

# RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL DE OBJETOS CON TÉCNICAS DE VISIÓN Y LUZ ESTRUCTURADA.

P. Gil, E. Manchón, F. Torres, J. Pomares, F. G. Ortiz  
Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial.  
Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal.  
Universidad de Alicante.  
Crta. San Vicente s/n. A.P. de correos 99.  
pgil@disc.ua.es

## Resumen

*En la actualidad, los sistemas de reconstrucción, como los escáneres tridimensionales, están adquiriendo una especial importancia, sobre todo desde el punto de vista del modelado de objetos, en muchos campos y aplicaciones: procesos productivos, prótesis en medicina o incluso en el desarrollo de entornos virtuales y/o elaboración de efectos especiales en el cine.*

*En este artículo se presenta un sistema de reconstrucción de objetos tridimensionales de medianas dimensiones y uso cotidiano. El sistema de reconstrucción que aquí se trata es de tipo educativo-docente y se caracteriza por su sencillez de construcción y por su bajo coste.*

*Con el se pretende, por un lado proporcionar una base para posteriores investigaciones y estudios en campos de visión tridimensional y reconstrucción. Y por otro, desarrollar el principio de una serie de herramientas didácticas que permitan entender conceptos de visión, reconstrucción y transformaciones espaciales.*

**Palabras Clave:** Reconstrucción tridimensional, escáner 3D, digitalizador, triangulación activa.

## 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los sistemas de adquisición de datos por computador han adquirido especial importancia debido a los avances que se han producido desde el punto de vista computacional y gracias a la integración y desarrollo de nuevos sensores. Frutos de estos avances tecnológicos se ha producido, primero, el desarrollo de escáneres 2D que permiten digitalizar objetos planos y después, la aparición de escáneres 3D que permiten digitalizar objetos con volumen [5][7][8].

Aunque los escáneres 3D comienzan a estar bastante extendidos en la actualidad, y son usados en muchos sectores [5][7][8]: industria, medicina, escultura, etc.; a diferencia de los escáneres 2D, el alto coste de éstos impide el uso con fines educativos, formativos o simplemente cotidianos.

Los escáneres 3D son herramientas de gran utilidad en la industria. El uso de estos permite abaratar el proceso productivo, mejorando la calidad de éste mediante la integración en sistemas CAD-CAM. Además, son usados para obtener objetos virtuales idénticos al real en geometría que permita simular los procesos de diseño y fabricación en los que intervendría el objeto real.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

A la hora de abordar el diseño de una arquitectura para construir un escáner 3D que permita reconstruir la geometría de un conjunto de objetos, cabe tener en cuenta una serie de aspectos que hacen referencia, principalmente, al tipo de objetos que se quiere digitalizar, tamaño de estos, condiciones de trabajo y grado de precisión que se necesita de acuerdo al uso que vaya a dársele, así como costo de los componentes que lo integran.

### 2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA.

En cuanto a la arquitectura del sistema, existe una gran diversidad de tipos de escáneres en el mercado ya sean comerciales o de investigación.



Figura 1: Sistema cámara-láser.

Así, se pueden comentar la existencia de escáneres que emplean métodos láser, con o sin composición de espejos, sistemas de cámaras estereoscópicas, con plataformas móviles de más o menos grados de libertad de movimiento para captar mayor número de puntos de vista, etc.

En la Figura 1 se muestra el sistema de visión activa empleado, formado por una cámara CCD y por un láser óptico como fuente de luz para realizar el proceso de digitalización de los objetos.

Las características de ambos elementos son las siguientes:

- Sistema de adquisición de imágenes: La adquisición de imágenes se realiza mediante la utilización de una cámara blanco y negro SONY XC-75CE. Como tarjeta de adquisición y procesamiento se ha usado una MATROX CORONA con 4Mb de memoria. El tamaño de imagen con el que se ha trabajado es de 752x582 (horizontal y vertical) y sistema de digitalización CCIR.
- Proyector láser: El láser óptico utilizado proyecta un patrón de luz en forma de plano. La deformación de este patrón de luz cuando incide sobre la superficie del objeto se utiliza para calcular, mediante un proceso de triangulación, la profundidad de los puntos en la superficie del objeto a reconstruir. La longitud de onda del láser usado es de 670 nm y la mínima anchura de línea del patrón emitido es de 150  $\mu\text{m}$ .
- Mesa giratoria: Para realizar el barrido de la superficie del objeto que permita la obtención de la geometría de éste, se usa una mesa giratoria ESHED ROBOTEC. Ésta consta de un motor paso a paso, lo que supone poder rotar la mesa 360° y tener un control del posicionamiento del objeto situado sobre ella. El diámetro de la mesa es de 350 mm. Esta mesa es manejada vía software mediante instrucciones a una unidad controladora de la misma compañía.

El sistema de cámara y láser se ha situado sobre un trípode en forma de T regulable en altura, además de permitir regular la distancia que separa cámara CCD y proyector láser (Figura 1).

La arquitectura del sistema empleada es abierta y permite variar o reconfigurar cada uno de los elementos que se emplean en la célula digitalizadora. Tanto los sistemas de adquisición, cámara y tarjeta de procesamiento, como el proyector láser, así como la mesa giratoria están interconectados por un PC y un software desarrollado que se encarga de comunicar, gestionar y ejecutar las ordenes y comandos que

hacen funcionar cada una de las partes de la célula de modo automático (Figura 2).

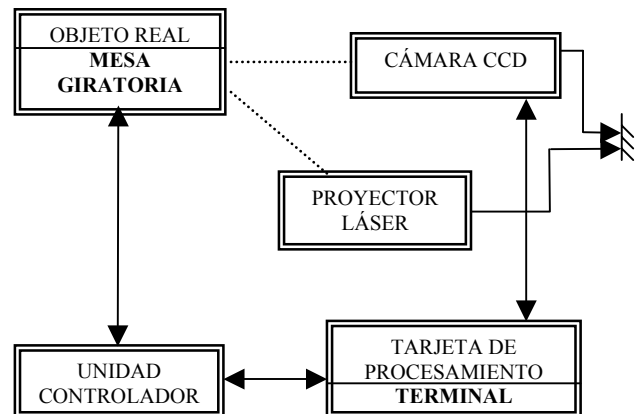


Figura 2: Diagrama de bloques de elementos que constituyen el sistema e interconexiones entre éstos.

## 2.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN.

Cuando se trata de calcular coordenadas espaciales, a partir de datos extraídos de la captura de imágenes mediante cámaras de video, se hace imprescindible obtenerlas con la mayor exactitud posible. Sin embargo, el propio proceso de formación (modelo pinhole) y adquisición de imágenes limitan y alteran esos datos, haciendo que los datos reales varíen sustancialmente con respecto a los ideales. Esta diferencia entre lo que se obtiene y lo que se debería obtener, obliga a obtener un modelo del sistema de formación y adquisición de la imagen. Es el proceso de calibración, el método empleado que da a conocer que variaciones se producen como consecuencia de la formación y adquisición de imágenes con una determinada cámara y tarjeta de adquisición, según las condiciones de utilización de ambas.

La construcción de cualquier sistema de reconstrucción necesita, por lo tanto, utilizar un proceso previo de calibración. En este caso, el proceso de calibración se ha usado para obtener los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara; de modo que a partir de los datos extraídos se sea capaz de conocer información necesaria para el cálculo de posiciones en el proceso posterior de triangulación.

El método de calibración usado es una variante del método de Roger Y. Tsai [9] y está basado en los estudios realizados por Zhang [10] para el cálculo de parámetros extrínsecos (rotaciones y traslaciones) a partir de homografías; y los estudios realizados por Heikkilä [3] en el cálculo de los parámetros intrínsecos y de las correcciones a partir de las distorsiones de las lentes, principalmente.

El uso de esta metodología de calibración ha permitido conocer con exactitud los siguientes parámetros:

- Intrínsecos:
  - Distorsión ( $k_i$ ): los parámetros que modelan la distorsión de las lentes (tangenciales y radiales) permiten corregir valores de coordenadas píxel en la imagen.
  - Focal ( $f$ ) y factor de escala: proporciona información del escalado, es decir a cuántos milímetros equivale un píxel en la imagen.
  - Centro óptico: punto por el que pasa el eje principal de proyección.
- Extrínsecos:
  - Orientación: proporcionará el punto de vista de la cámara con respecto al objeto del que se capturan las imágenes y del que se pretende realizar la reconstrucción.
  - Traslación: a partir de la cual se obtiene datos de distancia entre objeto y cámara.

### 2.3 PROCESO DE TRIANGULACIÓN ACTIVA CON LÁSER.

Una vez, se conoce con exactitud la arquitectura del sistema y los elementos que modelan el sistema (distancias, orientaciones, escalados, etc.), se hace necesario el cálculo de coordenadas espaciales del objeto a digitalizar. Las coordenadas espaciales del objeto determinan la geometría de éste.

El método utilizado para calcular profundidades  $D$ , es decir, las distancias entre los puntos de la superficie del objeto  $P$  y el sistema de cámara-láser, es el de triangulación [4]. El proceso de triangulación con láser consiste en calcular la profundidad  $D$  a la que se encuentra cada uno de los puntos de la superficie del objeto, mediante el análisis y procesamiento de un conjunto de imágenes. Para ello se hace incidir el haz de un láser sobre la superficie del objeto y se adquieren un conjunto de imágenes del objeto con el haz reflejando sobre éste.

El principio matemático de este proceso es el siguiente. Dados dos puntos  $C$  y  $L$  de los que se conoce la distancia que los separa  $B$ , es posible conocer la posición exacta que ocupa un punto  $O$  respecto a  $C$  y  $L$ , si además se conocen que ángulos  $(\alpha, \beta)$  forman el punto  $O$  con respecto a la línea base que une  $C$  y  $L$ . Si se entiende como  $C$  la posición de la cámara,  $L$  la posición del láser y  $O$  la posición que se quiere estimar del objeto visible desde  $C$  y  $L$ . Y se denotan y conocen los puntos de vista de la cámara y láser respecto al objeto como los ángulos  $(\alpha, \beta)$ , el esquema de triangulación queda como se muestra en la figura 3.

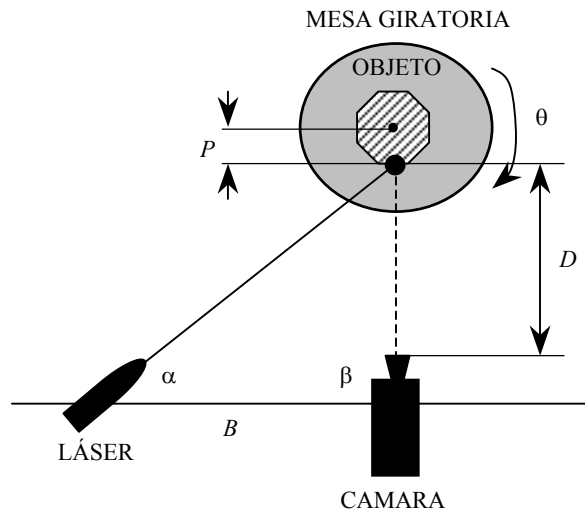


Figura 3: Proceso de triangulación.

## 3 PROCESO DE DIGITALIZACIÓN.

El proceso digitalización de objetos tridimensionales consta de tres fases. La primera de ellas consiste en obtener el perfil del plano láser, la segunda la obtención de las coordenadas de los puntos situados sobre la superficie del objeto que forman parte del perfil del plano-láser y en tercer lugar, estos puntos se ajustan mediante la utilización de un método de modelado.

### 3.1 PREPROCESADO Y OBTENCIÓN DEL PERFIL DEL PLANO-LÁSER.

Para obtener la geometría de un objeto se hace girar la mesa  $360^\circ$ , el número de movimientos de giro que se hagan de la mesa dependerá del número de imágenes que se quieran capturar del objeto. A su vez, el número de imágenes dependerá del nivel de detalle que se quiera alcanzar en la reconstrucción.

De este modo, es posible ajustar el ángulo de giro  $\theta$  de cada movimiento  $[1^\circ, 360^\circ]$ . Entre giro y giro se realiza la adquisición de la imagen del objeto sobre el que incide el plano láser que queda deformado por la tridimensionalidad del objeto sobre la mesa, obteniéndose un determinado perfil. La captura y procesamiento de las imágenes se ha realizado mediante librerías MIL (Matrox Imaging Library).

Terminada la captura de la imagen, en la que se observa un determinado perfil, se hace necesario el filtrado de ésta por dos motivos. El primero de ellos para mejorar la calidad del perfil y el segundo para eliminar todas aquellas características que aparecen como consecuencia de reflejos debidos al tipo de

material con el que se ha construido el objeto, luces no deseadas, etc.

El proceso, básicamente, consiste en umbralizar la imagen de modo que se elimine toda aquella información que no se desea. Interesa quedarse únicamente con el perfil que se forma cuando el plano láser incide sobre el objeto. Después de detectar y aislar el perfil con el proceso de umbralización se aplican varios filtros morfológicos (apertura, cierre, etc.), para conseguir adelgazar el patrón en aquellas zonas donde se han producido reflejos, y reconstruir el patrón de luz en aquellas otras zonas donde parece faltar información del perfil. A este proceso se le ha llamado proceso de adelgazamiento del patrón de luz.

Una vez se ha mejorado la calidad del perfil se hace, indispensable, un proceso de eliminación de todos aquellos puntos de láser que pueden distorsionar lo que sería la superficie del objeto una vez reconstruido, y que son consecuencia de reflejos principalmente. Así, se eliminan todos los puntos del perfil del plano láser que no cumplan unos ciertos criterios de vecindad.

### 3.2 OBTENCIÓN DE LA GEOMETRÍA.

Terminado el proceso de preprocesado y filtrado de la imagen del perfil, se hace necesario la obtención de las coordenadas píxel de cada punto que forma el perfil. Los puntos del perfil (objeto) se distinguen del resto de la imagen (fondo) porque después del preprocesado su valor de luminancia es de 255. El número de puntos que constituyen el perfil depende del nivel de detalle y resolución de escaneado que se utilice. Por lo tanto, existen dos parámetros que regulan la resolución de la digitalización. Uno de ellos es el número de perfiles obtenidos y viene dado por el número de giros de la mesa para los cuales se toman imágenes del objeto; y el otro es el número de puntos detectados y procesados para cada perfil.

Las coordenadas píxel ( $u',v'$ ) de los puntos significativos del perfil vienen dadas respecto a la esquina superior izquierda de la imagen y se trasladan, obteniéndose respecto al centro ( $C_u, C_v$ ) de ésta, teniendo en cuenta los parámetros intrínsecos obtenidos en el proceso de calibración (centro y distorsiones). De este modo se obtienen unas nuevas coordenadas píxel ( $u,v$ ).

$$\begin{aligned} u &= \left[ 1 + k_1(u'^2 + v'^2)^2 + k_2(u'^2 + v'^2)^4 \right] \cdot u' \\ &+ 2k_3 \cdot u' \cdot v' + k_4 \cdot (u'^2 + v'^2 + 2u'^2) + C_u \\ v &= \left[ 1 + k_1(u'^2 + v'^2)^2 + k_2(u'^2 + v'^2)^4 \right] \cdot v' \\ &+ k_3 \cdot (u'^2 + v'^2 + 2v'^2) + 2k_4 \cdot u' \cdot v' + C_v \end{aligned} \quad (1)$$

El siguiente paso consiste en calcular las coordenadas espaciales ( $X,Y,Z$ ) correspondientes a las coordenadas píxel ( $u,v$ ) de los puntos del perfil calculadas anteriormente. El método utilizado es el de la triangulación activa (Figura 3) y la metodología empleada pasa por realizar diversas transformaciones de coordenadas. La primera de las transformaciones consiste en pasar de coordenadas píxel ( $u,v$ ) a coordenadas espaciales respecto al sistema de referencia situado en la cámara ( $X_c, Y_c, Z_c$ ). Si se sitúa la cámara de video de forma que el ángulo  $\beta$  sea de 90 grados, la transformación viene dada por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{B}{f \cdot \tan^{-1} \alpha - u} \cdot u \\ Y_c &= \frac{B}{f \cdot \tan^{-1} \alpha - u} \cdot v \\ Z_c &= \frac{B}{f \cdot \tan^{-1} \alpha - u} \cdot f \end{aligned} \quad (2)$$

Después de realizar la triangulación para obtener estas ecuaciones, que transforman las coordenadas píxel respecto al sistema de coordenadas de la cámara ( $X_c, Y_c, Z_c$ ), la siguiente operación que se realiza es transformar estas coordenadas referidas a la cámara, al sistema de referencia situado en el centro de la mesa ( $X_M, Y_M, Z_M$ ). De este modo se obtiene una reconstrucción realista con posiciones reales según las dimensiones del objeto que se está digitalizando.

Para pasar del sistema de coordenadas de la cámara al sistema de coordenadas de la mesa se realizan una serie de transformaciones (rotaciones y traslaciones) que determinan una cierta matriz de transformación homogénea. De este modo para pasar de un sistema de coordenadas a otro, basta con multiplicar por esa matriz de transformación homogénea.

Una vez que se han obtenido las nuevas coordenadas de los puntos del perfil referidos al sistema de coordenadas centrada en la mesa, hay que deshacer la transformación de rotación que ha sufrido la mesa. De este modo, cada uno de los puntos de los perfiles obtenidos que conforman el objeto digitalizado, se situará espacialmente en el lugar adecuado. Esta operación se realiza como una rotación sobre el eje  $Y_M$  del ángulo acumulado y se realiza en sentido inverso al que rota la mesa. Así los perfiles obtenidos en los sucesivos giros de la mesa se van contrarrotando en sentido opuesto al giro de ésta, de forma que se obtienen todos los perfiles en el lugar que les corresponde en la superficie del objeto.

### 3.3 MÉTODO DE MODELADO Y AJUSTE.

La salida del digitalizador es un fichero de texto que contiene las coordenadas de los puntos tridimensionales de cada uno de los perfiles obtenidos, en cada uno de los giros de la mesa. Ese fichero de texto se utiliza como entrada del módulo de modelado y ajuste que se encarga de proporcionar una reconstrucción gráfica. Pero antes de usar ese conjunto de puntos, en el proceso de modelado, se realiza un proceso de mejora de la calidad de esos puntos. Este proceso consiste básicamente en desechar aquellos puntos que parecen a priori no pertenecer al objeto (puntos de ruido). Por lo tanto, se eliminan todos aquellos puntos tridimensionales obtenidos, cuyas coordenadas se salen de un cierto intervalo que determina la región de trabajo y volumen de los objetos a digitalizar. También se eliminan todos aquellos puntos que provocan discontinuidades en la superficie, mediante el cálculo de diferencias cuadráticas en el entorno de vecindad de dichos puntos.

Existen numerosas técnicas implementadas y disponibles, bien comercialmente o mediante programas y librerías de dominio público que permiten el ajuste de puntos y su modelado. Entre ellas cabría destacar dos: la triangulación de Delaunay [1][2] y las técnicas de Marching Cubes [6].

La triangulación de Delaunay consiste en un método matemático que permite medir distancias y superficies, además de ser muy útil para el cálculo de estructuras geométricas. Así, a partir de una nube de puntos almacenada en fichero se busca obtener una triangulación de su cierre convexo, de este modo se obtiene un conjunto de tetraedros encadenados cuyos vértices son esos mismos puntos.

La triangulación de Marching Cubes es otro algoritmo que permite renderizar superficies a partir de datos volumétricos. El método consiste en dividir la nube de puntos almacenada en fichero en un conjunto de regiones volumétricas llamadas voxel. Un voxel es una región volumétrica formada a partir de los valores que forman una serie de puntos (por ejemplo ocho puntos tomados como esquinas forman un cubo). Si unos o más puntos del voxel tienen valores menores que un valor específico, y uno o más tiene valores mayores que este valor, se sabe que el voxel contribuye como componente de la superficie. Determinándose qué bordes del cubo son intersecados por la superficie, se puede obtener los retículos triangulares que dividen al cubo entre las regiones dentro de la superficie y regiones fuera. Conectando los retículos de todos los cubos en el límite de la superficie, se consigue una representación de la superficie del objeto.

Tanto el proceso de modelado con la triangulación de Delaunay 3D como con la triangulación de Marching Cubes, se ha llevado a cabo con las librerías VTK 3.2, que están implementados en C++ utilizando las MFC.

## 4 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Se ha presentado un sistema de reconstrucción basado en la construcción de un escáner tridimensional de bajo costo y fácil manejo. El digitalizador construido se ha probado con una finalidad didáctica en varios objetos; todos ellos con diferente geometría y elaborados a base de diferentes materiales. Se ha constatado que la calidad de la reconstrucción depende en gran medida tanto de las condiciones de luz existentes como del material de los objetos. Hay materiales que reflejan gran cantidad de luz, otros que absorben gran parte del haz; incluso otros que esparcen o distorsionan el haz por su superficie debido a la rugosidad de ésta. A continuación, se presentan un par de ejemplos de objetos digitalizados. El primero de ellos, es una vasija decorativa (Figura 4) cuyo proceso de reconstrucción se presenta desde dos puntos de vista distintos en la figura 6. Y el segundo una escultura (Figura 5) de diferente material y geometría cuya reconstrucción se observa en la figura 7.

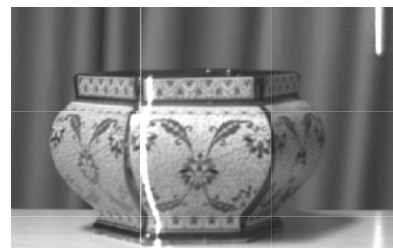


Figura 4: Vasija en proceso de tridimensional.

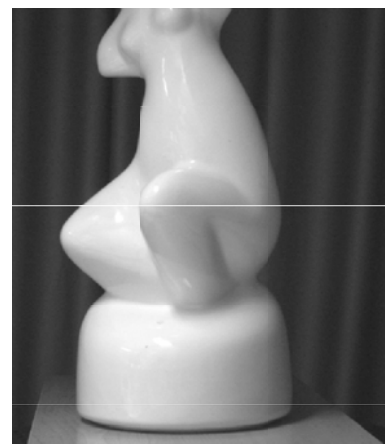


Figura 5: Escultura a digitalizar.

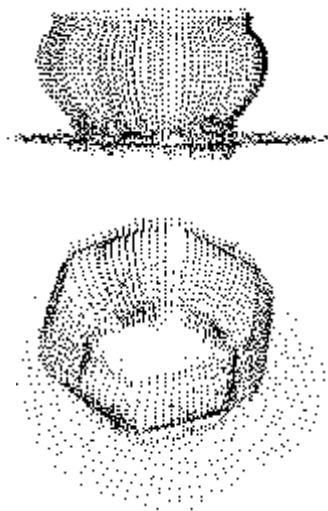


Figura 6: Reconstrucción tridimensional de la vasija.

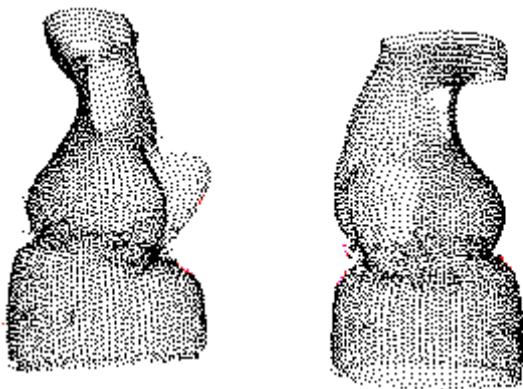


Figura 7: Reconstrucción tridimensional de la escultura.

Se puede concluir diciendo que se obtienen mejores resultados de reconstrucción dependiendo del grado de opacidad del objeto, suavidad de la superficie y color de ésta. Así, los mejores resultados se obtienen para objetos totalmente opacos, de colores claros y superficies suaves. Además, se puede resaltar que con un sistema de reconstrucción económico y sencillo basado en métodos de triangulación, como éste, se pueden obtener niveles de precisión del orden del milímetro. Los resultados obtenidos son más precisos cuanto más cerca está el objeto de la cámara, siempre que la distancia no suponga una alteración en sus parámetros de calibración. Y las principales dificultades aparecen en objetos con pequeñas y pronunciadas concavidades y agujeros. Esto supone importantes discontinuidades en los ficheros tridimensionales de puntos, lo cual dificulta el proceso de filtrado de datos erróneos y puede suponer una mala reconstrucción del objeto.

## Referencias

- [1] Borouchaki H., S.H. Lo, (1995). "Fast Delaunay triangulation in three dimensions", *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Elsevier, Vol 128, pp.153-167.
- [2] Fang T-P., Piegl L.A., (1995). "Delaunay Triangulation in Three Dimensions". *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 15, N. 5, pp 62-69.
- [3] Heikkilä J., Silven O., (1997) "A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction". *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Proceedings CVPR'97, pp 1106-1112.
- [4] Klette R., Schlüns K., Koschan A., (1998). *Computer Vision: Three-dimensional data from images*, Springer, Singapore.
- [5] Levoy, Pulli, Curless, Rusinkiewicz, Koller, Pereira, Ginzton, Anderson, Davis, Ginsberg, Shade, Fulk (2000). "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues". *Conference on Computer Graphics*. Proceedings SIGGRAPH'00, pp 131-144.
- [6] Lorensen, W.E., Cline, H.E., (1987) "Marching Cubes: a high resolution 3D surface reconstruction algorithm," *Conference on Computer Graphics*, Proceedings SIGGRAPH'87, Vol. 21, No. 4, pp 163-169.
- [7] Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P., Scopigno R., (2001). "A low cost 3D scanner based on structured light". *Proceedings EUROGRAPHICS '01*. Vol 20, No. 3, pp 299-308.
- [8] Serra J., Varona X., López A., Roca X., Villanueva J., (2001). "P3: a three-dimensional digitizer prototype". *Proceedings, IX Spanish Symposium on Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 1, pp 315-322.
- [9] Tsai R.Y., (1987) "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", *IEEE J. Robotics Automat.*, pages 323-344, Vol. RA-3, No. 4 1987.
- [10] Zhang Z., (2000) "A flexible new technique for camera calibration". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(11), pp 1330-1334.