

**MODELO FUNCIONAL ÓPTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN
TOPOGRÁFICA DEL ROSTRO.**

**JAIME EDUARDO CARREÑO
GERSON SALAZAR MEZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.
BUCARAMANGA**

2014

**MODELO FUNCIONAL ÓPTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN
TOPOGRÁFICA DEL ROSTRO.**

**JAIME EDUARDO CARREÑO RODRÍGUEZ
GERSON SALAZAR MEZA**

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director
Ph.D. JAIME E. MENESES FONSECA
Físico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.
BUCARAMANGA
2014**

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PROYECCIÓN DE FRANJAS	13
2. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	17
3. PROCEDIMIENTO DE RECONSTRUCCIÓN 3D	21
4. MODELO FUNCIONAL	26
5. VALIDACIÓN METRÓLOGICA	31
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Proyección de franjas: montaje experimental.	13
Figura 2. Patrón de franjas proyectado sobre, (a) Plano, (b) Rostro humano...14	14
Figura 3. (a) Fase discontinua, (b) Fase continúa.....17	17
Figura 4. Proyección del plano (a) Vertical, (b) Horizontal18	18
Figura 5. Patron de calibración.20	20
Figura 6. Patrón de puntos proyectado.....21	21
Figura 7. Procedimiento de reconstrucción 3D del rostro humano22	22
Figura 8. Rostro humano a reconstruir (imagen adquirida con consentimiento, informado por escrito)23	23
Figura 9. Franjas proyectadas sobre el rostro con desfase de (a) 0, (b) $\pi/2$, (c) π , y (d) $3\pi/2$24	24
Figura 10. Fases discontinuas de las franjas proyectadas sobre el rostro.....24	24
Figura 11. Fase continua de las franjas25	25
Figura 12. Nube de datos 3D.....25	25
Figura 13. Montaje de proyección de franjas múltiple vistas.....26	26
Figura 14. Objeto de Control por la cámara (a) izquierda, (b).....27	27
Figura 15. (a) Translación y (b) Rotación de los planos.....28	28
Figura 16. R3D del objeto de control en único plano coordinado.29	29
Figura 17. R3D del objeto de control aplicando matriz de rotación y vector de tranlacion.29	29
Figura 18. Imágenes de las franjas vistas por las cámaras CCDs.....30	30
Figura 19. Reconstrucción 3D del rostro.....30	30

Figura 20. Líneas de expresión en el rostro.....	31
Figura 21. R3D de objeto de dimensiones conocida.....	32
Figura 22. Perfil de la R3D.....	32
Figura 23. Desplazamiento del plano en el eje Z.....	33
Figura 24. R3D de una lámina respecto al sistema coordenado de una de las camaras.	33
Figura 25. Relación de desplazamientos experimentales vs teóricos.....	34

RESUMEN

TÍTULO: MODELO FUNCIONAL ÓPTICO PARA LA EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA DEL ROSTRO¹.

AUTORES: Jaime E. Carreño Rodríguez, Gerson Salazar Meza².

PALABRAS CLAVE: Metrología Óptica, Reconstrucción 3D, Calibración de Cámaras, Proyección de Franjas.

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se presenta un modelo funcional para obtener información topográfica del rostro humano. El modelo funcional propuesto se basa en la técnica de proyección de franjas y está conformado por un video proyector y dos cámaras digitales, ubicadas a ambos lados del proyector. Tradicionalmente una cámara y un proyector permiten extraer información del rostro humano con una resolución aproximada de 0.6 mm y con un campo de observación que está influenciado por la presencia de sombras, causadas por formas salientes como la nariz. El modelo propuesto evita el problema de sombras y mejora la resolución al utilizarse dos cámaras digitales con ángulo de observación grandes. Al utilizarse dos cámaras, cada una extrae información (3D) de una región del rostro humano. Un procedimiento novedoso de tratamiento digital de imágenes permite unificar las dos secciones en un único sistema coordinado, obteniéndose información completa del rostro humano y con la resolución apropiada para extraer información de detalles superficiales como arrugas profundas, líneas de expresión, etc. De igual forma, el sistema se calibra con una nueva técnica de calibración manual, desarrollada en el Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales (GOTS) de la Universidad Industrial de Santander, con la que es posible calibrar un sistema de proyección de franjas sin medir los parámetros geométricos del montaje, por lo tanto el tiempo de calibración se reduce de manera significativa.

¹ Proyecto de grado.

² Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela De Ingenierías Eléctrica, Electrónica Y Telecomunicaciones. Director: Ph.D. Jaime E. Meneses Fonseca. Codirector: Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía.

ABSTRACT

TITLE: FUNCTIONAL MODEL FOR OPTICAL INFORMATION EXTRACTION OF TOPOGRAPHIC FACE¹.

AUTHORS: Jaime E. Carreño Rodríguez, Gerson Salazar Meza².

KEYWORDS: Optical Metrology, 3D Reconstruction, Cameras Calibration, Fringe Projection.

DESCRIPTION

This paper presents a functional model for topographic information of the human face . The proposed functional model is based on the fringe projection technique and consists of a projector and two digital video cameras, located on both sides of the projector . Traditionally a camera and projector technology takes the information of the human face with a resolution of 0.6 mm and a field of observation which is influenced by the presence of shadows, shapes like protrusions caused by the nose. The proposed model avoids the problem of shadows and enhances the resolution to use two digital cameras with large observation angle . When using two cameras , each extracted information (3D) of a region of the human face . A novel method of digital image processing to unify the two sections into one coordinate system to give complete information of the human face and with appropriate resolution to extract information from surface details as deep wrinkles, fine lines, etc. . Similarly , the system is calibrated with a new manual calibration technique developed in Optics and Signal Processing (GOTS) Industrial University of Santander, with which it is possible to calibrate a fringe projection system without measuring the geometrical parameters of the assembly , therefore the calibration time is significantly reduced .

¹ Degree project..

² Faculty of Physics Mechanics Engineering. School of Engineering Electrics, Electronics and Telecommunications. Director: Ph.D. Jaime E. Meneses Fonseca. Codirector: Ph.D. Rodolfo Villamizar Mejía.

INTRODUCCIÓN

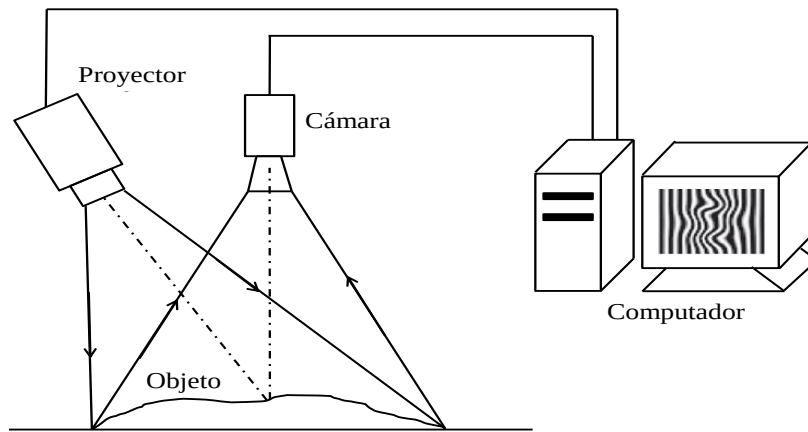
En diferentes procedimientos médicos y estéticos es de interés obtener información métrica, con resolución milimétrica, de la topografía cutánea del rostro humano. La precisión y confiabilidad que se espera de estas medidas, sumado a la dificultad para adquirir esta información han motivado el desarrollo de este trabajo; cuya estrategia de investigación consiste en evaluar experimentalmente el desempeño de un modelo de reconstrucción 3D para realizar mediciones de estrías cutáneas en la región facial y alteraciones del volumen cutáneo inducidas por procedimientos terapéuticos. Los métodos de reconstrucción 3D que no requieren de contacto físico entre el sistema captor y el objeto que se desea reconstruir han demostrado un mejor desempeño y mayor versatilidad si se comparan con otros métodos que dependen del contacto físico para llegar a la reconstrucción. Esta afirmación se deduce al considerar el tiempo de adquisición, y características del objeto a reconstruir como el tamaño, la forma y la dureza; esta consideración se acentúa si el objeto a reconstruir es parte del cuerpo de un humano vivo. Particularmente, la dificultad de situar la ceja de una persona en una misma posición evitando cualquier gesto que altere la forma superficial de la piel durante cinco o más segundos consecutivos, es una limitante en el proceso de reconstrucción 3D, porque cualquier movimiento o variación de la forma durante la etapa de adquisición afecta significativamente todo el proceso de reconstrucción.

La técnica de proyección de franjas permite, en aproximadamente dos segundos, adquirir las imágenes necesarias para obtener una reconstrucción 3D con resolución micrométrica. Esta es una de las principales razones por las que al consultar la literatura especializada, los antecedentes evidencian una amplia preferencia por esta técnica, cuando se requiere implementar métodos de reconstrucción 3D en aplicaciones biomédicas, en las que la métrica y la forma son el objeto de estudio. Dentro del impacto científico, se espera que con este trabajo se incentive el desarrollo de dispositivos de metrología óptica facial, que faciliten y respalden los resultados de los procedimientos médicos y estéticos en los que se pueden implementar, incrementando la tranquilidad y la confianza de pacientes potenciales; lo cual genera un impacto social positivo, al aumentar la demanda de los tratamientos y mejorar la calidad de vida de quienes se someten a ellos. En la sección uno de este artículo, se resumen los conceptos fundamentales de la técnica de proyección de franjas. En la sección dos se presentan conceptos referentes a la calibración del modelo, En la sección tres se muestra cómo se realiza la reconstrucción tridimensional y algunos resultados experimentales obtenidos. en la sección cuatro se expone el modelo funcional propuesto, y por último, en la sección cinco se realiza la evaluación metrológica del sistema desarrollado.

1. PROYECCIÓN DE FRANJAS

La técnica de proyección de franjas consiste en proyectar sobre el objeto a reconstruir franjas paralelas, que se deforman por la topografía del objeto [10]. La Fig. 1, muestra un montaje típico empleado para ejecutar la técnica. El sistema consta de una unidad de proyección/adquisición y una unidad de control. La unidad de proyección/adquisición está conformada por un Video Proyector y una Cámara Digital. Las imágenes adquiridas son procesadas por la unidad de control, que permite también sincronizar la proyección y la adquisición. Cuando la proyección se realiza sobre una superficie plana se observan franjas paralelas y de paso constante; al proyectarlas sobre un objeto, las irregularidades de la superficie quedan evidenciadas con la deformación de las franjas [2,8], tal y como se observa en la Fig. 2.

Figura 1. Proyección de franjas: montaje experimental.



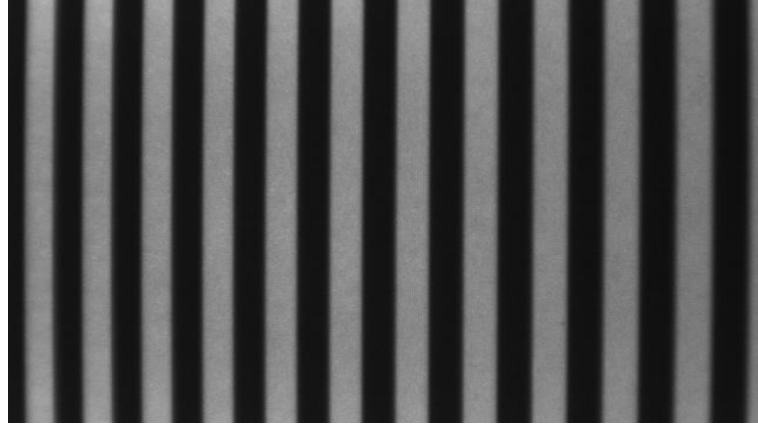
Fuente: Autores del proyecto.

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

$$I(x_0, y_0) = I_o(x_0, y_0) + A_o(x_0, y_0) * \cos(2\pi f_o x_0 + \phi_o) \quad (1)$$

Donde I_o y A_o corresponden a la intensidad del fondo continuo y el contraste de las franjas, respectivamente. El término f_o es la frecuencia espacial media de las franjas y ϕ_o es la fase inicial de las franjas, que corresponde a la deformación inicial sufrida por las franjas.

Figura 2. Patrón de franjas proyectado sobre, (a) Plano, (b) Rostro humano.



(a)



(b)

Fuente: Autores del proyecto.

Al ubicar sobre el plano de referencia un objeto, la ecuación se modifica de acuerdo con (2):

$$I(x_0, y_0) = I_o(x_0, y_0) + A_o(x_0, y_0) * \cos(2\pi f_o x_0 + \phi_o + \Delta\phi). \quad (2)$$

El término Df es la fase introducida por la topografía del objeto. La ecuación 2 se puede reducir como se muestra en (3),

$$I(x_0, y_0) = I_o(x_0, y_0) + A_o(x_0, y_0) * \cos(\phi). \quad (3)$$

El término f corresponde a la fase del patrón de franjas. De este modo, la deformación que genera un objeto al sistema de franjas altera directamente la función fase f de (3). Entonces el proceso de reconstrucción 3D, empleando la técnica de proyección de franjas, consiste en recuperar la función f . Para dicho cálculo se describe en este artículo el método de Corrimiento de Fase (Phase Shifting) [6]. Con este algoritmo se determina la fase del objeto a partir de la intensidad luminosa de n imágenes digitalizadas, con su respectiva fase modificada en valores φ_i conocidos dentro de un intervalo de 2π , como se muestra en (4),

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

Para $i=1,2,3,...n$. De este modo, (3) se modifica como se muestra en (5):

$$I_i(x_o, y_o) = I_o(x_o, y_o) + A_o(x_o, y_o) * \cos[\phi - \varphi_i]. \quad (5)$$

A partir de las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales se llega a (6), (7) y (8):

$$\sum_{i=1}^n I_i * \cos(\varphi_i) = \frac{nA}{2} * \cos(\phi), \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i * \sin(\varphi_i) = \frac{nA}{2} * \sin(\phi), \quad (7)$$

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

Ordenando (6), (7) y (8). se obtienen (9) y (10),

$$\tan(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i * \sin(\varphi_i)}{\sum_{i=1}^n I_i * \cos(\varphi_i)}, \quad (9)$$

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

El procedimiento es comúnmente utilizado con $n = 4$ imágenes [6], lo cual implica un desplazamiento de fase $j_i = p/2$. Así, adquiriendo las 4 imágenes se puede calcular el valor de A y f para cada punto (x_o, y_o) usando (11) y (12),

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

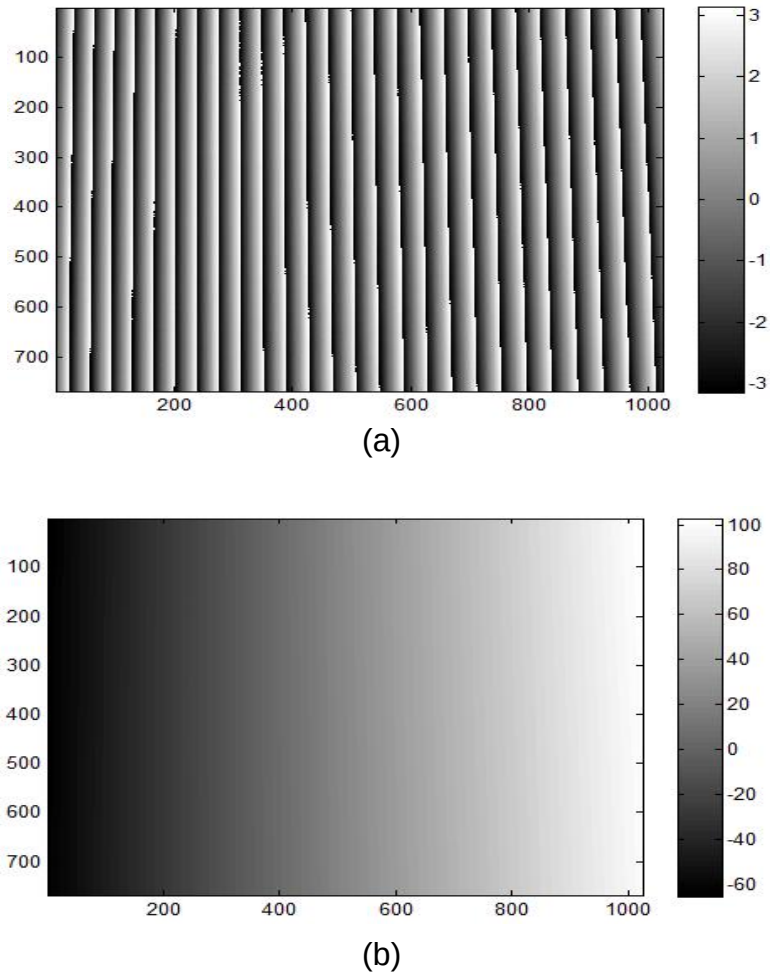
$$2A(x, y) = \sqrt{(I_2 - I_4)^2 + (I_1 - I_3)^2}, \quad (12)$$

Donde I_1 es la imagen con un desplazamiento de fase $j_1 = 0$, I_2 con $j_2 = p/2$, I_3 con $j_3 = p$, e I_4 con $j_4 = 3p/2$.

Como se observa en (11), el uso de la función arco-tangente para el cálculo de la fase genera puntos de discontinuidad entre $-\pi$ y $+\pi$. Razón por la cual es necesario convertir la fase discontinua (Fig. 3(a)) en una fase continua (Fig. 3(b)). En la Fig. 3(a) el valor de $-\pi$ corresponde al nivel de gris más bajo (negro) y $+\pi$ al nivel de gris más alto (blanco). Con el fin de obtener la fase continua es necesario identificar las discontinuidades y adicionar valores de $2\pi N$, siendo N una función escalón entera apropiada para eliminar las discontinuidades; este procedimiento se conoce como “Unwrapping” [7,5].

El proceso de reconstrucción 3D se completa al convertir la distribución de fase ϕ , para cada posición (X, Y) digitalizada por la cámara, en coordenadas métricas. El proceso de conversión se realiza mediante un proceso de calibración que permite determinar una ecuación experimental que asocia ϕ con las coordenadas espaciales de la superficie del objeto [2]. Este procedimiento se explicará en la siguiente sección

Figura 3. (a) Fase discontinua, (b) Fase continúa.



Fuente: Autores del proyecto.

2. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración de la unidad de proyección-adquisición consiste en encontrar los factores de una expresión matemática que relaciona el sistema coordenado del Video Proyector con el sistema coordenado de la Cámara, en función de los parámetros intrínsecos del video proyector y los parámetros extrínsecos de la cámara. En la Fig. 7, se muestran los sistemas coordenados empleados en el proceso de calibración. De acuerdo al modelo de proyección puntual o modelo pinhole, el video proyector y la cámara se modelan por un sistema coordenado cuyo origen se ubica en el centro de la pupila de salida o entrada y cuyo eje Z es paralelo al eje de simetría de la lente usada.

El plano de proyección LCD o el plano imagen del sensor CCD se ubica paralelo al eje XY y a una distancia sobre el eje Z igual al valor de la distancia focal de la lente de proyección. Un punto del objeto es proyectado siguiendo una línea recta que une el punto con el origen del sistema coordenado

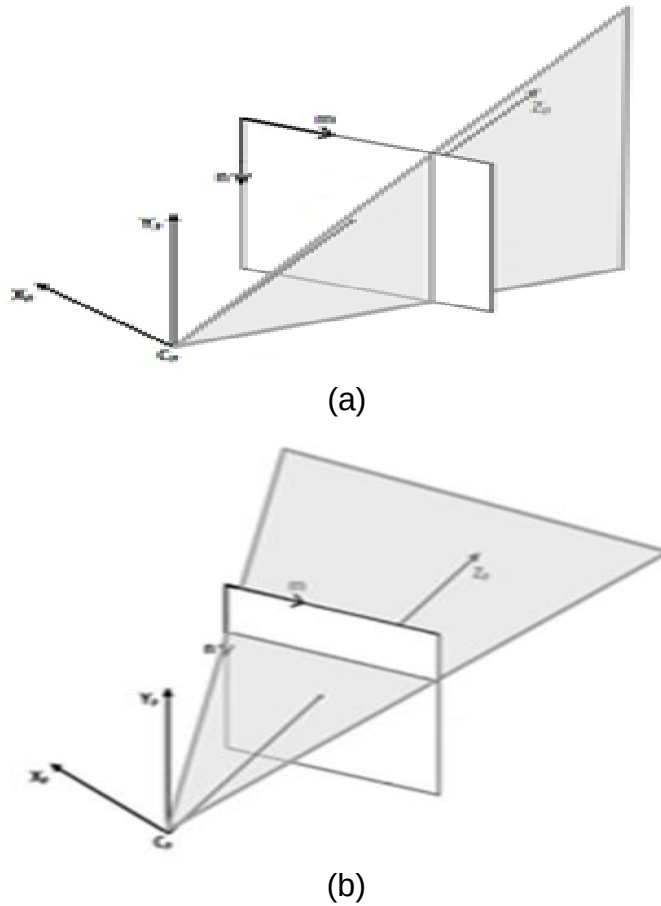
correspondiente. La intersección con el plano define las coordenadas en el plano del punto sobre la LCD o las coordenadas del punto en el plano imagen, dependiendo si corresponde al video proyector o la cámara digital. La LCD está conformada por $m \times n$ pixeles. A cada pixel se le asigna un valor de intensidad luminosa que dependa del patrón de franjas que se desea proyectar. Matemáticamente el pixel (m_i, n_i) está conformado por la intersección de la fila n_i y columna m_i correspondientes. Usando el sistema coordenado del video proyector, las líneas n_i y m_i se pueden escribir como se indica en (13) y (14).

$$x_p^l = k_{x_p} (m_i - m_o), \quad (13)$$

$$x_p^l = k_{y_p} (n_i - n_o). \quad (14)$$

Al proyectar las líneas, la propagación de la luz en el espacio forma un plano como se muestra en la Fig. 4.

Figura 4. Proyección del plano (a) Vertical, (b) Horizontal



Fuente: Autores del proyecto.

La representación matemática de los planos vertical y horizontal está dada por las ecuaciones (15) y (16) respectivamente:

$$f_p X_p - x_p^l Z_p = 0, \quad (15)$$

$$f_p Y_p - y_p^l Z_p = 0. \quad (16)$$

Los sistemas coordenados del proyector (X_p, Y_p, Z_p) y de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) se pueden relacionar mediante la transformación que se expresa en la ecuación (17),

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{c11} & r_{c12} & r_{c13} \\ r_{c21} & r_{c22} & r_{c23} \\ r_{c31} & r_{c32} & r_{c33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{c1} \\ t_{c2} \\ t_{c3} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Al resolver la ecuación (17) y reemplazar los valores de X_p , Y_p y Z_p en las ecuaciones (15) y (16), se tienen las ecuaciones (18) y (19),

$$\begin{aligned} w_{11}X_c + w_{12}Y_c + w_{13}Z_c + w_{14} - \\ w_{31}m_x X_c - w_{32}m_x Y_c - \\ w_{33}m_x Z_c - w_{34}m_x = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} w_{21}X_c + w_{22}Y_c + w_{23}Z_c + \\ w_{24} - w_{31}n_y X_c - w_{32}n_y Y_c - \\ w_{33}n_y Z_c - w_{34}n_y = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

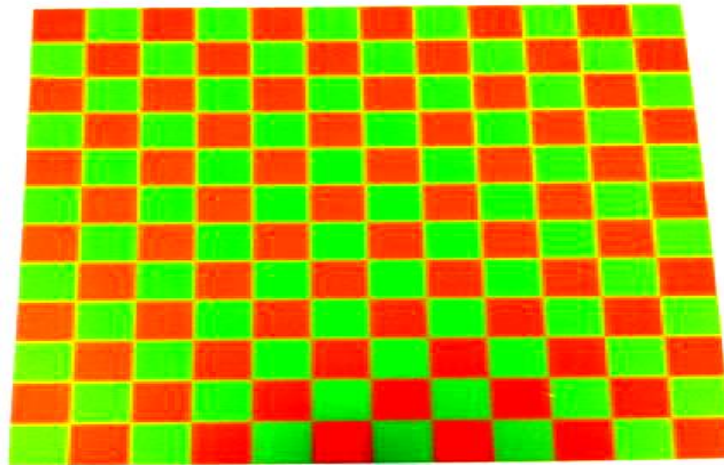
Matricialmente, las ecuaciones (18) y (19), se pueden expresar como se muestra en la ecuación (20):

$$\begin{bmatrix} \alpha m_x \\ \alpha n_y \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{c11} & w_{c12} & w_{c13} & w_{c14} \\ w_{c21} & w_{c22} & w_{c23} & w_{c24} \\ w_{c31} & w_{c32} & w_{c33} & w_{c34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Los coeficientes w_{ij} son función de los parámetros intrínsecos del proyector $(m_0, n_0, k_{xp}, k_{yp}, f_p)$ y los parámetros extrínsecos de la cámara (r_{cij}, t_{ci}) . La ecuación (20) indica que conociendo los coeficientes w_{ij} se pueden determinar, en coordenadas de la cámara, las ecuaciones de los dos planos ortogonales que pasan por un punto de la LCD del proyector. Para el caso de realizar la proyección del sistema de franjas en el proceso de reconstrucción 3D, es importante conocer la ecuación del plano vertical para la franja ubicada en la LCD. De esta manera, el procedimiento de calibración consiste en calcular w_{ij} según la ecuación (20).

Para calcular w_{ij} se requiere conocer puntos de la LCD con coordenadas (m_x, n_y) con sus respectivos puntos (X_c, Y_c, Z_c) vistas por la cámara. Para realizar este proceso se emplea un patrón de calibración que consiste de una superficie plana con un diagrama de cuadros de colores de dimensiones conocidas, similar a un tablero de ajedrez; ver Figura (5). Los colores se escogen de tal manera que al proyector un fondo homogéneo de color rojo, la cámara digital monocromática obtiene una imagen blanca y negra del tablero de ajedrez.

Figura 5. Patrón de calibración.

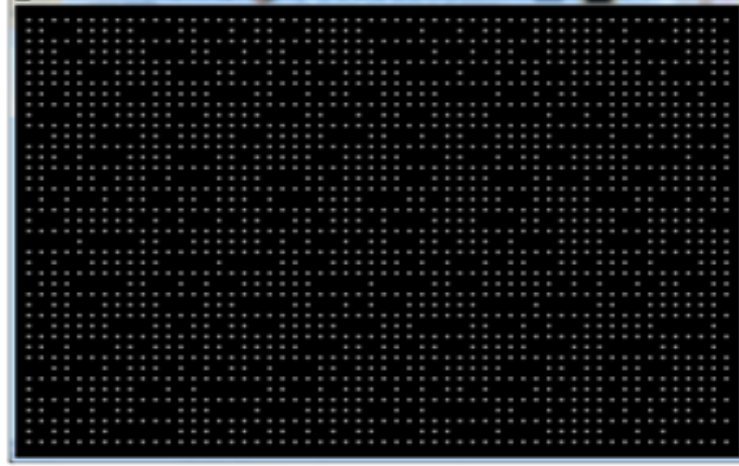


Fuente: Autores del proyecto.

Cuando se proyecta un fondo homogéneo blanco, la CCD observará una imagen homogénea donde no se identifican los cuadros. De igual forma para identificar las coordenadas (m_x, n_y) de la LCD utiliza un patrón de puntos.

Fig. 6, que se ubica sobre la LCD y se proyecta sobre el patrón de calibración. El procedimiento de adquisición de imágenes para la calibración consiste en ubicar el patrón de calibración, el cual se puede sostener manualmente en el espacio de calibración; se toman dos imágenes, una proyectando un fondo homogéneo rojo y otra proyectando con luz blanca el patrón de puntos de la Figura (6). Un tratamiento digital de imágenes mostrado en [2] permite calcular los coeficientes w_{ij} .

Figura 6. Patrón de puntos proyectado.



Fuente: Autores del proyecto.

3. PROCEDIMIENTO DE RECONSTRUCCIÓN 3D

El procedimiento de reconstrucción 3D de la superficie de un objeto inicia con la proyección de un sistema de franjas definido en la ecuación (21)

$$I(m_x, n_y) = \frac{1}{2} I_0 (1 + \cos \phi(m_x, n_y)). \quad (21)$$

La distribución en intensidad se ubica sobre la LCD del proyector donde I_0 es un valor entre 0 y 255, 0 corresponde al color negro y 255 al color blanco. La fase $\phi(m_x, n_y)$ está definida por la ecuación (22).

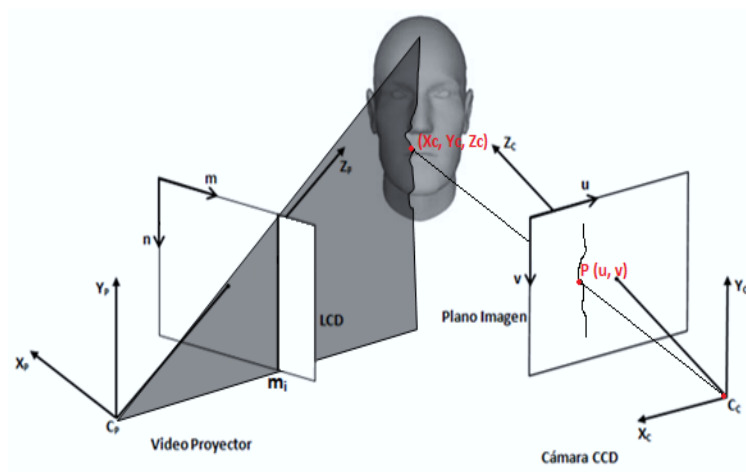
$$\phi(m_x, n_y) = \frac{2\pi}{P_0} m_x \quad (22)$$

Siendo m_x un valor entero entre 0 y N_x , Donde N_x corresponde al número de columnas de la LCD. P_0 es un entero y define el paso o separación entre franjas blancas consecutivas.

De acuerdo a la ecuación (22) la intensidad adquiere un máximo para valores de $m_x = nP_0$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ y valor mínimo para $m_x = ((n+1)/2)P_0$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. La ecuación (22) indica que conociendo el valor de ϕ en un punto cualquiera sobre el objeto, se puede determinar cuál es el valor de m_x sobre la LCD. Con el fin de calcular ϕ se emplea el método de corrimiento de fase, usando $n=4$. Es decir se proyectan y adquieren con la CCD cuatro sistemas de franjas corridos $\pi/2$. Al realizarse el proceso de corrección de fase, debido a la función arcotangente, se obtiene $\phi(u, v)$ siendo (u, v) las coordenadas en píxeles de la CCD. La clave del proceso de reconstrucción 3D consiste en emplear la fase ϕ como función independiente del sistema coordenado. Es decir que la posición del primer máximo de intensidad ubicado en la coordenada (u_0, v_0) de la CCD ocurre a una distancia $m_x = P_0$ sobre la LCD. De esta manera para cada punto sobre la superficie del objeto observado por la CCD se tiene el valor de m_x correspondiente, usando su valor de fase y la ecuación (22).

De esta manera, conociendo m_x y los coeficientes w_{ij} , se conoce la ecuación del plano vertical en las coordenadas de la cámara, según ecuación (18) y mostrado en la Fig. 7.

Figura 7. Procedimiento de reconstrucción 3D del rostro humano



Fuente: Autores del proyecto.

La Fig. 7. muestra el proceso asociado a la reconstrucción 3D. Sobre el plano (u,v) se ubica un punto imagen $P(u,v)$ de la superficie del objeto al que se le desean calcular sus coordenadas (X_c, Y_c, Z_c) . Para $P(u,v)$ se conoce ϕ , luego se calcula m_x . La Figura 7. exhibe el plano vertical de proyección que pasa por m_x que y de cual se conoce su ecuación en el sistema coordenado (X_c, Y_c, Z_c) .

Del proceso de calibración mostrado en [2] se conocen los parámetros intrínsecos de calibración de la CCD; lo cual permite conocer la ecuación de la línea de proyección; línea que pasa por el centro del sistema coordenado y por el punto $P(u,v)$. La intersección de la línea con el plano de proyección permite determinar las coordenadas espaciales del plano (X_c, Y_c, Z_c) .

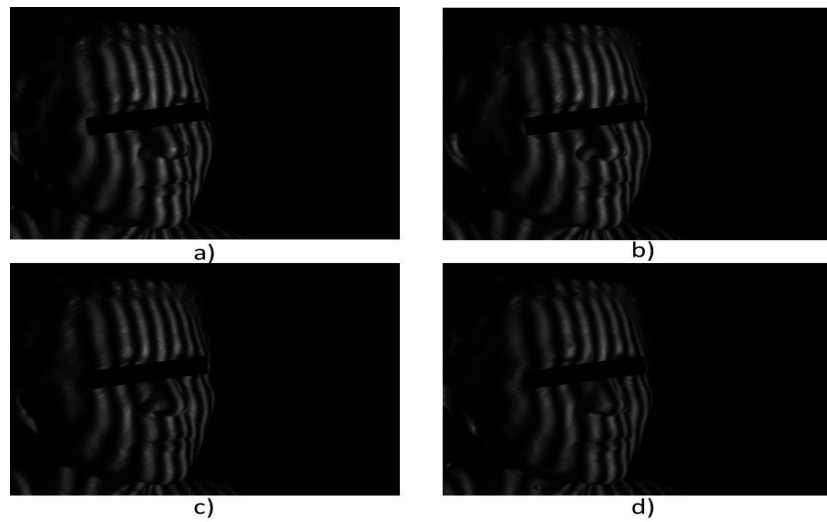
Al realizar este procedimiento para cada punto sobre la imagen de la superficie del objeto se obtiene una nube de datos de la superficie del objeto en coordenadas (X_c, Y_c, Z_c) . El procedimiento experimental de R3D utiliza la unidad de proyección-adquisición conformada por una cámara CCD, UEYE UI2310M, con lente EDMUND OPTICS de 8.5mm/F1.3, y un video proyecto DELL M110. El objeto a reconstruir es un rostro humano real (ver Fig. 8). La persona se ubica frente a la unidad y sobre el rostro de ella se proyectan de forma consecutiva cuatro sistemas de franjas con $P_0 = 8$ y con desfase entre las imágenes de $\phi_i = \pi/2$. La Fig. 9. muestra los sistemas de franjas adquiridos por la cámara CCD. El montaje fue calibrado usando el procedimiento de la sección dos.

Figura 8. Rostro humano a reconstruir (imagen adquirida con consentimiento, informado por escrito)



Fuente: Autores del proyecto.

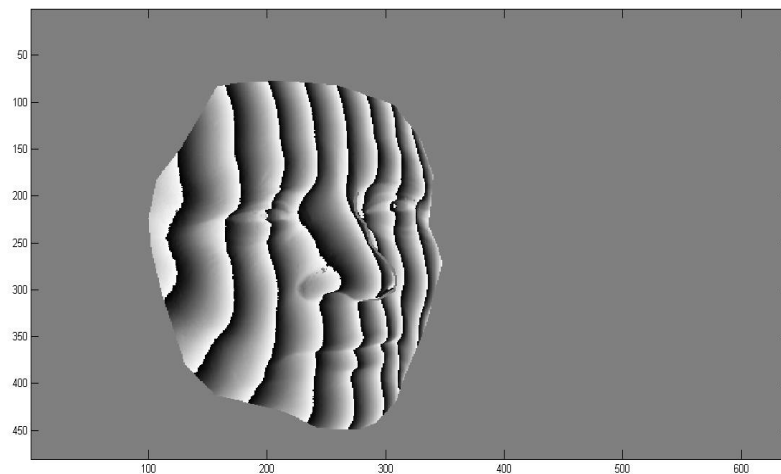
Figura 9. Franjas proyectadas sobre el rostro con desfase de (a) 0, (b) $\pi/2$, (c) π , y (d) $3\pi/2$.



Fuente: Autores del proyecto.

Utilizando la ecuación (11) se recupera la fase discontinua del sistema de franjas proyectado sobre el rostro, Fig. 10.

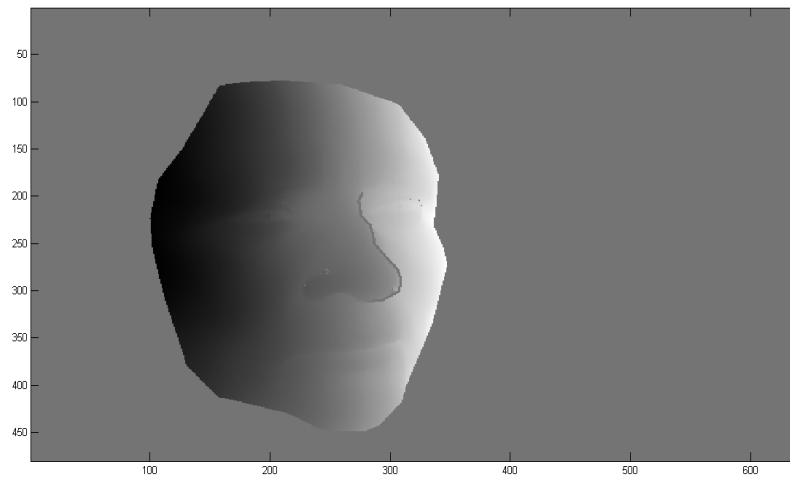
Figura 10. Fases discontinuas de las franjas proyectadas sobre el rostro.



Fuente: Autores del proyecto.

Mediante el algoritmo unwrapping se recupera la fase continua partiendo de la fase discontinua [8], como se observa en la Fig.11.

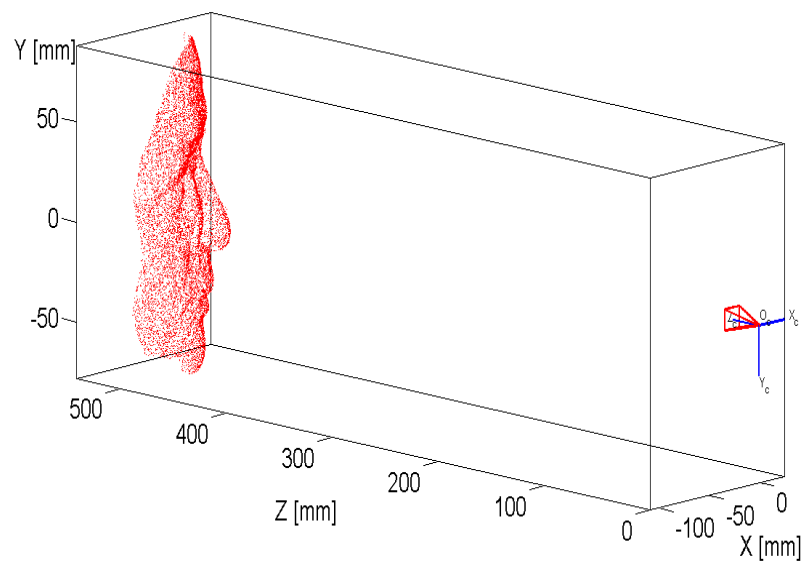
Figura 11. Fase continua de las franjas



Fuente: Autores del proyecto.

Como ya se mencionó la fase ϕ tiene una relación lineal con la posición horizontal de m del sistema de franjas en la LCD del video proyector. Partiendo de este hecho y utilizando el procedimiento mencionado anteriormente se pueden calcular las coordenadas 3D del área del rostro visto por la cámara que conforma la nube de datos 3D (Fig. 12).

Figura 12. Nube de datos 3D.

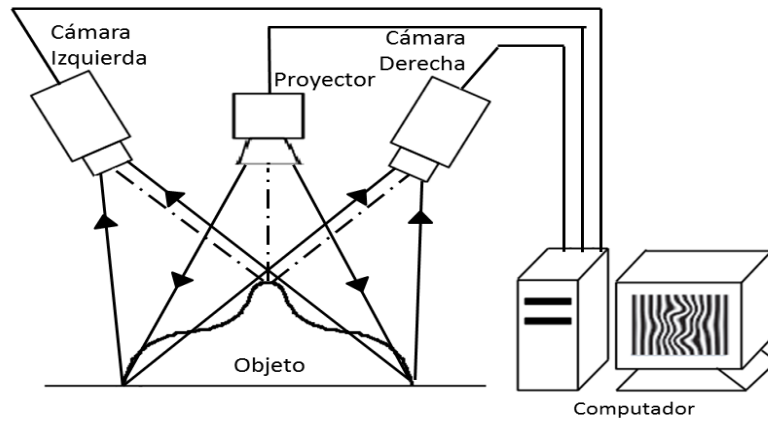


Fuente: Autores del proyecto.

4. MODELO FUNCIONAL

En la anterior sección se muestra cómo se puede extraer información 3D del rostro humano usando un video proyector y una cámara. Este tipo de sistemas sólo permite reconstruir las secciones del rostro donde las franjas son iluminadas y capturadas por la cámara. El modelo propuesto en el presente trabajo (ver Fig. 13.) utiliza dos cámaras que extraen información 3D del rostro humano. La idea básica consiste en usar dos cámaras de tal manera que cada una adquiera una parte del rostro humano con alta información, la unificación de las dos secciones permite obtener una imagen completa del rostro con alta resolución. En un trabajo preliminar [3], se demostró que la resolución se incrementa en función del ángulo que hacen los ejes de proyección de la cámara y el proyector.

Figura 13. Montaje de proyección de franjas múltiple vistas.



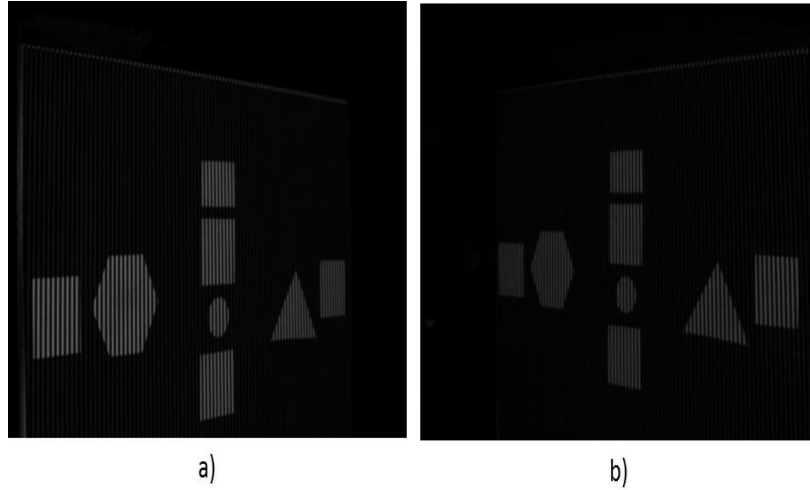
Fuente: Autores del proyecto.

De esta manera, el modelo propuesto comprende a dos unidades de proyección/adquisición que extraen información 3D independiente. Cada reconstrucción tiene su sistema coordenado independiente y corresponde al sistema coordenado de la cámara. Con el fin de unificar las dos nubes de datos en un único sistema coordenado, se debe aplicar a una nube de datos una transformación, conformada por una matriz de rotación y un vector de translación, ecuación(23). Esta transformación se aplica a una nube de datos para convertirlas al sistema coordenado de la otra cámara. La ecuación (23) transforma la nube de datos de la cámara derecha al sistema coordenado de la cámara izquierda.

$$\begin{bmatrix} X_I \\ Y_I \\ Z_I \end{bmatrix} = R_{cn} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} + T_{cn} \quad (23)$$

Para calcular R_{cn} y T_{cn} se utiliza una estrategia que consiste en emplear un objeto de control compuesto por figuras geométricas adheridas a una superficie plana. En la Fig. 14. se observan las imágenes adquiridas con el modelo propuesto.

Figura 14. Objeto de Control por la cámara (a) izquierda, (b).

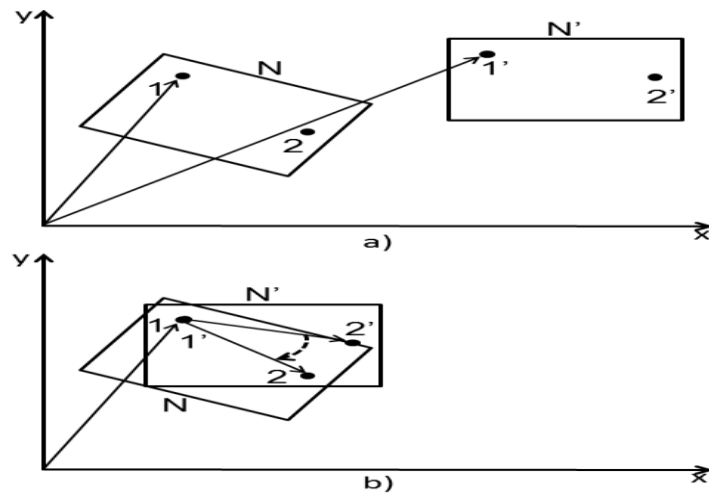


Fuente: Autores del proyecto.

El objetivo consiste en realizar la reconstrucción 3D del objeto de control visto por cada cámara. El objeto de control empleado corresponde a una superficie con un nivel de gris diferente al nivel de gris de las figuras geométricas. De esta manera, la nube de datos 3D se puede segmentar en puntos que pertenecen al plano y puntos que pertenecen a las figuras. De igual forma las figuras son fácilmente identificables, lo cual implica que se pueden identificar y calcular los centroides de cada una.

Se identificaron los centroides de cada figura en cada nube de datos. El problema para calcular R_{cn} y T_{cn} se plantea de la siguiente manera: conociendo las coordenadas del centroide de una figura en el sistema coordenado de la cámara derecha (X_d, Y_d, Z_d) y conociendo las coordenadas del centroide de la misma figura en el sistema coordenado de la cámara izquierda (X_l, Y_l, Z_l), como aplicar R_{cn} y T_{cn} a (X_d, Y_d, Z_d) para obtener unas nuevas coordenadas que coincidan con (X_l, Y_l, Z_l).

Figura 15. (a) Translación y (b) Rotación de los planos.



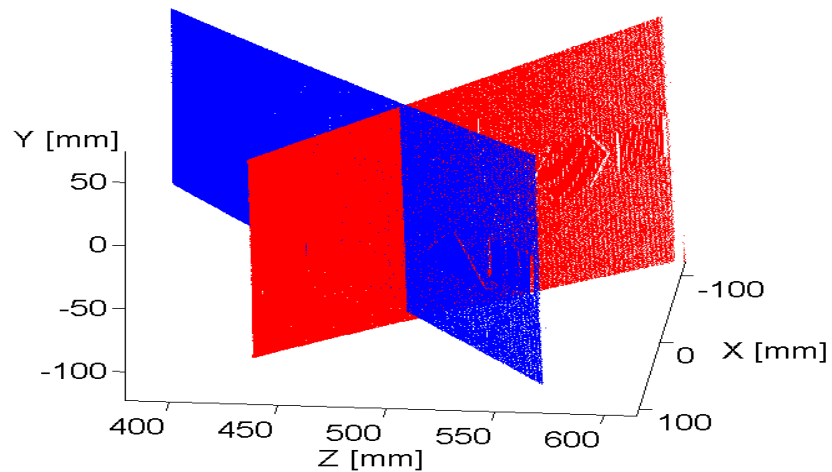
Fuente: Autores del proyecto.

El problema planteado puede resolverse usando una estrategia de optimización en términos de mínimos cuadrados, ya que hay bastante información 3D con puntos correspondientes o emplearse una estrategia geométrica usando solamente tres figuras geométricas no colineales. La Fig. 15 muestra la idea empleada pero para el caso 2D con el fin de facilitar la comprensión. Los puntos 1 y 2 son los centroides de dos figuras y los puntos 1' y 2' son puntos correspondientes. A la nube de datos N' se aplica la translación dada por $T = \vec{P} - \vec{P}_1$. Posteriormente se calcula la rotación de 2' a 2, ya que el ángulo θ se puede calcular.

Para el caso del plano ubicado en el espacio 3D, se requieren de 3 figuras no colineales, donde intervienen una translación y dos rotaciones en el espacio. El procedimiento se repite para varias combinaciones de figuras y se promedia los valores R_{cn} y T_{cn} .

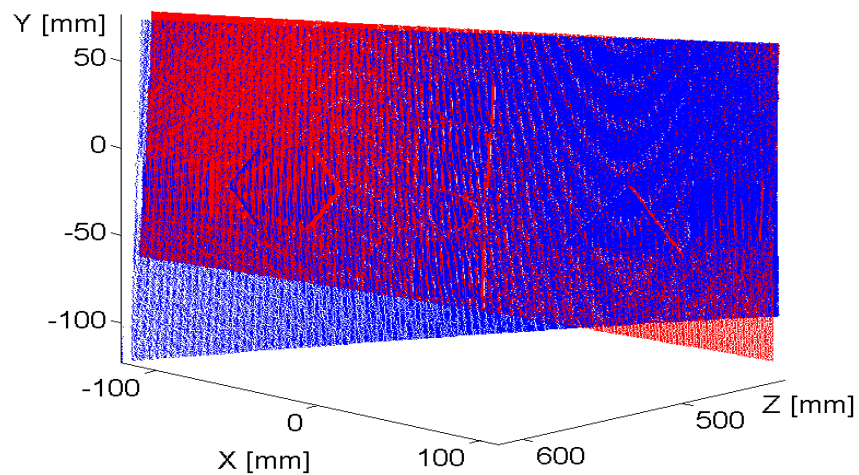
La Fig. 16 muestra las nubes de datos iniciales del objeto de control y la Fig. 17 muestra las nubes unificadas.

Figura 16. R3D del objeto de control en único plano coordenado.



Fuente: Autores del proyecto.

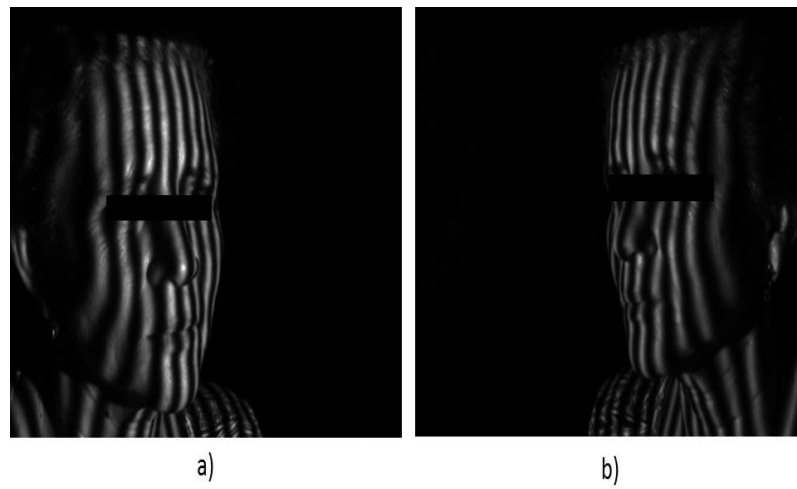
Figura 17. R3D del objeto de control aplicando matriz de rotación y vector de translacion.



Fuente: Autores del proyecto.

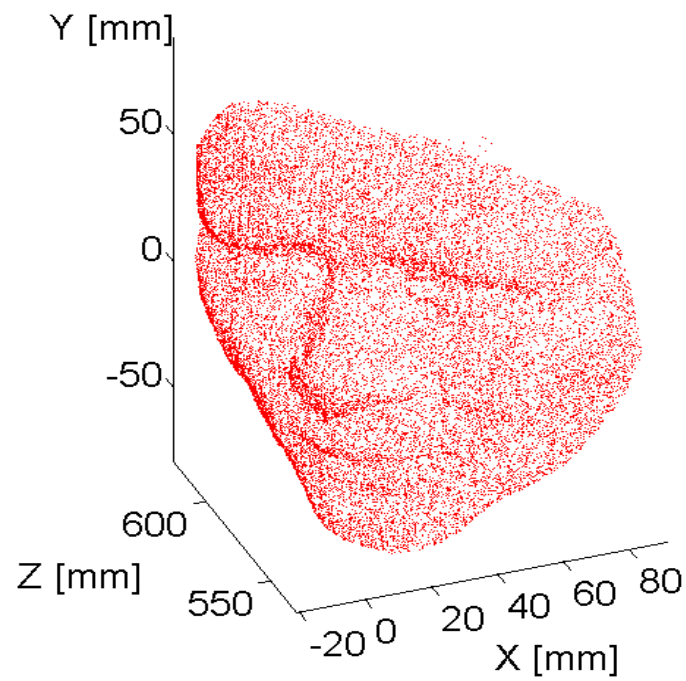
Luego, se procede a realizar la reconstrucción 3D completa al rostro humano. La Fig. 18 muestra los sistemas de franjas adquiridos por cada cámara CCD de las cuales se obtiene su respectiva nube de datos y utilizando La matriz de rotación y el vector de translación, se genera la nube unificada entre las nubes de datos que da como resultado la reconstrucción 3D del rostro(ver Fig.19).

Figura 18. Imágenes de las franjas vistas por las cámaras CCDs.



Fuente: Autores del proyecto.

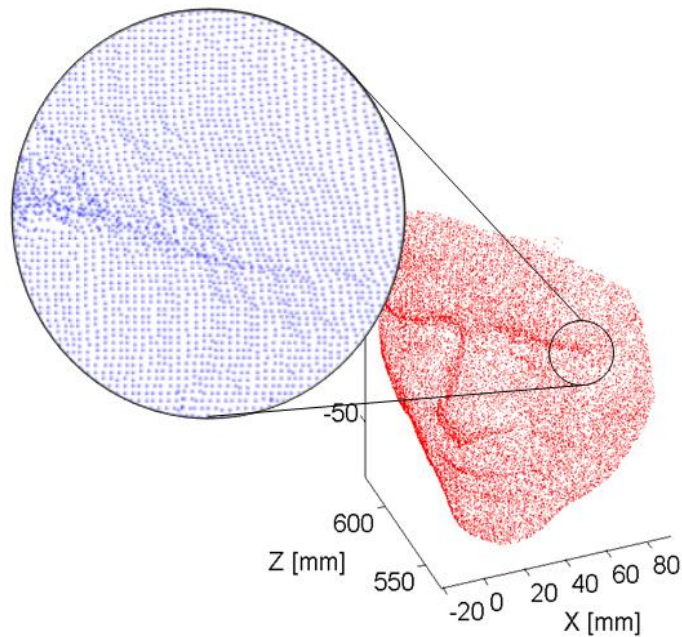
Figura 19. Reconstrucción 3D del rostro.



Fuente: Autores del proyecto.

En la reconstrucción 3D de la Fig. 20. Se muestra una línea de expresión extraída del rostro humano.

Figura 20. Líneas de expresión en el rostro.



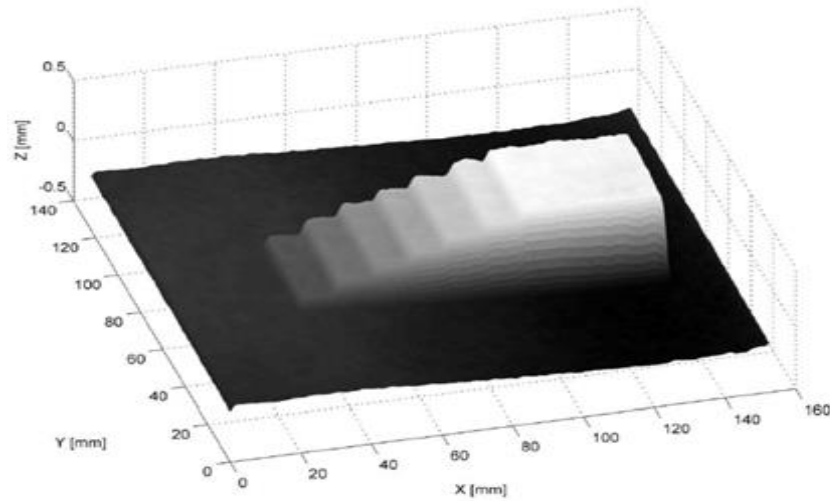
Fuente: Autores del proyecto.

5. VALIDACIÓN METRÓLOGICA

El objetivo consiste en evaluar el error que se comete en el proceso de R3D. La idea consistió en establecer de manera aproximada el nivel de detalle que puede resolver el modelo implementado. Para validar la resolución métrica que puede resolver el sistema y que margen de error presenta, se hizo un análisis cuantitativo y cualitativo.

Análisis cualitativo. Para obtener una resolución de forma cualitativa, se realizó una reconstrucción 3D por proyección de franjas de un objeto patrón de dimensiones conocidas y se compararon las mediciones del objeto R3D y las obtenidas con un instrumento de medición. El objeto patrón está conformado por 7 hojas de papel y ubicadas para formar una escalera. El espesor de la hoja de papel, medida con un calibrador correspondiente a $105 \pm 10 [\mu m]$. La Fig.21 muestra la R3D del objeto patrón.

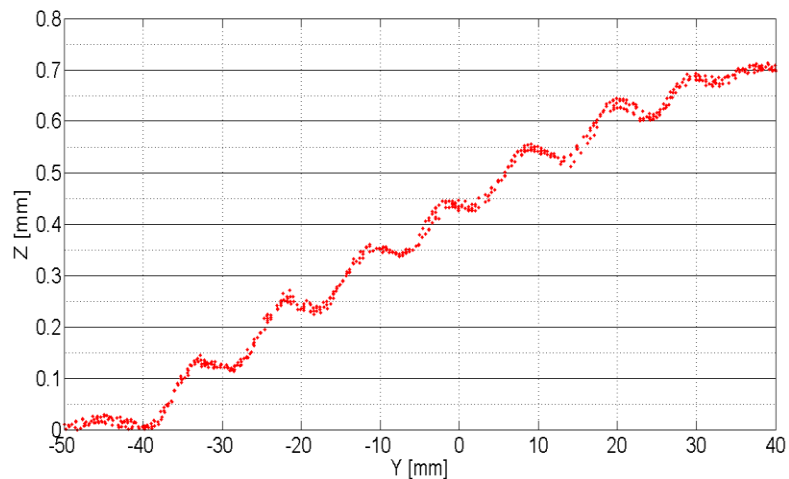
Figura 21. R3D de objeto de dimensiones conocida.



Fuente: Autores del proyecto.

En la Fig. 22. se observa las variaciones de altura obtenidas con el sistema de reconstrucción tridimensional. Según los datos obtenidos se puede deducir en primera instancia que nuestro sistema puede resolver variaciones de altura cercana a los 0.1 [mm] .

Figura 22. Perfil de la R3D.

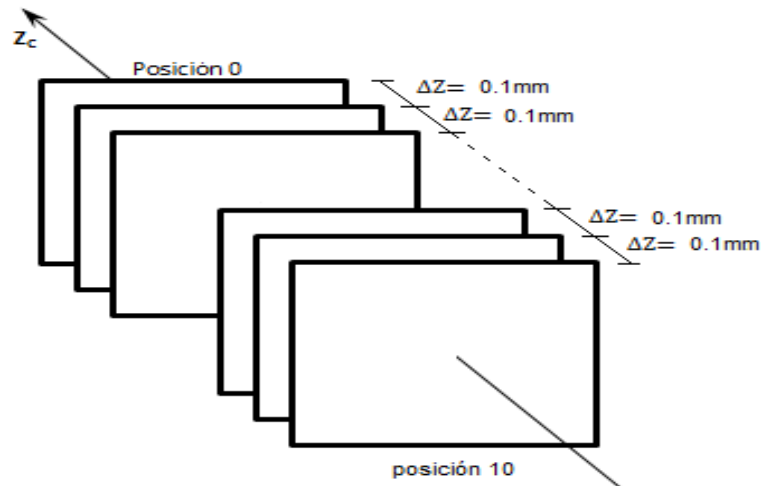


Fuente: Autores del proyecto.

Análisis cuantitativo. Para cuantificar la resolución del modelo, se adquieren imágenes de un objeto en diferentes posiciones Δ_z conocidas. Manteniendo su posición en el plano XY. Al realizar las reconstrucciones 3D en un mismo plano coordenado, la separación entre cada una debe corresponder con los

desplazamientos teóricos. Para la experiencia se adquieren imágenes de una lámina deacrílico blanca que se desplaza en diez diferentes posiciones en el eje Z por medio de un tornillo micrométrico, con variaciones de $\Delta_z = 0.1[mm]$, respecto al plano anterior como se observa en la Fig. 23.

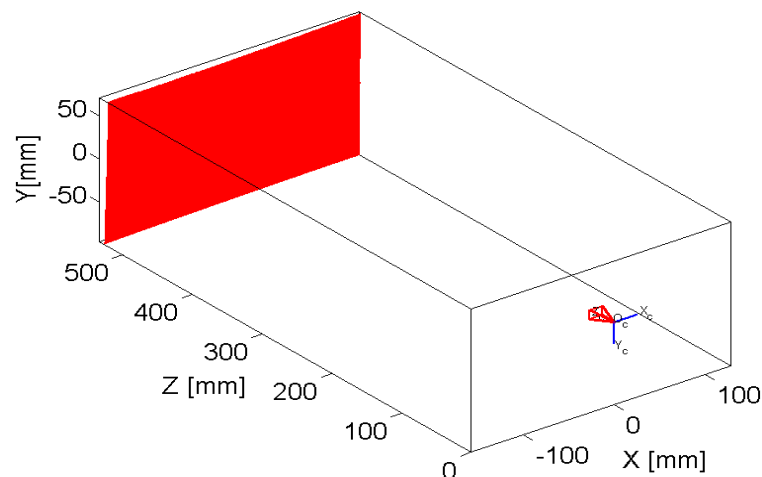
Figura 23. Desplazamiento del plano en el eje Z.



Fuente: Autores del proyecto.

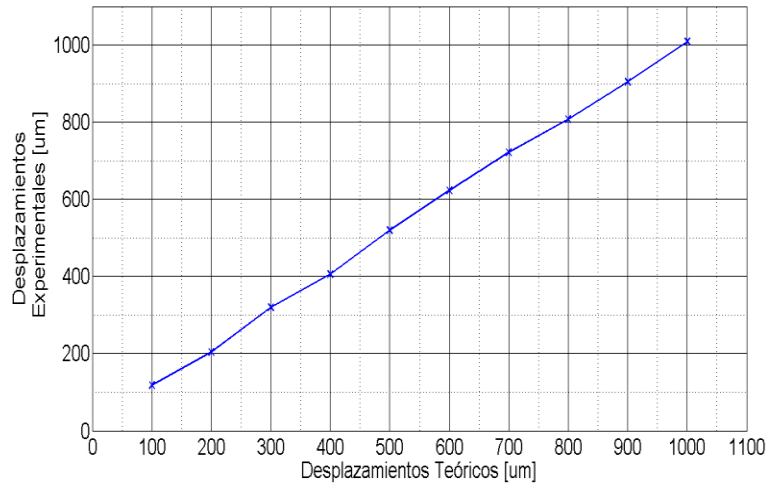
Una vez se tiene la rescontruccines 3D de cada lamina (ver Fig. 24.), se puede hacer una relacion entre los datos de desplazamiento experimentales arrojados por la RD3 y los adquiridos teóricamente con el tornillo micrométrico (Fig. 25).

Figura 24. R3D de una lámina respecto al sistema coordenado de una de las camaras.



Fuente: Autores del proyecto.

Figura 25. Relación de desplazamientos experimentales vs teóricos



Fuente: Autores del proyecto.

De acuerdo con los resultados se concluye que con el modelo presentado es posible obtener información metrológica de variaciones de $0.1 [mm]$, con un error de $\pm 20 [\mu m]$.

CONCLUSIONES

Este documento presenta una estrategia que permite adquirir información métrica del rostro y que puede ser utilizada para evaluar alteraciones en su forma, esta estrategia se basa en un sistema de reconstrucción tridimensional el cual utiliza el método de proyección de franjas, el montaje experimental del sistema difiere a uno tradicional de este tipo, puesto que se incluye un objeto de observación, con el fin de minimizar los errores por presencias de sombras. Los ángulos empleados permiten resolver fácilmente detalles del orden de 100 micrómetros. En el desarrollo del presente trabajo se realizaron aportes significativos en el procedimiento de extracción de información 3D por el método de proyección de franjas. Por un lado se realiza un procedimiento de calibración de una unidad de proyección/adquisición. Este procedimiento se desarrolló interior del grupo GOTS y ha sido mencionado en diferentes artículos. Por otro lado, para la extracción de información del rostro humano se desarrolló una estrategia de unificación de sistemas coordenados a partir de un procedimiento geométrico básico, sin necesidad de recurrir a procedimientos de optimización.

REFERENCIAS

- [1] A Baldi, F. Bertolino, F. Ginesu. On the performance of some unwrapping algorithms, Opt. Laser Eng. 37, 313-330. 2002.
- [2] A. L. González, J. León, J. E. Meneses. Reconstrucción 3D del torso humano a 360° de observación mediante la tecnica de proyección de franjas, Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Autonoma de Bucaramanga. 2014.
- [3] Ariza Diana,Vesga Eliana. Extraccion de las características topográficas de la piel humana por medio del metodo de proyeccion de franjas, Trabajo de grado, Faculta de ingeniería Fisico mecanicas,Universidad Industrial de Santander. 2012.
- [4] Henrik O. Saldner, Jonathan M. Huntley. Profilometry using temporal phase unwrapping phase unwrapping and a spatial light modulator-based fringe projector, Opt. Eng. 36(2) 610-615. 1997..
- [5] Hong hao, Wenyi Chen, Yushan Tan. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes. Applied Optics Vol 33, N° 20. 1994.
- [6] K.G. Larkin, K. Hibino, B.F. Oreb, I. Farrant. Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors. J. Opt Soc. Am. A, Vol 12, N° 4. 1995.
- [7] Meneses Jaime, Gharbi Tijani, and Philippe Humbert. Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram. Applied Optics, Vol. 44, No. 7, pp. 1207-1215, 2005.
- [8] Meneses Jaime, Système Optique Pour La Mesure des Dèformations De la Voûte Plantaire Sous Chargue Statique , Thèse. L'U.F.R Des Sciences Et Techniques DeL'Université De Franche-Comté. 22 Septembre, 1998.
- [9] N. Egidi, P. Maponi. A comparative study of two fast unwrapping algorithms. Appl. Math. Comp. 148, 599-629. 2004.
- [10] Salvi Joaquin. Pattern codification strategies in structured light systems. Instituto de Informatica, Universidad de Girona, España. 2001.