

Evaluación dimensional del proceso de digitalización 3D por fotogrametría de un patrón de calibración propio

Fco. Eugenio López G.^a, Francisco Ramírez Cruz^a,
Sergio Alberto Cardona Ortiz^b, Moisés Rivera Rocha^b

^aUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura, México

^bMétrica Industrial S.A. de C.V., Monterrey, Nuevo León, México.

francisco.lopezgrr@uanl.edu.mx, francisco.ramirezcr@uanl.edu.mx,

sergio.cardonaort@uanl.edu.mx, moisesrivera@metricaindustrial.mx

RESUMEN

Este artículo presenta la evaluación de un sistema de digitalización 3D usando técnicas de fotogrametría usando como referencia geométrica un bloque patrón de diseño propio. La geometría del bloque patrón está basada en el estándar ISO 10360-6 y fue impreso por una impresora 3D ZCorp de alta calidad, con valores de precisión conocidos a partir de trabajos anteriores. El proceso de digitalización de la geometría del patrón se hizo utilizando una aplicación comercial de fotogrametría. Se procesó la nube de puntos resultante y se realizaron los ajustes a curvas y superficies a partir de ésta. Finalmente fue comparada la nube de puntos de mediciones con el documento de CAD de la geometría original. Un análisis estadístico de los resultados numéricos muestra un error promedio en un rango de -0.23 mm a +0.6 0mm. La desviación estándar fue de 0.56mm. Las conclusiones muestran que el desempeño de digitalización es de buena calidad.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría, sistema de digitalización 3D, ISO 10360-6, ajuste a curvas y superficies.

ABSTRACT

This article presents the evaluation of a 3D digitalization system using photogrammetry techniques, using as geometric reference an own-design prototype-printed Gauge block. The geometry of the Gauge block is based on the ISO 10360-6 standard, and was 3D printed with a ZCorp high quality prototype printer, with precision values known from other works.

The scanning process was made using a commercial software photogrammetry application. The point cloud was processed, and the fitting curves and surfaces were made. Finally, the points cloud was compared against the CAD file. A statistical deviation analysis shows a mean error between -0.23mm to +0.60 mm. The standard deviation was 0.56 mm. The conclusions show a scanning process with good quality.

KEYWORDS

Photogrammetry, 3D scanning system, ISO 10360-6, curves and surfaces fitting.

INTRODUCCIÓN

La digitalización de geometrías tridimensionales se ha convertido en un proceso crítico que apoya fuertemente la manufactura. Hoy en día existe suficiente oferta de digitalizadores 3D en el mercado, y al mismo tiempo, nuevas tecnologías emergen implementando mejores dispositivos, abaratando

componentes y optimizando cálculos. Las limitaciones de algunos sistemas han sido objeto de investigaciones^{1,2,3}. Aunque la implementación de la digitalización 3D ha llegado completamente a los trenes productivos^{4,5,6} a partir de máquinas de coordenadas, en el caso de México no han penetrado significativamente su mercado. Ver la Prospectiva Tecnológica Industrial de México 2002-2012 en el Sector 8 Diseño y Automatización, área 8.1 Diseño.

El proceso de producción para objetos con superficies complejas^{7,8} permite {1} la digitalización de objetos con facilidades que implican usuarios con el mínimo de requerimientos cognitivos; ello abarata el proceso y permite una mejora de las características estéticas y funcionales del producto (optimización del proceso de diseño con la introducción de métodos de ingeniería inversa). {2} nuevas funciones para el diseño estilístico, para permitir mejores resultados: mejor calidad y menor tiempo invertido en el diseño y {3} una arquitectura nueva de sistema tipo modular, que permitirá a las pequeñas y medianas empresas acceder a los sistemas de diseño alternativo, hasta ahora fundamentalmente usados por las grandes empresas.

En cada aparato digitalizador existen de manera imbuida los algoritmos de ajuste propios para la calibración y utilizando cálculos internos basados en geometrías de referencia 9. *Estos procedimientos son opacos para el usuario y no permiten evaluar la eficiencia del cálculo interno del digitalizador 10.*

Los algoritmos de las máquinas de medición son mantenidos en confidencialidad por los fabricantes, por lo que es difícil comparar, evaluar y eliminar las inconsistencias de software o elegir el método mejor. Consecuentemente, en los últimos años se han desarrollado proyectos de investigación internacionales^{11,12,13} para establecer un método para probar las herramientas de software sin que los fabricantes de máquinas de medición tengan que develar sus técnicas de construcción. Los resultados de estos estudios han cristalizado en la norma ISO 10360-6, que define:

- **Métodos de prueba:** Evaluación de la estimación del software comparando los parámetros del modelo de prueba contra sus valores referenciados.
- **Criterios de estimación de parámetros:** Minimización de los errores medidos.
- Error de medición: La distancia geométrica entre el modelo de prueba y un punto medido.
- **Conjunto de puntos:** Valores coordenados de un conjunto de puntos arbitrariamente localizados en el volumen del modelo de prueba.

OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo consistió en evaluar la calidad del proceso de digitalización fotogramétrica de una aplicación comercial. La evaluación se llevó a cabo comparando la geometría CAD contra la geometría resultante de la digitalización de un objeto patrón fabricado en 3D con una impresora de calidad dimensional conocida¹⁴. El objeto patrón fue una geometría propia, diseñada bajo los requerimientos del estándar ISO 10360-6.

Los objetivos particulares fueron:

- Determinar los puntos de medición que conforman las primitivas geométricas y sus valores de ajuste a las primitivas geométricas individuales del objeto patrón.
- Determinar los valores metrológicos globales que representan la calidad de las mediciones de todo el proceso.
- Determinar un valor de calidad de digitalización que permita saber si los procesos industriales y de taller puedan aplicar el proceso de digitalización por fotogrametría.

El presente trabajo apoya los trabajos desarrollados por los autores sobre mejora geométrica usando algoritmos de crecimiento biológico^{15,16,17,18,19}, y en el desarrollo de un sistema que para la digitalización de objetos de geometría compleja^{20,21,22,23}.

METODOLOGÍA

La figura 1 muestra a detalle la secuencia metódica del presente trabajo para la validación del proceso de digitalización por fotogrametría y los resultados dimensionales experimentales.

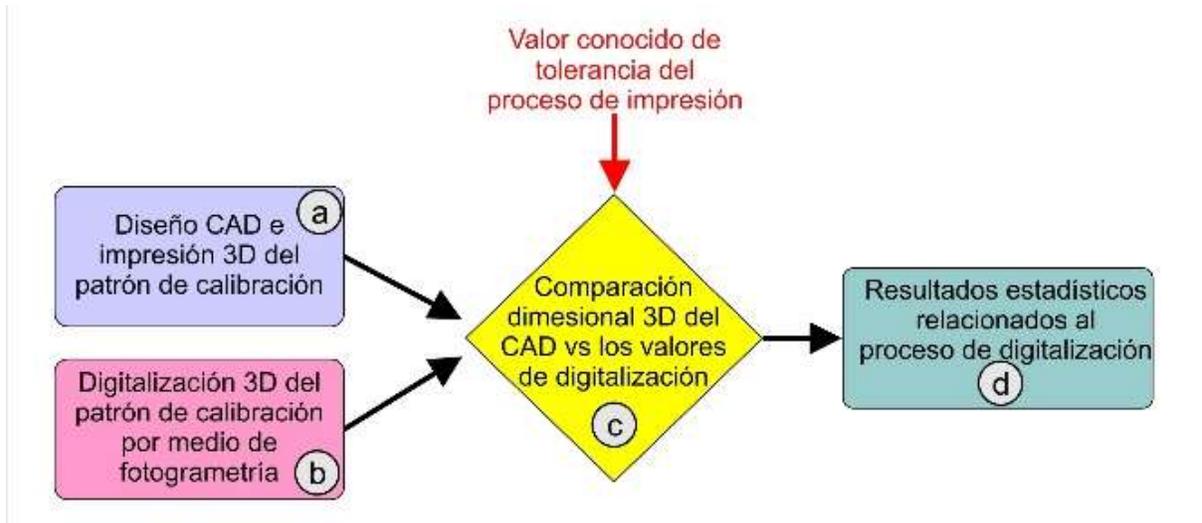


Fig. 1. Metodología de la evaluación.

La etapa de diseño CAD incluye la consideración de las geometrías preponderantes (no todas) en el estándar ISO 10360-6. La impresión de dicho modelo como prototipo rápido utilizando la impresora de laboratorio cuya desviación dimensional es conocida.

La digitalización fue hecha por un proceso fotogramétrico usando una aplicación comercial. El proceso incluye: edición de fotos, discriminación de fondo, calibración de niveles de iluminación y finalmente, edición de la nube de puntos resultante.

El requisito para que la comparación dimensional pueda ser hecha es que la nube de puntos tenga la escala acorde al modelo y que los sistemas de coordenadas universal y local estén alineados; bajo esa premisa es posible calcular las desviaciones de posición de cada punto de la nube de puntos.

Los resultados estadísticos son la evaluación de las condiciones de ajuste de la nube de puntos a curvas y superficies de cada entidad geométrica contenida en el patrón de calibración, para posteriormente ser comparadas con el modelo de CAD.

DISEÑO CAD E IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL DEL PATRÓN DE CALIBRACIÓN DISEÑO DE LA GEOMETRÍA CAD

En la tabla I se resumen las entidades y los parámetros que el estándar ISO 10360-6 define para los modelos de prueba:

Tabla I.- Entidades patrón para modelos de prueba ISO 10360.

Entidad	Dimensión	Posición	Orientación
Línea	2D / 3D	XY / XYZ	ab / abc
Plano	3D	XYZ	abc
Círculo	2D / 3D	XYZ	ab / abc
Esfera	3D	XYZ	abc
Cilindro	3D	XYZ	abc
Cono	3D	XYZ	abc
Toro	3D	XYZ	abc

A pesar de que el ajuste lineal (e inclusive el ajuste a un plano) son conocidos suficientemente, en este patrón se ha privilegiado detallar consistentemente las entidades básicas de que consta el estándar ISO 10360-6; para el modelo se presentan los casos de las entidades patrón Plano y Esfera. El cálculo de las entidades Línea recta y Círculo se presentan como primitivas de las entidades Plano y Esfera respectivamente. Ver figura 2

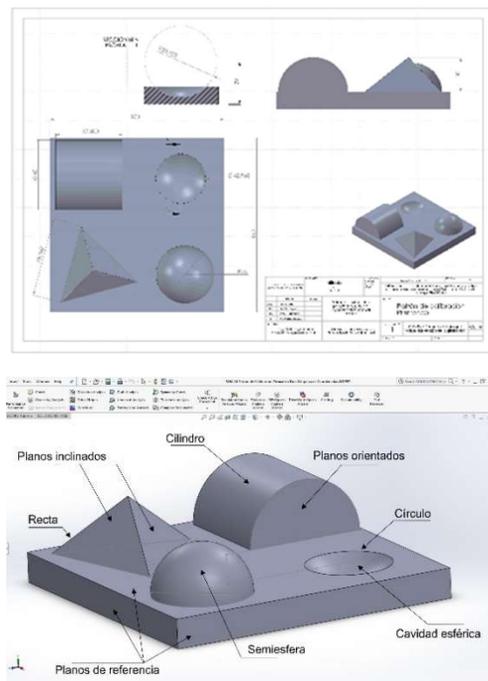


Fig. 2. Geometría del cuerpo de calibración en el ambiente CAD: cotas y referencias.

IMPRESIÓN 3D DEL PATRÓN DE CALIBRACIÓN

Las impresoras 3D de Z Corporation permiten producir rápido, a bajo costo y con relativa tolerancia cerrada modelos físicos a partir de datos digitales. Para ello utilizan la tecnología de inyección de tinta para depositar líquido aglutinante sobre polvo polimérico, construyendo las partes

en base a capas. Incorporan además la capacidad de adicionar una superficie a color mezclando tinta con el aglutinante. El resultado es una representación geométrica del diseño de CAD que puede incluir colores, dibujos y fotografías.

La tecnología que utiliza la impresora 3D fue desarrollada en el Tecnológico de Massachussets, la cual consiste en particionar el modelo geométrico (usualmente en formato de estereolitografía) en capas de espesor de 0.0762 a 0.2286 mm (0.003 a 0.009 pulgadas) de espesor.

Cada capa se imprime sobre un depósito de polvo de impresión, utilizando dos pistones para controlar la alimentación y construcción (ver figura 3).

Ya que la producción de geometrías con este procedimiento implica una conversión de formato CAD a STL y posteriormente a capas, el prototipo final puede contener errores de conversión²⁴.

La tecnología de inyección de tinta se basa en la mezcla subtractiva de colores *MAGENTA-CYAN-AMARILLO*, la cual es vectorialmente complementaria al sistema aditivo RGB. Además del dosificador de aglutinante, la máquina de prototipos utiliza 3 dosificadores para cada componente de color.



Fig. 3. Impresión 3D ZCorp del patrón de calibración.

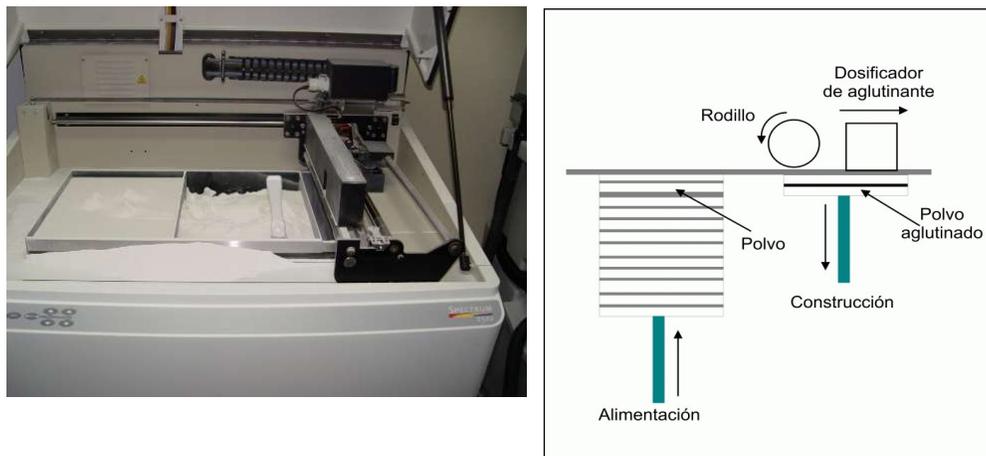


Fig. 4. Principio de funcionamiento de la impresora 3D ZCorp Spectrum Z510.

El modelo CAD (ver figura 2) fue usado como la referencia geométrica para la fabricación del prototipo²⁵ que se muestra en la figura 3. En trabajos anteriores²⁶ se demostró que esta impresora 3D con la cual se fabricó el patrón de calibración tiene una desviación estándar de 0.15-0.20 mm.

Tabla II. Diferentes tecnologías de prototipos rápidos²⁷.

Tecnología de prototipado	Tolerancia típica	Material base
Sinterizado selectivo de láser (SLS)	±0.1778 mm. Varía dependiendo del material sinterizado con láser.	Metales, termoplásticos, polvos cerámicos
Modelado por deposición fundida (FDM)	±0.13 mm.	Termoplásticos, metales eutécticos
Estereolitografía (SLA)	±0.127 mm a 0.0381 mm para cada 25.4 mm subsiguientes.	Fotopolimero
Modelado Multi Jet (MJM)	±0.0127 mm.	Fotopolimero
Objeto manufacturado por capas laminadas (LOM)	±0.1066 mm.	Papel
Fusión por electrorayo (EBM)	0.05 - 0.2 mm	Aleaciones de titanio
Impresión 3D (3DF)	0.0762 a 0.2286 mm	Materiales varios

DIGITALIZACIÓN 3D DEL PATRÓN DE CALIBRACIÓN POR MEDIO DE FOTOGAMETRÍA

La metodología general para la captura digital de geometrías²⁸ utilizando fotogrametría se muestra en la figura 5. Dicho proceso no se muestra a detalle en este trabajo, pero se especifican las variables más importantes.

La toma de fotografías se hizo colocando el objeto en cabezal divisor motorizado controlado con un microcontrolador dotado de un disparador automático de cámara DSLR.

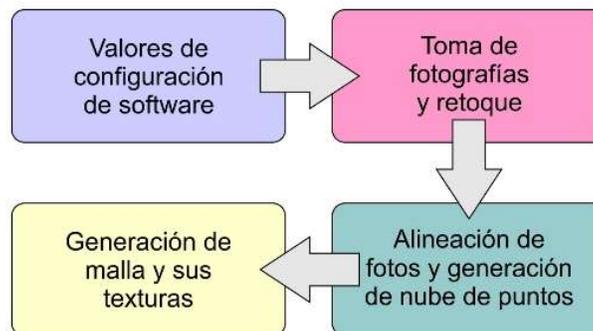


Fig. 5. Proceso de digitalización por fotogrametría utilizando un programa comercial.

La aplicación Agisoft PhotoScan es un programa autónomo que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales 3D. Entre sus utilidades se encuentran los siguientes procesos:

- Triangulación fotogramétrica.
- Generación de nube de puntos densos: edición y clasificación.
- Exportación orto mosaica georreferenciada.
- Mediciones: distancias, áreas y volúmenes.
- Puntos de control de tierra: topografía de alta precisión.
- Python scripts: Personalizar el flujo de trabajo de procesamiento.
- Procesamiento de imágenes multiespectrales.

La versión académica ofrece todas las funciones de la versión Pro.

Las principales condiciones de operación del programa que deben considerarse anterior a su uso son: la calibración, fuente de luz y fondo, densidad de digitalizado y posición de la cámara que no se especifican aquí.

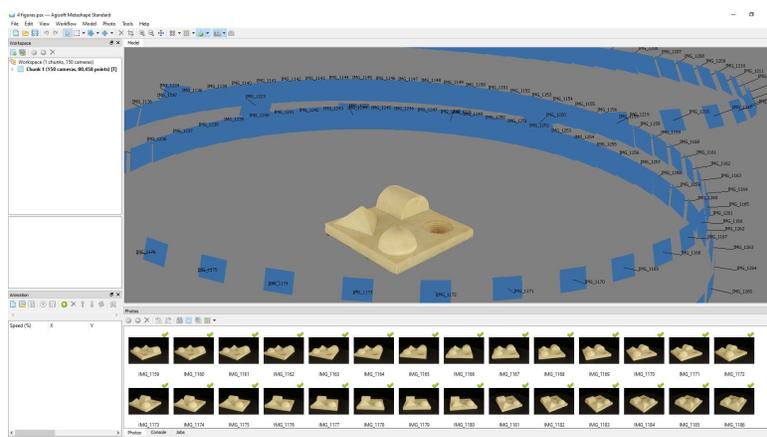


Fig. 6. Alineación de fotos, generación de nube de puntos y malla con texturas.

La configuración de la cámara fue: tiempo de obturación de 1/10 con 6.3 de apertura, a un ISO de 200. Las imágenes tomadas fueron editadas para eliminar el ruido de fondo.

Tabla II. Valores de configuración en la sesión fotogramétrica.

	Valor
Número de circuitos de 360°	3
Cantidad de fotos por circuito	50
Total de fotos	150
Total de puntos generados	80458

Tras la edición de las fotografías, el proceso de digitalización inicia con la alineación de las tomas, y a partir de ahí obtener la nube de puntos tridimensionales²⁹. Una vez hecho esto, es posible generar una malla triangular texturizada y convertir el resultado a un objeto 3D de formato comercial conocido (*obj* o *ply*, por ejemplo).

La figura 6 presenta miniaturas de las fotografías, su alineación y la nube de puntos generada.

El resultado de la digitalización debe ser aislado de objetos circunvecinos y posteriormente editado para eliminar ruido. La nube de puntos^(a) y la malla texturizada^(b) resultado de este procesamiento se muestran en la figura 7.

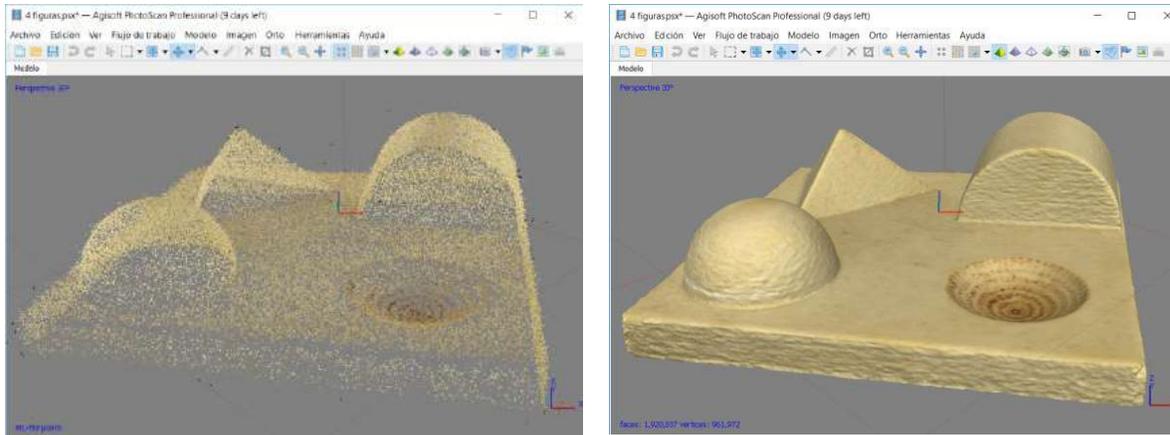


Fig. 7. (a)Nube de puntos resultante del proceso de digitalización. (b) Malla triangulada con mapas de textura.

El número de puntos de la nube fueron 1,733,268.

COMPARACIÓN DIMENSIONAL 3D DEL CAD VERSUS LOS VALORES DE DIGITALIZACIÓN.

Para referenciar las mediciones es necesario que los ejes universales del modelo CAD coincidan con los ejes locales de la nube de puntos. El factor de escala lo contiene el mismo objeto patrón. Una vez hecho esto, es necesario alinear la nube de puntos contra el modelo CAD, y luego es factible calcular las desviaciones. Es posible observar desviaciones individuales en algún sector de la nube de puntos (y así evaluar cada entidad geométrica contenida en el patrón), así como la desviación global de toda la geometría.

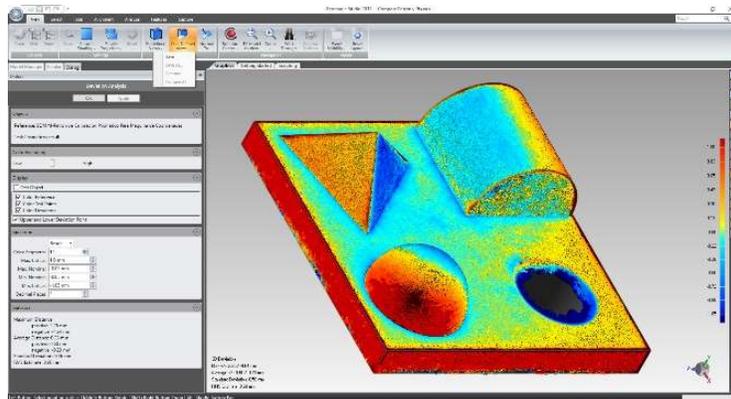


Figura 8. Escala cromática preliminar de desviaciones

Las figuras 8 y 9 muestran en tonos de colores los valores de los puntos de medición contra el modelo CAD de referencia. Los rangos de desviación son de ± 1.0 mm; la desviación típica fue de 0.56 mm, lo cual concuerda con las especificaciones del proceso de digitalización.

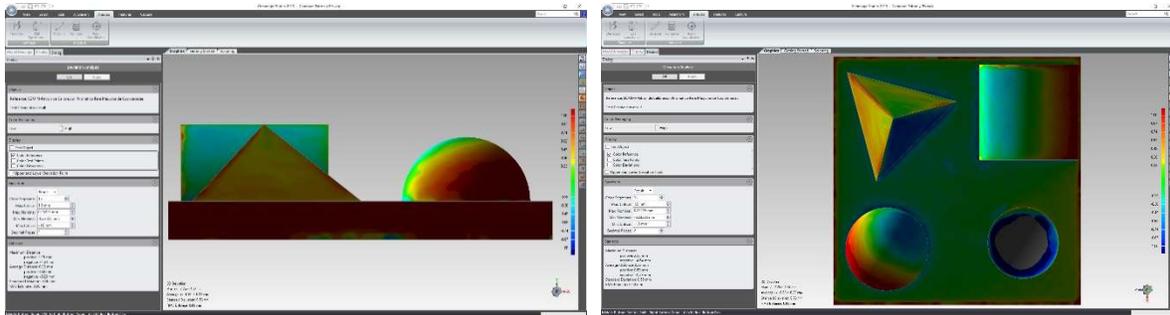


Fig. 9. Vistas ortogonales de los valores de desviación finales.

RESULTADOS ESTADÍSTICOS RELACIONADOS AL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN

Para evaluar la calidad del proceso de escaneo, se comparó la geometría del archivo CAD con la nube de puntos de medición. Esta comparación arroja como resultado todas las desviaciones dimensionales midiendo las distancias entre cada punto y la geometría más cercana. Con estos valores es posible hacer un reporte estadístico de error dimensional. En la tabla IV se presentan los valores más significativos de este reporte.

Tabla IV. Valores de desviación 3D de la digitalización referidos al modelo CAD.

Estadístico	Valor (mm)
Error máximo positivo	+2.25 mm
Error máximo negativo	-4.64 mm
Error promedio positivo	+0.60 mm
Error promedio negativo	-0.23mm
Desviación estándar	0.56 mm
RMS estimado	0.60 mm

A continuación, se presentan los cálculos y mediciones utilizando la nube de puntos para cada una de las geometrías de referencia por separado imbuídas en el bloque patrón. La tabla V resume los valores calculados con respecto al CAD del bloque patrón.

Tabla V. Comparación de los resultados de ajuste vs las dimensiones del modelo de referencia CAD.

Primitiva geométrica	Medida de referencia en CAD	Valor de ajuste con la nube de puntos
Longitud de la línea recta del canto del tetraedro (mm)	59.588	46.147
Ángulos en grados entre las normales a los planos del tetraedro	90° 90° 90°	88.9° 93.1° 98.8°
Diámetro del círculo extraído del cilindro (mm)	60	59.245
Diámetro de la esfera (mm)	50	49.399

Método para el ajuste a una línea recta

En donde el error es la suma de cuadrados de las diferencias:

$$\varepsilon^2 = \sum_i [y_i - f(x_i)]^2 \quad (\text{ec. 1})$$

Y las condiciones para la minimización del error son:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = 0 \quad (\text{ec. 2})$$

Esto es,

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial m} = m \sum_{i=0}^n x_i^2 + b \sum_{i=0}^n x_i = \sum_{i=0}^n x_i y_i \quad (\text{ec. 3a})$$

y

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = m \sum_{i=0}^n x_i + b \cdot n = \sum_{i=0}^n y_i \quad (\text{ec. 3b})$$

Sustituyendo y agrupando se tiene:

$$Mt = \begin{pmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i \\ \sum_i x_i & \sum_i 1 \end{pmatrix}, \quad v = \begin{pmatrix} \sum_i x_i y_i \\ \sum_i y_i \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 4})$$

Resolviendo $R = Mt^{-1}v$ se obtienen los valores de la pendiente m y la intersección b buscados.

Método para el ajuste a un círculo

$$\varepsilon(h, k, \alpha) = \sum_{i=0}^n (L_i - \alpha)^2 \quad (\text{ec. 5})$$

$$L_i = \sqrt{(x_i - h)^2 + (y_i - k)^2} \quad (\text{ec. 6})$$

En donde $\alpha = r^2$, y una vez más, el criterio de minimización es:

$$\frac{\partial \varepsilon(h, k, \alpha)}{\partial h} = 0, \frac{\partial \varepsilon(h, k, \alpha)}{\partial k} = 0, \frac{\partial \varepsilon(h, k, \alpha)}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{z. 7)}$$

Desarrollando y agrupando, las matrices de coeficientes son:

$$Mt = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n x_i^2 & \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n x_i \\ \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n y_i^2 & \sum_{i=0}^n y_i \\ \sum_{i=0}^n x_i & \sum_{i=0}^n y_i & n \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 8})$$

$$v = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n x_i (x_i^2 + y_i^2) \\ \sum_{i=0}^n y_i (x_i^2 + y_i^2) \\ \sum_{i=0}^n (x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 9})$$

Con el método de coeficientes indeterminados obtenemos linealizada la ecuación general del círculo:

$$x^2 + y^2 = Ax + By + C \quad (\text{ec. 10})$$

En donde la forma matricial es

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = Mt^{-1} \cdot v \quad (\text{ec. 11})$$

Y los parámetros buscados son:

$$h = \frac{A}{2}, k = -\frac{B}{2}, r = \frac{\sqrt{4C + A^2 + B^2}}{2} \quad (\text{ec. 12))}$$

Cálculos y mediciones para el cilindro

Utilizando los métodos para ajuste a recta y ajuste a círculo, es posible extraer los valores del cilindro de la nube de puntos.

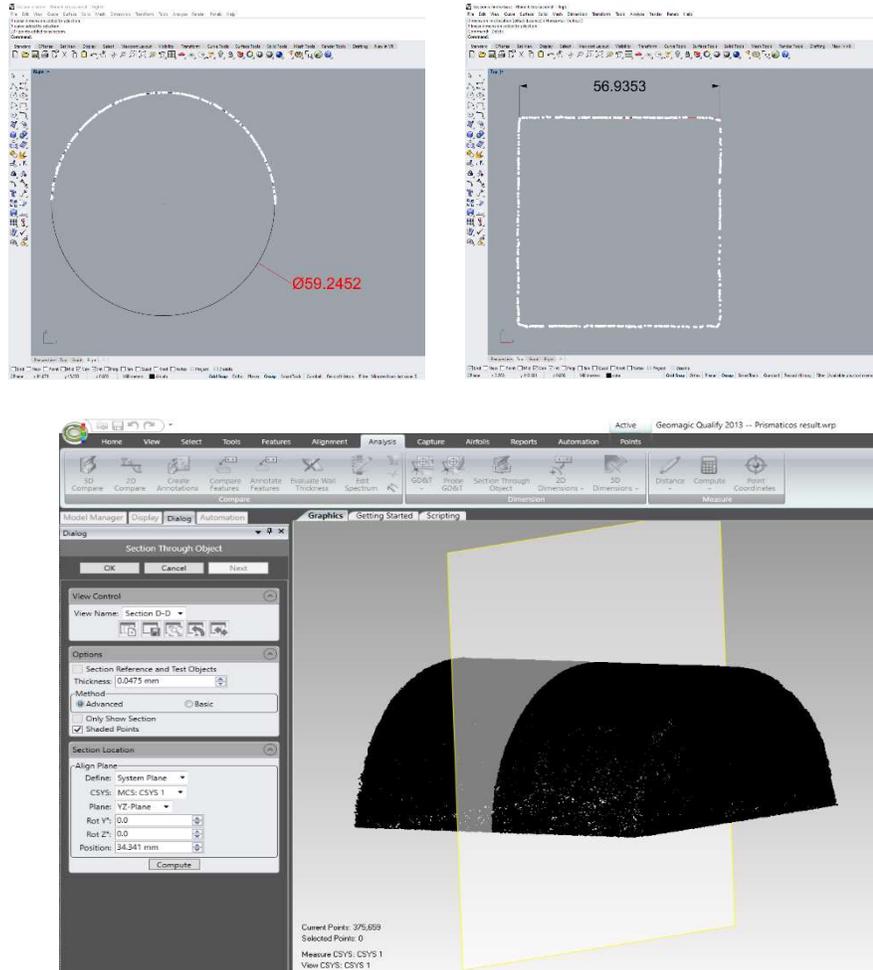


Fig. 10. Puntos de los planos inclinados extraídos de la nube de puntos, comparados con el ajuste a planos hecha por CAD. Note la distribución numérica de cotas angulares de los vectores normales.

Cálculos y mediciones para los planos del tetraedro

Análogamente al ajuste a una línea, el problema para un plano puede resolverse de la misma manera.

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^n (ax_i + by_i + c - z_i)^2 \quad (\text{ec. 13})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial c} = 0 \quad (\text{ec. 14})$$

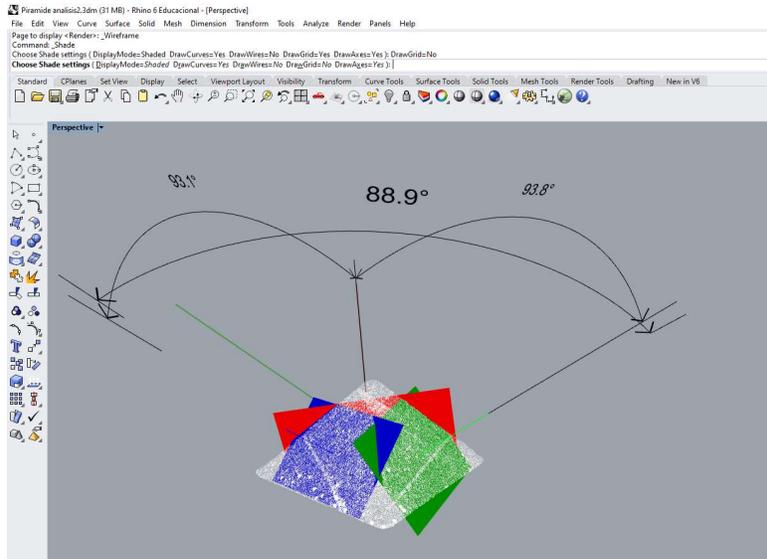


Fig. 11. Puntos de los planos inclinados extraídos de la nube de puntos, comparados con el ajuste a planos hecha por CAD. Note la distribución numérica de cotas angulares de los vectores normales.

Los valores calculados de los vectores normales fueron:

$$R := \begin{pmatrix} 4.109 \\ -15.496 \\ 10.198 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 10.107 \\ 10.111 \\ 9.199 \end{pmatrix} \quad G := \begin{pmatrix} -20.360 \\ 5.468 \\ 13.437 \end{pmatrix}$$

Los valores angulares entre los vectores normales:

$$\theta_0 = 88.9^\circ \quad \theta_1 = 93.1^\circ \quad \theta_2 = 93.8^\circ$$

Cálculos y mediciones para la esfera

A menudo la esfera es utilizada como geometría de referencia^{30,31,32}. La ecuación de la distancia de un punto a la esfera es una función no lineal, por lo cual es necesario emplear algún algoritmo de minimización no lineal para la solución del problema de ajuste de puntos a la geometría, a menudo se usa el algoritmo de Gauss-Newton³³. Este algoritmo necesita una aproximación inicial a los parámetros reales que se encuentre cercana la verdadera solución. En donde se ajusta a mínimos cuadrados la ecuación lineal y se encuentran con ello los valores iniciales para el algoritmo de convergencia.

En una aplicación de CAD dicho algoritmo está implementado, por lo que en este trabajo se utilizó esta aproximación³⁴.

Los puntos están distribuidos en una semiesfera. El algoritmo debe arrojar una aproximación del diámetro con la muestra de datos.

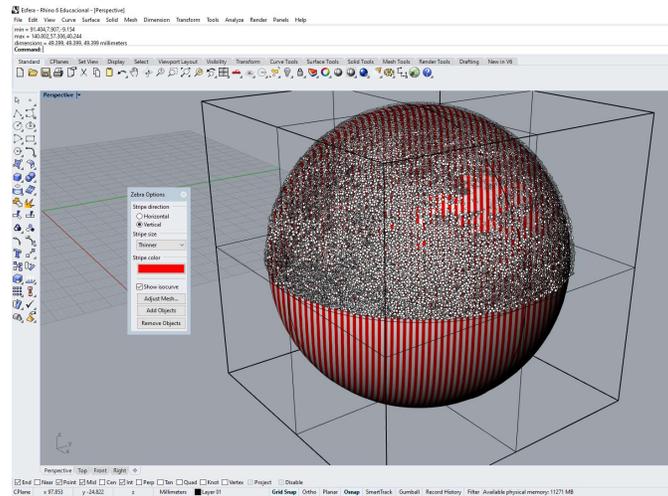


Fig. 12. Puntos de la semiesfera extraída de la nube de puntos, comparada con su ajuste a una esfera. [35]

En el análisis por CAD, el diámetro de la semiesfera resultado de la digitalización concuerda con la cota del CAD de 50mm:

- $P_{min} = 91.404, 7.907, -9.154$
- $P_{max} = 140.802, 57.306, 40.244$
- Dimensiones XYZ = 49.399, 49.399, 49.399 mm
- Error = 0.601 mm

CONCLUSIONES

Se ha presentado una síntesis del relativamente nuevo estándar de pruebas ISO 10360-6 que permite evaluar cálculos internos basados en geometrías de referencia.

Dicho estándar fue utilizado como punto de partida para evaluar las características de desempeño dimensional del proceso de digitalización utilizando fotogrametría. Se comparó el archivo en formato CAD y la digitalización por fotogrametría de un prototipo impreso en 3D con alta precisión (desviación estándar de 0.15-0.20 mm). Los valores de desviación estándar de 0.56 mm, lo cual es sorprendentemente bueno, considerando la cantidad de variables involucradas que influyen en el proceso.

En este trabajo se han incluido los fundamentos para el ajuste de datos experimentales a un sistema lineal de coeficientes, tanto lineales como no lineales. Se desarrolló de manera detallada el procedimiento para obtener los cálculos que permiten cuantificar la calidad en el proceso de digitalización 3D por fotogrametría de una aplicación comercial. Se presentan los valores de ajuste para las primitivas más significativas del estándar ISO 10360-6. Los resultados arrojados son un marco de referencia para usar el proceso de digitalización en situaciones de restricción holgada con un grado relativo de certeza.

El proceso evaluado representa una buena herramienta en la reconstrucción de geometrías en una gran cantidad de aplicaciones en la manufactura de productos. Nuevas tecnologías están emergiendo para satisfacer la necesidad de digitalizar geometrías y ambientes virtuales, por lo que a corto plazo se vislumbran expansiones de los estándares actuales.

AGRADECIMIENTOS Y EQUIPO UTILIZADO

El presente trabajo fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento “Optimización geométrica de productos” del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL con el apoyo financiero de la misma.

- Licencia académica de software CAD Rhinoceros v6.
- Licencia académica de software Solidworks v2016.
- Cámara DLSR Canon 7D. Cámara réflex digital 18MP, AF/AE con montura Canon EF, con lente EF 100mm f/2.8 Macro USM. Interfaz automática de disparo de diseño propio.
- Licencia de software para el tratamiento de puntos Geomagic Studio/Qualify v8.
- Licencia de software MeshLab Visual Computing Lab ISTI-CNR (Apr 3 2014) para el tratamiento de mallas.
- Impresora 3D de la compañía ZCorp, modelo Spectrum Z510 con capacidad de construcción de 2 capas por minuto y un volumen de trabajo de 254 x 356 x 203 mm, con resolución de 600 x 540 dpi.

REFERENCIAS

1. L. Iuliano, P. Minetola and A. Salmi. “Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers”. IOP Publishing. Measurement Science and Technology, 21 105102 (13pp, 2010).
2. Yang Hu, Qingping Yang, Xizhi Sun. “Design, Implementation, and Testing of Advanced Virtual Coordinate-Measuring Machines”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 61, NO. 5, May 2012.
3. Y. Wu, H. Wang, Z. Li. “Quotient Kinematics Machines: Concept, Analysis, and Synthesis”. Journal of Mechanisms and Robotics, ASME. vol. 3. May 2011.
4. Nicola D'Apuzzo. “Overview of 3D surface digitization technologies in Europe”. Three-Dimensional Image Capture and Applications VI, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose California, USA, 2006.
5. S. Winkelbach, S. Molkenstruck and F. Wahl. “Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach”. K. Franke et al. Editors. DAGM, LNCS 4174, pp. 718–728. Springer Berlin Heidelberg 2006.
6. J. Reznicek, K. Pavelka. “New low-cost 3d scanning techniques for cultural heritage documentation”. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008.
7. Y. F. Li and Z. G. Liu. “Method for determining the probing points for efficient measurement and reconstruction of freeform surfaces”. Measurement Science and Technology. 14 p1280–1288. Institute of Physics Publishing 2003.
8. S. J. Lee and D. Y. Chang. “Laser scanning probe with multiple detectors used for sculptured surface digitization in reverse engineering”. 7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Journal of Physics: Conference Series 13 155–158. Institute of Physics Publishing, 2005.
9. J. Guo, Y. Wang. “Study on Calibration Technology of Portable Coordinate Measuring Machines”. International Conference on Electronics and Optoelectronics. V4 170-173. IEEE 2011.

10. G. Gao, W. Wang, K. Lin, Z. Chen. "Structural Parameter Identification for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines". International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. p128-131. Computer Society IEEE 2009.
11. J. Santolaria, J. Aguilar, D. Guillomía, C. Cajal. "Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines". Precision Engineering 32 pp. 251–268. 2008 Elsevier Ltd.
12. K. Shimojima, R. Furutani, K. Takamasn and K. Araki. "The Estimation Method of Uncertainty of Articulated Coordinate Measuring Machine". IEEE ICIT'02. Bangkok, THAILAND 2002.
13. J. Sladek, K. Ostrowska, A. Gaska. "Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model". Measurement 46 pp. 667–679. 2013 Elsevier Ltd.
14. B. Wieneke, H. Gerber. "Rapid Prototyping Technology – New potentials for offshore and abyssal engineering". The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference ISOPE 2003 - Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 2003.
15. Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. "Reducción de la concentración de esfuerzos para piezas de fundición por medio del método de elementos finitos utilizando algoritmos de crecimiento biológico". IX Congreso Anual SOMIM 2003 vol. VI, pág. 25, Sept. 2003.
16. Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. "Diseño óptimo de elementos mecánicos usando algoritmos de crecimiento biológico". Revista Ingenierías vol. VII, no. 22, 2004.
17. Ramírez, F., López, E. Ocañas, J. "Optimización geométrica con criterio de crecimiento biológico para la reducción de la concentración de esfuerzos en uniones". X Congreso Anual SOMIM 2004 Sept. 2004.
18. Ramírez, F., López, E. Romero, I. "Optimización geométrica con criterio de crecimiento biológico para la reducción de la concentración de esfuerzos en placas con perforaciones transversales". XI Congreso Internacional Anual SOMIM, Sept. 2005.
19. E. López, F. Ramírez, I. Márquez, J. de la Garza, A. Castillo. "Relación de la geometría de elementos mecánicos con el cambio de forma en la naturaleza como criterio de diseño". XVI Congreso Internacional Anual SOMIM, Sept. 2010. ISBN 968-9173-01-4
20. E. López, F. Ramírez, I. Romero, J. de la Garza, J.L. Castillo. "Diseño de un instrumento para la captura de geometrías 3D con aplicación en la manufactura de productos". Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. Vol. 2 No. 3, Año 5 (2006) p. 101-110 ISSN1665-7381.
21. E. López, I. Márquez, D. Franco, F. Ramírez. "Elaboración de bustos por medio de digitalización 3D y prototipos rápidos". XIV Congreso Internacional Anual SOMIM p.836-846, sept. 2008. ISBN 968-9173-01-4.
22. E. López, F. Ramírez, A. Ávila. "Digitalización 3D como herramienta en la manufactura de calzado deportivo". XV Congreso Internacional Anual SOMIM p.137-146, sept. 2009. ISBN 968-9173-01-4.
23. E. López, F. Garza, F. Ramírez. "Diseño y construcción de un brazo digitalizador para la captura de geometrías". Revista Ingenierías, Abril - Junio de 2014, vol. XVII, No. 63, p45-57. ISSN 1405-0676.

24. B. de Smit, J. Broek, I. Horváth. "Expected performance of the FF-TLOM technology, based on preliminary testing of the involved basic technologies". 1st RAPDASA Annual Conference, Pretoria, South Africa. November 2000.
25. R. Hague, S. Mansour, N. Saleh. "Design opportunities with Rapid Manufacturing". *Assembly Automation* v.23 N4 2003 pp 346-356 ISSN 0144-5154.
26. E. López, F. Ramírez, J. de la Garza, A. Castillo. "Evaluación de características dimensionales y de color de piezas producidas en prototipos rápidos". XIII Congreso Internacional Anual SOMIM p. 66, sept. 2007. ISBN 968-9173-01-4
27. J.W. Branch, J.B. Gomez, F. Prieto. "Reconstrucción 3D a partir de imágenes de rango: Revisión de la literatura". *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, V.8, N° 23, 2004. España.
28. F. Rodrigues, P. Lerones. "Digitalización automática de superficies empleando escáneres ópticos". XXII Jornadas de Automática en la Industria. Bellaterra (Barcelona, España). Septiembre de 2001.