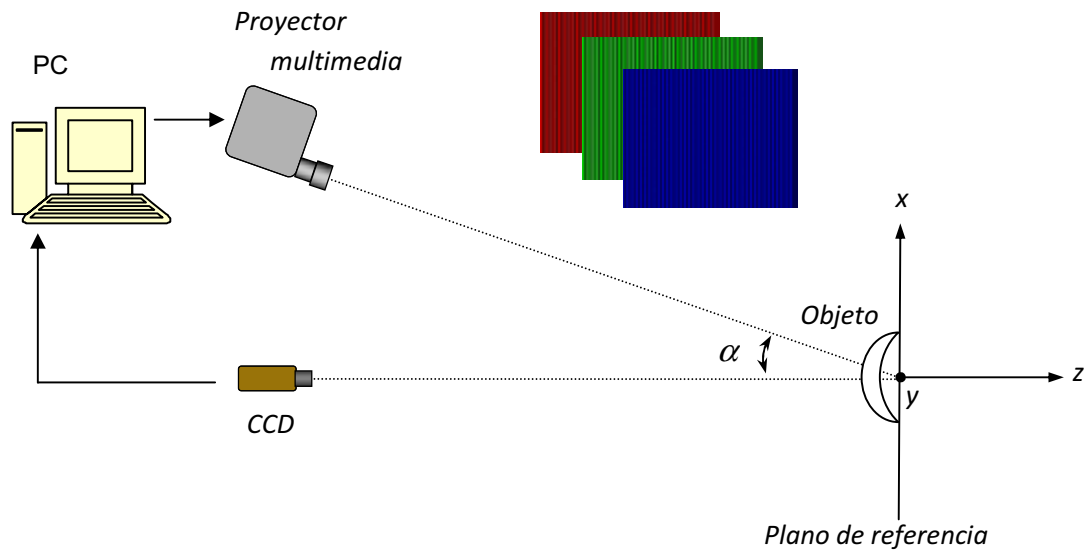


Figura 4.3 Arreglo experimental para la proyección de franjas.

Por lo tanto, se obtiene el patrón de franjas para los tres colores, tal como se muestra en la figura 4.4.

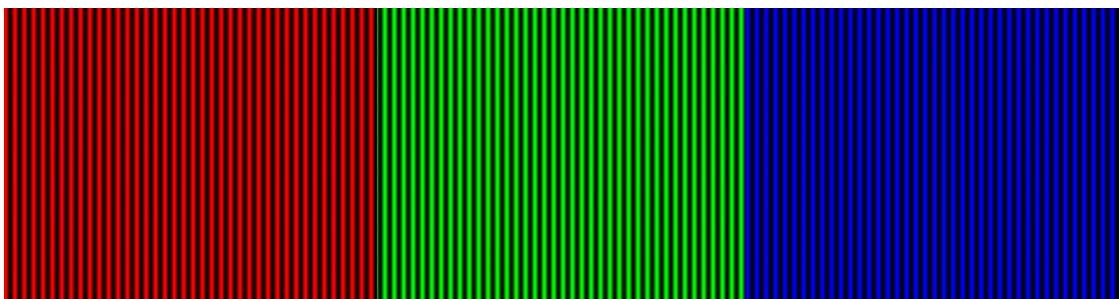


Figura 4.4 Patrón de franjas en rojo, verde y azul, generado por computadora.

Los datos del arreglo utilizado en el laboratorio son los siguientes:

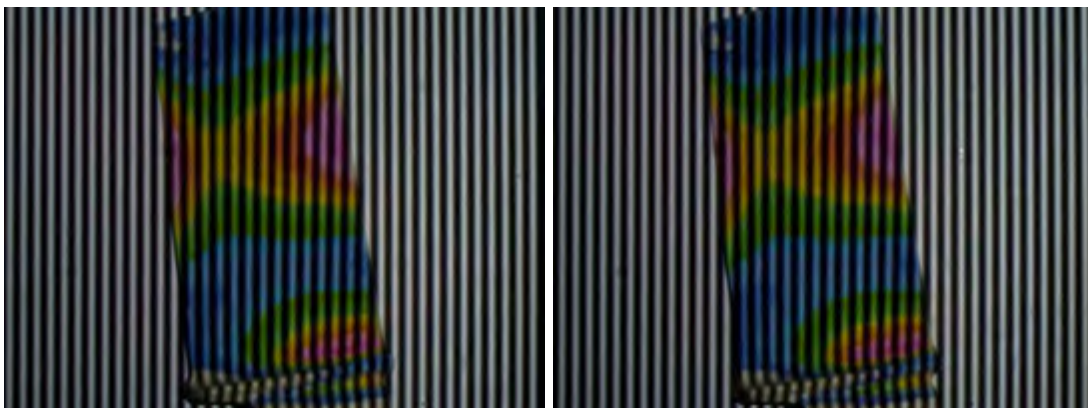
- Cámara CCD a color. PL-B776 con resolución máxima de 2048 x 1536 pixeles.
- Proyector multimedia con resolución de 800 x 600 pixeles.
- La distancia entre la cámara CCD y el centro del sistema de coordenadas es 54.02 cm
- La distancia del proyector al origen es 51.6 cm

A partir de estos datos, encontramos que el ángulo de proyección es: $\alpha=17.21^\circ$

4.3 MEDICIÓN DE LA FASE (PHASE SHIFTING)

En este trabajo, se utiliza el método de phase shifting de 4 pasos, por lo que se proyectarán cuatro patrones de franjas con un desplazamiento de 90° entre ellas.

Para este método, es necesario tener un plano de referencia, por lo que el primer paso es proyectar las franjas sobre el plano y tomar las imágenes correspondientes. Acto seguido, se coloca el objeto, se proyecta el patrón de franjas sobre la superficie del objeto y se toman las imágenes de las franjas distorsionadas.



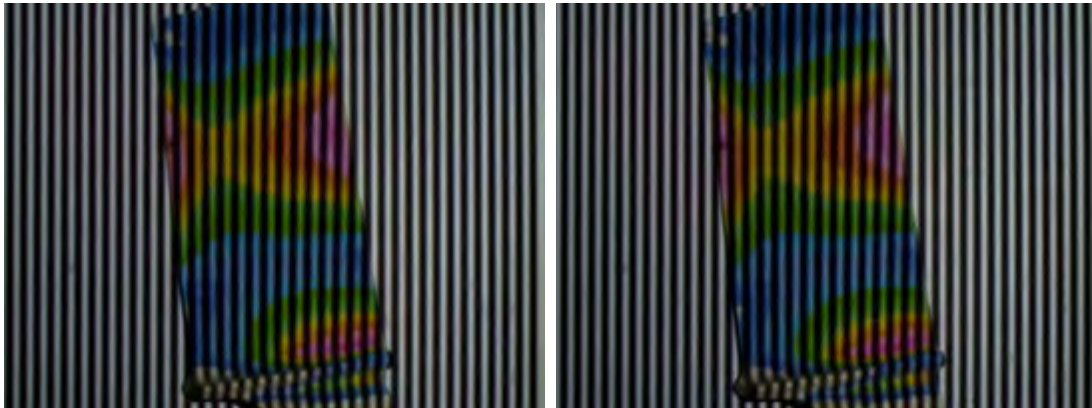


Figura 4.5 Imágenes de las franjas proyectadas sobre el objeto de prueba con desplazamiento de 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$ respectivamente.

Una vez obtenidas las imágenes de referencias y las imágenes del objeto con las franjas proyectadas, se utiliza el algoritmo de desplazamiento de fase de cuatro pasos (Ec. 3.10), para obtener la información de la fase de las franjas.

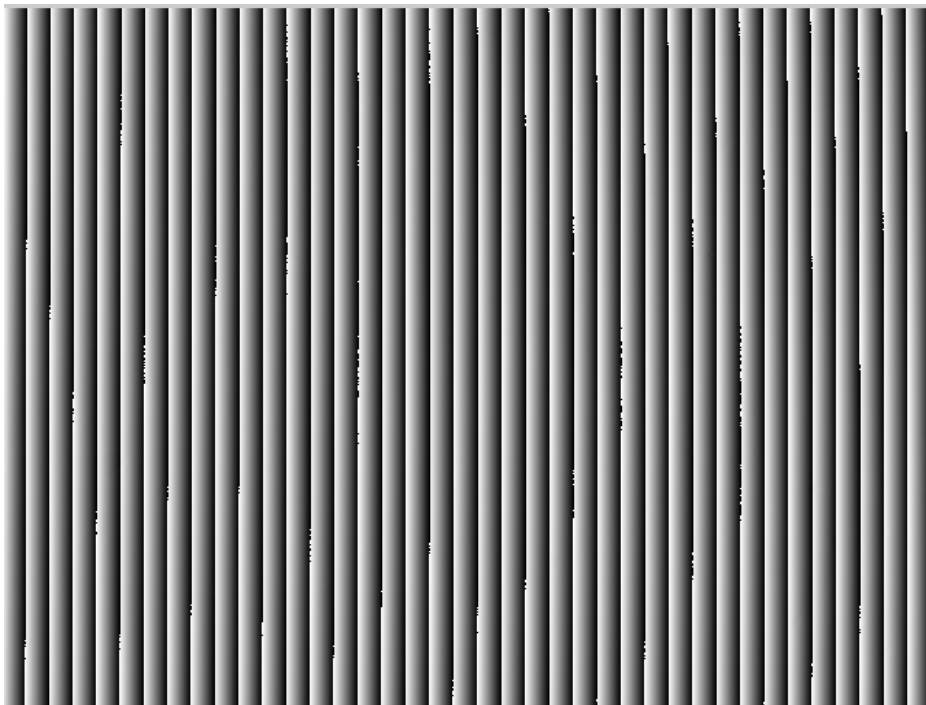


Figura 4.6.- Fase envuelta de las franjas de referencia

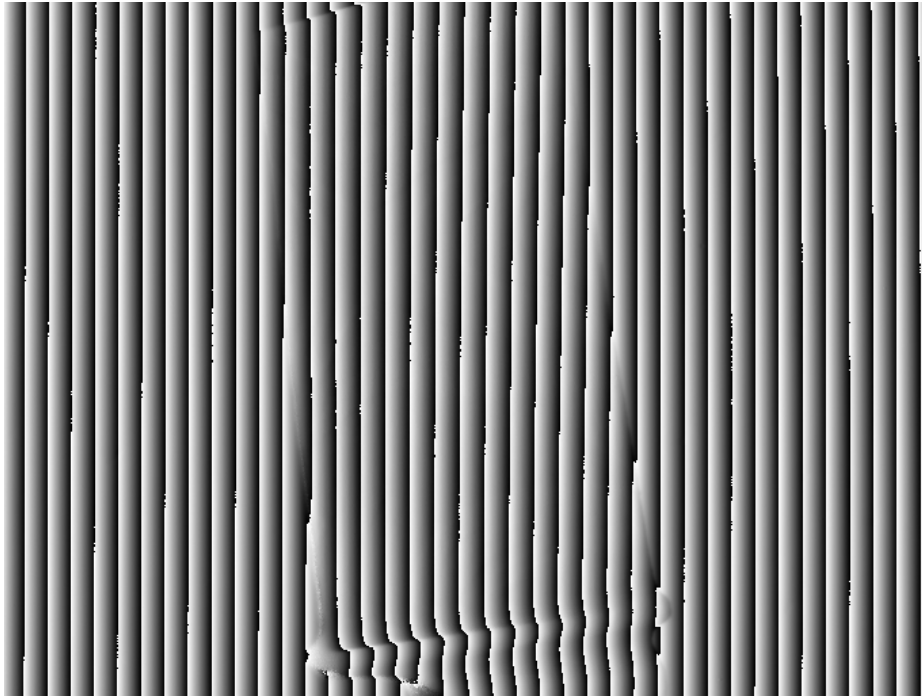


Figura 4.7 Fase envuelta de las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto.

Observando la imagen de la fase envuelta, se logra distinguir ligeramente la forma del objeto bajo prueba.

Siguiendo el algoritmo de desenvolvimiento explicado en el capítulo anterior, se procede a desenvolver la fase de la referencia (o portadora) (figura 4.9) y luego se desenvuelve la fase del objeto (figura 4.10).

Podemos observar de la figura 4.9, que el aumento de la fase es uniforme, debido a que al ser imágenes de referencia (sin objeto), las franjas no sufrieron distorsión alguna, por lo tanto, no hubieron cambios bruscos de fase.



Figura 4.8 Fase desenvuelta de las franjas de referencia.

En cambio, en la figura 4.10 la forma del objeto se logra ver muy ligeramente, ya que los saltos de fase no fueron muy bruscos a lo largo del objeto, a excepción de los bordes.

4.4 OBTENCIÓN DE LA TOPOGRAFÍA

Una vez obtenida la fase desenvuelta de las franjas de referencia y de las franjas proyectadas sobre la superficie del objeto, se puede obtener finalmente la topografía, restando las dos fases desenvueltas obtenidas, como se puede ver en la figura 4.11.

Para obtener la profundidad del objeto en unidades de longitud, utilizamos la ecuación 2.18 donde se sustituyen los datos del arreglo mostrados

en la sección 4.2 y la diferencia de fase entre el plano de referencia y el objeto. Las fases utilizadas corresponden a las mostradas en las figuras 4.9 y 4.10.



Figura 4.9 Fase desenvuelta de las franjas proyectadas sobre el objeto.

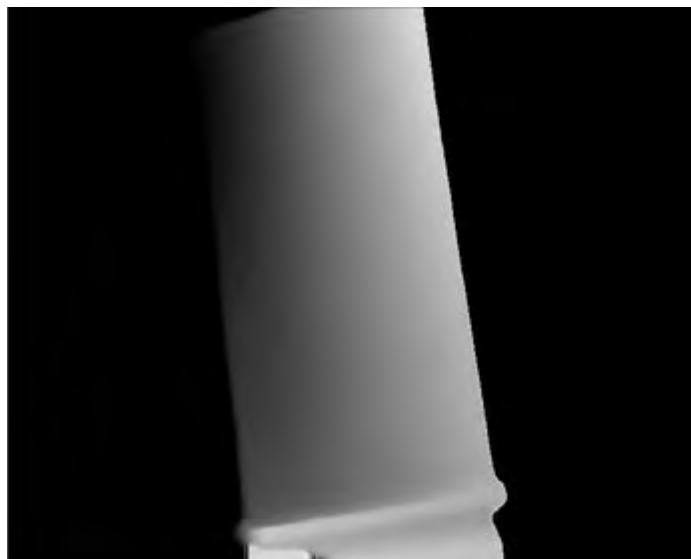


Figura 4.10 Topografía del objeto bajo prueba.

Para este caso, los datos son los siguientes:

- 119 pixeles=1 cm
- 52 pixeles=1 franja
- Periodo=52/119

Comparando las mediciones obtenidas del objeto de la figura 4.10 con las mediciones realizadas con un vernier calibrado (certificado), se obtuvo que el error máximo es de 0.03 mm.

4.5 RESULTADOS

Siguiendo el método propuesto de proyectar franjas en RGB, seguimos los mismos pasos explicados anteriormente con las franjas en blanco y negro. Para este caso, se proyectan las franjas en rojo, en verde y en azul con su correspondiente desplazamiento de fase, tal como se ve en la figura 4.12.

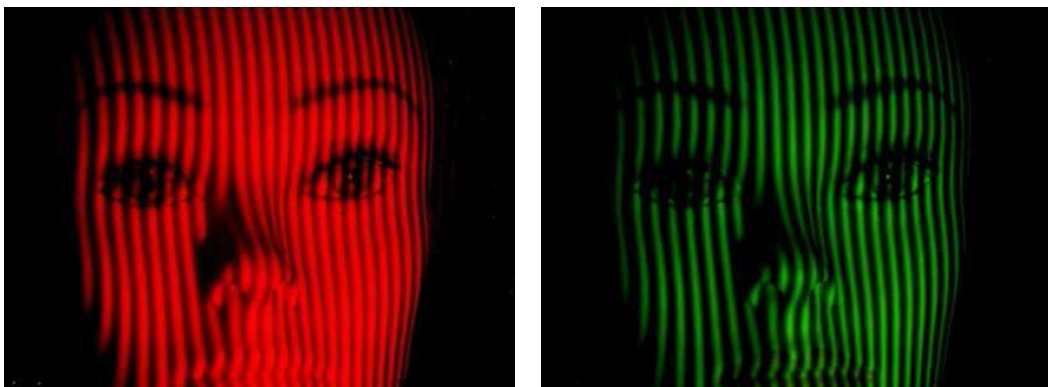
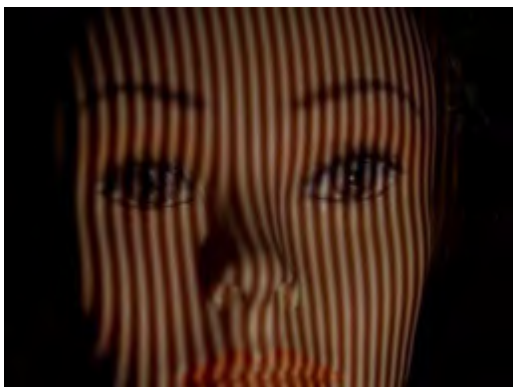




Figura 4.11 Franjas RGB proyectadas sobre el objeto.

La fase envuelta y desenvuelta es obtenida para cada juego de imágenes, es decir, se recuperan tres topografías en total, cada una correspondiente a cada patrón de franjas de color. A pesar de que el método que utilizamos (phase shifting) solamente obtiene información sobre la fase de las franjas, entonces la fase obtenida para los tres colores debe ser el mismo. Sin embargo, nos dimos cuenta que hay un ligero cambio en los resultados para cada color, ya que a veces las franjas de un color recuperan mayor detalles que los otros, como se puede ver en la figura 4.13.



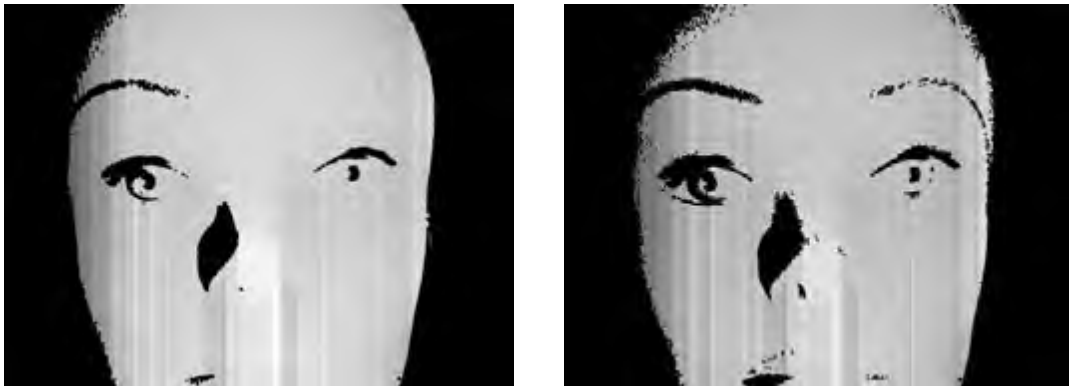


Figura 4.12 a) Objeto bajo prueba con las franjas superpuestas, b) fase desenvuelta con franjas en rojo, c) fase desenvuelta con franjas en verde, d) fase desenvuelta con franjas en azul.

Podemos observar en la figura 4.13 que la fase obtenida de las franjas en azul obtiene mayores detalles del objeto que las franjas en rojo y verde. Sin embargo, también presentan la desventaja de que al ser franjas oscuras, introducen más ruido a la medición. Esto se solucionó utilizando un filtro de suavizado a la fase obtenida.

Por lo tanto, los tres resultados obtenidos se promedian para así obtener la topografía del objeto. La información sobre la textura del objeto se obtiene promediando las cuatro imágenes correspondientes al desplazamiento de fase en cada color, obteniendo así tres imágenes. Estas imágenes se concatenan formando una nueva imagen de 3 canales, es decir, rojo, verde y azul. Finalmente, ésta se superpone a la topografía obtenida anteriormente.

En la figura 4.14 se muestra el objeto original bajo prueba y en la figura 4.15 la topografía resultante con la asociación del color.



Figura 4.13 Objeto original bajo prueba.

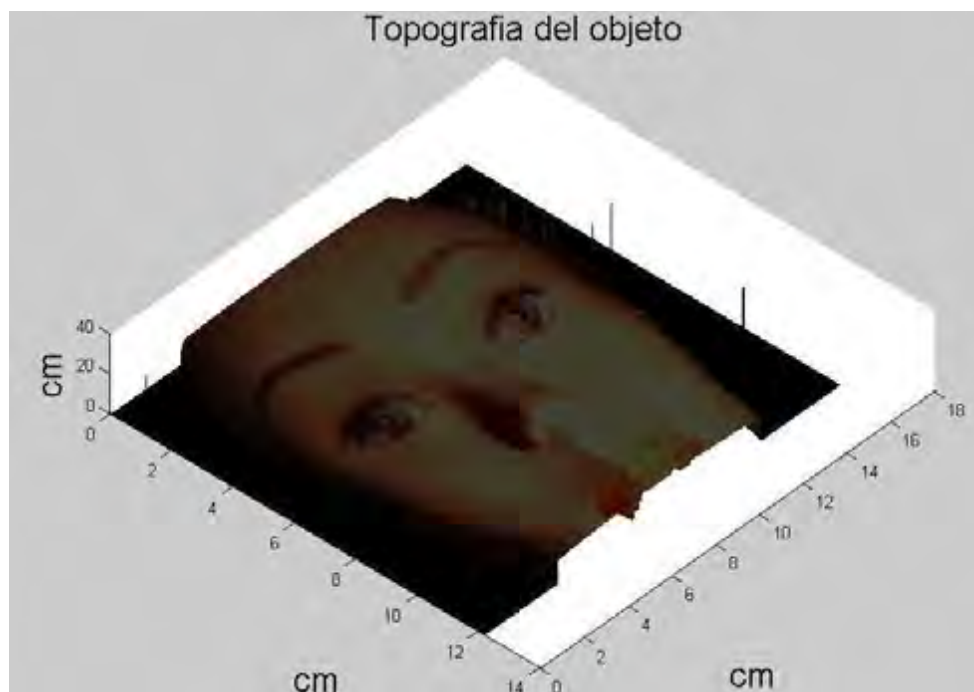


Figura 4.14 Topografía resultante con asociación del color y la textura del objeto.

En la figura 4.15, podemos observar la topografía obtenida del objeto bajo prueba con el color y la textura asociada. La medida de profundidad obtenida a partir de la ecuación 2.18, alto y ancho están dados en *cm*. También podemos observar de la misma figura, que la imagen está un poco oscura. Esto puede ser asociado a la no uniformidad de la iluminación de fondo y a que se están promediando imágenes donde alguna de ellas trae menos brillo (proveniente, por ejemplo, de la imagen con franjas azules).

Por lo tanto, se probó otro método donde no se tiene iluminación de fondo y se utiliza una fuente de luz blanca para iluminar de frente al objeto bajo prueba. Sin proyectar franjas se toma una imagen a color del objeto la cual será superpuesta a la topografía obtenida siguiendo el mismo procedimiento de la técnica de proyección de franjas a color (RGB). En este caso se tiene un ahorro en tiempo computacional.

A continuación se presentan resultados para un segundo objeto de prueba, donde el color del objeto es asociado mediante la imagen a color tomada directamente como fue descrito en el párrafo anterior.



a)



b)

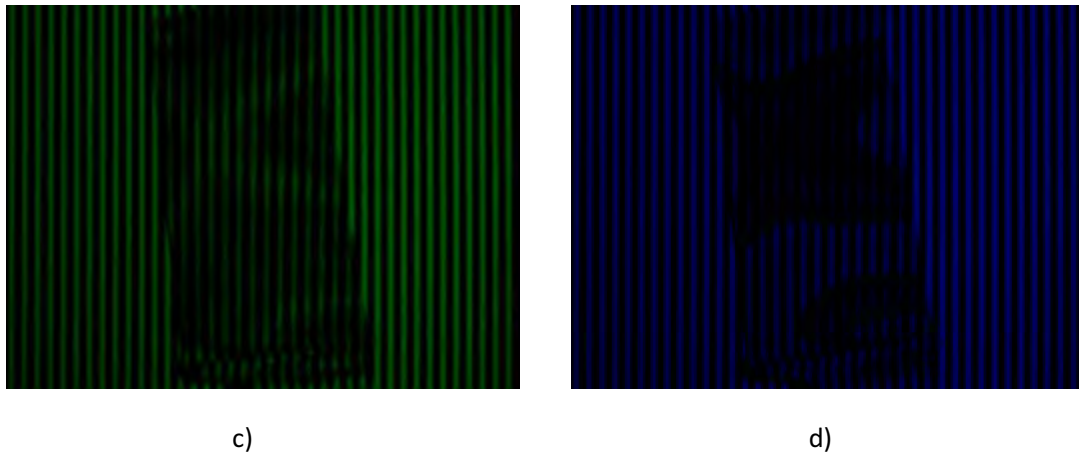


Figura 4.15 a) Objeto bajo prueba, b) franjas proyectadas en rojo, c) franjas proyectadas en verde, d) franjas proyectadas en azul.

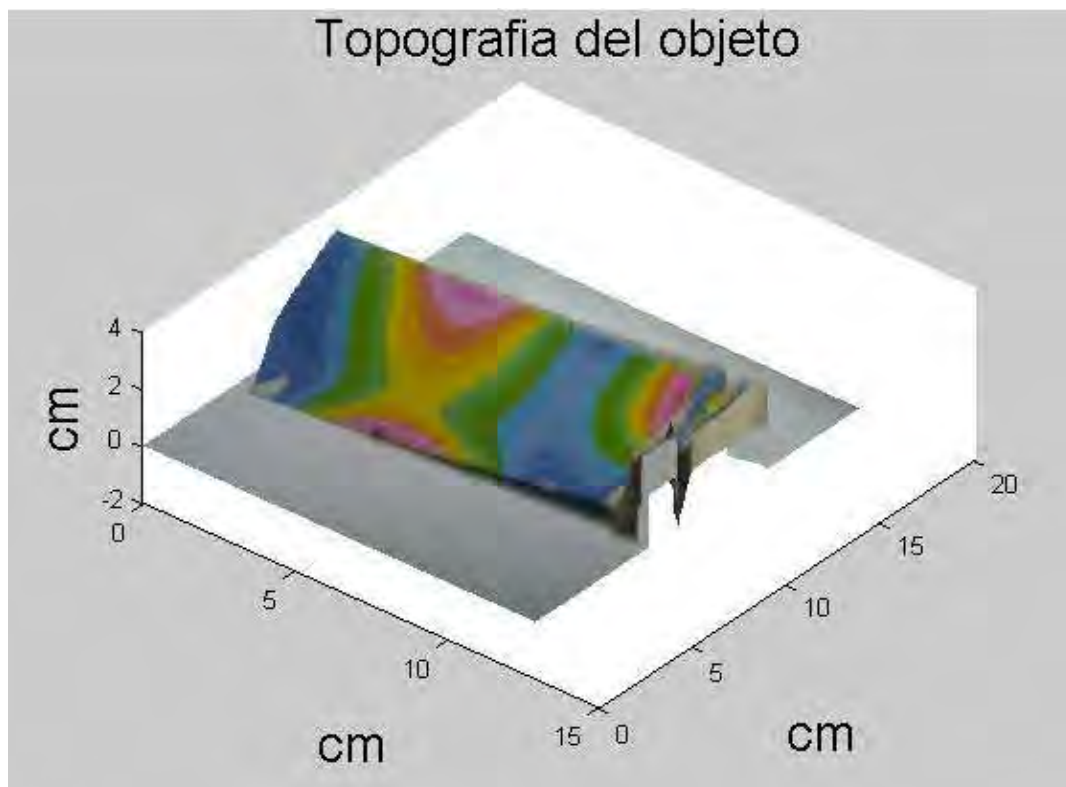


Figura 4.16 Topografía obtenida con color y textura.

Comparando visualmente el color asociado a dos objetos mostrados en las figuras 4.15 y 4.17 se observa que el objeto de la figura 4.16 está más brillante.

REFERENCIAS:

1. V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, “Automated phase measuring profilometry of 3D diffuse objects,” *Appl. Opt.* **23**, 3105–3108 (1984).
2. J. A. Jalkio, R. C. Kim, S. K. Case, “Three dimensional inspection using multistribe structured light,” *Opt. Eng.* **24**(6), 966–974 (1985).
3. Amalia Martínez, J. A. Rayas, H. J. Puga, Katia Genovese, “Iterative estimation of the topography measurement by fringe-projection method with divergent illumination by considering the pitch variation along the x and z directions”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, 2010, pp. 877-881.
4. M. Halioua, R. S. Krishnamurthy, H. C. Liu, and F. P. Chiang, “Automated 360° profilometry of 3-D diffuse objects,” *Appl. Opt.* **24**, 2193–2196 (1985).
5. X. X. Cheng, X. Y. Su, and L. R. Guo, “Automated measurement method for 360° profilometry of diffuse objects,” *Appl. Opt.* **30**, 1274–1278 (1991).
6. J. A. Rayas, R. Rodríguez-Vera, Amalia Martínez, “Data amalgamation in the digitalization of 3D objects all over its 360°”, Eighth International Symposium on Laser Metrology, edited by R. Rodríguez-Vera, F.

-
- Mendoza Santoyo, Proc. of SPIE Vol. 5776 (SPIE, Bellingham, WA 2005), pp. 779-785.
7. Z. H. Zhang, C. E. Towers, D. P. Towers, "Phase and colour calculation in colour fringe projection", *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 9 (2007) S81-S86.
 8. P. S. Huang, Q. Y. Hu, Jin F, F. P. Chiang, "Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three dimensional surface contouring", *Optical Engineering*, January 1999, Vol. 38, No. 6, pp. 1065-71.
 9. O. A. Skydan, M. J. Lalor, D. R. Burton, "Using colored structured light in 3D surface measurement", *Optics and Lasers in Engineering*, July 2005, Vol. 43, No. 7, pp. 801 – 14.
 10. D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara, "Phase unwrapping", *Interferogram Analysis For Optical Testing*, Second Edition, Taylor & Francis, 2005. Cap. 11.
 11. D. Malacara, "The nature of color", *Color Vision and Colorimetry: Theory and applications*, SPIE Press, 2002. Cap 1.

Conclusiones

Se hizo una revisión de algunas técnicas útiles en la recuperación de topografía y asociación de color a objetos de prueba.

La técnica aplicada en el experimento consiste en la técnica de proyección de franjas cuyo principio básico es bastante simple y fácil de entender. La medición de la forma de cualquier objeto usando el método de proyección de franjas es básicamente hecho en tres etapas: primero, la simulación de franjas y su proyección sobre la superficie del objeto; segundo, la obtención del mapa de fase; y tercero, la evaluación de la altura a partir de este mapa de fase considerando la información del sistema óptico. El algoritmo utilizado para obtener la fase corresponde al de corrimiento de 4 pasos.

La metodología en la asociación de color se obtiene proyectando franjas en RGB y obteniendo la topografía respectiva dependiendo del color de las franjas proyectadas. Para obtener la textura del objeto, se probaron dos métodos distintos. El primer método consiste en promediar las cuatro imágenes correspondientes al desplazamiento de fase en cada color y concatenándolas en una nueva imagen de color. El segundo método consiste en iluminar la muestra con una fuente de luz blanca únicamente, es decir no había iluminación de fondo. En este caso se tomó una sola imagen para la textura. Los resultados del primer método muestran el color asociado un poco oscuro mientras que

con el segundo método la imagen es más clara. El método computacional se reduce considerablemente en el segundo caso así como la evaluación topográfica y asociación de color resultaron satisfactorias.

Se elaboró un software en Matlab para procesar las imágenes capturadas y obtener la fase envuelta y desenvuelta de las franjas. Se utilizaron diversos objetos de prueba, lo que nos sirvió para identificar los problemas que aparecen en diferentes casos. La fase obtenida de cada patrón de franjas a color proyectado presenta ligeras diferencias. Una posible explicación es el contraste de las franjas. Se observó que el uso de franjas azules realza algunos detalles mientras que el uso de franjas rojas hace perder algunos detalles en la topografía. Otro problema presentado fue el de la iluminación, ya que dependiendo de la forma del objeto y de la iluminación del ambiente en donde se llevaron a cabo las pruebas, a veces se introducen algunas sombras sobre el objeto y eso provoca una discontinuidad en las franjas lo cual dificulta la evaluación de la topografía. Por lo tanto, se utilizó el método alternativo mencionado anteriormente, en el cual se ilumina la muestra con una fuente de luz blanca y así evitar las sombras indeseadas.

Para obtener mejores resultados, también se pueden eliminar las demás fuentes de iluminación (del laboratorio y del ambiente en general) para que la muestra sea iluminada únicamente por la fuente del proyector.

Como se mencionó anteriormente, el uso de las franjas a color nos permitió obtener con más detalle la topografía de un objeto, aunque también presentan algunas desventajas. Por ejemplo, como las franjas azules son más oscuras, no reflejan suficiente luz y eso introduce ruido en el momento de capturar la imagen. Este problema se solucionó utilizando un filtro de suavizado para eliminar ese ruido.

El software elaborado automatiza totalmente este proceso, es decir, sincroniza el proceso de proyectar una franja y luego capturar su imagen correspondiente. El desplazamiento de las franjas se hace vía software para evitar cometer errores en el corrimiento de fase. A pesar de que el procesamiento de las imágenes es relativamente rápido (15 imágenes por segundo) el proceso de proyección de las franjas y captura de las imágenes toma un poco más de tiempo, por lo que en un futuro se piensa mejorar el sistema y software de tal forma que trabaje en tiempo real.

5.1 TRABAJO A FUTURO

Como ya ha sido mencionado, la obtención de la topografía de un objeto tiene muchísimas aplicaciones, entre ellas en el área de medicina.

Se puede obtener la topografía de órganos humanos externos o extremidades (por ejemplo: oreja, rodillas, mano, etc.) para así obtener su réplica mediante la fabricación de prótesis externas. Es importante entonces, la asociación del color y la textura de la piel del paciente a la reconstrucción 3D del componente a duplicar, haciendo posible así, la fabricación de implantes y prótesis con características específicas de cada paciente.

Dado que el color, la textura y el volumen que presenta una inflamación están directamente relacionados con el proceso de recuperación de un paciente, se tiene como objetivo a futuro, el estudio de hematomas, inflamación y cicatrices en personas que han sido sometidas a una intervención quirúrgica utilizando el método de proyección de franjas y asociación de color.

Como mejora al proyecto, se harán diversas pruebas con el método de phase shifting, ya que por el momento se utiliza el método de cuatro pasos, pero quizá en un futuro se implemente el método de 3 pasos para que así el

proceso se haga en tiempo real. Por el momento el proceso está totalmente automatizado, pero la proyección de franjas a colores evita que el proceso sea rápido. También se migrará el software a lenguaje C para ahorrar el tiempo computacional del proceso.

5.2 VISITA A EMPRESAS E INSTITUCIONES

Con la finalidad de encontrar las diversas aplicaciones del proyecto, se realizaron visitas a algunas instituciones correspondientes a una empresa, un centro de investigación y una institución de salud pública con el objetivo de conocer sus necesidades y poder hacer un nexo con la técnica implementada. Como consecuencia de estas visitas se establecerá una colaboración futura con algunas de ellas.

Las instituciones visitadas son:

El **Centro de Innovación Aplicada a Tecnologías Competitivas, CIATEC** [1], es un centro de investigación que tiene el propósito de proveer a las industrias del cuero y del calzado de los recursos tecnológicos a fin de mejorar su sistema de producción y que puedan ofrecer mayor competitividad y eficacia en el mercado. En este centro, las posibles aplicaciones al proyecto, fue el de medir las fracturas que se presentan en las suelas de zapatos después de ser sometidas a cierta presión (figura 5.1). Otra aplicación detectada es el reconocimiento del patrón de degradado en las telas, ya que por el momento, la comparación del degradado y el color se realiza a simple vista.



Figura 5.1 Pruebas físicas a la suela.

En el Instituto Mexicano del Seguro Social, IMSS [2], concretamente en el área de cirugías e implante de prótesis. Otra aplicación consiste en dar seguimiento con la técnica estudiada a los síntomas post-operatorios de un paciente mediante el estudio de la topografía y del color de la cicatrices para evaluar el proceso de recuperación de los pacientes. También se requiere obtener la topografía de las inflamaciones o hematomas (figura 5.2), en dimensiones volumétricas para poder analizar la gravedad del síntoma.



Figura 5.2 Ejemplo de hematoma en codo.

CONTINENTAL AUTOMOTIVE GUADALAJARA MEXICO, S. A. DE C. V. [3]. Se realizó una visita a CONTINENTAL Guadalajara, una empresa que se dedica a la fabricación de componentes de autos, normalmente de camiones

grandes. Existen varios problemas en el área de la metrología, sobre todo para las mediciones de sus componentes y así realizar un control de calidad. Se detectó una posibilidad de aplicación de la técnica estudiada al escaneo tridimensional para la obtención de la topografía de los circuitos y mejorar el diseño de los mismos.

Las problemáticas expresadas por la compañía se mencionan a continuación: La problemática de la etapa a) se centra en la falta de un sistema de medición de la aplicación de dispensado de materiales sobre los circuitos impresos. Sin este sistema no es posible determinar una falla en este dispensado, que hace crítico el desempeño de los productos. Un defecto puede ocasionar fallas de campo en condiciones extremas de temperatura o fatiga por vibración.

La problemática de la etapa b) se encuentra en la dificultad de los ingenieros y técnicos para reconstruir o extraer el modelo en 3D de una pieza, de la cual se requiere modificar o replicar, ya que no se cuenta con dibujos técnicos. Esto implica que se dedique mucho tiempo en la reconstrucción de dichas piezas en SW (Solid Works) de diseño, con altas probabilidades de falla.

DATOS DE LAS INSTITUCIONES

- [1] CIATEC A.C.
Omega 201
Fraccionamiento Industrial Delta
León, Gto., México, C.P. 37545
Tel 01 (477) 7 10 00 11, ext. 1509
<http://www.ciatec.mx>



Figura 5.3 Visita al CIATEC.



Figura 5.4 Visita al CIATEC.

- [2] Instituto Mexicano del Seguro Social, Delegación Guanajuato.
López Mateos S/N
Colonia Paraísos, León Gto., México. ZC-37320.
Fax: 0152 (477) 7174800
<http://www.imss.mx>
- [3] Continental Automotive Guadalajara Mexico, S. A. de C. V.
Camino a la Tijera No. 3
45640, Tlajomulco de Zuñiga, Jalisco, México.
A company of the Continental Corporation
Phone: +52 33 38 18 20 00 ext. 2951
<http://www.continental-corporation.com>

.....

APENDICE A:

PLAN DE NEGOCIOS

.....

DESCRIPCION DEL PROYECTO

Desarrollar un sistema integrado que obtenga la reconstrucción tridimensional de un objeto, y asocie el color real y la textura a dicha reconstrucción, para ser aplicada en el área de medicina, en específico en el área de cirugías. Dado que el color, la textura y el volumen que presenta una inflamación están directamente relacionados con el proceso de recuperación de un paciente,

Utilizando el método de proyección de franjas y la asociación del color, el sistema obtendrá información tridimensional de un paciente que se utilizará para el estudio de hematomas, inflamaciones y cicatrices en personas que han sido sometidas a una intervención quirúrgica.

MERCADO

Este proyecto tiene aplicaciones en diversas áreas, como por ejemplo en la medicina, la arqueología, líneas de producción, etc. En este caso, estará enfocado al área de la salud, específicamente en el área de cirugías, de tal forma que en base a la información obtenida por nuestro sistema, se fabriquen prótesis o implantes de acuerdo a las características específicas de cada paciente y se lleve a cabo un monitoreo del proceso de recuperación de dicho paciente.

BENEFICIOS

El sistema tiene el beneficio de obtener información cuantitativa de las dimensiones volumétricas de las inflamaciones y hematomas además del color que estos presentan, lo que permite monitorear la gravedad de los síntomas o el estado del paciente. Hasta el momento, la detección del color de inflamaciones y cicatrices se hace de forma visual, por lo que el sistema presenta mayor confiabilidad y ahorro de tiempo.

COSTO

El costo tentativo del sistema es de 150,000 pesos, un ahorro bastante significativo tomando en cuenta que algunos sistemas extranjeros cuestan muchísimo más.

COMPETIDORES

De acuerdo a los antecedentes, en el país no existen sistemas que obtengan información volumétrica y del color en síntomas post-operatorios de un paciente. En el mercado extranjero, existe un sistema que realiza casi las mismas funciones que nuestro sistema, ya que obtiene la reconstrucción tridimensional de un objeto con asociación de colores. Sin embargo, este sistema no está orientado al área de salud y utiliza más componentes en el arreglo que el de nuestro sistema. El precio de este sistema es de 50,000 dólares.

POSICIONAMIENTO DEL PRODUCTO:

El producto busca posicionarse como una buena opción en instituciones de salud públicas, laboratorios clínicos, e instituciones privadas. En la actualidad, no existe un sistema que realice el monitoreo de síntomas post-operatorios en un paciente basándose en estudios de topografía y de color de los hematomas, inflamaciones, cicatrices, etc., por lo que esta sería una gran área de oportunidad para comercializar el sistema.

Actualmente en el país, existen alrededor de 3500 instituciones de salud, tanto públicas como privadas. De ellas, aproximadamente un 70% de las instituciones públicas tiene la capacidad financiera de adquirir un sistema como el nuestro, mientras que en el sector privado hay mayores oportunidades.

Las ventajas con los que cuenta el sistema son:

- Información de la topografía y superficie de los edemas, hematomas, etc., en dimensiones volumétricas.
- Reconstrucción tridimensional con asociación del color, de los síntomas específicos de un paciente.
- Resultados en tiempo real.

MODELO DEL NEGOCIO

Para empezar la línea de producción de los sistemas, es necesario realizar un convenio con las empresas distribuidoras de los proyectores y cámaras a color, así como de las lentes. Debido a que el software es general para todos los sistemas, solamente se utilizará una mínima mano de obra para el ensamble de los componentes del arreglo.

ANÁLISIS FINANCIERO

Análisis Financiero del plan de negocios						
Año	0	1	2	3	4	5
Ventas en unidades	0	15	22	30	40	55
<i>Crecimiento</i>			47%	36%	33%	38%
Precio de venta promedio	0	\$150,000.00	\$150,000.00	\$145,000.00	\$140,000.00	\$130,000.00
<i>ASP Delta</i>			0%	0%	0%	0%
Remuneración (Ventas)	\$0	\$2,250,000.00	\$3,300,000.00	\$4,350,000.00	\$5,600,000.00	\$7,150,000.00
Remuneración (servicios)		\$225,000.00	\$330,000.00	\$435,000.00	\$560,000.00	\$715,000.00
Remuneración Total	\$0	\$2,475,000.00	\$3,630,000.00	\$4,785,000.00	\$6,160,000.00	\$7,865,000.00
<i>Crecimiento</i>			47%	32%	29%	28%
Gastos						
Costo Por Unidad (Material+Mano de obra)		\$50,000.00	\$52,500.00	\$55,125.00	\$57,881.25	\$60,775.31
Costo Total de Bienes Vendidos (COGS)	\$0	\$750,000.00	\$1,155,000.00	\$1,653,750.00	\$2,315,250.00	\$3,342,642.19
Costos Generales, Ventas y Administrativos (SG&A)		\$300,000.00	\$330,000.00	\$363,000.00	\$399,300.00	\$439,230.00
Gastos Directos Totales	\$0	\$1,050,000.00	\$1,485,000.00	\$2,016,750.00	\$2,714,550.00	\$3,781,872.19
Costo de Arranque	\$500,000.00					
Ganancias (EBITDA)	\$0	\$1,425,000.00	\$2,145,000.00	\$2,768,250.00	\$3,445,450.00	\$4,083,127.81
<i>% de Remuneración</i>		58%	59%	58%	56%	52%

FACTORES DE RIESGO

El principal riesgo para la comercialización del sistema es que es difícil introducir al mercado un producto nacional, ya que existe mucha preferencia o mayor confianza hacia los productos extranjeros, por lo que el primer paso será cambiar la perspectiva o la forma de pensar de los empresarios y así le den una oportunidad al producto nacional. El otro factor de riesgo es que debido a que es un producto nuevo en el mercado, se necesitará de publicidad para dar a conocer el sistema.

PLAN DE ACCION

- Realizar y concertar reuniones con los posibles clientes, como hospitales, laboratorios privados, etc.
- Realizar demostraciones con pacientes reales para mostrar la eficacia del producto.
- Empezar a introducirnos en el mercado de las instituciones de salud en la ciudad de León.
- Proveer el servicio de mantenimiento preventivo a los sistemas adquiridos.
- Apoyar a los clientes con garantías en caso de fallas.

CONCLUSIONES

Creemos que el producto tiene oportunidad de posicionarse en el mercado ya que es nuevo en su ramo, es innovador y presenta la ventaja de que es económico, además de ser un producto nacional. El sector de medicina es un sector que podría obtener beneficios al utilizar el sistema.

.....

APENDICE B:

CODIGO DEL PROGRAMA

.....

```
function varargout = GUI_Proyeccion(varargin)

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_Proyeccion_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUI_Proyeccion_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GUI_Proyeccion is made visible.
function GUI_Proyeccion_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)

% Choose default command line output for GUI_Proyeccion
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUI_Proyeccion_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% Activar cámara
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
activar_camara(handles);

%% Activar la cámara
function activar_camara(handles)
set(handles.figure1,'currentaxes',handles.axes1);
video_obj=videoinput('winvideo',1,'UYVY_2048x1536');
start(video_obj);
vidRes=get(video_obj,'VideoResolution'); %Contiene el alto y ancho de
los frames
nBands=get(video_obj,'numberOfBands'); %
hImage=imshow(zeros(vidRes(2),vidRes(1),nBands));
preview(video_obj,hImage);

flag=1; assignin('base','flag',flag);
assignin('base','video_obj',video_obj);

% --- Executes on button press in checkbox1.
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)

%% Creación de la figura y lectura de imágenes
function figure1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
matriz=cell(3,4);
flag=0; flag1=0; ref=0; ref1=0;
%Ref indica si ya se proyectaron las franjas de referencia
%Ref1 indica si ya se procesaron las franjas de referencia
assignin('base','matriz',matriz);
assignin('base','flag',flag);

%Leer imagenes de franjas para proyectar (4 pasos)
% Fila 1-->Gray, 2-->Rojo, 3-->Verde, 4-->Azul
franjas=cell(4,4);

%Lee imágenes de franjas en grises
franjas(1,1)={imread('franja1.bmp')};
franjas(1,2)={imread('franja2.bmp')};
franjas(1,3)={imread('franja3.bmp')};
franjas(1,4)={imread('franja4.bmp')};

% Lee imágenes de franjas RGB
franjas(2,1)={imread('franjaR1.bmp')};

```

```

franjas(2,2)={imread('franjaR2.bmp')};
franjas(2,3)={imread('franjaR3.bmp')};
franjas(2,4)={imread('franjaR4.bmp')};

franjas(3,1)={imread('franjaG1.bmp')};
franjas(3,2)={imread('franjaG2.bmp')};
franjas(3,3)={imread('franjaG3.bmp')};
franjas(3,4)={imread('franjaG4.bmp')};

franjas(4,1)={imread('franjaB1.bmp')};
franjas(4,2)={imread('franjaB2.bmp')};
franjas(4,3)={imread('franjaB3.bmp')};
franjas(4,4)={imread('franjaB4.bmp')};

assignin('base','franjas',franjas);
assignin('base','flag1',flag1);
assignin('base','ref',ref);
assignin('base','ref1',ref1);

% Proyectar franjas y tomar imágenes
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
flag=evalin('base','flag');
ref=evalin('base','ref');

if flag==0 %Si aún no se ha activado la cámara
    activar_camara(handles);
end

if ref==0 %Si aún no se han proyectado franjas de referencia
    msgbox('No se han proyectado franjas de referencia','error')
end

proyectar(handles);

% Proyectar franjas de referencia
function proyectar_ref(handles)

franjas=evalin('base','franjas');
video_obj=evalin('base','video_obj');
franjas_ref=cell(1,4);

figure('Units','normalized','Position',[1 0 1 1],'MenuBar','none');
set(gca,'Position',[0 0 1 1]);
for k=1:4 %Proyecta los tres colores
    imagesc(franjas{1,k}); colormap gray;
    pause(1);
    img=getsnapshot(video_obj);
    img=ycbcr2rgb(img);
    franjas_ref(1,k)={img(10:1516,605:1780,:)};
end
close();

```

```

ref=1; %Indica que ya se tomaron las franjas de referencia
assignin('base','franj_ref',franj_ref);
assignin('base','ref',ref);

%% Proyectar franjas
function proyectar(handles)

franj=evalin('base','franj');
video_obj=evalin('base','video_obj');
%h=evalin('base','h');
f=get(handles.checkbox1,'Value');
imagen=cell(4,4);
%Poner la ventana de la figura en tamaño del monitor y la imagen en
tamaño
%real

figure('Units','normalized','Position',[1 0 1 1],'MenuBar','none');
set(gca,'Position',[0 0 1 1]);
%535, 1790
if f==1 % Se proyectarán franjas a colores
    for j=2:4 %Proyecta los 4 pasos
        for k=1:4 %Proyecta los tres colores
            imagesc(franj{j,k});
            pause(1);
            img=getsnapshot(video_obj);
            img=ycbcr2rgb(img);
            imagen(j,k)={img(10:1516,605:1780)};
        end
        im=ones(1280,800);
        imagesc(im);
        pause(1);
        img=getsnapshot(video_obj);
        img=ycbcr2rgb(img);
        imnormal=img(10:1516,605:1780,:);
    end
else
    for k=1:4 %Proyecta las 4 franjas grises
        imagesc(franj{1,k}); colormap gray;
        pause(1);
        img=getsnapshot(video_obj);
        img=ycbcr2rgb(img);
        imagen(1,k)={img(10:1516,605:1780,:)};
    end
    im=ones(1280,800);
    imagesc(im);
    pause(1);
    img=getsnapshot(video_obj);
    img=ycbcr2rgb(img);
    imnormal=img(10:1516,605:1780,:);
end
close();
flushdata(video_obj);
assignin('base','imagen',imagen);
flag1=1; assignin('base','flag1',flag1);

```

```

assignin('base','imnormal',imnormal);

%% Procesar juego de imágenes para obtener topografía
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

procesamiento(handles);

%% Para que empiece a obtener la envuelta y desenvuelta
function procesamiento(handles)

f=get(handles.checkbox1,'Value');
flag1=evalin('base','flag1');
ref1=evalin('base','ref1');
g=get(handles.checkbox2,'Value');

if f==1 % Las imagenes serán en RGB
    procesar_imagen(1,1,flag1,handles); %Rojo-objeto
    % procesar_imagen(1,2,flag1); %Rojo-referencia
    procesar_imagen(2,1,flag1,handles); %Verde-objeto
    procesar_imagen(3,1,flag1,handles); %Azul-objeto
    if ref1==0 %Aun no se han procesado las de referencia
        procesar_imagen(0,2,flag1,handles); %Gris referencia
    end

    matriz=evalin('base','matriz');
    ImagenR=matriz{2,2}-matriz{3,1};
    ImagenG=matriz{2,3}-matriz{3,1};
    ImagenB=matriz{2,4}-matriz{3,1};
    Imagen=(ImagenR+ImagenG+ImagenB)/3;
    % Imagen=ImagenB;
    figure; imshow(Imagen,[]); title('Topografía del objeto');
else
    procesar_imagen(0,1,flag1,handles); %Gris objeto
    if g==0 %Son imágenes en tiempo real
        if ref1==0
            procesar_imagen(0,2,flag1,handles); %Gris referencia
        end
    else
        procesar_imagen(0,2,flag1,handles);
    end

    matriz=evalin('base','matriz');
    Imagen=matriz{2,1}-matriz{3,1};
    figure; imshow(Imagen,[]); title('Topografía del objeto');
end

assignin('base','Imagen',Imagen);
assignin('base','matriz',matriz);
%assignin('base','imnormal',imnormal);

%
```

```

set(handles.pushbutton4,'enable','on');

%% Procesar imagenes (leer, envuelta, desenvuelta)
function procesar_imagen(color,tipo,flag1,handles)
% Color-->0=gris, 1=rojo, 2=verde, 3=azul
% Tipo--> 1=Objeto, 2=Referencia

g=get(handles.checkbox2,'Value');
if g==0
    leer_imagenreal(color,tipo);
else
    leer_imagenes(color,tipo);
end

    fase=envuelta();
    des_obj=desenvuelta(fase);
    matriz=evalin('base','matriz');
    matriz(tipo+1,color+1)={des_obj};

    assignin('base','matriz',matriz);

    % 1536 x 2048
%% Leer imágenes tomadas en tiempo real
function leer_imagenreal(color,tipo)
imagen=evalin('base','imagen');
franjas_ref=evalin('base','franjas_ref');
matriz=evalin('base','matriz');

if tipo==1 % Leerá imagenes del objeto
    aux=imagen;
else % Leerá imagenes de la referencia
    aux=franjas_ref;
    ref1=1;
    assignin('base','ref1',ref1);
end
img1=double(rgb2gray(aux{1,1}));
img2=double(rgb2gray(aux{1,2}));
img3=double(rgb2gray(aux{1,3}));
img4=double(rgb2gray(aux{1,4}));

matriz(1,1)={img1};
matriz(1,2)={img2};
matriz(1,3)={img3};
matriz(1,4)={img4};

assignin('base','matriz',matriz);

%% Leer imagenes guardadas en la computadora
function leer_imagenes(color,tipo)
% Color-->0=gris, 1=rojo, 2=verde, 3=azul

```



```
% Tipo--> 1=Objeto, 2=Referencia
matriz=evalin('base','matriz');
if tipo==1 % Leerá imagenes del objeto
    nombre='imobj';
else % Leerá imagenes de la referencia
    nombre='imref';
end

if color==0 %Leerá imagenes con franjas en gris
    img1=(imread([nombre,'1.bmp']));
    img2=(imread([nombre,'2.bmp']));
    img3=(imread([nombre,'3.bmp']));
    img4=(imread([nombre,'4.bmp']));
    img1=double( RGB2gray(img1) );
    img2=double( RGB2gray(img2) );
    img3=double( RGB2gray(img3) );
    img4=double( RGB2gray(img4) );
else %Entonces serán imagenes con franjas en RGB
    if color==1 %Rojo
        img1=double(imread([nombre,'13.bmp']));
        img2=double(imread([nombre,'14.bmp']));
        img3=double(imread([nombre,'15.bmp']));
        img4=double(imread([nombre,'16.bmp']));

    elseif color==2 % Verde
        img1=double(imread([nombre,'9.bmp']));
        img2=double(imread([nombre,'10.bmp']));
        img3=double(imread([nombre,'11.bmp']));
        img4=double(imread([nombre,'12.bmp']));

    elseif color==3 %Azul
        img1=double(imread([nombre,'5.bmp']));
        img2=double(imread([nombre,'6.bmp']));
        img3=double(imread([nombre,'7.bmp']));
        img4=double(imread([nombre,'8.bmp']));

    end

    img1=img1(:,:,color); %Se habilita el canal dependiendo del color
    img2=img2(:,:,color);
    img3=img3(:,:,color);
    img4=img4(:,:,color);
end

figure; imshow(img1,[]); title('Imagen paso 1');
figure; imshow(img2,[]); title('Imagen paso 2');
figure; imshow(img3,[]); title('Imagen paso 3');
figure; imshow(img4,[]); title('Imagen paso 4');

matriz(1,1)={img1};
matriz(1,2)={img2};
matriz(1,3)={img3};
matriz(1,4)={img4};
```

```

assignin('base','matriz',matriz);

%% Fase envuelta..
function fase=envuelta ()
matriz=evalin('base','matriz');
aux=double(matriz{1,4}-matriz{1,2});
aux1=double(matriz{1,1}-matriz{1,3});
fase_env=atan2(aux,aux1);
figure; imshow(fase_env,[]); title('Fase envuelta del objeto');
fase=fase_env;

%% Fase desenvuelta tanto del objeto como la referencia
function fase_des=desenvuelta(fase_env)
fase_des=fase_env;
[x y]=size(fase_env);
for i=1:x
    aux=fase_env(i,:);
    fase_des(i,:)=unwrap(aux);
end

for i=1:y
    aux=fase_des(:,i);
    fase_des(:,i)=unwrap(aux);
end

figure; imshow(fase_des,[]); title ('Fase desenvuelta del objeto');
h=fspecial('average',5);
fase_des=imfilter(fase_des,h);
%figure; imshow(fase_des,[]);

%% Mostrar la topografía con medidas y color reales
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
matriz=evalin('base','matriz');
imagen=evalin('base','Imagen');
aux=get(handles.checkbox2,'value');

if aux==0 %En tiempo real
    imnormal=evalin('base','imnormal');
else %En la computadora
    imnormal=imread('imobj17.bmp');
end
%119 pixeles=1 cm
%52 pixeles=franja
%[x y]=meshgrid(1:2048,1:1536);

%imnormal=imread('imobj17.bmp');
imshow(imnormal);
img1=rgb2gray(imnormal);
img1=imcomplement(img1);

```

```

imshow(img1);
img2=im2bw(img1,0.38);
imshow(img2, []);
bw=bwareaopen(img2,100000); %para eliminar ruido u areas que no se
desean
bw=imfill(bw,'holes'); % Se especifica a partir de que tamaño de pixel
se considera basura
figure; imshow(bw, []);
img3=imagen.*bw;
figure; imshow(img3, []);

[f c]=size(imagen);
[x y]=meshgrid(0:1/119:c/119-1/119,0:1/119:f/119-1/119);

lk=62.7;
lpk=9;
alfa=atan(lpk/lk);
per=52/119;
z=(img3.*per)./(2*pi*tan(alfa));
figure;
warp(x,y,z,imnormal); title('Topografía del objeto','fontsize',20);
xlabel('cm','fontsize',20); ylabel('cm','fontsize',20);
zlabel('cm','fontsize',20);
assignin('base','z',z);
assignin('base','bw',bw);

%% Cerrar la ventana de proyeccion
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

%%
function figure1_DeleteFcn(hObject, eventdata, handles)

%% proyectar franjas de referencia
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
flag=evalin('base','flag');

if flag==0 %Si aún no se ha activado la cámara
    activar_camara(handles);
end

proyectar_ref(handles);

%% Pantalla en blanco
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
figure('Units','normalized','Position',[1 0 1 1],'MenuBar','none');
set(gca,'Position',[0 0 1 1]);

```



```
%% Leerá imágenes de la computadora
function checkbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes on button press in checkbox3.
function checkbox3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox3

%2.8096546
```