Reconstrucción dimensional de estructuras industriales mediante fotogrametría y técnicas de segmentación

Reverse engineering using photogrammetry and segmentation for industrial structures

Óscar J. Cosido-Cobos[1,2], Alberto Salcines-Menezo[2], Carlos Loucera-Muñecas[3] y Antolín Lorenzana-Ibán[4]

[1] Universidad de Cantabria (España)
[2] UPINTELLIGENCE (España)
[3] Universidad de Cantabria-DICOM (España)
[4] Universidad de Valladolid (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8549

1. INTRODUCCIÓN

La forma tradicional de trabajar en el cálculo inverso de estructuras implicaba la necesidad de medir sobre la propia estructura, mediante contacto directo, para poder generar un modelo que permita conocer la geometría y calcular, por ejemplo, cómo se comporta ante determinadas cargas y poder tomar decisiones sobre su aptitud ante posibles modificaciones o sobre la necesidad de mantenimiento o refuerzos para alargar su vida útil. Si esta estructura tenía partes elevadas o inaccesibles, se necesitaba una plataforma elevadora u otros medios que permitieran el acceso de un operario para medir. Algunos de estos inconvenientes se superan mediante tecnologías modernas basadas en el uso del escáner - láser [1], si bien se propone un procedimiento basado en la toma de simples fotografías y su posterior procesado con el que, para precisiones similares, se abaratan costes y se reduce el riesgo en los trabajos asociados a la adquisición de datos.

La metodología permite el modelado 3D (y la obtención de los tradicionales planos) de estructuras antiguas o de aquellas en las que por distintas razones no se disponga del correspondiente proyecto. Lo anterior, junto con la continua necesidad de cálculo e inspección sobre estructuras industriales, lleva a procedimientos que abaratan costes sin menoscabar la precisión. El cálculo de estructuras a partir de ingeniería inversa es una herramienta muy apropiada en el ámbito industrial [2], siendo además estas técnicas aplicadas en muchos otros campos, sobre todo en aplicaciones geomáticas o patrimonio [3], donde el grupo de trabajo tiene una mayor experiencia.

La metrología industrial de componentes mecánicos se ha enfrentado a una revolución gradual [4][5] a través de la aplicación de escáneres 3D fijos y más recientemente embarcados en vehículos e incluso en drones. El sistema más utilizado en entornos industriales suele ser el uso de plataformas de escáner–láser de altas prestaciones y usualmente también de elevado coste. En este trabajo, sin embargo, se demuestra la posibilidad de trabajar enteramente con fotografías y conseguir similares niveles de precisión gracias a re-escalados, cuando éstos sean posibles. Para ello se tendrá en cuenta la disponibilidad comercial discreta de muchos de los componentes industriales cuya geometría y dimensiones se trata de determinar.

Se puede definir la fotogrametría como la tecnología consistente en la extracción de información (coordenadas, textura y color) mediante algoritmos informatizados de correlación dimensional. Cuando se aplican a dos o más fotografías del mismo objeto tomadas desde distintos puntos de vista se pueden inferir (por estéreo-correlación) coordenadas en 3D de los distintos puntos identificables y, con todos, obtener una nube de puntos. Con esa información geométrica y algoritmos de mallado se identifican superficies. Inicialmente esas superficies son simples triángulos definidos entre 3 puntos cercanos de la nube. Posteriormente algoritmos matemáticos de interpolación y suavizado [6] permiten agrupar triángulos en superficies geométricas parametrizadas. Finalmente sobre esas superficies se añade el correspondiente color y texturizado a partir de las fotografías originales.

Por su parte, mediante el escaneado láser se determina directamente la posición en el espacio de cada punto sobre el que incide la luz láser y, en algunos casos, también el color. Del mismo modo que en fotogrametría, el modelo debe ser completado con la identificación de superficies y la incorporación del texturizado.

El límite de precisión de un escáner láser depende de sus prestaciones y en principio es fijo. En fotogrametría se puede aumentar la precisión [6] sin más que aumentar el número de fotografías pudiendo llegar a obtener detalles con precisiones superiores a las dadas por el escáner, en función de óptica de la cámara y la toma de puntos de anclaje del modelo. Se entiende por punto de anclaje aquellos puntos de referencia con coordenadas tridimensionales conocidas. En publicaciones como [7], se recopilan varios trabajos basados en fotogrametría aplicados a distintos fines.

2. SEGMENTACIÓN DE OBJETOS

Se entiende por segmentación al proceso por el que se identifican los distintos objetos representados en un conjunto. Este proceso puede ser aplicado directamente a imágenes pero también a las nubes de puntos obtenidas tras el tratamiento de las imágenes. La técnica de segmentación, basada en algoritmos de visión artificial [7][8], consigue dividir la imagen en las distintas partes identificables que la componen. La homogeneidad cromática y los brillos de los elementos estructurales en entornos industriales hace recomendable combinar diversos algoritmos para una exitosa identificación. Los resultados son ajustados a entidades geométricas simples y, en principio, no escaladas. El siguiente paso es referenciar dimensionalmente alguna de esas entidades a, al menos, una medida de referencia.

3. EJEMPLO DE VERIFICACIÓN

Como caso de estudio, se reconstruyó el perfil tipo IPE de una de las ménsulas que soportan la viga carril del puente grúa de la Figura 1. Las ménsulas se encuentran a cierta altura y se puede suponer que en un caso real sería costoso o inseguro elevar a un trabajador para tomar físicamente las medidas. Dado que con este trabajo se pretende demostrar la viabilidad del método, las medidas reales de la ménsula son conocidas y servirán para validar la eficacia de la metodología.

3.1. TOMA DE FOTOS

Se comienza con una serie de fotografías del objeto desde ángulos diferentes y convergentes al mismo (Figura 1). Conviene también hacerlas con distintos niveles de zoom lo cual ayuda a referenciar la escala del modelo a objetos accesibles de su entorno, además de alimentar con más información a los algoritmos de reconstrucción.



Fig. 1: Imágenes convergentes a la ménsula

3.2. GENERACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

Existen varias aplicaciones de postprocesado de imágenes que a partir de las fotografías y la medición de un objeto accesible en la escena generan la correspondiente nube de puntos escalada. En este trabajo se ha usado el software comercial *Agisoft Photoscan* (www.agisoft.com). Este programa detecta puntos en las fotos de origen que son estables (insensibles a las variaciones de punto de vista e iluminación) y genera un descriptor para cada punto en función de su vecindario local. La generación de correspondencias se hace mediante diversos algoritmos geométricos que consiguen definir las coordenadas de cada uno de los puntos identificados. En total tras las dos imágenes de la Figura 1 se pueden identificar 888677 puntos (Figura 2).

Todos estos puntos se pre-procesan con un doble objetivo: por una parte se eliminan puntos "atípicos" (*outliers*) de forma que se minimice el efecto de las diversas formas de ruido; por otra permitirá agilizar los cálculos posteriores debido a la reducción del tamaño de la nube. Para ello se ha utilizado un *filtro mediante entornos próximos* [7]. En esencia la técnica consiste en marcar como atípico un punto dado Q si la distancia de sus k vecinos más cercanos es superior a le, donde e es la mediana de las distancias medias de todos los vecinos. Los parámetros que mejor resultado han dado han sido l=4.0 y k=4.

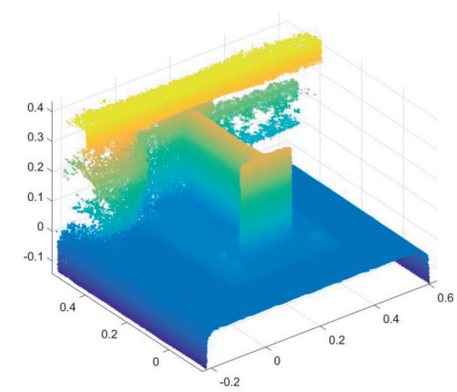


Fig. 2: Nube de puntos

3.3. SEGMENTACIÓN DE LAS NUBES DE PUNTOS

Una vez definidos los puntos de interés, se procede (mediante triangulación de *Delaunay*) a obtener las superficies facetadas para su posterior tratamiento mediante algoritmos RANSAC (*Random Sample Consensus*, [9]) implementados para este proyecto, bien de forma automática o asistidos por el usuario (opcional). RANSAC es un método estocástico iterativo que estima los parámetros de una entidad geométrica "base" establecida a priori (un plano, por ejemplo) que ajuste con suficiente precisión a un subconjunto de la nube de puntos dada. Partiendo de un subconjunto aleatorio, en cada iteración se van refinando los parámetros del modelo que mejor ajusta. Por tanto, se trata de un proceso estocástico "tolerante al ruido" que genera "mejores" soluciones a medida que se añaden iteraciones.

Tras este proceso se obtienen subconjuntos de la nube de puntos que son ajustables a entidades geométricas (planos, cilindros, ..., NURBS en general) con suficiente sencillez y precisión. Tras ello se agrupan dichas superficies básicas en base a cercanías y texturas (proceso de mapeado) y se identifican objetos por agrupación de superficies conexas. En el caso bajo estudio se consiguen identificar diversas partes como la placa de testa (Figura 3.a), la superficie inferior del ala inferior (Figura 3.b) o las superficies laterales del alma (Figura 3.c), entre otras.

La identificación en este caso se basa en el conocimiento previo de que el elemento estructural está formado por placas metálicas y perfiles laminados en los que se pueden identificar superficies planas. De esta forma, se indica al algoritmo RANSAC que ajuste subconjuntos de la nube de puntos a "planos". En cada iteración se selecciona un subconjunto aleatorio de la nube original y se trata de ajustar a planos. En cada iteración se realiza un test de cómo ajusta el subconjunto de puntos seleccionado al plano identificado. Como función de coste se suele utilizar el error cuadrático medio entre los puntos seleccionados y el plano identificado. Para las tolerancias definidas, se seleccionan los puntos que mejor ajustan (puntos de consenso) y se sustraen de la nube original. Con los puntos restantes se procede de forma análoga. Del mismo modo se puede proceder para buscar otras entidades geométricas (rectas, arcos, cilindros, etc.).

3.4. GENERACIÓN DE SUPERFICIES

Para cada uno de los planos identificados anteriormente, se seleccionan de forma manual aquellos que en realidad corresponden a la misma superficie física y se determina el plano único que mejor aproxima (por mínimos cuadrados) a cada entidad física. En la Figura 4 se pueden ver

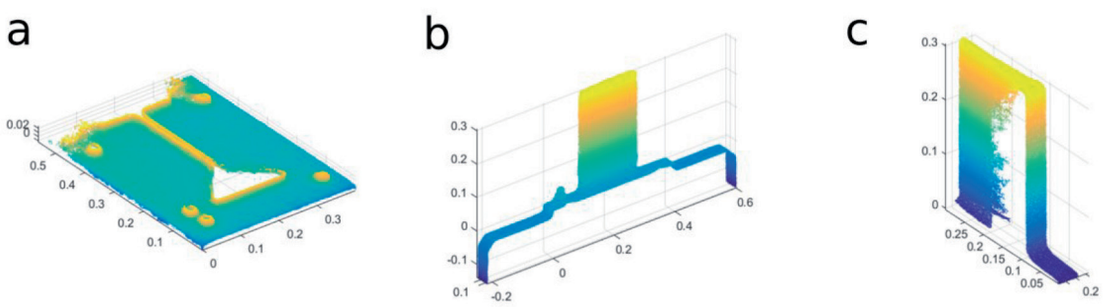


Fig. 3: Partes de la segmentación automática

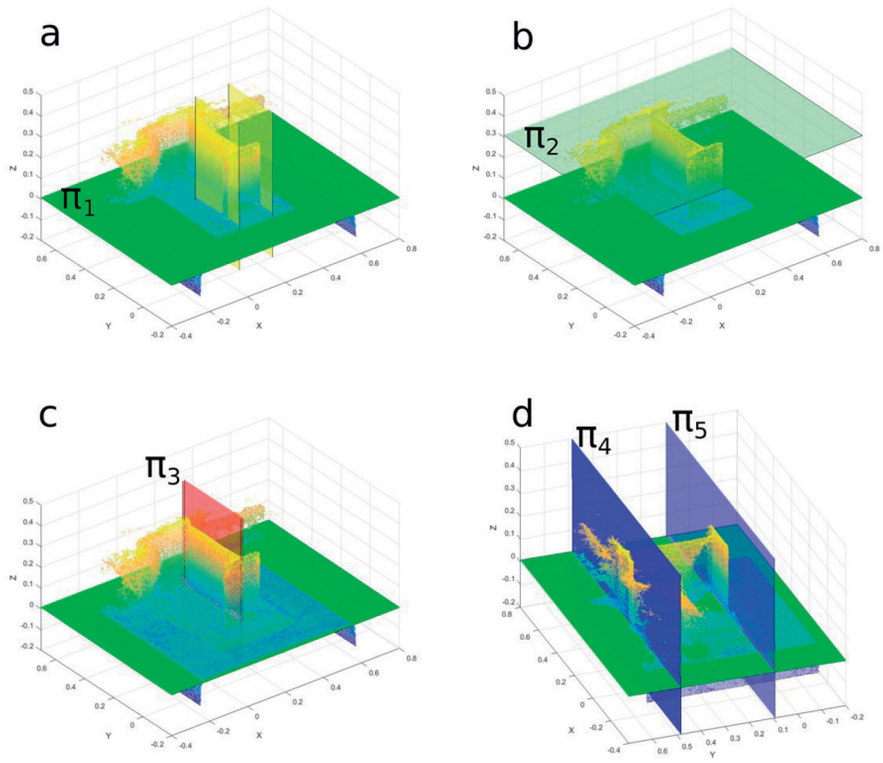


Fig. 4: Representación gráfica de los planos obtenidos superpuestos a la nube de puntos

los planos resultantes correspondientes a la cara vista de la placa de testa (ϖ_1), la sección extrema del perfil doble T (ϖ_2), la cara derecha del alma (ϖ_3) y las dos caras inferiores de las alas (ϖ_4 y ϖ_5).

De esta forma se pueden obtener la ecuación de los distintos planos y sus coeficientes de ajuste a la nube de puntos. También se pueden hacer comprobaciones de paralelismo o de perpendicularidad. Para los planos identificados en la Figura 4 el coeficiente R^2 es 0.966, 0.876, 0.970, 0.837 y 0.978 respectivamente. Respecto a errores de paralelismo, como referencia se tienen 0.48º entre ϖ_4 y ϖ_5 y 1.80º entre ϖ_1 y ϖ_2. Análogamente la falta perpendicularidad entre ϖ_1 y ϖ_3 es de 1.28º y entre ϖ_3 y ϖ_4 es de 0.34º. Algunos valores, como el paralelismo entre ϖ_4 y ϖ_5 o la perpendicularidad entre ϖ_4 y ϖ_4, dados por la precisión del proceso de fabricación por laminación del propio perfil, son indicativos de la resolución del método que se propone. Otros, como el paralelismo entre ϖ_1 y ϖ_2 o la perpendicularidad entre ϖ_1 y ϖ_3, además están influidos por la precisión durante el proceso de corte y soldadura en taller.

Con los planos más significativos bien identificados se pueden calcular líneas y puntos de corte entre los subgrupos de 2 o de 3 para identificar aristas y vértices y de este modo ir completando el modelo. También se podían haber buscado aristas directamente como se muestra en la Figura 4a.

3.5. ESCALADO

Como medida de referencia para el escalado se ha tomado el ancho b del pilar sobre el que está espitada la ménsula (ver Figura 1) cuyo valor es de 767 mm. Este elemento del entorno de la ménsula aparece en las imágenes convergentes y es cómodamente accesible para su medición desde el suelo. Ahora ya se pueden calcular distancias y determinar parámetros físicos del perfil como el canto (h), el ancho (b) y sus espesores de ala t_f y de alma t_w e incluso el radio de acuerdo (r). En la segunda columna de la Tabla 1 se muestran dichos valores. En este tipo de aplicaciones industriales es muy importante sacar partido de que muchos parámetros suelen tener unos valores discretos debidos a la estandarización comercial.

A la vista de esas dimensiones se deduce que se ha de tratar de un perfil tipo IPE400, cuyos valores nominales (http://sections.arcelormittal.com) son los indicados en la tercera columna de la misma tabla. En este punto, parecería lógico pensar que ha habido algún error en la escala y de forma tentativa se podría calcular su valor promedio (0.94%) y "corregir" la escala, tras lo cual se obtendrían los valores indicados en la cuarta columna, resultando que algunos de los parámetros son significativamente menores que los nominales. Nótese que las diferencias no pueden ser imputadas al recubrimiento de pintura de los perfiles, que suele estar en torno a las 120 micras para este tipo de estructura metálica. Ante la discrepancia entre los valores escalados y los nominales del IPE400 se decidió acceder a la ménsula mediante una escalera y medir esos parámetros con ayuda de una cinta métrica y un calibre. Los resultados (promediados tras varias mediciones) se muestran en la quinta columna. El máximo error entre estos valores medidos y los inferidos por fotogrametría es inferior al 0.6%. Esto hace sospechar que el perfil no es el IPE400 estándar sino alguna variación del mismo. Concretamente el denominado IPE 0 400+ (perfiles norma EU19-57) cuyas medidas nominales son las de la última columna de la tabla 2 (según la misma referencia http://sections.arcelormittal.com) y discrepan de los medidos en menos del 1.2% y de los inferidos en menos del 1%. Es destacable que los espesores medidos (incluyendo la pintura) son algo inferiores a los nominales, estando estos rozando la tolerancia inferior según la norma EN10034:1993.

Tras el proceso seguido en este caso sencillo de verificación se ha concluido que no ha sido necesaria una corrección del escalado inicial. No obstante, la metodología permite escalados sucesivos en base a las comprobaciones dimensionales que vayan resultando en cada paso.

3.6. RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO

En este instante se tendría toda la documentación gráfica escalada de tal manera que es posible conocer no solo los valores de los parámetros usados para el ajuste de escala (dimensiones del perfil) sino también otros como las dimensiones y espesor de la placa de testa (resultando en 650 mm de alto y 401 mm de ancho y 20 mm de espesor), las posiciones de los tornillos y métrica de los mismos (M16) y

	inferidos	IPE400	Escalado	Medidos	IPE0400+
h (mm)	404.6	400	382.0	404.75	404
b (mm)	182.4	180	172.2	182.5	182
t_w (mm)	9.5	8.6	9.0	9.55	9.7
t_f (mm)	15.4	13.5	14.5	15.32	15.5
r (mm)	21.8	21	20.6	...	21

Tabla 1: Parámetros del perfil

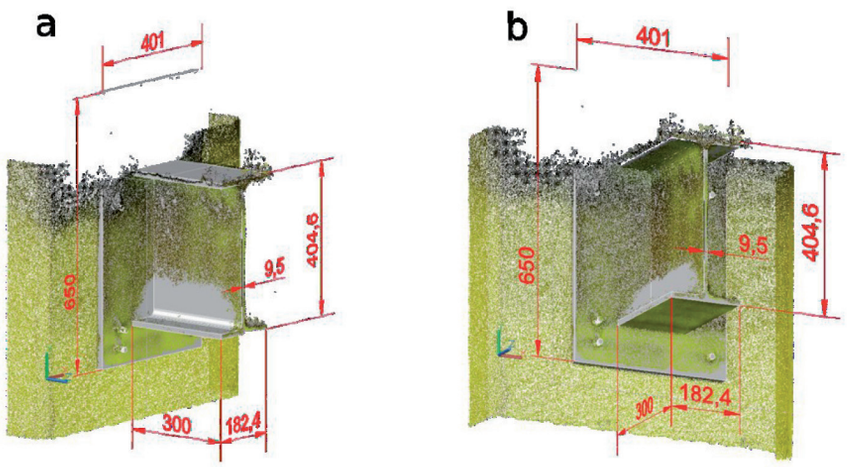


Fig. 5: Modelo CAD con medidas inferidas sobre nube de puntos

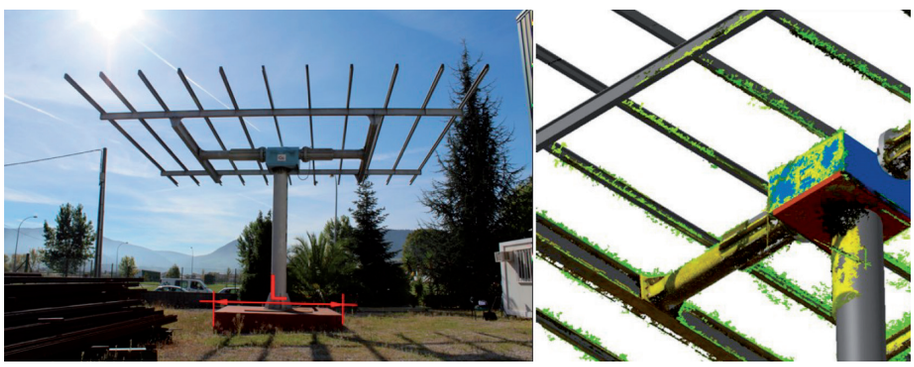


Fig. 6a: Fotografía de la estructura del panel solar. Fig. 6b: Modelado 3D a partir de la nube de puntos

una estimación de la garganta del cordón de soldadura entre el perfil y la placa de testa (11 mm en la zona de las alas). La ménsula resultante es la mostrada en la Figura 5. Todo el proceso seguido, realizado por un usuario experto con medios informáticos habituales en cualquier oficina técnica puede suponer unos 10 minutos para la toma de fotografías (sin incluir desplazamientos), 40 minutos para el procesado y 20 minutos para la reconstrucción CAD.

Con toda la información recopilada en los pasos previos, se está en condiciones de abordar una última fase que incluya la elaboración de planos o la realización de cálculos sobre la resistencia de dicho elemento estructural. Para esto, además de las dimensiones geométricas, sería necesario conocer las propiedades de los materiales (acero y hormigón en este caso), las cuales deberán ser inferidas mediante otras técnicas (ultrasonidos u otros ensayos sobre probetas).

Estos requerimientos de cálculo podrían ser necesarios ante casos de estructuras envejecidas o dañadas o ante situaciones de cambio de uso de la estructura original (por ejemplo, ante el caso de cambiar el puente grúa por otro de mayor tonelaje).

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

La metodología ilustrada con el ejemplo de la ménsula visto en el apartado anterior se puede aplicar a estructuras más complejas. En la Figura 6 se muestra el esqueleto de un seguidor solar. Tras procesar múltiples fotografías y con la única referencia dimensional de la longitud del lado de la zapata (L) se pudieron identificar las dimensiones de los distintos perfiles y levantar el correspondiente modelo sólido sobre el cual poder hacer simulaciones del movimiento siguiendo al sol así como cálculos sobre, por ejemplo, la vulnerabilidad de este seguidor ante vientos de una determinada intensidad o los modos propios de vibración una vez se instalen los correspondientes paneles.

5. CONCLUSIONES

Se ha visto cómo mediante una cámara digital convencional y múltiples fotografías procesadas mediante ciertos algoritmos se puede conseguir el modelo geométrico de determinadas estructuras industriales con un aceptable nivel de precisión. Dicha precisión además puede ser mejorada una vez se han identificado determinados componentes estructurales estandarizados. Esta metodología posibilita, a bajo coste, labores de ingeniería inversa como la generación de planos o comprobación resistente ante determinadas cargas o bajo situaciones de cambio de uso.

Por todo ello, el procedimiento presenta un valor añadido al grupo de trabajo de los autores, quienes están reconstruyendo virtualmente estructuras de patrimonio industrial así como ciertas infraestructuras, valiéndose de los sucesivos re-escalados para conseguir la precisión suficiente para fines ingenieriles.

Con la proliferación de nuevas tecnologías, como cámaras cada vez de mayor calidad y embarcadas en drones geoposicionados, las posibilidades de esta metodología son muy prometedoras.

PARA SABER MÁS

[1] Beraldin J-A. "Integration of laser scanning and close-range photogrammetry – The last decade and beyond". International Archives of t he Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, No B7, p.972-983. (2004).

[2] Koelman HJ, "Application of a photogrammetry-based system to measure and re-engineer ship hulls and ship parts: An industrial practices-based report". Computer-Aided Design, Vol.42 p731–743. (2010).

[3] Martínez, S, Ortiz, J, Gil ML. "Recording complex structures using close range photogrammetry: the cathedral of Santiago de Compostela". The Photogrammetric Record. Vol.28 p.375–395 (2013).

[4] Rodríguez P, Rodríguez M, Ramos L et al. "3D reconstruction methods and quality assessment for visual inspection of welds". Automation in Construction. Vol. 79 p.49-58. (2015).

[5] Ciocca L,Scotti R. "CAD-CAM generated ear cast by means of a laser scanner and rapid prototyping machine". Journal of Prosthetic Dentistry,Vol.92 p.591-595. (2014).

[6] Kortaberria G, Olarra A, Tellaeche A, et al. "Close Range Photogrammetry for Direct Multiple Feature Positioning Measurement without Targets". Journal of Sensors. Vol.16, p.930-943, (2017).

[7] Richard H, Andrew Z. View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN: 978-0-521-54051-3. (2007).

[8] Demirhan A, Guler I, "Combining stationary wavelet transform and self-organizing maps for brain MR image segmentation", Engineering Applications of Articial Intelligence Vol.24, p.358-367, (2011).

[9] Fishler M, Bolles R. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". Graphics and Image Processing. Vol.78, 138–156 (1981).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas 3DINTELLIGENCE y UPINTELLIGENCE por financiar parcialmente este proyecto y por la ayuda recibida en la parte de visión artificial. Asimismo se agradece la colaboración y disponibilidad del Centro Tecnológico CARTIF y de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.