

FUSIÓN DE DATOS PARA RECONSTRUCCIÓN 3D MEDIANTE UN SISTEMA HÍBRIDO DE VISIÓN

C. Torre Ferrero, J. R. Llata García, A. González Saro, E. González Sarabia
Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática
E. T. S. de Ingenieros Industriales y Telecomunicación, Universidad de Cantabria
Avda. Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria.
[carlos, llata, alvarogs, esther] @teisa.unican.es

Resumen

Este artículo presenta un sistema híbrido de visión, el cual combina un sistema estéreo convencional con un sistema de triangulación activa. Utilizando dos cámaras CCD y un proyector láser, que es desplazado sobre la escena por medio de una guía lineal, realizamos una reconstrucción tridimensional de los objetos presentes.

El mapa de profundidad obtenido va a constar de tres conjuntos de datos: por un lado el formado por puntos obtenidos mediante correspondencia estéreo, y por otro lado, los dos conjuntos obtenidos mediante triangulación activa: uno correspondiente a la cámara izquierda y otro a la cámara derecha.

Por consiguiente, va a haber un cierto número de puntos 3D que pertenezcan a los tres conjuntos citados. Esta información redundante nos va a permitir atenuar los errores en la reconstrucción ocasionados por errores de calibración y conseguir una fusión más precisa de los datos 3D obtenidos.

Palabras Clave: sistema híbrido, visión estéreo, triangulación activa, calibración, reconstrucción, algoritmo ICP.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés en la industria por sistemas de visión capaces de obtener una reconstrucción tridimensional de las piezas fabricadas, ya sea con el objetivo de comprobar si las dimensiones de éstas son las correctas, realizar labores de inspección para la detección de posibles defectos, o asistir a los robots industriales en tareas de manipulación.

El gran desafío de este tipo de sistemas de visión se encuentra en poder combinar la obtención de una reconstrucción 3D que satisfaga los requerimientos de fidelidad, precisión y rapidez que demanda la industria, con aquellos condicionantes económicos que lo hagan rentable y competitivo.

De este modo, han surgido en los últimos años diferentes propuestas que intentan, con mayor o

menor éxito, obtener una solución que establezca un compromiso entre los requisitos exigidos. Con este mismo objetivo, nosotros proponemos un sistema híbrido de visión cuya configuración describimos a continuación.

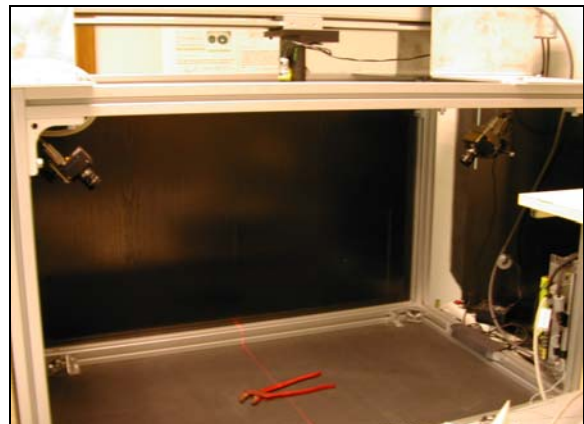


Figura 1 : Configuración utilizada

2 SISTEMA HÍBRIDO DE VISIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN

Nuestro sistema va a combinar una configuración estéreo con un sistema de triangulación activa. En la figura 1 podemos observar la disposición de los elementos utilizados : dos cámaras CCD y un proyector láser.

Las dos cámaras están ancladas a una estructura de aluminio mediante sendos soportes que permiten colocarlas en la posición deseada. Asimismo, una guía lineal, controlada por computador, nos facilita el desplazamiento de la línea láser sobre la escena.

La adquisición de las imágenes y el movimiento de la guía están sincronizados mediante una señal de comunicación entre el *frame-grabber* de las cámaras y el controlador de la guía.

Como se puede observar en la figura 2 las cámaras están separadas por una distancia b , de manera que se generará entre sus respectivas imágenes la disparidad necesaria para poder reconstruir esos puntos tal y

como se haría en un sistema estéreo. Por otro lado, al utilizar un plano láser que barre la escena, puede emplearse el conocimiento de la posición y orientación de éste para reconstruir aquellos puntos que son vistos por una u otra cámara.

De esta manera, se obtendrán puntos 3D mediante dos métodos de reconstrucción : triangulación estéreo y triangulación activa (T.A.), que serán descritos en el apartado 2.3. Los tres conjuntos de puntos (estéreo, T.A. con cámara izda. y T.A. con cámara dcha.) van a estar referidos al mismo sistema de coordenadas, tal y como se muestra en la figura 2.

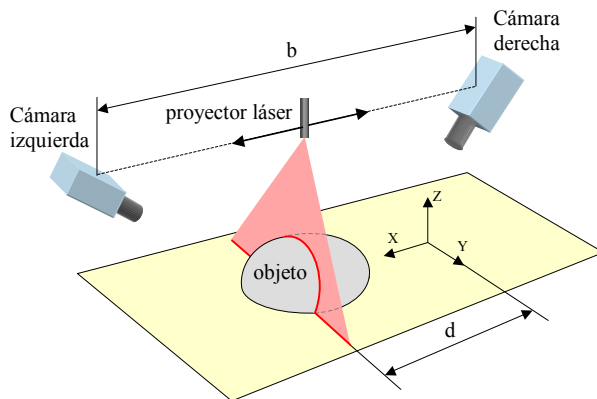


Figura 2 : Sistema híbrido de visión

2.2 CALIBRACIÓN

Para poder recuperar información tridimensional será necesario realizar una calibración completa del sistema. Puesto que las cámaras son elementos fijos mientras que el plano láser es móvil, vamos a tratarlos de forma separada aunque sin descuidar la consistencia que debe haber entre ambos resultados. Para ello vamos a utilizar unas plantillas que nos van a servir para calibrar tanto el láser como las cámaras (figuras 3 y 4).

La calibración de cada una de las cámaras va a consistir en determinar su matriz de proyección asociada $M(3 \times 4)$, tal que:

$$M = [K \cdot R \mid -K \cdot R \cdot t] \quad (1)$$

donde K es la matriz de parámetros intrínsecos, R es la matriz de rotación y t es el vector de traslación entre el sistema de cámara y el sistema de referencia.

El software que hemos desarrollado permite realizar esta calibración de manera casi automática, además de considerar las distorsiones que pueda introducir la óptica. Para los resultados que presentamos en este artículo se utilizó una óptica de 25 mm que, como comprobamos, poseía unos coeficientes de distorsión radial y tangencial prácticamente despreciables.

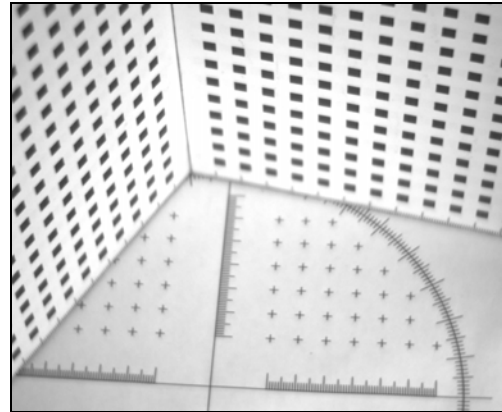


Figura 3 : Plantillas utilizadas para la calibración de las cámaras.

La calibración del láser se va a realizar de manera que su plano sea perpendicular al plano XY. Para ello vamos a utilizar una cabeza proyectora de líneas cruzadas para poder ajustar y alinear la proyección con la plantilla. Estas líneas de ajuste son las que aparecen destacadas en la figura 4. Por otra parte, las líneas cruzadas van a ser coincidentes con los ejes X e Y del sistema de coordenadas de referencia y, por lo tanto, su intersección lo va a ser también con el origen.

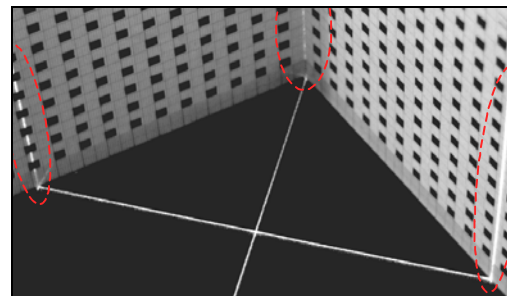


Figura 4 : Detalle de la calibración del láser

2.3 CÁLCULO DE LAS COORDENADAS 3D

A continuación describimos los dos métodos que hemos seguido para la reconstrucción de los puntos de la escena. En ambos casos vamos a utilizar el modelo de cámara 'pin-hole'.

La obtención de puntos correspondientes se realiza mediante líneas epipolares, para lo cual se han colocado las cámaras de manera que dichas líneas sean prácticamente perpendiculares en la imagen a la banda láser.

2.3.1 Sistema estéreo

Una vez realizada la calibración del sistema, vamos a tener una matriz M_i asociada a la cámara izquierda y una matriz M_d para la cámara derecha. De este modo,

dato un punto P del espacio expresado en coordenadas homogéneas (\tilde{P}), sus proyecciones en ambos planos de imagen, expresadas también en coordenadas homogéneas, van a determinarse de la siguiente forma (figura 5):

$$\begin{cases} \tilde{p}_i = M_i \cdot \tilde{P} \\ \tilde{p}_d = M_d \cdot \tilde{P} \end{cases} \quad (2)$$

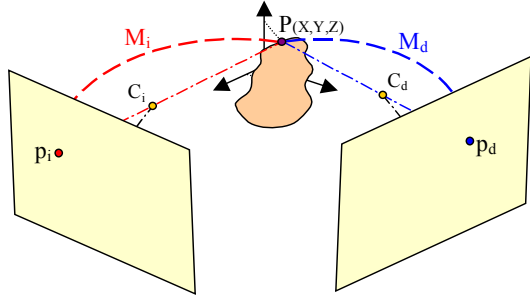


Figura 5: Configuración estereó

Si consideramos las siguientes expresiones para cada una de las variables de la ecuación (2) :

$$\tilde{p}_i = (\tilde{u}_i, \tilde{v}_i, \tilde{w}_i) \quad (3)$$

$$\tilde{p}_d = (\tilde{u}_d, \tilde{v}_d, \tilde{w}_d) \quad (4)$$

$$M_i = [m_{1i} \quad m_{2i} \quad m_{3i}]^T \quad (5)$$

$$M_d = [m_{1d} \quad m_{2d} \quad m_{3d}]^T \quad (6)$$

donde m_{ki} y m_{kd} son las filas k de la matriz M de la cámara izquierda y de la cámara derecha respectivamente, entonces podemos expresar las transformaciones anteriores de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \\ \tilde{w}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1i}^T \\ m_{2i}^T \\ m_{3i}^T \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} \\ \begin{bmatrix} \tilde{u}_d \\ \tilde{v}_d \\ \tilde{w}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1d}^T \\ m_{2d}^T \\ m_{3d}^T \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} \end{cases} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que las coordenadas píxel que conocemos (u_i, v_i) van a estar afectadas por el escalado α de las coordenadas homogéneas, entonces:

$$(\tilde{u}_i, \tilde{v}_i, \tilde{w}_i) = (\alpha \cdot u_i, \alpha \cdot v_i, \alpha) \quad (8)$$

Por consiguiente, las tres ecuaciones referentes al plano imagen izquierdo quedarán de la forma:

$$\begin{cases} \alpha \cdot u_i = m_{1i}^T \cdot \tilde{P} \\ \alpha \cdot v_i = m_{2i}^T \cdot \tilde{P} \\ \alpha = m_{3i}^T \cdot \tilde{P} \end{cases} \quad (9)$$

Sustituyendo en las 2 primeras ecuaciones de (9) la tercera de ellas, obtenemos:

$$\begin{cases} m_{3i}^T \cdot \tilde{P} \cdot u_i = m_{1i}^T \cdot \tilde{P} \Rightarrow (u_i \cdot m_{3i}^T - m_{1i}^T) \cdot \tilde{P} = 0 \\ m_{3i}^T \cdot \tilde{P} \cdot v_i = m_{2i}^T \cdot \tilde{P} \Rightarrow (v_i \cdot m_{3i}^T - m_{2i}^T) \cdot \tilde{P} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Extrapolando al plano imagen derecho las ecuaciones halladas para el plano imagen izquierdo, resulta:

$$\begin{cases} m_{3d}^T \cdot \tilde{P} \cdot u_d = m_{1d}^T \cdot \tilde{P} \Rightarrow (u_d \cdot m_{3d}^T - m_{1d}^T) \cdot \tilde{P} = 0 \\ m_{3d}^T \cdot \tilde{P} \cdot v_d = m_{2d}^T \cdot \tilde{P} \Rightarrow (v_d \cdot m_{3d}^T - m_{2d}^T) \cdot \tilde{P} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Poniendo las cuatro ecuaciones en forma matricial obtenemos:

$$\begin{bmatrix} u_i \cdot m_{3i}^T - m_{1i}^T \\ v_i \cdot m_{3i}^T - m_{2i}^T \\ u_d \cdot m_{3d}^T - m_{1d}^T \\ v_d \cdot m_{3d}^T - m_{2d}^T \end{bmatrix} \cdot \tilde{P} = A \cdot \tilde{P} = 0 \quad (12)$$

siendo,

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \\ \tilde{Z} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot X \\ \alpha \cdot Y \\ \alpha \cdot Z \\ \alpha \end{bmatrix}$$

A es una matriz (4×4). La solución a esta ecuación matricial será aquella que minimice la norma al cuadrado de $A \cdot \tilde{P}$, siendo \tilde{P} el punto del espacio expresando en coordenadas homogéneas. Esto es equivalente a calcular las componentes del vector propio de norma unidad de la matriz $(A^T \cdot A)$ correspondiente a su valor propio más pequeño.

2.3.2 Sistema de triangulación activa

Para el cálculo de las coordenadas 3D mediante triangulación activa vamos a considerar de nuevo la ecuación (2) con $k = i, d$; es decir, las expresiones que obtengamos van a ser igualmente válidas para ambas cámaras.

$$\tilde{p}_k = M_k \cdot \tilde{P} \quad (13)$$

Teniendo en cuenta también las ecuaciones (7) y (8) podemos llegar a la siguiente expresión, relativa a una de las cámaras, que relaciona las coordenadas píxel con las coordenadas 3D correspondientes.

$$\alpha \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

La ecuación del plano láser, atendiendo a la figura 2, va a ser :

$$x = d \quad (15)$$

De este modo, solamente nos van a quedar como incógnitas y, z, α . Reorganizando las ecuaciones (14) y (15) obtenemos la siguiente ecuación matricial :

$$\begin{bmatrix} -m_{12} & -m_{13} & u \\ -m_{22} & -m_{23} & v \\ -m_{32} & -m_{33} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ z \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}m_{14} \\ m_{21}m_{24} \\ m_{31}m_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow A \cdot c = B \cdot D \quad (16)$$

Despejando el vector de coordenadas:

$$c = A^{-1} \cdot (B \cdot D) \quad (17)$$

Como se puede observar, la matriz A va a estar formada por las columnas segunda y tercera de M, cambiadas de signo, y por las coordenadas del píxel de la imagen (u, v); mientras que la matriz B (3x2) va a ser aquella formada por las columnas primera y segunda de M.

De la ecuación (16) también se deduce que los únicos parámetros variables en cada barrido de la escena van a ser los píxeles (u, v) y el desplazamiento del plano láser d .

Los píxeles van a extraerse de la banda láser mediante un algoritmo que calcula con precisión subpíxel el máximo de los perfiles transversales de intensidad correspondientes a cada columna (pues la banda láser es horizontal). La ubicación de ese pico se obtiene aplicando el filtro propuesto por Blais-Rioux, atendiendo al análisis realizado en [4].

2.4 FUSIÓN DE LOS DATOS 3D

Aplicando lo visto en el apartado 2.3 para todas las imágenes obtenidas en el barrido de la escena, vamos a lograr, como ya se dijo anteriormente, tres conjuntos de puntos 3D. Las figuras 6, 7 y 8 los muestran por separado asignando un color para cada uno de ellos : rojo para los correspondientes a T.A.

con la cámara izquierda, azul para T.A. con la derecha y verde para la reconstrucción estéreo. También se puede observar en estas figuras unas líneas discontinuas que representan el campo de visión de cada cámara sobre el plano XY: rojo para la cámara izquierda y azul para la derecha.

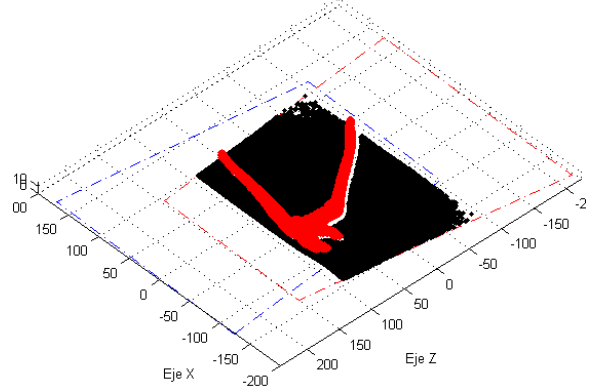


Figura 6 : Puntos 3D obtenidos mediante triangulación activa para la cámara izquierda.

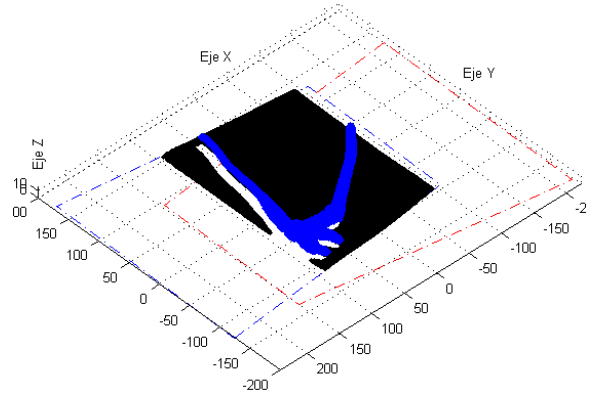


Figura 7 : Puntos 3D obtenidos mediante triangulación activa para la cámara derecha.

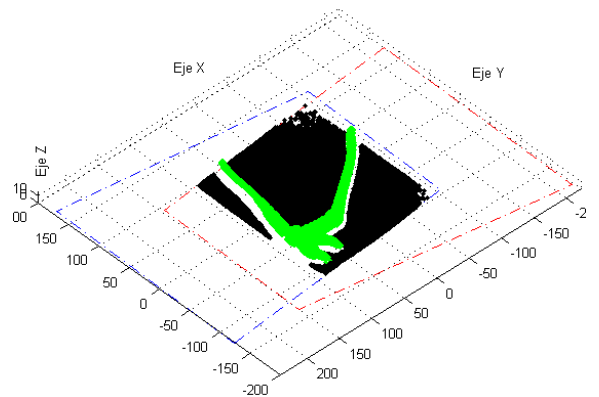


Figura 8 : Puntos 3D obtenidos mediante triangulación estéreo

Hemos colocado los campos de visión ligeramente desalineados para poder caracterizar mejor la influencia que el campo de visión tiene sobre cada uno de los conjuntos de puntos generados.

Como se puede observar los tres conjuntos van a tener puntos comunes pero que estarán reconstruidos con diferente precisión.

Los puntos de las figuras 6 y 7 van a depender tanto de la calibración de su cámara correspondiente como de la calibración del plano láser, con el inconveniente de que este último es un elemento móvil, y como tal, sometido a posibles alteraciones y desajustes en su configuración. En cambio, los puntos de la figura 8 van a depender solamente de la calibración de elementos fijos (las cámaras), lo cual supone una ventaja pues estos puntos no van a verse alterados, en principio, por un *envejecimiento* del sistema.

Por consiguiente, si realizamos una buena calibración de las cámaras, los puntos de la figura 8 pueden considerarse como un modelo frente a los puntos correspondientes de los otros dos conjuntos.

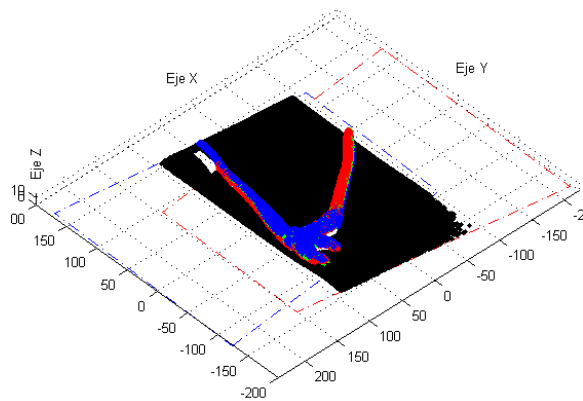


Figura 9 : Fusión de los tres conjuntos de puntos

Para reducir las diferencias de posición que va a haber entre esas tres nubes de puntos se puede hacer uso del algoritmo ICP (Iterative Closest Point). Éste es el método más utilizado para el alineamiento geométrico de modelos tridimensionales. El ICP y algunas de sus variantes, [1] y [3], comienzan con dos mallas y una estimación inicial de la posición relativa y, de forma iterativa, va refinando esa transformación mediante la generación repetida de puntos correspondientes entre ambas mallas de manera que se minimice una medida del error cometido.

Entonces, podemos considerar que nuestro modelo es el conjunto de puntos obtenidos mediante triangulación estéreo y que vamos a alinear con él las dos nubes de puntos correspondientes a la triangulación activa. Una vez alineadas se fundirán en un solo conjunto (figura 9) y, realizando

posteriormente un mallado, se obtendrá la reconstrucción 3D mostrada en la figura 10.

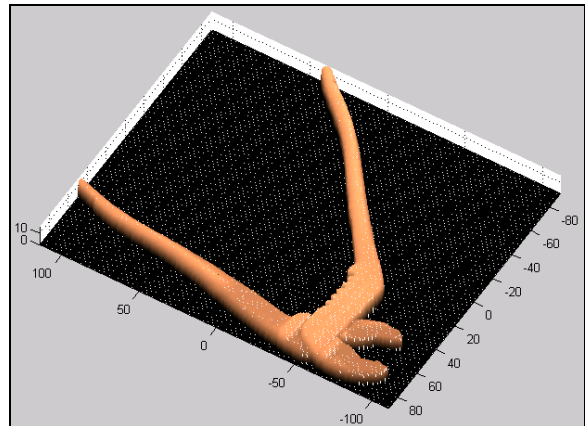


Figura 10 : Mallado final para 'alicates pico de loro'.

3 CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un sistema híbrido de visión que aprovecha las características de la visión estéreo y de la triangulación activa para obtener una reconstrucción tridimensional de la escena.

Teniendo en cuenta las conclusiones a las que se llegan en [2] en lo referente a precisión, vamos a considerar los puntos reconstruidos mediante la metodología estéreo como el modelo al que se han de ajustar los puntos obtenidos mediante triangulación activa. De esta manera, podemos atenuar los errores de reconstrucción que puedan producirse por desajustes en las partes móviles del sistema.

Referencias

- [1] Besl, P.J., (1992) "A method for registration of 3-D shapes", IEEE Transactions on Pattern Analysis and machine intelligence, v.14 n.2, p.239-256, February 1992.
- [2] El-Hakim, S. F., (1995) "A comparative evaluation of the performance of passive and active 3D vision systems", St. Petersburg Conference on Digital Photogrammetry, Volume 2646, pp 14-25. June 25-30, 1995.
- [3] Rusinkiewicz, S., (2001) "Efficient variants of the ICP algorithm". Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001).
- [4] Trucco, E., (1998) "Calibration, data consistency and model acquisition with a 3-D laser striper". International Journal of Computer Integrated Manufacturing 11: (4) 293-310 JUL-AUG 1998.