

Recuperación de formas 3D usando luz estructurada

Venustiano Soancatl¹ y Leopoldo Altamirano¹

INAOE Departamento de Ciencias Computacionales Luis Enrique Erro No. 1
Sta. Ma. Tonantzintla, Puebla, 72840, México
venus@ccc.inaoep.mx, robles@inaoep.mx

Resumen La recuperación 3D usando luz estructurada es una técnica que permite recuperar modelos 3D de objetos con alta exactitud. En este artículo presentamos una breve revisión de la técnica de recuperación de profundidad proyectando una sola franja, explicamos el método para su extensión a múltiples franjas, hacemos una calibración de la cámara y proponemos una técnica sencilla de calibración del proyector. Así mismo proponemos usar un método de codificación binaria para resolver el problema de las discontinuidades de las franjas, presentamos también resultados obtenidos, conclusiones y trabajo futuro.

1. Introducción

En la industria en general hay una gran necesidad de medir con exactitud formas de objetos 3D y asegurar la calidad en la producción. En muchos casos la medición de estos objetos se hace mediante contacto manual en donde técnicos miden la superficie de los objetos para encontrar defectos. También posible usar robots para la medición de los objetos. En ambos casos tanto medición mediante contacto manual como en la utilización de robot el tiempo de medición es alto. Estas son algunas de las principales razones por las que es importante contar con un sistema de recuperación 3D basado en luz estructurada. Con un sistema de este tipo, puede realizarse inspección automática línea valiéndose de la medición de formas 3D del objeto bajo inspección, por ejemplo, se pueden detectar los defectos en el pintado del cuerpo de un panel inspeccionar abolladuras, efectuándose estos con alta rapidez, exactitud y sobre todo sin contacto.

Un sistema de luz estructurada normalmente consta de una cámara, un objeto o superficie a recuperar, una fuente de iluminación que puede ser un láser, proyector de diapositivas, un cañón o incluso un foco común y corriente que pueda proyectar una franja o patrón de luz sobre el objeto. Otras de las ventajas de usar esta técnica es que se puede hacer la medición de objetos sin la utilización de dispositivos de contacto y el hecho de que la cámara y la fuente de iluminación no son costosos.

Esta técnica consiste en proyectar patrones de luz sobre la superficie que queremos recuperar, estos patrones pueden ser puntos de luz, una sola franja,

múltiples franjas, en general patrones de luz de los que conozcamos su geometría. La información 3D se manifiesta por sí misma en las deformaciones aparentes del modelo proyectado. Analizando estas deformaciones podemos obtener información acerca de la posición, orientación y textura de la superficie. El procedimiento para la obtención de la forma y dimensiones de los objetos se determina mediante la distancia de los objetos en relación con algún sistema de referencia. Un sistema de luz estructurada usa una técnica denominada triangulación en la que una fuente de luz emite un haz a un cierto ángulo sobre una superficie, el haz reflejado es captado por una cámara. Al estar la cámara y la fuente de iluminación separados una cierta distancia se obtiene un triángulo que al resolverlo se puede conocer la distancia a la que se encuentra el objeto.

1.1. Trabajo relacionado

Klette, Schlüns and Koshan [1] proponen una técnica de proyección de plano de luz en donde el centro óptico de la fuente de iluminación es considerado como el origen. El objetivo es calcular las distancias entre un plano de referencia y los puntos iluminados en el objeto, dicho plano de referencia es definido por el eje vertical Y del sistema de coordenadas del plano de luz y el eje X en el que se encuentra la cámara. El centro óptico de la cámara y el centro óptico de la fuente de iluminación se encuentran en el mismo eje. Los autores calculan un ángulo α_k y a partir del conocimiento de la distancia entre la cámara y el proyector y un espacio calibrado pueden calcular las distancias iluminadas en el objeto. Este método se verá con mayor profundidad en la siguiente sección ya que una parte de nuestro trabajo es una extensión de este método.

Boughet [2] implementó un sistema de luz estructurada de bajo costo que usa una lámpara de escritorio y un objeto con el que pueda proyectar una sombra que se asemeje a una franja. Se mueve esta franja manualmente de tal manera que barra toda la superficie del objeto. Calculan la posición del centro óptico de la fuente de iluminación colocando un objeto en posición vertical. Del conocimiento de la altura del objeto y de la longitud de la sombra que proyecta es posible encontrar el centro óptico de la fuente de iluminación.

Sotoca [3] presenta una aplicación de la técnica de luz estructurada para reconstrucción de espaldas humanas. El usa principalmente dos enfoques, el primero es reconstrucción con el eje óptico de la cámara perpendicular al plano de referencia y el segundo es reconstrucción con el eje óptico de la cámara con dirección arbitraria. La técnica es similar a la de Klette y la diferencia radica en que Klette pone el plano perpendicular al plano de referencia.

2. Proyección de una sola franja

El principio consiste en proyectar una franja de luz sobre el objeto como se muestra en la Fig. 1

Como ya se mencionó anteriormente, esta técnica proyecta un plano de luz sobre la escena. La idea es interceptar los rayos de proyección de la imagen con el plano de luz. Dicha intersección es visible como una franja de luz en la imagen.

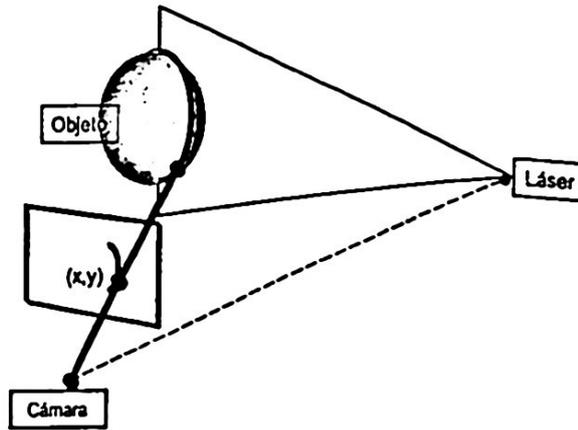


Figura 1. Proyección de una franja de luz

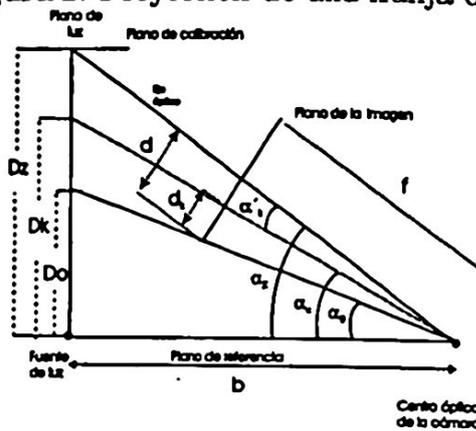


Figura 2. Representación esquemática de la técnica de proyección de un plano de

La tarea consiste en determinar las distancias entre los puntos iluminados del objeto y un plano de referencia (ver Fig. 2). Asumimos que la imagen es tamaño $M \times N$ y que los índices columna de esta matriz son $x = 0, 1, \dots, M -$

Como un paso inicial, se lleva a cabo la calibración de la franja de luz para poder calcular los valores de profundidad. Primero se mide la longitud b es la distancia entre el centro óptico de la cámara y el proyector del plano luz. Se asume que se tiene un objeto de calibración plano, paralelo al plano referencia y puede moverse a lo largo del eje óptico del proyector del plano luz. El objeto de calibración se mueve de tal forma que la franja de luz proyectada coincida con la columna del centro de la imagen $x = M/2$. Posteriormente mide la distancia D_z entre el objeto de calibración y el plano de referencia. Para determinar la distancia D_0 se mueve el objeto de calibración de tal forma que franja de luz proyectada coincida con la primera columna de la imagen $x =$ entonces D_0 es la distancia entre el objeto de calibración y el plano de referencia.

Sean α_z el ángulo formado por el plano de referencia y el eje óptico de cámara y α_0 el ángulo formado por el plano de referencia y el plano que definido por la primera columna de la imagen y el centro óptico de la cámara (ver Fig. 2). Así:

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{D_z}{b}\right) \tag{1}$$

$$\alpha_0 = \arctan\left(\frac{D_0}{b}\right) \quad (2)$$

El objetivo es poder calcular cualquier distancia D_k entre D_0 y D_z . De la Fig. 2 podemos ver que

$$D_k = b \cdot \tan \alpha_k \quad (3)$$

donde

$$\alpha_k = \alpha_z - \alpha'_k \quad (4)$$

De esta última ecuación podemos ver que la solución al problema de la distancia D_k se reduce a encontrar α'_k . De la Fig. 2 también

$$d = f \cdot \tan(\alpha_z - \alpha_0) \quad (5)$$

al aplicar la fórmula de la adición de la tangente tenemos

$$d = f \cdot \frac{(D_z - D_0) \cdot b}{b^2 + D_z \cdot D_0} \quad (6)$$

Puesto que la imagen tiene M columnas la distancia d_k entre la columna 0 la columna k puede ser calculada por la siguiente ecuación

$$d_k = \frac{2kd}{M} \quad (7)$$

$$\tan(\alpha'_k) = \frac{d - d_k}{f} \quad (8)$$

de (7) y (8) tenemos:

$$\tan(\alpha'_k) = \frac{d \cdot (M - 2k)}{M \cdot f} \quad (9)$$

$$= \frac{(D_z - D_0) \cdot b \cdot (M - 2k)}{M \cdot (b^2 + D_z \cdot D_0)} \quad (10)$$

de (9) podemos resolver (3) y (4) que son las ecuaciones que nos dan la profundidad de la escena.

2.1. Proyección de múltiples franjas

Esta técnica se basa en la técnica de proyección de una sola franja. Se asume al igual que para el caso de una sola franja, que las franjas se proyectan sobre un plano de calibración paralelo al plano de referencia y el objetivo es calcular las distancias D_{ki} de los puntos iluminados por las franjas en la escena al plano de referencia (ver Fig. 3).

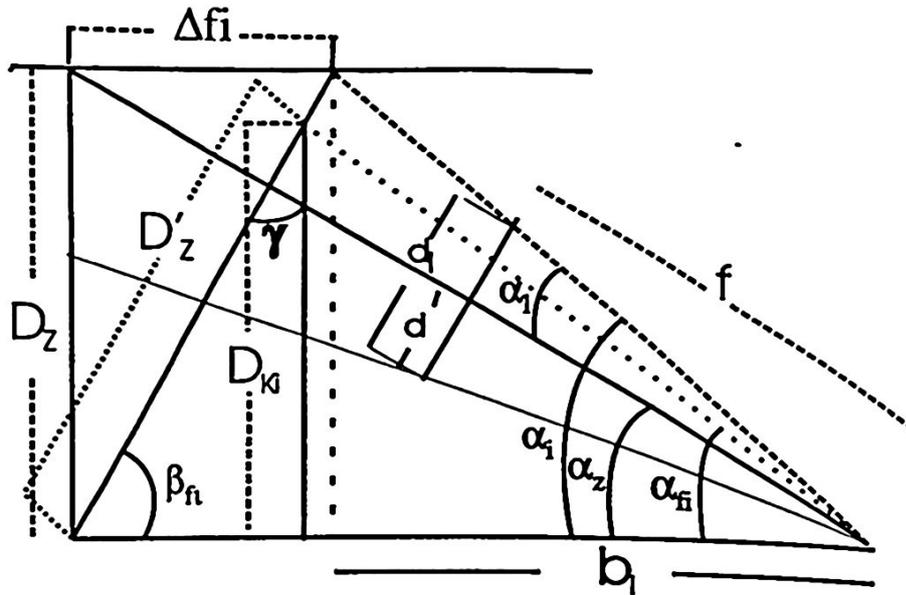


Figura 3. Representación esquemática para múltiples franjas

De la ecuación (9) tenemos

$$\tan(\alpha_l) = \frac{d_l - d}{f} \tag{11}$$

Podemos obtener d_l de la ecuación (7) sustituyendo k por l donde l es l -ésima columna en la imagen, así.

$$\tan(\alpha_l) = \frac{d \cdot (2l - M)}{M \cdot f} \tag{12}$$

$$= \frac{(D_z - D_0) \cdot b \cdot (2l - M)}{M \cdot (b^2 + D_z \cdot D_0)} \tag{13}$$

Por lo tanto tenemos que $\alpha_i = \alpha_z + \alpha_l$ entonces

$$b_i = \frac{D_z}{\tan(\alpha_i)} \tag{14}$$

Ahora se calcula α_{fi} de la misma forma que α_i y $\Delta fi = |b - b_i|$ además $\beta_{fi} = \arctan(D_z/\Delta fi)$ entonces usando la ley de los cosenos

$$D'_z = \frac{b \cdot \sin(\alpha_{fi})}{\sin(\beta_{fi} + \alpha_{fi})} \tag{15}$$

y finalmente obtenemos

$$D_{ki} = D'_z \cdot \sin(\beta_{fi})$$

Con esta última expresión podemos calcular la profundidad de cualquier punto iluminado en el objeto.

3. Calibración

Los métodos expuestos en las secciones anteriores dependen de la exactitud con la que se encuentren los valores D_z , D_0 y b ver Fig. 2. Por esta razón es necesario usar un modelo exacto para la calibración tanto de la cámara como del proyector.

3.1. Calibración de la cámara

La calibración de cámara consiste en encontrar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. A saber longitud focal f , el punto principal (C_x, C_y) , los factores de escala S_x y S_y y los parámetros de rotación α, β, γ y de traslación T_x, T_y y T_z . Para tal efecto usamos un plano de calibración de 10 cm x 10 cm como el que se muestra en la Fig. 4.

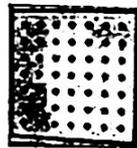


Figura 4. Plano usado para calibrar la cámara

Hay tres posiciones fundamentales del plano de calibración, la primera es la posición en plano trasero como se muestra en la Fig. 5, paralelo al plano xy . La segunda posición es perpendicular a la primera posición de forma tal que coincida con el plano yz y finalmente la tercera posición es perpendicular al segundo plano y de nuevo paralelo al plano xy como se muestra en la Fig. 5.

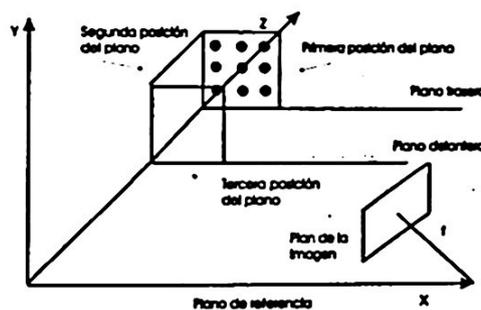


Figura 5. Plano usado para calibrar la cámara

Se pueden tomar varias imágenes del plano en diferentes posiciones, en particular nosotros tomamos 10 para llevar a cabo la calibración de la cámara.

3.2. Calibración del proyector

La calibración del proyector se hace después de haber calibrado la cámara. Primero se proyectan las franjas sobre el plano trasero, ver Fig. 6. Llámosle

Δfi a la distancia entre la franja fp y alguna franja fi sobre el plano trasero. Así mos calcular las distancias entre la franja fp y cualquier franja fi . El siguiente paso es mover nuestro plano al plano delantero. Podemos saber qué tanto movi- mos nuestro plano dado que usamos un plano de calibración de la cámara que coincide con el plano yz . Sea esta distancia dm . El siguiente paso es medir de nue- vo las distancias entre el plano fp y los planos fi puesto que el plano delantero también esta calibrado.

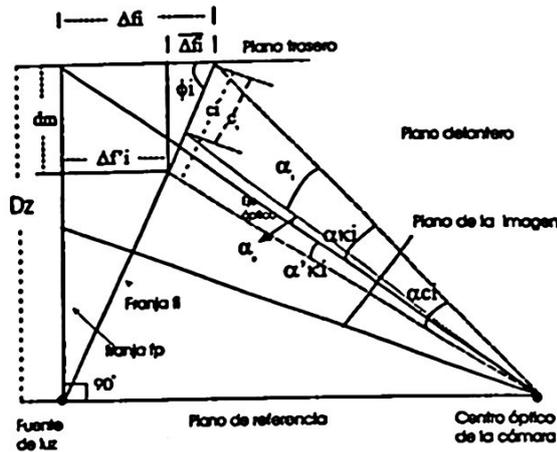


Fig. 7: Calibración del proyector

Figura 6. Calibración del proyector

Así conocemos las Δfi , $\Delta f'i$ y dm , de estos datos podemos calcular

$$\overline{\Delta fi} = \Delta fi - \Delta f'i \tag{1}$$

de aquí podemos obtener

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{dm}{\overline{\Delta fi}}\right) \tag{18}$$

que es el ángulo comprendido entre el plano trasero y la franja fi . También podemos calcular la distancia D_z del plano trasero al centro óptico de la fuente de iluminación.

$$D_z = \overline{\Delta fi} \cdot \sin(\phi_i)$$

Ahora bien, podemos calcular la distancia cl sobre la franja fi (ver Fig. mediante la ecuación

$$cl = \sqrt{dm^2 + (\overline{\Delta fi})^2}$$

puesto que la cámara ya ha sido calibrada

$$d = \frac{M}{2} \cdot Sx$$

donde S_x es el factor de escala para la dirección x obtenida en la fase de calibración de la cámara y podemos obtener dk de la ecuación (7) donde k , es la columna k en el plano de la imagen, por lo tanto podemos calcular $\alpha_2, \alpha_{ki}, \alpha'_{ki}$ y por supuesto

$$\alpha_{ci} = \alpha'_{ki} - \alpha_{ki} \quad (22)$$

$$\alpha_1 = \alpha_{ki} - \alpha_2 \quad (23)$$

puesto que hay una correspondencia entre α_{ci} y ci tenemos

$$c1 = \frac{\alpha_1 \cdot ci}{\alpha_{ci}} \quad (24)$$

Una vez hecho esto, lo único que resta es calcular las distancias D_{ki} al plano de referencia (ver Fig. 7).

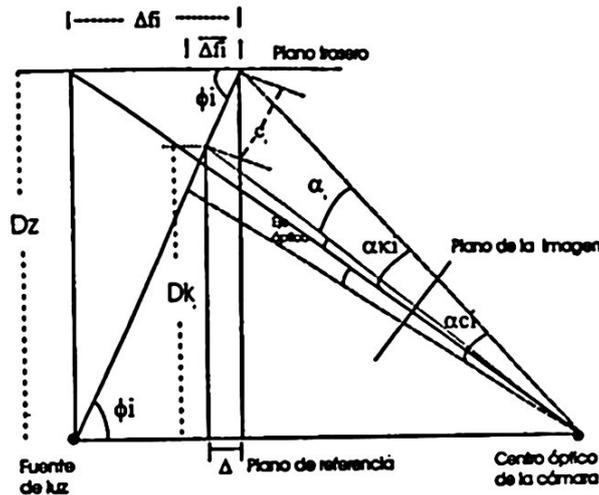


Figura 7. Distancias D_{ki} al plano de referencia

$$\Delta = c1 \cdot \cos(\phi_i) \quad (25)$$

y finalmente

$$D_{ki} = (\Delta f_i - \Delta) \cdot \tan(\phi_i) \quad (26)$$

De esta manera la exactitud de las mediciones ahora dependen de la calibración de la cámara y de la colocación del plano trasero y delantero. A diferencia de la sección 2 y 2.1 ya no es necesario medir D_z, D_0 y b puesto que para el método de calibración presentado no necesita de esos tres parámetros.

3.3. Codificación binaria

Hasta ahora se ha resuelto el problema de la profundidad para una y múltiples franjas, sin embargo aun queda el problema de las discontinuidades cuando

se proyectan múltiples franjas. El problema de saber que líneas en la imagen pertenecen a una determinada franja es resuelto usando el método de codificación binaria.

La idea para codificar las franjas de luz es proyectar secuencialmente señal binaria correspondiente a los dígitos binarios de un código. En la Fig. señal binaria es traducida en franjas blancas y negras. Al proyectar una secuencia de n patrones produce 2^n franjas codificadas.

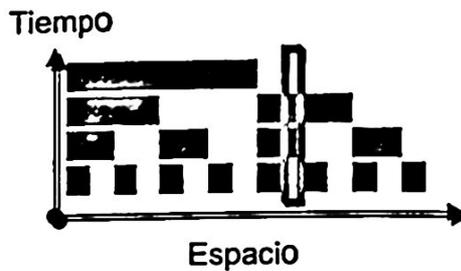


Figura 8. Codificación binaria

Para decodificar la posición de un pixel, la tarea principal es recuperar la intensidad binaria proyectada en la secuencia de patrones. Así por ejemplo, código para la franja del rectángulo vertical en la Fig. 8 es 1001.

4. Experimentos

Se han llevado a cabo varios experimentos para comprobar el funcionamiento del sistema. Uno de ellos es la recuperación de un ratón de computadora con el que se muestra en la siguiente figura.

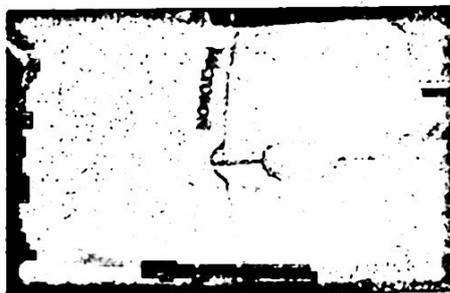


Figura 9. Objeto que queremos recuperar

Para recuperar el objeto de la Fig. 9 se proyectó una sola franja de luz objeto fue desplazado 55 veces de modo que se barriera la totalidad del objeto, para cada desplazamiento se tomó una imagen, el resultado de procesar cada una de las imágenes se muestra en la Fig. 10

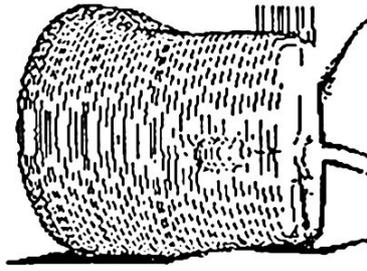


Figura 10. Resultado de la recuperación 3D del objeto de la Fig. 9

Para el caso de múltiples franjas se llevo a cabo el siguiente experimento. Se uso una superficie metálica (ver Fig. 11) a la que se le proyectaron múltiples franjas usando un proyector de diapositivas.

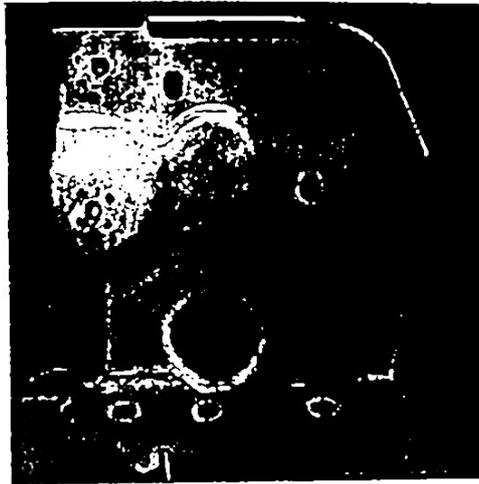


Figura 11. Objeto que queremos recuperar

El resultado de recuperar información 3D de la objeto de la Fig. 11 se muestra en la Fig. 12. El error obtenido de h_1 es 0.01 mm, el de h_2 es de 0.02 mm y el de h_3 es de 0.06 mm (ver Fig. 12). Cabe mencionar que los puntos en las figuras 10 y 12 representan profundidades.

5. Conclusiones

Se ha hecho una breve revisión de la técnica de proyección de una sola franja y se ha propuesto un método para su extensión a múltiples franjas así como también se ha propuesto un método de calibración de la fuente de iluminación. También se presentaron resultados satisfactorios aplicado estas técnicas. Para el problema de discontinuidades en las franjas se ha usado una técnica de codificación binaria. La proyección de una sola franja se implementa con mayor facilidad, un inconveniente es que se requieren muchas más imágenes y por lo tanto mayor tiempo

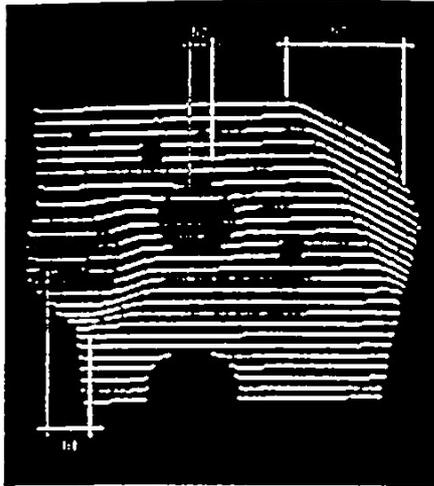


Figura 12. Objeto que queremos recuperar

de procesamiento que con la técnica de proyección de múltiples franjas. Los resultados en ambos casos son bastante buenos puesto que los errores reportados son pequeños. En cuanto a la proyección de múltiples franjas un inconveniente como ya se ha mencionado es la discontinuidad de las franjas proyectadas que se resuelve con la técnica de codificación binaria.

6. Trabajo futuro

Como trabajo futuro adicional al ya realizado se proponen los siguientes puntos.

- Implementar otras técnicas de codificación de franjas o codificación de patrones.
- Implementar la técnica de luz estructurada para objetos de grandes dimensiones (1–2 metros).
- Reconstrucción completa de los objetos usando alguna técnica de creación de mallas.

Referencias

1. Klette, Schlüns and Koschan Computer Vision Three-Dimensional Data from Images, Springer-Verlag, Singapore 1998.
2. Boughet Visual Methods for Three-Dimensional Modeling, Phd thesis, California Institute of Technology Pasadena, California, 1999.
3. Sotoca Reconstrucción de Superficies en Entornos de Luz Estructurada: Aplicación a Espaldas Humanas, Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Informática. Julio, 2001.
4. Huynh, Calibration of a Structured Light System: a Projective Approach, Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Patt. Recog, June 1997, Puerto Rico, pp. 225–230.
5. Rocchini, Cignoni, Montani, Pingi and Scopigno "Low Cost 3D Scanner Based on Structured Light, EUROGRAPHICS 2001, Volume 20 (2001), Number 3.

6. Monks Measuring the Shape of Time-Varing Objects, Phd thesis. Faculty of Engineering and Applied Science Department of Electroncs and Computer Science, august 1994.
7. Chen, Brown and Song Overview of three-dimensional shapemeasurement using optical methods, Optical Engineering Enero 2000.
8. Batlle, Mouaddib y Salvi Recent Progress in Coded Structured Light as a Technique to Solve the Correspondence Problem: a survey, Pattern Recognition, Diciembre de 1996.
9. Jeffrey A., Richard C. Kim and Steven K. Case Three dimensional inspection using multistripe structured light, Optical Engineering, Vol. 24, No 6, 966-974 p.1995.
10. Kowarschik Richard, Kühmstedt Peter Adaptive Optical three dimensional measurement with Structred light, Optical Engineering, Vol. 39, No.1, 150-158 p, 2001.
11. Yang Zaiming, Wang Error Analysis of 3D Shape Construction form Structured Lighting, Department of Computer Science, University of California, USA, Vol 29, No, 2 189-206.
12. Yi-Chih Hsieh Decoding structured light patterns for three-dimensional imaging system, Elsevier Science. 1999.