

# Diseño de un instrumento para captura de geometrías 3D con aplicación en la manufactura de productos

F. Eugenio López Guerrero, Carlos Iván Romero Martínez,  
F. Javier de la Garza Salinas, Francisco Ramírez Cruz,  
José Luis Castillo Ocañas

Cuerpo Académico de Sistemas Integrados de Manufactura, FIME-UANL  
elopez@uanl.mx

## RESUMEN

*La digitalización de objetos tridimensionales se ha convertido en una de las herramientas más útiles en el desarrollo de productos debido a la creciente utilización de las técnicas de la ingeniería inversa en la manufactura de productos. La reproducción de la geometría de los productos proporciona ventajas relacionadas con la reducción de tiempos y costos con un alto grado de precisión.*

*Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un escáner tridimensional de superficies que permite reproducir las geometrías utilizando un instrumento de medición constituido por una cámara digital y un rayo láser posicionado por medio de un brazo robot.*

*El trabajo comprende desde la calibración del instrumento de medición hasta la reconstrucción de la superficie del objeto en coordenadas 3D.*

## PALABRAS CLAVE

Digitalización 3D, medición por triangulación, ingeniería inversa, cálculo del error, reconstrucción tridimensional.

## ABSTRACT

*3D scanning has become a useful tool in product development because of the increasing use of reverse engineering techniques. It has many advantages related to reducing time and costs with a good accuracy level.*

*This document presents a system to reproduce 3D geometries from images captured with a measuring instrument based on a digital camera and a laser pointer, manipulated through a robot arm.*

*This work includes the calibration of the measuring instrument and the reconstructed surface of an object in 3D coordinates.*

## KEYWORDS

3D scanner, measuring by triangulation, reverse engineering, error estimation, 3D reconstruction.



Artículo publicado en la revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica: *Ingeniería Mecánica, Tecnología y Desarrollo*. Vol. II, Núm. 3, Sept. 2006.

## INTRODUCCIÓN

El aspecto fundamental de la implementación de los sistemas de digitalización en el desarrollo de productos se encuentra en la posibilidad de reproducir las geometrías de productos existentes.<sup>1,2</sup> Esto es especialmente útil en objetos complejos en términos de sus formas, contornos y perfiles, elementos clave en el modelado de productos. Tal es el caso del diseño de piezas mecánicas, moldes, objetos ergonómicos o estéticos, gráficos para la industria del entretenimiento y formas aerodinámicas.<sup>3</sup> La creciente implementación de la digitalización de productos en una gran diversidad de industrias ha conducido al desarrollo de diferentes sistemas.

Las mejoras en la tecnología de medición óptica han hecho posible capturar geometrías tridimensionales con relativa facilidad,<sup>4,5,6</sup> son muchos los sistemas de reconstrucción de geometrías que han sido desarrollados; sin embargo, no ha sido establecida una metodología general y automatizada para crear modelos geométricos a partir de dicha tecnología.

Para algunos de los problemas en la reconstrucción de geometrías existen soluciones ampliamente demostradas,<sup>7</sup> pero, para todos los casos, las soluciones se cumplen solamente cuando el problema está acotado: digitalización de varias vistas con certidumbre de calibración, estimación de la reflectancia superficial y la digitalización de superficies con características poco adecuadas, reconstrucción superficial con ausencia de información y estimación de perfiles de superficie, por mencionar algunos ejemplos.

Actualmente existe un auge en el que se pretende dar solución a un espectro amplio de problemas, como por ejemplo:

- El trabajo de J. S. M. Vergesst, Sander Spanjaard and Jos J. O. Jelier “Matching 3D freeform shapes to digitized objects” de la Delft University of Technology de Holanda, con algoritmos robustos para reconocer y automatizar las superficies a puntos escaneados.
- En “Probabilistic matching for 3D scan registration” de la University of Freiburg (Alemania) Dirk Hähnel y Wolfram Burgard se enfocan al reconocimiento en vehículos autónomos.
- Aplicaciones en el área médica como el trabajo de Marco Andreetto y Nicola Brusco: “Automatic

3D modeling of palatal plaster casts” para digitalizar moldes dentales.<sup>8</sup>

- En Palenteología<sup>9,10</sup> y Arqueología<sup>11,12,13</sup> se están resolviendo problemas de conservación de geometrías, como el mostrado en los trabajos de Lam y los trabajos de Fontana que resuelven aspectos que se involucran en la reconstrucción y preservación virtual de sitios históricos, de piezas arqueológicas y de fósiles.
- Y otros trabajos tan particulares como el tratamiento de puntos en “Orientierung von Laserscanner-Punktwolken” de Hofer y Pottmann<sup>14</sup> u otros más generales como “Digitalización rápida de modelos: métodos, instrumentos, estrategias de digitalización y análisis de la precisión obtenida mediante un sensor láser por triangulación” de Jorge Santolaria *et al.*, de la Universidad de Zaragoza.<sup>4</sup>

Este trabajo presenta una solución a la problemática de la reconstrucción superficial de productos, utilizando un scanner tridimensional basado en componentes comerciales de bajo costo. Los resultados podrán ser usados dentro de los procesos de diseño y desarrollo de nuevos productos.

## OBJETIVOS

Construir un sistema de captura de geometrías tridimensionales de resolución competente utilizando elementos no especializados para la medición, calculando y corrigiendo los errores de sus componentes.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- Determinar mediante simulación las condiciones óptimas de operación del instrumento.



Fig. 1. Instrumento de medición posicionado por medio de un brazo robot.

- Determinar el error del instrumento de medición utilizado en el sistema de digitalización 3D por triangulación, para así corregir los errores del sistema real.
- Evaluar el desempeño del instrumento por medio de la captura de las geometrías de prueba.

### FUNCIONAMIENTO DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

Un objeto a ser digitalizado es recorrido por el instrumento de medición de acuerdo a una serie de posicionamientos programados en un brazo robot (figura 1). En cada posición se captura una imagen que invariablemente muestra el rayo láser incidido sobre la superficie del objeto (figura 2).

Previo al digitalizado, es necesario establecer un punto de referencia o convergencia  $P_c$ , el cual es el punto en el que coincide el eje óptico de la cámara y el rayo láser, a una distancia de calibración  $z_0$  del instrumento de medición (figura 2). El ángulo que se forma entre el eje óptico de la cámara y la línea de proyección del rayo láser se calcula de acuerdo a:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{s}{z_0} \quad (1)$$

En donde:

$\theta$ : es el ángulo entre el eje óptico de la cámara y la línea de proyección del rayo láser ( $^\circ$ ).

$s$ : es la distancia de separación entre la cámara y el apuntador láser (mm).

$z_0$ : es la distancia de calibración (mm).

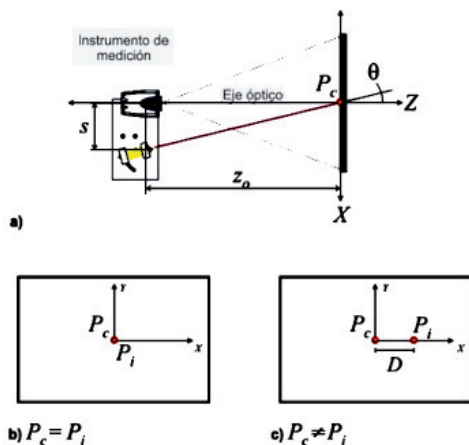


Fig. 2. a) Punto de convergencia  $P_c$  del rayo láser y eje óptico de la cámara a una distancia de calibración  $z_0$ . b) Imagen de  $P_c$  y  $P_i$  a una distancia  $z_0$ . c) Distancia  $D$ .

Si la distancia entre el instrumento de medición y el punto de incidencia del rayo láser sobre el objeto es diferente de  $z_0$ , el nuevo punto  $P_i$  incide a una distancia  $D$  del eje óptico de la cámara. Esta distancia es calculada con:

$$D = P_c - P_i \quad (2)$$

En donde:

$D$ : es la distancia entre  $P_i$  y el eje óptico de la cámara (mm).

$P_c$ : es el punto en el que incide el rayo láser a una distancia de calibración  $z_0$  del instrumento de medición.

$P_i$ : es el punto de incidencia del rayo láser a una distancia de separación  $z_{exp}$  entre el instrumento de medición y el objeto medido.

La secuencia de posicionamientos del robot proporciona coordenadas bidimensionales  $(\chi, \gamma)$  para los puntos del objeto digitalizado. Para el caso de una superficie plana situada a una distancia  $z_0$  éstas coordenadas  $(\chi, \gamma)$  permanecen iguales, en cualquier otra situación es necesario corregirlas debido al desplazamiento sobre el eje X del punto de incidencia  $P_i$  (figura 3). La distancia  $D$  permite calcular por triangulación el dato que proporciona la información de  $z$ , conforme a:

$$z = \frac{D}{\tan \theta} \quad (3)$$

En donde:

$z$ : es el valor de la coordenada  $z$  para un punto en un sistema de coordenadas X,Y,Z (mm).

Además de determinar la corrección de la coordenada  $x$ , puesto que ésta se relaciona de forma directa con  $z$  (ec. 4).

$$x_c = z \tan \theta \quad (4)$$

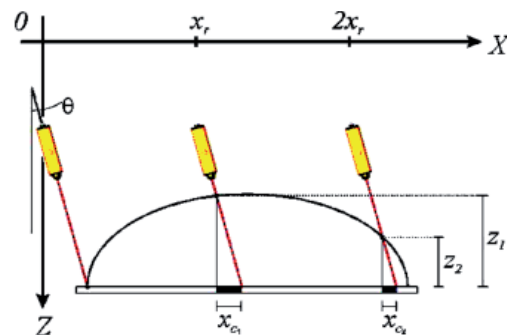


Fig. 3. Corrección de la coordenada  $x$  obtenida del instrumento de medición.

En donde:

$\chi_c$ : es la corrección de la coordenada x (mm).

El valor de la coordenada  $\chi$  corregida es:

$$x = x_r - \chi_c \quad (5)$$

En donde:

$\chi$ : es el valor programado en el robot de un posicionamiento del instrumento de medición sobre el eje X (mm).

Para reconstruir la geometría del objeto, cada posicionamiento ( $\chi, \gamma$ ) del instrumento de medición es asociado con su valor correspondiente en z.

### PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Los instrumentos de medición requieren de procedimientos que garanticen su precisión y exactitud; la calibración satisface esa necesidad. Esencialmente esta calibración consiste en comparar un instrumento de medición, bajo condiciones específicas, con un patrón de referencia, lo que permite estimar su error. La calibración de los instrumentos de medición utilizados en los sistemas de digitalización tridimensional es de gran importancia, ya que la utilidad de estos sistemas depende principalmente de su capacidad para reproducir formas complejas con gran precisión, difíciles de lograr mediante otros métodos.

### CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

La calibración de la cámara es un paso necesario para extraer información métrica a partir de imágenes y obtener resultados precisos. El procedimiento se ilustra en la figura 4. Algunas de las técnicas de calibración utilizadas en trabajos similares son la calibración por fotogrametría,<sup>15</sup> auto-calibración,<sup>16</sup> puntos de fuga para direcciones ortogonales<sup>17</sup> y calibración por rotación.<sup>18</sup>

Los errores más significativos inherentes a todos los lentes son conocidos como la distorsión radial y la aberración óptica. Los rayos provenientes de un punto en el objeto convergen en un mayor número de puntos del plano de la imagen creando lo que se conoce como aberración óptica; por consiguiente se crea un efecto que hace que un punto del objeto capturado no sea representado únicamente por un punto en la imagen, sino por un conjunto de puntos. En consecuencia cada punto de la imagen depende de

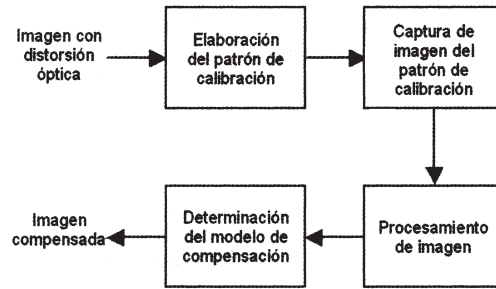


Fig. 4. Procedimiento para la compensación de la distorsión óptica en las imágenes.

un punto objeto y sus puntos objeto vecinos.<sup>19</sup> Para el cálculo de distancias de punto a punto en la imagen del objeto es necesario antes controlar este efecto.

Al corregir las aberraciones de los lentes se tiene correspondencia de punto a punto, en el que el punto en la imagen que le corresponde a cada punto en el objeto se desvía de su proyección en una magnitud proporcional a su distancia al eje óptico, este efecto es la distorsión óptica.

Mientras que las aberraciones se relacionan con la nitidez del enfoque de la imagen, la distorsión afecta a la forma que toma el conjunto de la misma. Es frecuente expresar la distorsión como un porcentaje entre la altura ideal de la imagen y la distancia que los puntos se desvían de su posición en la imagen ideal. La distorsión destruye la perfecta semejanza entre su objeto y su imagen, dando una distorsión positiva (figura 5a) o una distorsión negativa (figura 5b).

El centro de distorsión, que tiene simetría radial, es el eje de la lente.<sup>19</sup> Esta distorsión se denomina distorsión radial y se deduce, junto con las aberraciones ópticas asumiendo que la lente de la cámara tiene una simetría radial perfecta. Es claro que la lente no cumple con este grado de simetría,

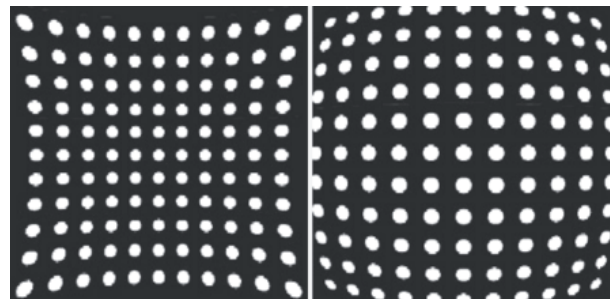


Fig. 5. Distorsión en la imagen capturada por una cámara: (a) distorsión positiva, (b) distorsión negativa.

por lo que existirán también distorsiones no radiales, sin embargo, en este trabajo se consideró únicamente la distorsión radial.

Para efectos de procesar correctamente las imágenes, se debió considerar la diferencia de iluminación de sus píxeles, en esto se enfocó la primera parte del procesamiento de imagen (figura 6).

Para corregir los errores causados por la distorsión radial se determinó un factor de compensación que reposiciona cada píxel de la imagen original (distorsionada) en su posición ideal (compensada).

Se elaboró un patrón de calibración que consistió en una retícula con círculos como entidades de calibración (figura 6). Las consideraciones de su elaboración fueron: la exactitud en los círculos, la calidad de impresión de la retícula y su fijación en una superficie plana de forma perpendicular a la cámara al momento de capturar la fotografía.

Para uniformizar la iluminación, se evaluó el tono de gris de cada píxel en relación con su posición respecto al centro geométrico de la fotografía (figura 7), se determinó el centro de iluminación y se aplicó un factor de corrección de acuerdo a:

$$M_{X,Y} := \text{Factor} \cdot \frac{r(X,Y)}{r(X_{\max}, Y_{\max})} + \text{Img}_{\text{org}X,Y} \quad (6)$$

En donde:

$M_{X,Y}$ : es un píxel de coordenadas (X,Y) con iluminación corregida.

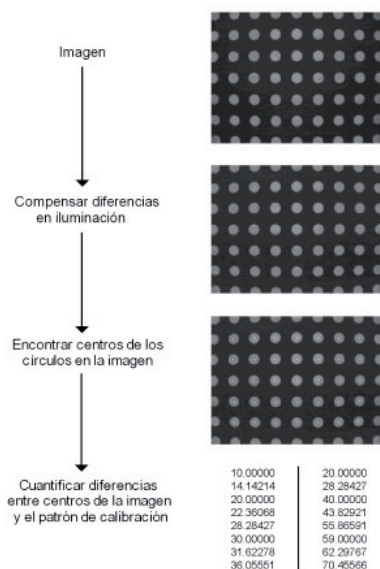


Fig. 6. Procesamiento de imagen.

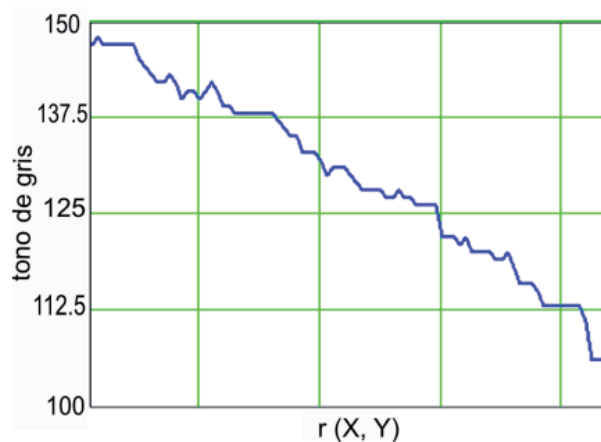


Fig. 7. Variación de la iluminación de los píxeles con respecto al centro geométrico de la fotografía.

**Factor:** es el factor de corrección de iluminación.

$r(X,Y)$ : es la distancia a un píxel (X,Y) en la imagen, medida desde el centro  $r(0,0)$ .

$r(X_{\max}, Y_{\max})$ : es la distancia del centro  $r(0,0)$  al píxel más alejado de la imagen.

$\text{Img}_{\text{org}X,Y}$  es el tono de gris de cada píxel en la imagen original.

La corrección de la iluminación permitió establecer el rango de tonos de grises que abarcó los píxeles pertenecientes a la retícula, permitiendo diferenciarlos del resto de la imagen para poder continuar con su procesamiento. Para este trabajo en particular un valor de 0 correspondió al negro y uno de 255 al blanco.

Con la iluminación corregida, para calcular la posición (X,Y) del píxel central o centroide de las entidades del patrón de calibración, se segmentó la imagen de manera que cada entidad de calibración fuera contenida en una subdivisión (figura 8). El orden de la segmentación de la imagen fue de izquierda a derecha y de arriba abajo conforme a

$$\Phi_{\delta, \kappa} = \text{submatrix} \quad (7)$$

$$(M, Y_{\text{pix}\delta, \kappa}, \epsilon + Y_{\text{pix}\delta, \kappa}, X_{\text{pix}\delta, \kappa}, \epsilon + X_{\text{pix}\delta, \kappa})$$

En donde:

$\Phi_{\delta, \kappa}$  : es la subdivisión con iluminación corregida que contiene la entidad de calibración de localización horizontal  $d$  y vertical  $k$ .

$M$ : es la imagen con iluminación corregida.

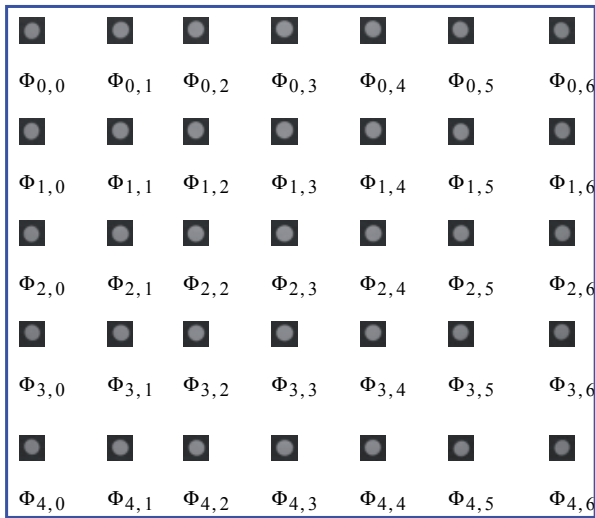


Fig. 8. Segmentación de la imagen en submatrices.

$Y_{pix_{\delta,k}}$ : es la coordenada Y del píxel superior izquierdo de la submatriz.

$e$ : es la medida en píxeles de cada lado de la submatriz con igual número de filas y columnas.

$X_{pix_{\delta,k}}$ : es la coordenada X del píxel superior izquierdo de la submatriz.

Determinadas las coordenadas (X,Y) en la imagen del centroide de cada entidad de calibración, fueron comparadas con su posición  $(\chi, \psi)$  correspondiente en el patrón y se estableció la relación existente.

Al convertir las coordenadas de un píxel  $\rho(X, Y)$  en coordenadas polares  $\rho(r, \phi)$ , se tiene que la distorsión radial está definida por:

$$\delta_r(\rho) = \zeta \frac{\rho}{r(X_{max}, Y_{max})} \quad (8)$$

En donde:

$\delta_r(\rho)$ : es la compensación de la distorsión radial con centro en (0,0) para un píxel  $\rho$ .

$\zeta = r(\chi_{max}, \psi_{max})$ : es la distancia medida desde centro (0,0) al píxel más alejado en una imagen ideal (sin distorsión).

En coordenadas rectangulares, las ecuaciones de compensación para la cámara utilizada en el instrumento de medición de este trabajo son:

$$\begin{aligned} \delta\chi(\chi, \psi) &= 1.0441 \cdot (r(X, Y)) \cdot \cos(\phi(X, Y)) \\ \delta\chi(\chi, \psi) &= 1.0441 \cdot (r(X, Y)) \cdot \cos(\phi(X, Y)) \end{aligned} \quad (9)$$

En donde:

$\delta\chi(\chi, \psi)$ : es la coordenada x del píxel  $\rho$  en la imagen compensada.

$\delta\chi(\chi, \psi)$ : es la coordenada y del píxel  $\rho$  en la imagen compensada.

En la figura 9 se muestra el comportamiento de la distorsión radial que presentan las imágenes: ésta se incrementa de forma directamente proporcional al aumento de la distancia medida del centro de la imagen a la posición de un punto.

En la figura 10 se muestra el reposicionamiento de los centroides de las entidades de calibración, después de compensada la curvatura de la lente de la cámara.

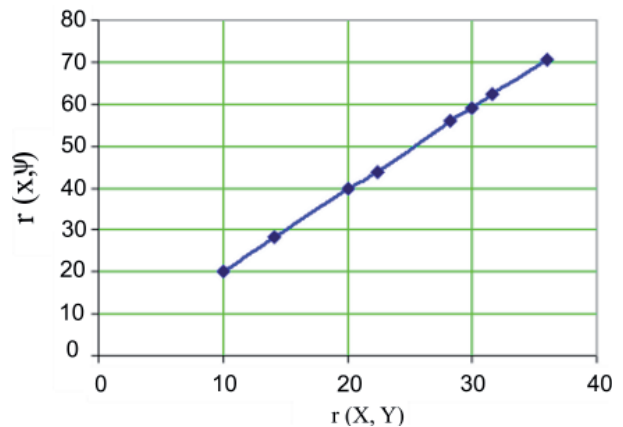


Fig. 9. Comportamiento lineal de la distorsión radial: radii en la imagen  $r(X, Y)$  contra radii ideales en el patrón de calibración  $r(\chi, \psi)$ .

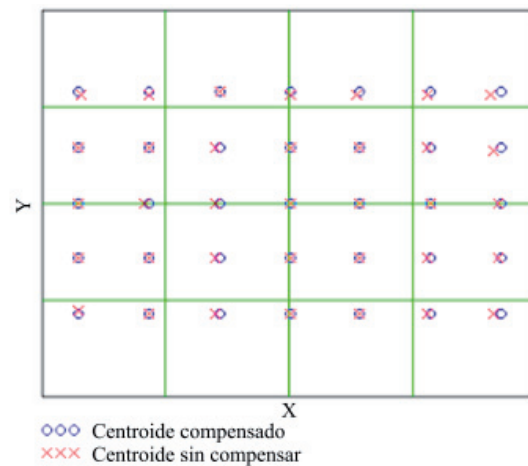


Fig. 10. Compensación de la distorsión radial en las imágenes: reposicionamiento de centroides.

## CALIBRACIÓN DEL INSTRUMENTO

El dispositivo de calibración del instrumento de medición consiste en una base móvil en un eje, Z, que se desplaza al hacer girar un tornillo sin fin. Perpendicular al eje de desplazamiento de la base se encuentra una pantalla en la que incide el rayo láser en un punto  $P_i$  de tal forma que al mover la base a lo largo del eje Z,  $P_i$  se desplaza sobre el eje X. La simulación del instrumento de medición y del dispositivo de calibración permitió optimizar el rango de medición del instrumento mediante la determinación de los parámetros de calibración (figura 11): la distancia  $z_0$  y el ángulo  $\theta$ .

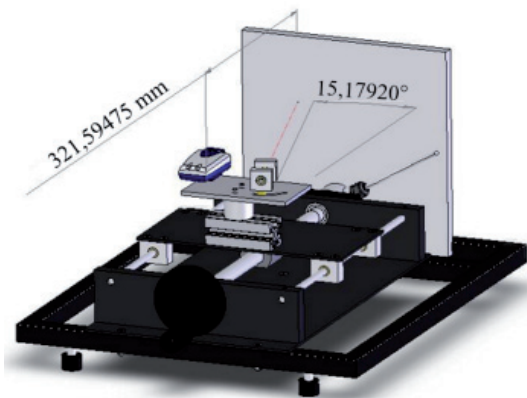


Fig. 11. Parámetros de calibración del instrumento de medición:  $\theta = 15.17920^\circ$ ,  $z_0 = 321.59475\text{mm}$ .

La primera parte de la calibración del instrumento de medición consistió en alinear el eje óptico de la cámara con el eje Z del dispositivo de calibración. El siguiente paso fue hacer coincidir  $P_i$  y  $P_c$  sobre la pantalla. La exactitud de los dos pasos anteriores se comprobó al desplazar el instrumento a diferentes distancias de la pantalla, conservando el centro de la imagen coincidente con el eje Y, dibujado sobre un patrón milimétrico fijo a la pantalla (figura 12); el punto  $P_i$  invariablemente incidió sobre el eje X. Finalmente, establecidos  $z_0$  y  $\theta$ , fue posible calcular el valor z para cualquier punto, evaluando D en la imagen (figura 13).

## EXPERIMENTACIÓN

Se realizaron 9 ensayos a diferentes distancias  $z_{exp}$  entre el instrumento de medición y la pantalla del dispositivo de calibración (figura 13). La distancia  $z_{exp}$  fue determinada de acuerdo a:

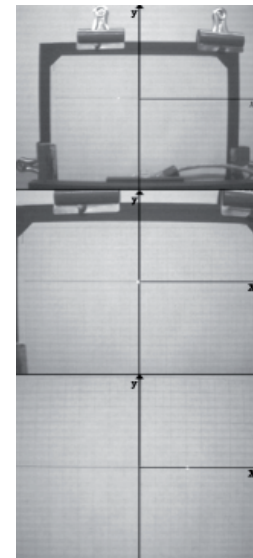


Fig. 12. Alineación del eje óptico de la cámara con el eje Z del dispositivo de calibración. Imágenes del instrumento a diferentes distancias de la pantalla: final, centro e inicio del recorrido del tornillo del dispositivo de calibración.

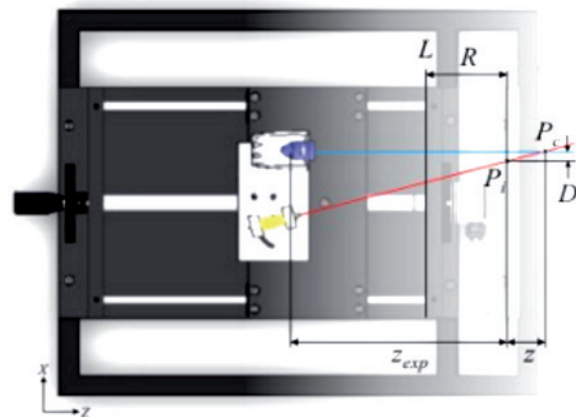


Fig. 13. Nomenclatura de la experimentación.

$$z_{exp} = K_T N + R \quad (10)$$

En donde:

$K_T = 4.92379$ : constante de avance por revolución del tornillo.

N: número de revoluciones del tornillo a partir del límite L de desplazamiento.

$R = 198.5$  mm: es la constante de la distancia desde L a la pantalla del dispositivo de calibración.

El ángulo  $\theta$  permaneció constante para determinar D, conforme a (ec.2), y calcular z mediante (ec.3). Los parámetros utilizados en los ensayos experimentales se muestran en la tabla I.

Tabla I. Parámetros utilizados en la experimentación.

Ensayo	$z_{exp}$ (mm)
1	223.11895
2	247.73790
3	272.35685
4	296.97580
5	321.59475
6	346.21370
7	370.83265
8	395.45160
9	420.07055

Los ensayos fueron realizados y posteriormente simulados computacionalmente, los resultados fueron comparados para determinar el error del instrumento. En lo sucesivo, D y z serán referidos por 3 diferentes valores:

- $D_r$  y  $z_r$  para valores reales, medidos sobre el patrón milimétrico de la pantalla al momento de hacer los experimentos.
- $D_v$  y  $z_v$  para valores virtuales, obtenidos de la simulación.
- $D_c$  y  $z_c$  para valores calculados al analizar las imágenes.

## RESULTADOS

Las tablas II y III muestran los resultados de la experimentación utilizando los valores reales y los obtenidos mediante la simulación, respectivamente. Los primeros fueron utilizados como referencia comparativa de los valores calculados a partir del procesamiento de las imágenes. El procedimiento para el cálculo de  $D_c$  y de  $z_c$  se muestra en la figura 14.

Las coordenadas ( $X_{pix}$ ,  $Y_{pix}$ ) del punto del láser fueron obtenidas al aplicar un filtro en las imágenes (ec.11), tomando como referencia un valor de 100 en la escala de grises, donde se les reasignó un valor de 0 a los píxeles con tono de gris inferior a la referencia y al resto, los correspondientes al punto donde incide el láser, un valor de 255.

$$\begin{aligned}
 \text{Img}_{k,j} &\leftarrow 0 \text{ if } \text{Img}_{k,j} < \text{offset} \\
 \text{Img}_{k,j} &\leftarrow 0 \text{ otherwise}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Tabla II. Resultados reales de la experimentación.

Ensayo	$D_r$ (mm)	$Z_r$ (mm)
1	25	92.14748
2	18.5	68.18914
3	12.5	46.07374
4	6	22.11539
5	0	0
6	-6.5	-23.95834
7	-12.5	-46.07374
8	-18.5	-68.18914
9	-25	-92.14748

Tabla III. Resultados virtuales.

Ensayo	$D_v$ (mm)	$Z_v$ (mm)
1	26.7634	98.64721
2	20.03767	73.85683
3	13.35845	49.23790
4	6.67922	24.61893
5	0	0
6	-6.67922	-24.61893
7	-13.35845	-49.23790
8	-20.03767	-73.85683
9	-26.7634	-98.64721

En donde:

$\text{Img}_{k,j}$ : Cada píxel de la fotografía.

offset: Tono de gris de referencia.

Después de aplicado el filtro, se obtuvo el promedio de las coordenadas en X, y en Y de los píxeles correspondientes al punto del láser, para determinar la posición del píxel central mediante (ec.12) y (ec.13).

$$X_{pix} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{cols} \sum_{k=0}^{rows} j \quad \text{if } \text{Img}_{j,k} = 255 \tag{12}$$

$$Y_{pix} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{cols} \sum_{k=0}^{rows} k \quad \text{if } \text{Img}_{j,k} = 255 \tag{13}$$

En donde:

n: es el número de píxeles en blanco encontrados en la imagen.



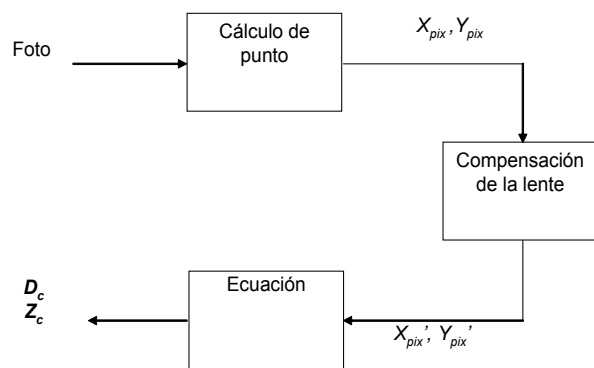


Fig. 14. Procedimiento para el cálculo de Dc y Zc.

Al aplicar las ecuaciones de compensación de calibración de la cámara (ec.9), se obtuvieron datos de coordenadas en píxeles. Para uniformizar estos resultados con los reales y los virtuales, se ajustó una curva de regresión polinomial de segundo grado entre los datos en píxeles y los datos en milímetros (producto de la simulación) para cada uno de los ensayos. En la figura 15, se muestran los resultados de este procedimiento.

La siguiente ecuación (ec.14), permite obtener dimensiones en milímetros a partir de píxeles.

$$D_c = -0.0004(r(X,Y))^2 + 0.2211r(X,Y) - 0.511 \quad (14)$$

En donde:

$D_c$ : es la distancia en mm.

$r(X,Y)$ : es la distancia en píxeles.

El modelo de conversión de unidades anterior, es aplicable sólo a mediciones realizadas sobre imágenes capturadas a una distancia  $z_{exp}$  dentro del rango de 223.11 a 420.07 mm, y con una resolución de 1280×960 píxeles.

Tabla IV. Resultados de la compensación de la lente.

Ensayo	$P_i$ (píxeles)	$X_{pix}$ (píxeles)	$Y_{pix}$ (píxeles)	$X_{pix'}$ (píxeles)	$Y_{pix'}$ (píxeles)
1	(817,484)	177	4	184.806	4.176
2	(759,484)	119	5	124.248	5.221
3	(711,485)	71	5	74.131	5.221
4	(672,485)	32	5	33.411	5.221
5	(639,485)	-1	5	-1.044	5.221
6	(611,485)	-29	5	-30.279	5.221
7	(587,485)	-53	5	-55.337	5.221
8	(566,484)	-74	4	-77.263	4.176
9	(547,485)	-93	5	-97.101	5.221

En la tabla IV se muestran las coordenadas en píxeles del punto del láser en la imagen antes y después de la compensación de la curvatura del lente. La figura 16 muestra la posición de los puntos de coordenadas  $(X_{pix}, Y_{pix})$  y los de coordenadas

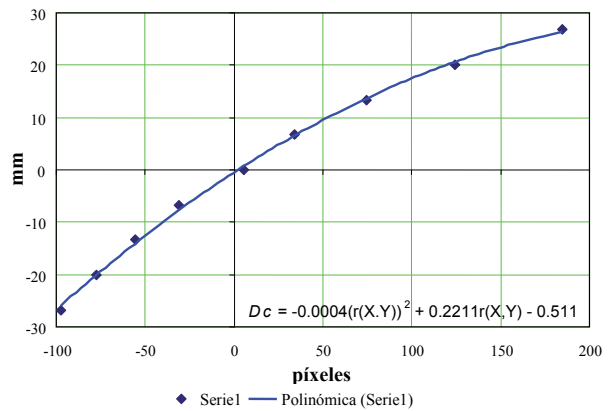


Fig. 15. Modelo de regresión polinomial para los datos en píxeles y en milímetros.

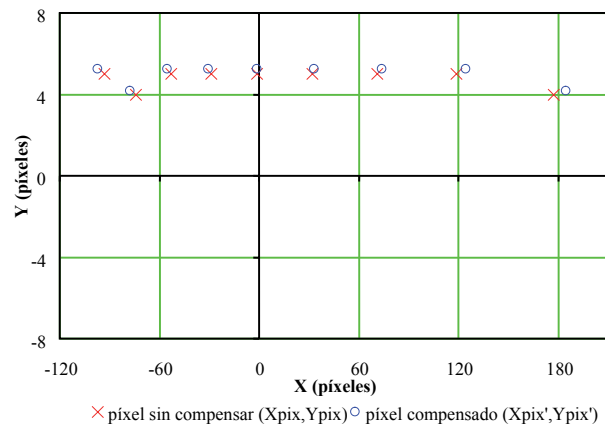


Fig. 16. Reposicionamiento de puntos de la experimentación con la compensación de la lente.

$(X_{pix}, Y_{pix})$ , con origen en el centro de la imagen; esto es, las coordenadas en la imagen antes y después de la compensación de la lente.

Los valores para  $D_c$  y  $z_c$  calculados mediante la ecuación (14) se muestran en la tabla V. En la figura 17 se muestran los valores para  $z_v$ ,  $z_v$  y  $z_c$ , se puede apreciar la aproximación de los valores reales y calculados con respecto a los virtuales.

Tabla V. Resultados calculados.

Ensayo	$D_c$ (mm)	$z_c$ (mm)
1	26.69176	98.38310
2	20.79850	76.66130
3	13.71090	50.53700
4	6.50840	23.98931
5	0.654876	2.41381
6	-7.68210	-28.31550
7	-14.03610	-51.73570
8	-20.01359	-73.76801
9	-25.79339	-95.07180

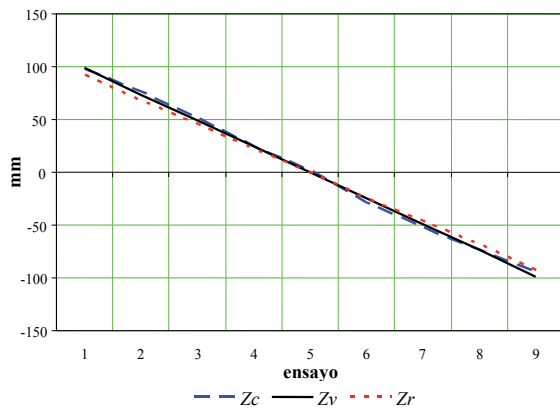


Fig. 17. Comparación de los valores de z, resultado de la experimentación.

### CÁLCULO DEL ERROR

La determinación del error del instrumento de medición permite aproximar el nivel de exactitud esperado  $e$  igualmente hacer recomendaciones al respecto. El error  $e$  del instrumento de medición fue evaluado mediante la (ec.15).

$$e = \sqrt{\frac{1}{T} \sum (z_v - z_c)^2} \tag{15}$$

En donde:

T: Es el número total de ensayos.

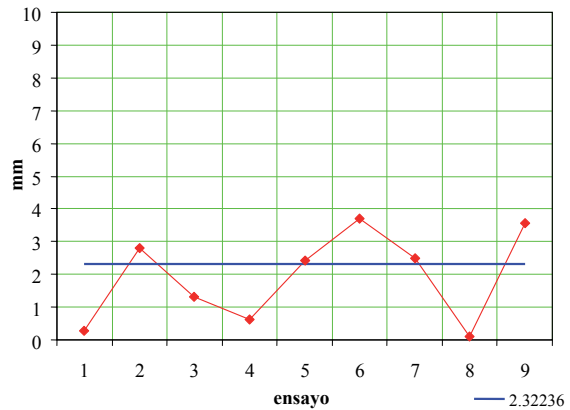


Fig. 18. Error del instrumento de medición.

En la figura 18 se muestra el error obtenido en la experimentación.

El error del instrumento fue de 2.32236 mm, que, aunque es significativo, representa un error relativo de 1.18% para mediciones de  $z$  dentro de un rango de 0 a 197 mm. Se obtuvo un valor máximo de error de 3.57537 mm en el ensayo 9, y un error mínimo de 0.08875 mm en el ensayo 8. La desviación estándar de los datos obtenidos en la medición del error fue de 1.38 mm.

Es recomendable utilizar el instrumento de medición para objetos con dimensiones en  $z$  máximas de 123.5 mm, ya que el instrumento presentó menor variabilidad en estas condiciones, reduciendo la desviación estándar del error de las mediciones a 1.09 mm.

### EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Para evaluar el desempeño del instrumento se digitalizaron dos objetos de prueba: un modelo en resina de un rostro humano y la superficie de fractura de una probeta de concreto que fue sometida a pruebas mecánicas. El aspecto que presenta la nube de puntos obtenida en cada caso puede ser apreciado en las figuras 19 y 20, respectivamente.

Para ambos casos, las superficies fueron digitalizadas utilizando un robot con un barrido cuadrangular programado de 10 mm de separación entre líneas verticales consecutivas y también entre líneas horizontales consecutivas. El espacio de trabajo cubierto para el modelo de resina fue de 200×140 mm, la probeta de concreto se digitalizó con un barrido de 70 mm×70 mm.

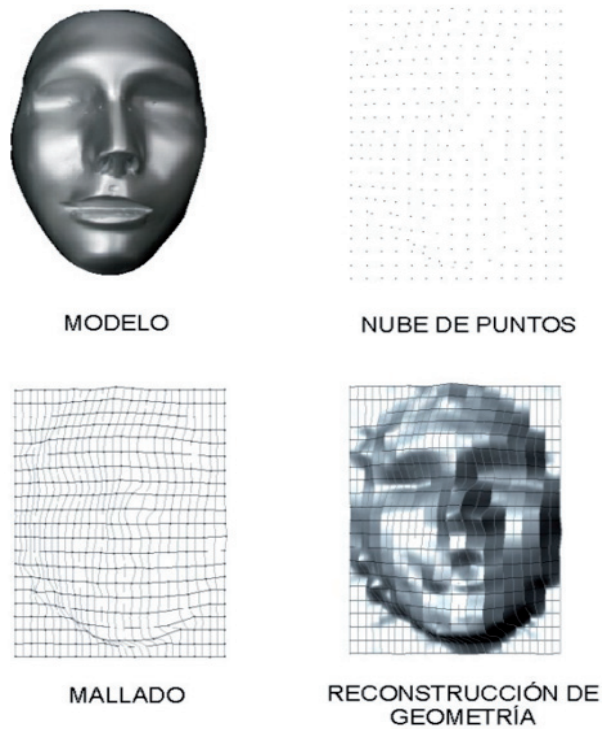


Fig. 19. Reconstrucción geométrica de modelo en resina de rostro humano.

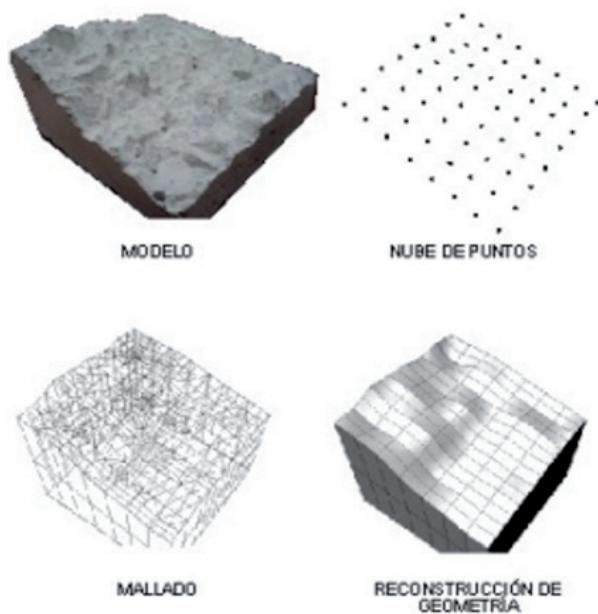


Fig. 20. Reconstrucción tridimensional de probeta de concreto.

## CONCLUSIONES

Se presentó un sistema de reconstrucción 3D mediante triangulación basado en el diseño de un instrumento de medición puntual constituido por una cámara digital y un rayo láser. Se desarrolló un método que trata el problema de reconstruir objetos que puedan ser medidos ópticamente mediante el barrido en un plano.

Considerando las propiedades de barrido y error encontrados, es posible digitalizar satisfactoriamente geometrías de mediano tamaño (a partir de los 100 mm aprox.).

Hasta la fecha de la elaboración de este reporte, el proceso de medición no había sido completamente automatizado, pero los algoritmos para el control del robot tienen un avance significativo, lo que reducirá el esfuerzo manual y permitirá aumentar drásticamente el número de puntos. Por lo anterior expuesto, la evaluación del desempeño fue hecha con una muestra mínima de puntos digitalizados, sin embargo, las geometrías obtenidas muestran resultados satisfactorios.

La construcción del sistema representa una buena herramienta en la reconstrucción de geometrías en una gran cantidad de aplicaciones en la manufactura de productos. Debido al principio de funcionamiento, existen limitantes en objetos con concavidades o agujeros. La calidad depende también de factores como la iluminación, el material del objeto y su rugosidad.

## TRABAJOS EN DESARROLLO

En los resultados mostrados en este reporte se utiliza un programa de CAD para la generación de las superficies a partir de las mediciones; actualmente se está trabajando en un sistema que incluirá los algoritmos de interpolación de superficies.

Encontrados los valores de compensación mostrados aquí, se está diseñando la construcción mecánica del instrumento.

## AGRADECIMIENTOS

En el presente trabajo se han presentado los resultados preliminares del proyecto UANL PAICYT 842-04. Fue realizado en las instalaciones del Departamento de Sistemas Integrados de Manufactura de la FIME, con el apoyo financiero

de la UANL. Los autores agradecen a todos los estudiantes que participaron en el proyecto, pero especialmente a Miguel Angel Alvarado Weigend, Sergio Armando Alanís Morales y Daniel Enrique Arredondo Torres.

## REFERENCIAS

1. John R. Lindbeck. "Product design and manufacture". Ed. Prentice Hall.
2. Actas del congreso internacional sobre ingeniería gráfica de Santander. Junio 2002.
3. Laurent Moccozet, Fabien Dellas, Nadia Magnenat-Thalmann, Silvia Biasotti, Michela Mortara, Bianca Falcidieno, Patrick Min, and Remco Veltkamp. "Animatable human body model reconstruction from 3D scan data using templates". Proc. CapTech workshop on modelling and motion capture techniques for virtual environments, Zermatt, Switzerland, december 2004.
4. Jorge Santolaria, Juan Aguilar, Miguel Lope. "Digitalización rápida de modelos: métodos, instrumentos, estrategias de digitalización y análisis de la precisión obtenida mediante un sensor láser por triangulación", XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Madrid, España.
5. P. Gil, E. Manchón, F. Torres, J. Pomares, F. G. Ortiz. "Reconstrucción tridimensional de objetos con técnicas de visión y luz estructurada". Universidad de Alicante, España.
6. Fernando A. Rodrigues, Pedro Martín Lerones. "Digitalización automática de superficies empleando escáneres ópticos". Valladolid, España.
7. Chandrajit L. Bajaj, Fausto Bernardini, Guoliang Xu. "Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans". International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. Pages: 109 – 118, 1995.
8. Marco Andreetto, Nicola Brusco. "Automatic 3D modeling of palatal plaster casts" Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM'03) 2003 IEEE.
9. R.A. Johnston, K. Barnes, T. Lovell-Smith and N.B. Price. "Use of a hand-held laser scanner in palaeontology: A 3D Model of a plesiosaur fossil". Image and vision Computing '04 New Zealand 21-23. november 2004. Akarua, New Zealand.
10. López, Carmelo; Alcalá, Luis; Berges, Luis; Yoldi, Víctor; Cobos, Alberto; Royo, Rafael. "Nuevas perspectivas en la reconstrucción de dinosaurios 3D". XVII Congreso internacional – ADM, junio de 2005.
11. P. K. Allen, I. Stamos, A. Troccoli, B. Smith, M. Leordeanu and Y. C. Hsu, "3D Modeling of historic sites using range and image data", International Conference of Robotics and Automation, Taipei, September 2003, pp. 145-150.
12. R. Fontana, M. Greco, M. Materazzi, E. Pampaloni, L. Pezzati, C. Rocchini, R. Scopigno, "Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo", J. of Cultural Heritage, vol. 3 n. 4, p.325-331, 2002.
13. Y.L.A. Lam. "3D scanning of cuneiform tablets: Capture and interactive delivery". technical report, University of Birmingham. june 2001.
14. M. Hofer and H. Pottmann. "Orientierung von Laserscanner-Punktwolken". Vermessung & Geo-information, 91:297–306, 2003.
15. D. C. Brown. "Close-range camera calibration". Photogrammetric engineering, 37(8):855-866, 1971.
16. Zhengyou Zhang. "A flexible new technique for camera calibration", Technical report MSR-TR-98-71. Microsoft research, Redmond, WA 98052. Marzo 1999.
17. D. Liebowitz y A. Ziesserman. "Metric rectification for perspective images of planes". En proceedings of the IEEE Conference on computer vision and pattern recognition, páginas 482-488, Santa Barbara, California, Junio 1998. IEEE Computer Society.
18. G. Stein. "Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of error". En Proc. Fifth International Conference on Computer Vision, páginas 230-236, Cambridge, Massachusetts. Junio 1995.
19. Andrés Azar y Pablo Musé. Calibración de cámaras digitales, Proyecto de fin de carrera "ACURUTÚ". Abril 1998-Noviembre 1999.