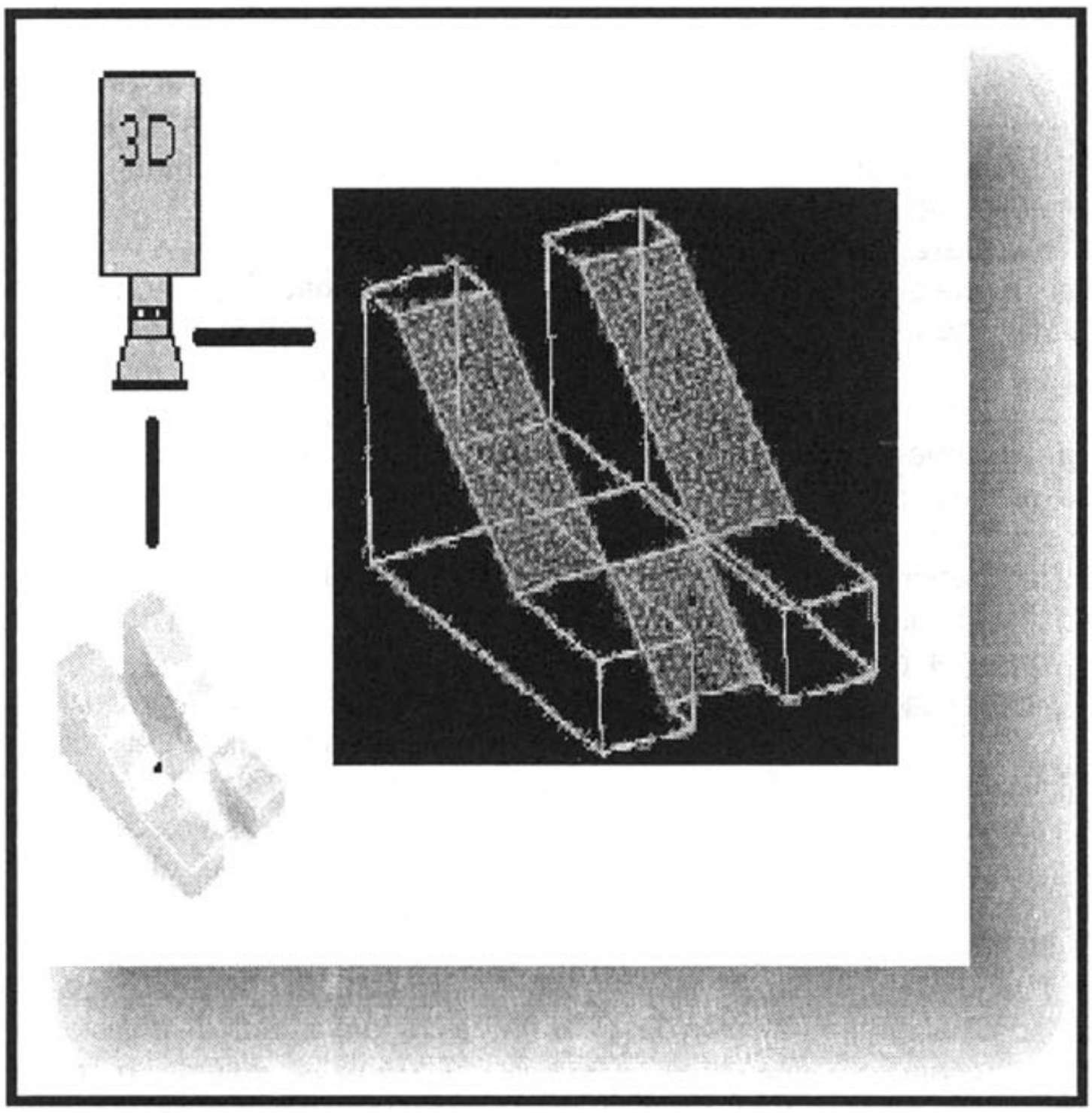
Control de tolerancias geométricas usando imagen 3D



❒ **Flavio Prieto Ph.D.**
Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Colombia.

❒ **Richard Lepage Ph.D.**
ÉTS, Laboratoire d'Imagerie, de Vision et d'Intelligence Artificielle. Canadá.

❒ **Pierre Boulanger Ph.D.**
NRCC, Institute for Information Technology. Canadá.

❒ **Tanneguy Redarce Ph.D.**
INSA, Laboratoire d'Automatique Industrielle. Francia

Grupo de trabajo en Percepción y Control Inteligente PCI. Fax (57)(6)8743033. pci@nevado.manizales.unal.edu.co

* La Revista recibió este artículo en Mayo de 2.001

RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema automático de inspección de piezas industriales. Las entradas al sistema son un conjunto de puntos 3D (imagen 3D) de la pieza y su modelo CAD. Los puntos 3D son obtenidos digitalizando la pieza con una cámara telemétrica de gran precisión. Después de la puesta en correspondencia entre la imagen 3D y el modelo CAD, la imagen es segmentada mediante el cálculo de la distancia mínima y la comparación de algunas propiedades geométricas entre los puntos 3D y la superficie NURBS*. Los resultados de la segmentación son utilizados para controlar las superficies de interés. El sistema de inspección sin contacto es comparado contra los resultados de la inspección a contacto utilizando una máquina de medición tridimensional.
*Non-Uniform Retionel B-splires.

PALABRAS CLAVES

Segmentación, inspección, sistema de visión.

ABSTRACT

This work presents an automatic inspection system of industrial parts. The inputs to the system are: a set of 3D points (3D Image) of the part and its CAD model. The 3D points are obtained digitalizing the part with a 3D range sensor of high precision.

After registration between the 3D image and the CAD model, the image is segmented by *computing the minimum distance and by comparison of some geometric properties between the 3D points and the NURBS* surface. The results of the segmentation are used to control the interesting surfaces. The no contact inspection system is compared against the results of the contact inspection using a Coordinates Measurement Machine (CMM).*

*Non-Uniform Retoinal B-Splines.

KEYWORDS

Segmentation, Inspection, Vision System.

1. INTRODUCCIÓN

La inevitable imprecisión en el proceso de fabricación hace imposible obtener una pieza industrial en rigurosa conformidad con sus especificaciones (tolerancias). El diseñador, consciente de este problema, introduce tolerancias en cada dimensión efectiva de la pieza. La inspección es el proceso de determinar si una pieza ha sido fabricada respetando un conjunto dado de especificaciones.

En la industria, la inspección es generalmente desarrollada por controladores humanos, basada en el muestreo de algunas piezas y no en la inspección total de las piezas. Sin embargo, en ciertas aplicaciones críticas tales como la industria espacial o médica, todas las partes deben ser controladas ya que el más pequeño defecto es inaceptable y debe ser identificado.

El mecanismo estándar para esta validación es la utilización de la máquina de medición tridimensional (MMT), la cual a pesar de poseer una gran precisión (1µm) presenta importantes limitaciones como la baja velocidad de medición y por consiguiente el bajo número de medidas y la necesidad de ser reprogramada cada vez que una nueva pieza deba ser controlada. Por otra parte, los avances recientes en los sensores sin contacto como las cámaras telemétricas laser, con significantes mejoras en velocidad de digitalización (hasta 20.000 puntos/s) y en precisión (hasta 25 µm), permite que ellos sean utilizados en las tareas de inspección.

Los sistemas de diseño y fabricación asistidos por computador (CAD/CAM) son empleados en numerosas industrias para diseñar y crear objetos físicos a partir de modelos numéricos. Los modelos CAD son utilizados frecuentemente en los sistemas de inspección. Ellos contienen una descripción matemática de la forma de un objeto y una parametrización explícita de las superficies del objeto.

En este trabajo presentamos un sistema automático de inspección, que utiliza una imagen 3D de la pieza, obtenida mediante su digitalización con una cámara telemétrica y su modelo CAD. El sistema se puede dividir en tres etapas: Inicialmente la imagen 3D y el modelo CAD de la pieza son llevados al mismo sistema de referencia; en la segunda etapa, la imagen 3D es segmentada en subconjuntos cada uno de los cuales representa una superficie del objeto; finalmente, los subconjuntos relacionados con las tolerancias especificadas son utilizados en el proceso de control de tolerancias.

2. IMÁGENES 3D Y MODELO COMPUTACIONAL

En esta sección describimos la cámara telemétrica utilizada para la obtención de las imágenes 3D, así que los modelos de diseño asistido por computador (CAD/CAM).

La cámara, un sensor de profundidad auto-sincronizado desarrollado en el consejo nacional de investigación de Canadá (NRCC) [1], [2], sincroniza el rayo laser proyectado con el rayo reflejado por la superficie y que es detectado por una cámara CCD, para esto utiliza un espejo de doble cara (Figura 1). Esta sincronización tiene la ventaja sobre la triangulación óptica estándar, de permitir obtener simultáneamente una alta resolución y un gran campo de visión.

El resultado de la digitalización de una superficie o pieza utilizando la cámara es una nube de puntos tridimensionales (x,y,z) (imagen 3D). La cámara explora la superficie línea por línea, la cantidad de medidas por línea es un factor especificado por el usuario (generalmente 512 puntos por línea). La velocidad de adquisición de puntos es de aproximadamente 20.000 puntos por segundo. La imagen 3D de una pieza es obtenida desplazando la cámara a partir de posiciones diferentes, para realizar este desplazamiento la cámara es montada en una máquina de medición tridimensional.

Nosotros definimos la inspección automática como la comparación entre la imagen 3D de la pieza y su modelo computacional. Siendo la inspección una tarea que evalúa la exactitud de fabricación de la pieza, el modelo computacional debe ser preciso, por tal razón hemos escogido el modelo CAD en formato IGES que contiene la representación exacta de la pieza, utilizando superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

En la figura 2 presentamos la imagen 3D y el modelo computacional de una pieza industrial.

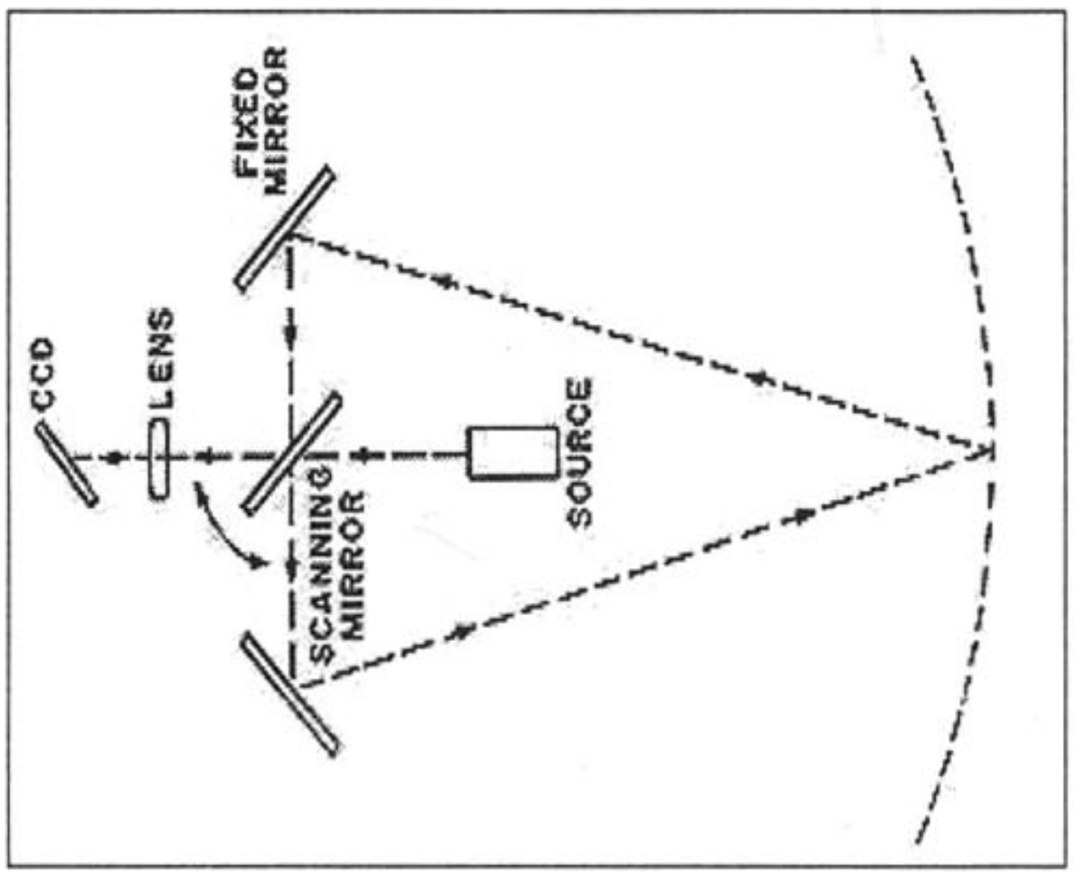
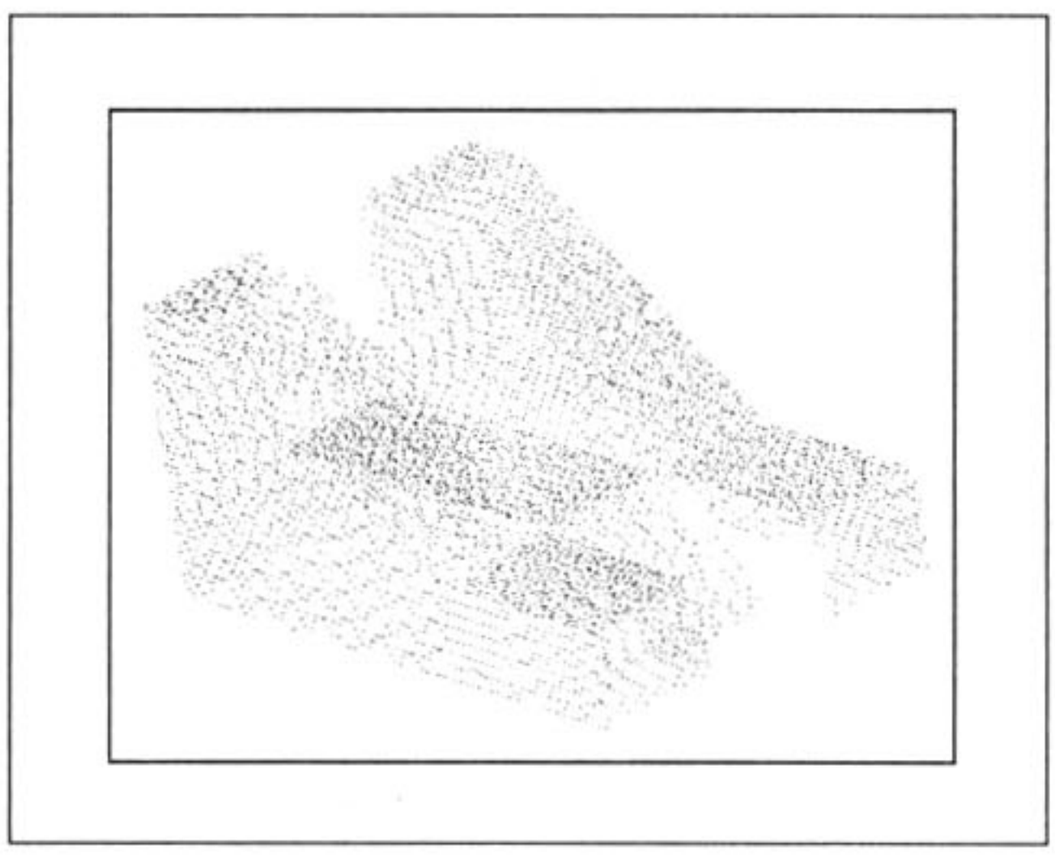


Figura 1. *Principio óptico de la cámara telemétrica..*



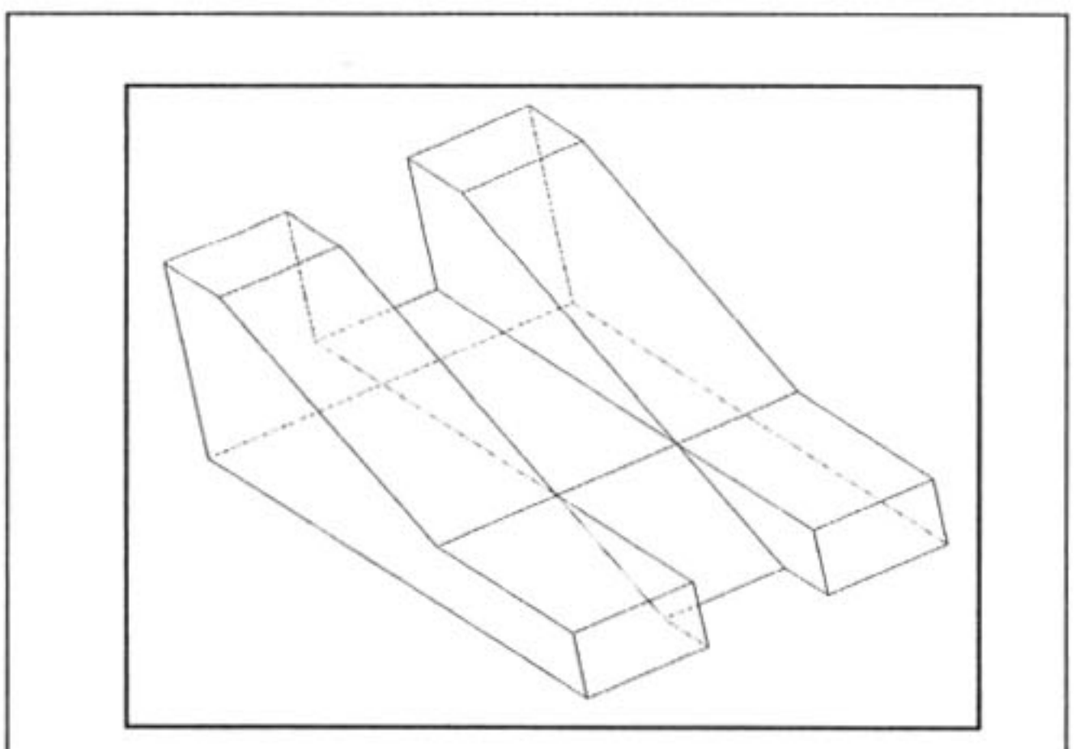


Figura 2. *Imagen 3D y modelo computacional de una pieza industrial.*

3. PROCESO DE PUESTA EN CORRESPONDENCIA

Una vez digitalizada la pieza tenemos dos representaciones de ella: la imagen 3D y el modelo computacional, los cuales tienen diferentes sistemas de coordenadas. La operación que consiste a superponer estas dos representaciones, calculando la transformación rígida (rotación + translación) es conocida con el nombre de puesta en correspondencia, este problema ha sido abordado por muchos investigadores [3], [4], [5]. El método de puesta en correspondencia que nosotros utilizamos en este trabajo se basa en los trabajos de Besl and McKay [6]. El método utiliza el algoritmo ICP (Iterative Closest Point), el cual solo requiere encontrar el punto sobre la superficie NURBS más cercano al punto 3D. La estimación de la transformación es hecha calculando la distancia media al cuadrado, este método no es robusto a los puntos aberrantes (puntos con ruido). Como solución a este problema, Masuda y Yokoya [7] fusionaron el algoritmo ICP con una selección aleatoria de puntos junto con el cálculo de la distancia mediana al cuadrado, ellos demostraron que este nuevo algoritmo presenta una robustez de hasta el 50% con respecto a los puntos con ruido.

El algoritmo de puesta en correspondencia utilizado en este trabajo, desarrollado por Moron et al [8], [9], puede ser descompuesto en tres pasos principales:

1. El algoritmo selecciona aleatoriamente *Ns* puntos de la imagen 3D, y con ellos calcula la transformación rígida utilizando el algoritmo ICP fusionado con la distancia mediana al cuadrado, este proceso es repetido *Nt* veces. La probabilidad de encontrar una buena solución es mayor cuando *Ns* disminuye y *Nt* aumenta. Después de cada ejecución del algoritmo ICP, la calidad de la transformación rígida estimada es evaluada calculando el error de la distancia mediana al cuadrado.
2. La mejor transformación rígida estimada, correspondiente al menor error de la distancia mediana al cuadrado, es aplicada sobre toda la imagen 3D. La imagen resultante es dividida en dos subconjuntos de puntos: aberrantes y no aberrantes.
3. El algoritmo ICP estándar (calculando la distancia media al cuadrado) es aplicado al subconjunto de puntos no aberrantes para así encontrar la mejor transformación rígida.

Para encontrar una solución global, puede ser necesario aplicar este método muchas veces, con diferentes condiciones iniciales.

3.1. El algoritmo LMS

El estimador de media cuadrada (*Mean Square, MS*), da una estimación de la matriz de transformación que

minimiza la suma de las distancias cuadradas entre el conjunto de puntos y el modelo. Desafortunadamente, cualquier punto aberrante en el conjunto de puntos 3D, puede dañar la solución. De otra parte, el estimador LMS (*Least Median of Squares*) encuentra una solución que minimiza la mediana de las distancias al cuadrado entre el conjunto de datos 3D y el modelo computcional. Esta categoría de estimador fue originalmente introducido por Rousseuw y Leroy [10] y es teóricamente robusto hasta una proporción del 50 % de puntos aberarntes.

El algoritmo LMS es el siguiente:

1. Un subconjunto de $P_{RS}{}^{I}$ de N_S 3D puntos es seleccionado aleatoriamente de la nube de puntos 3D R^{I}:

$$P_{RS}{}^{I} \leftarrow RS(R^{I}, N_S)$$

2. El subconjunto $P_{RS}{}^{I}$ es usado por el algoritmo ICP con el modelo de forma R^{II} para calcular los parámetros de transformación:

$$T_{ICP} \leftarrow ICP(P_{RS}{}^{I}, T_{LMS}, R^{II})$$

3. La calidad de la transformación es entonces evaluada por el estimador $MS(R^{I}, T_{ICP}, R^{II})$ con:

$$MS(R^{I}, T, R^{II}) = \sqrt{med_{r^{I} \in R^{I}}(d(T(r^{I}), R^{II})^{2})}$$

donde *d* es la distancia del punto 3D al modelo computacional.

4. SI $MS(R^{I}, T_{ICP}, R^{II}) < MS(R^{I}, T_{LMS}, R^{II})$ ENTONCES:

$$T_{LMS} \leftarrow T_{ICP}$$

3.2. El algoritmo ICP

El algoritmo ICP puede estimar eficientemente la transformación rígida entre el subconjunto $P_{RS}{}^{I}$ y el modelo de forma R^{II}. El algoritmo puede ser dividido en dos etapas. La primera etapa consiste en encontrar, para cada punto de $P_{RS}{}^{I}$, su punto más cercano en R^{II}. La etapa dos calcula la transformación rígida entre los dos puntos asociados utilizando la representación por cuaterniones. Un cuaternion es un vector de 4 dimensiones: $q=(q_0,q_1,q_2,q_3)$ donde $q_0{}^{3}0$ y $q_0{}^{2}+q_1{}^{2}+q_2{}^{2}+q_3{}^{2}=1$. Estas dos operaciones son repetidas hasta que $P_{RS}{}^{I}$ y R^{II} estén suficientemente cerca. El proceso iterativo termina cuando $d_{k-1} - d_k < \tau\sigma$ donde $d_k=d(P^{I},P^{II})$ es la suma de las distancias al cuadrado de P_i^{I} y P_i^{II}. El valor del umbral t representa la tolerancia de la convergencia. El valor de escala s es usado para hacer la condición de convergencia adimensional. El representa el tamaño aproximado de $P_{RS}{}^{I}$ y es definido como la raíz cuadrada de la traza de la matriz de covarianza de $P_{RS}{}^{I}$. Para el algoritmo ICP, fue demostrado [6] que el error medio al cuadrado es una secuencia que decrece para cada iteración monótonamente.

El algoritmo ICP es el siguiente:

1. $k \leftarrow 1, P^{I} \leftarrow T_{LMS}(P_{RS}^{I}), d_0 \leftarrow \infty$

2. P^{I} y P^{II} es estimada usando la La correspondencia de puntos es establecida:

$$P^{II} \leftarrow C(P^{I}, R^{II})$$

3. La transformación rígida entre representación de cuaterniones:

$$T_{ICP} \leftarrow Q(P_{RS}^{I}, R^{II})$$

4. La transformación estimada es aplicada al conjunto $P_{RS}{}^{I}$:

$$P^{I} \leftarrow T_{ICP}(P_{RS}^{I})$$

5. $$d_k \leftarrow d(P^{I}, P^{II})$$

6. Los pasos 2 a 5 son repetidos hasta que

$$d_{k-1} - d_k < \tau\sigma \quad \text{con} \quad k \leftarrow k+1$$

La Figura 3 muestra la imagen 3D superpuesta al modelo CAD de una pieza

Figura 3. *Puesta en correspondencia entre la imagen 3D y el modelo CAD de una pieza.*

3.3. Precisión del proceso de puesta en correspondencia.

Moron [8] estudió el error del proceso de puesta en correspondencia en función del parámetro de convergencia del algoritmo ICP, es decir en función del valor de e = t s. Este valor fue fijado a e = 10^{-8}.

Los parámetros internos N_s y N_t intervienen directamente en la precisión del resultado suministrado por el proceso de puesta en correspondencia. Se constató que el error de posición disminuye cuando N_t aumenta y cuando N_s disminuye. De otra parte, el tiempo de cálculo aumenta cuando N_t y N_s aumentan, eso que se comprende fácilmente ya que el número de operaciones a realizar aumenta proporcionalmente a N_t y N_s. En consecuencia, después de la evaluación de estos parámetros se encontró que una buena asignación fue N_t igual a 10 y N_s igual a 30.

Con estos parámetros, el error del proceso de puesta en correspondencia fue estimado a un valor promedio por punto de m = 0.7 mm con una varianza $s^2 = 0.01$. Ya que el error introducido en este proceso es pequeño con respecto a la aplicación de control de tolerancias (generalmente 100 mm), este error no se tendrá en cuenta.

4. PROCESO DE SEGMENTACIÓN

En el proceso de puesta en correspondencia la imagen 3D ha sido superpuesta con el modelo CAD. Muchos sistemas de inspección ([11], [12] [13]) utilizan esta superposición para realizar el control de tolerancias. Nosotros proponemos segmentar la imagen 3D en sus diferentes superficies y utilizar únicamente los puntos pertenecientes a las superficies involucradas en la tolerancia especificada. El proceso de segmentación es realizado calculando la distancia entre cada punto 3D y todas las superficies del modelo CAD y comparando algunas propiedades geométricas entre cada punto de la imagen 3D y el punto más cercano en la superficie.

4.1. Cálculo de la distancia punto 3D/superficie NURBS

El problema de calcular la distancia de un punto 3D a una superficie NURBS puede ser formulado de la manera siguiente: encontrar un punto en el espacio paramétrico de la superficie (u_0, v_0) de manera que la distancia entre la superficie $\overset{\rho}{s}(u_0, v_0)$ y el punto 3D $\overset{\rho}{r}$ sea mínima en la dirección perpendicular al plano tangente al punto (u_0, v_0). La función a ser minimizada es la siguiente: $min_{(u,v)} \left\| \overset{\rho}{r} - \overset{\rho}{s}(u,v) \right\|$ Desarrollando la superficie paramétrica $\overset{\rho}{s}(u,v)$ en series de taylor se obtiene:

$$\overset{\rho}{s}(u,v) = \overset{\rho}{s}(u_0, v_0) + \frac{\partial}{\partial u}\overset{\rho}{s}(u_0 - u) + \frac{\partial}{\partial v}\overset{\rho}{s}(v_0 - v)$$

Con $\frac{\partial}{\partial u}\overset{\rho}{s}(u-v) = \frac{AB - CD}{B^2}$ y $\frac{\partial}{\partial v}\overset{\rho}{s}(u-v) = \frac{EB - FD}{B^2}$

donde:

$$A = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}\left(\tfrac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u)\right)N_{j,q}(v)w_{i,j}\overset{\rho}{P}_{i,j},$$

$$B = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j},$$

$$C = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}\overset{\rho}{P}_{i,j},$$

$$D = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}\left(\tfrac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u)\right)N_{j,q}(v)w_{i,j},$$

$$E = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)\left(\tfrac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v)\right)w_{i,j}\overset{\rho}{P}_{i,j},$$

$$F = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}N_{i,p}(u)\left(\tfrac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v)\right)w_{i,j},$$

$\frac{\partial}{\partial u}N_{i,p}(u) = \frac{p}{u_{i+p-1}-u_{i-1}}N_{i,p-1}(u) - \frac{p}{u_{i+p}-u_i}N_{i+1,p-1}(u)$ y

$\frac{\partial}{\partial v}N_{j,q}(v) = \frac{q}{u_{j+q-1}-u_{j-1}}N_{j,q-1}(v) - \frac{p}{u_{j+q}-u_j}N_{j+1,q-1}(v),$

con

n el número de puntos de control en la dirección paramétrica u,

m el número de puntos de control en la dirección paramétrica v,

$\overset{\rho}{P}_{i,j}$ los puntos de control,

$w_{i,j}$ los pesos asociados al punto de control $\overset{\rho}{P}_{i,j}$,

$N_{i,p}$ (o $N_{j,q}$) las funciones de la base B-Spline [14].

El problema de minimización se convierte entonces en:

$$min_{(u,v)}\left\| \overset{\rho}{r} - \overset{\rho}{s}(u_0, v_0) + \frac{\partial}{\partial u}\overset{\rho}{s}(u_0 - u) + \frac{\partial}{\partial v}\overset{\rho}{s}(v_0 - v)\right\|^2$$

Esto puede ser expresado en forma matricial como $min_{(u,v)}\left\| J\overset{\rho}{w} - \overset{\rho}{d}\right\|^2$, donde J es el jacobiano de $\overset{\rho}{s}(u,v)$ y es igual a:

$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial s_x}{\partial u} & \frac{\partial s_x}{\partial v} \\ \frac{\partial s_y}{\partial u} & \frac{\partial s_y}{\partial v} \\ \frac{\partial s_z}{\partial u} & \frac{\partial s_z}{\partial v} \end{bmatrix}$ y $\vec{w} = \begin{pmatrix} u_0 - u \\ v_0 - v \end{pmatrix}$ es un vector que corresponde a la variación de la posición precedente.

Si $\vec{d}(u,v)$ el error entre el punto $\vec{r}$ y el modelo paramétrico: $\vec{d}(u,v) = \vec{r} - \vec{s}(u,v)$, entonces la solución al problema de minimización corresponde a la condición de Euler, es decir:

$\frac{\partial}{\partial \vec{w}} \left\| J\vec{w} - \vec{d} \right\|^2 = 0 = 2J^T J\vec{w} - 2J^T \vec{d}$ .De donde

$J^T J\vec{w} = J^T \vec{d}$, $J^T \vec{d}$ corresponde a la proyección de un vector de error en el plano tangente. La nueva posición paramétrica es igual a: $\vec{w} = (J^T J)^{-1} J^T \vec{d}$.

Usando un proceso iterativo, se puede calcular la distancia del punto 3D a la superficie CAD en menos de cuatro o cinco iteraciones [15].

Los parámetros de inicialización de este proceso iterativo son determinados dividiendo la superficie CAD en n cuadrados y tomando el centro (u,v) del cuadrado más próximo al punto $\vec{r}$ El criterio de parada, corresponde a la condición de ortogonalidad del vector de error y del plano tangente a la superficie en ese punto, medido por las dos condiciones siguientes:

$$\gamma = \left| \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{s}}{\partial u}}{\left|\vec{d}\right| \cdot \left|\frac{\partial \vec{s}}{\partial u}\right|} \right| \leq \varepsilon \quad \xi = \left| \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{\vec{d} \cdot \frac{\partial \vec{s}}{\partial v}}{\left|\vec{d}\right| \cdot \left|\frac{\partial \vec{s}}{\partial v}\right|} \right| \leq \varepsilon$$

El parámetro ε corresponde a la precisión con la que se quiere que esta condición de ortogonalidad sea respetada, ella ha sido fijada a $\varepsilon = 0.1$ grados.
El algoritmo para calcular la distancia punto 3D/ superficie NURBS puede ser resumido de la siguiente manera:

1 Cálculo de la matriz Jacobiana J
2 Cálculo de la distancia $\vec{d}$,
3 Cálculo del vector $\vec{w}$
4 $(u_0, v_0) = (u_0, v_0) + \vec{w}$
5 Calculo de γ y ξ
6 Si $\gamma \leq \varepsilon$ y $\xi \leq \varepsilon$, entonces terminar, de lo contrario retornar al paso 1.

Una vez que la distancia del punto 3D a todas las superficies ha sido calculado, las superficies más cercanas al punto son determinadas. Sea $\vec{d}_i$ la distancia mínima del punto 3D a la *i-esima* superficie $\vec{s}_i$. Sea $\vec{s}_j$ la superficie más próxima a un punto 3D, con una distancia d_j,En esta etapa de segmentación todas las superficies a una distancia tal que: $d_i \leq 1.5 d_j$, con *i=1,2,...,m*; $i \neq j$ y *m* el número de superficies e la pieza, son asociadas al punto 3D como superficies posibles de pertenencia.

Generalmente, un punto tiene dos o más superficies posibles de pertenencia cuando está cerca de un borde o de una esquina.

4.2. Cálculo y comparación de propiedades geométricas

Sea $\vec{r}$ un punto de la nube de puntos 3D, y $\vec{p}_{s_k}$ el punto más próximo sobre cada una de las posibles superficies de pertenencia identificadas en la etapa precedente. Para seleccionar la superficie de pertenencia correcta de un punto $\vec{r}$, calculamos y comparamos algunas propiedades geométricas de $\vec{r}$ y de $\vec{p}_{s_k}$ .Las propiedades geométricas utilizadas son la normal $\vec{n}$ a la superficie en el punto de interés, la curvatura gausiana *K* y la curvatura mediana *H*. Estas curvaturas son dos invariantes algebraicas naturales, que presentan propiedades interesantes como:

- Invarianza con respecto al punto de vista,
- Invarianza con respecto al tipo de parametrización,
- Determinación única de la forma de una superficie.

La normal $\vec{n}(u,v)$, la curvatura gaussiana $K(u,v)$ y la curvatura mediana $H(u,v)$ para un punto (u,v) sobre la superficie paramétrica son estimadas por las ecuaciones siguientes [15]:

$$\vec{n}(u,v) = \frac{\vec{r}_u(u,v) \times \vec{r}_v(u,v)}{\left\| \vec{r}_u(u,v) \times \vec{r}_v(u,v) \right\|}$$

$$K(u,v) = \frac{[\vec{r}_{uu}\vec{r}_u\vec{r}_v][\vec{r}_{uu}\vec{r}_u\vec{r}_v] - [\vec{r}_{uv}\vec{r}_u\vec{r}_v]^2}{\left|\vec{r}_u \times \vec{r}_v\right|^4}$$

$$K(u,v) = \frac{(\vec{r}_u \cdot \vec{r}_v)([\vec{r}_{uu}\vec{r}_u\vec{r}_v] + [\vec{r}_{vv}\vec{r}_u\vec{r}_v] - 2[\vec{r}_{uv}\vec{r}_u\vec{r}_v])}{2\left|\vec{r}_u \times \vec{r}_v\right|^3}$$

donde

$[\vec{a}\vec{b}\vec{c}] = \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c})$ $\vec{r}_u = \frac{\partial \vec{r}}{\partial u}$ $\vec{r}_v = \frac{\partial \vec{r}}{\partial v}$ $\vec{r}_{uu} = \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u^2}$

$\vec{r}_{vv} = \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial v^2}$ y $\vec{r}_{uv} = \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u \partial v}$

Para estimar las derivadas parciales primeras y segundas en el punto $\vec{p}_{s_k}$,utilizaremos los parámetros de la superficie NURBS. Para estimar esas derivadas

en el punto $\vec{r}$ utilizaremos un método propuesto por Boulanger [15], que utiliza un polinomio paramétrico de segundo orden obtenido utilizando un vecindario $N \times N\,(5 \times 5)$, alrededor del punto $\vec{r}(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v))^T$ .El polinomio paramétrico está definido por la ecuación siguiente:

$$\vec{\eta}(u,v) = \sum_{i=0}^{2}\sum_{j=0}^{2} \vec{a}_{ij} u^i v^j = (h_x(u,v), h_y(u,v), h_z(u,v))^T$$

donde $\vec{a}_{ij}$ es el coeficiente de cada componente de $\vec{\eta}(u,v)$, $\vec{a}_{ij}$,es igual a cero si $i + j > 2$.

Utilizando este polinomio, las derivadas parciales en el punto P son obtenidas:

$$\vec{\eta}_u = \vec{a}_{10} + \vec{a}_{11} v_0 + 2\vec{a}_{20} u_0$$
$$\vec{\eta}_v = \vec{a}_{01} + \vec{a}_{11} u_0 + 2\vec{a}_{02} v_0$$
$$\vec{\eta}_{uu} = 2\vec{a}_{20}$$
$$\vec{\eta}_{vv} = 2\vec{a}_{02}$$
$$\vec{\eta}_{uv} = \vec{a}_{11}$$

donde (u_0, v_0) son las coordenadas paramétricas del centro del vecindario.

Finalmente se comparan las propiedades geométricas locales de $\vec{p}_{s_k}$ estimadas a partir de la superficie NURBS con las propiedades del punto $\vec{r}$ en el conjunto de datos 3D. Sea α_{tol} el ángulo permitido entre la normal en $\vec{p}_{s_k}$ $(\vec{n}_s)$ y sea K_{tol} y H_{tol} las variaciones aceptables para la curvatura gausiana y la curvatura mediana respectivamente, entonces el punto $\vec{r}$ pertenece a la superficie s_k si se cumplen las condiciones siguientes:

$$\left|Angulo(\vec{N}_s, \vec{N}_r)\right| \le \alpha_{tol}$$
$$\left|(\vec{K}_s - \vec{K}_r)\right| \le K_{tol}$$

4.3. Etiquetaje del punto $\vec{r}$

El punto $\vec{r}$ es etiquetado con el número *k* de la superficie NURBS s_k, si sus propiedades geométricas son similares a las del punto $\vec{p}_{s_k}$ sobre la superficie paramétrica y si la superficie s_k es una de las superficies cercanas al punto.

En la Figura 4 presentamos algunos ejemplos de la segmentación de la imagen 3D en superficies.

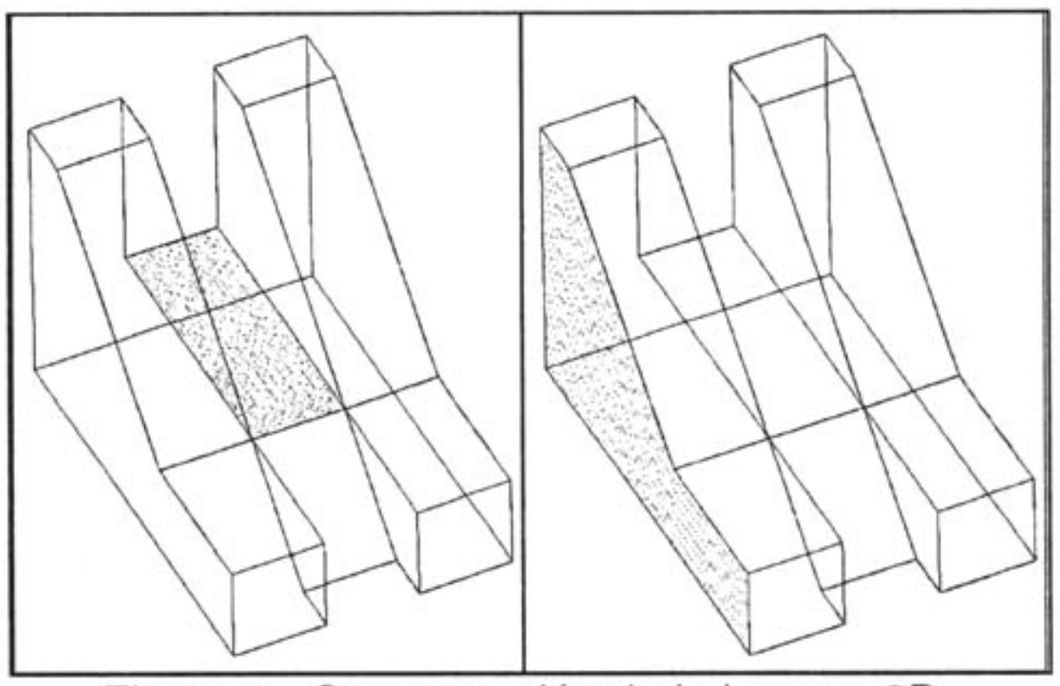


Figura 4. *Segmentación de la imagen 3D.*

5. CONTROL DE TOLERANCIAS

Una tolerancia es una especificación que define la variación admisible de dimensión o de geometría de un elemento. Según el dominio considerado, dos tipos de tolerancias son utilizados:

- Las tolerancias dimensionales.
- Las tolerancias geométricas

En este trabajo nos interesamos por el control de tolerancias geométricas. Para más detalles sobre el control de tolerancias ver [16], [17].
Las tolerancias geométricas son el intervalo máximo admisible dentro del cual pueden variar las características geométricas de forma, de orientación y de posición de un elemento (superficie).

5.1. Tolerancia de forma

Es el valor máximo autorizado de la desviación de la forma de un elemento, según la geometría del elemento. La zona de tolerancia está limitada por dos superficies de forma adecuada y distantes *t*, al interior de las cuales debe situarse la superficie considerada. La tolerancia de forma se aplica únicamente a la superficie considerada, independientemente de su posición y de su orientación. Por ejemplo, un plano es un plano así su orientación sea horizontal, vertical o cualquiera. La planeidad, la cilindricidad o la forma cualquiera son ejemplos de tolerancias geométricas de forma.

Como las tolerancias de forma se aplican directamente a la superficie bajo control, sin considerar ninguna superficie de referencia, la verificación de tolerancias de forma de una superficie se realiza utilizando solamente los puntos 3D asociados a esta superficie y obtenidos a partir del proceso de segmentación. Este subconjunto de puntos 3D es de nuevo puesto en correspondencia con el modelo CAD (ajuste fino) y la distancia entre cada punto 3D y la superficie NURBS

es calculada. La distribución de estas distancias tiene una forma gaussiana, la cual es utilizada para definir la zona de tolerancia medida. El valor promedio de la distribución gaussiana es ajustado con la superficie NURBS del modelo CAD. Haciendo pasar dos superficies paralelas a la superficie NURBS a una distancia de ±2ó, la tolerancia medida es definida por: t_m = 4ó. La Figura 5 muestra el proceso de control de tolerancias de forma. Para todas las tolerancias de forma, diremos que la superficie está de acuerdo con las especificaciones si la relación t_m £ t_s es respetada (t_s es la tolerancia especificada).

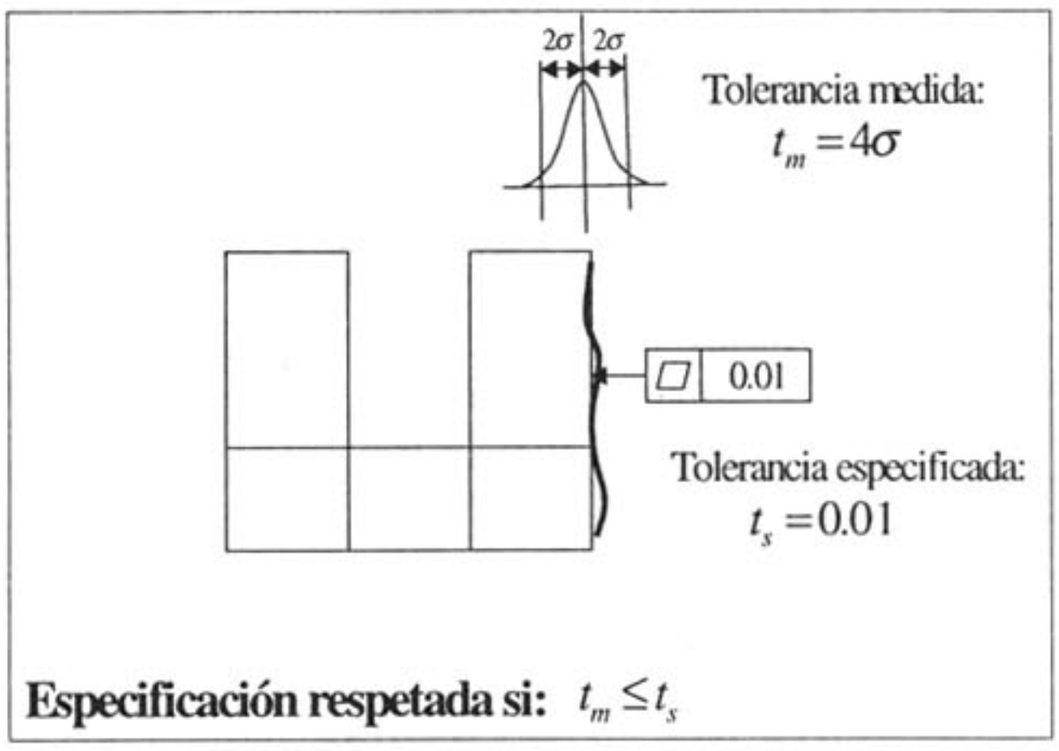


Figura 5. *Tolerancia de forma: planeidad.*

5.2. Tolerancia de orientación

Es el valor máximo de la desviación de la orientación de un elemento, la zona de tolerancia está limitada por dos planos al interior de los cuales debe situarse la superficie considerada. La tolerancia de orientación limita solamente la variación en orientación de la superficie bajo control, independientemente de su posición, en consecuencia la zona de tolerancia es móvil en translación y no determina ni controla la posición de la superficie. Solo la orientación con respecto a la superficie de referencia es impuesta. Son tolerancias de orientación el paralelismo, la perpendicularidad y la inclinación.

Las tolerancias de orientación siempre están relacionadas a una superficie de referencia. Por consecuencia, para el control de la tolerancia, debemos utilizar dos subconjuntos de puntos 3D: S_i asociado a la superficie a controlar y S_r asociado a la superficie de referencia. El subconjunto S_r es puesto en correspondencia con el modelo CAD y la transformación rígida encontrada es aplicada a S_i.. La distancia entre cada punto de S_i y la superficie NURBS es calculada. La distribución de estas distancias no tiene necesariamente una forma gausiana. Para estimar la zona de tolerancia medida, dos puntos son definidos:

- El punto p_1 a una distancia d_1 de la superficie NURBS tal que el 2.5% de los puntos en S_i tienen una distancia d_i £ d_1.
- El punto p_2 a una distancia d_2 de la superficie NURBS tal que el 2.5% de los puntos en S_i tienen una distancia d_i ³ d_2.

La zona de tolerancia medida es definida como aquella comprendida entre dos planos paralelos y orientados con respecto a una superficie de referencia. Los planos deben pasar por los puntos p_1 y p_2, para garantizar que el 95% de los puntos en S_i son tomados en cuenta. La Figura 6 muestra el proceso de control de tolerancias de orientación

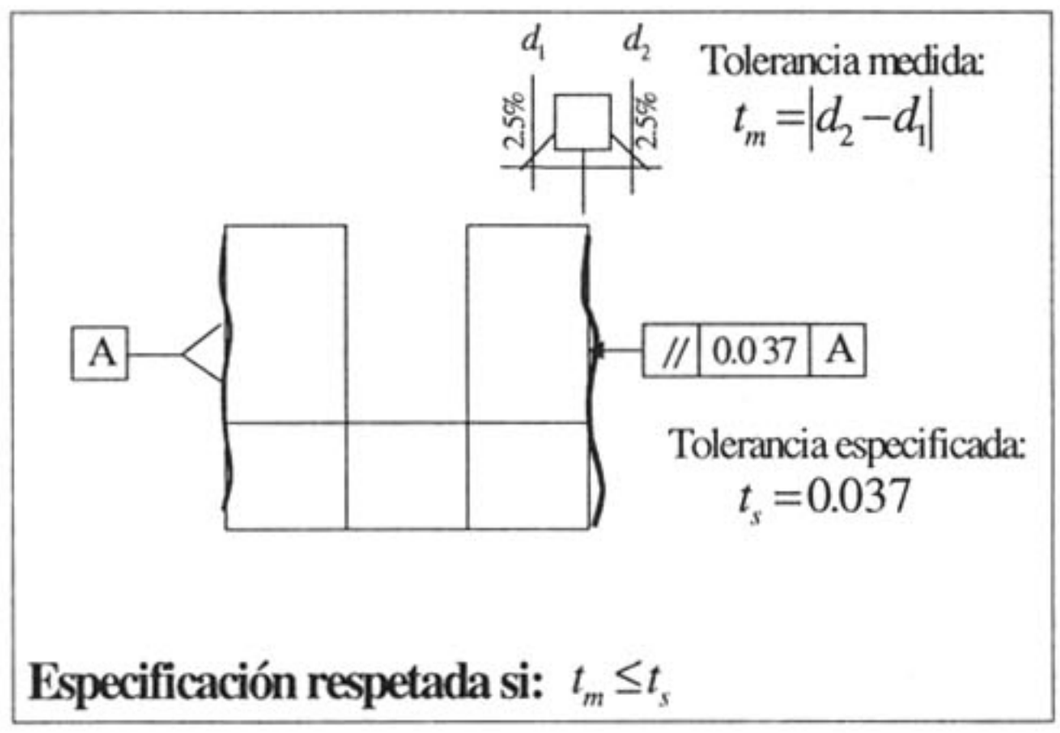


Figura 6. *Tolerancia de orientación:paralelismo.*

Para las tolerancias de orientación, la superficie bajo control respeta la especificación t_s si la relación $t_m = |d_2 - d_1| \leq t_s$ es respetada.

5.3. Tolerancia de posición

Es el valor máximo autorizado de la desviación de la posición de un elemento, según la geometría del elemento la zona de tolerancia está limitada por dos superficies de forma adecuada al interior de los cuales debe situarse la superficie considerada. La tolerancia de posición limita a la vez los errores de posición de orientación y de forma de un elemento. La zona de tolerancia deber estar orientada y puesta en posición con respecto a un elemento de referencia. La localización, la coaxialidad y la concentricidad son ejemplos de tolerancias de posición.
Las tolerancias de posición son controladas de manera similar a las tolerancias de orientación. Para asegurar la conformidad de la superficie bajo inspección, la relación siguiente debe ser respetada:

$t_{1_r} \leq t_{1_m} < t_{2_m} \leq t_{2_r}$ .Donde t_{1_r} y t_{2_r} son las distancias a la superficie de referencia, ellas definen la zona de tolerancia especificada. Y t_{1_m} y t_{2_m} son las distancias a la superficie bajo control, ellas definen la tolerancia medida.

6. RESULTADOS

Con el fin de controlar las tolerancias especificadas en la Figura 7, la pieza ha sido digitalizada utilizando la cámara descrita en la Sección 2.

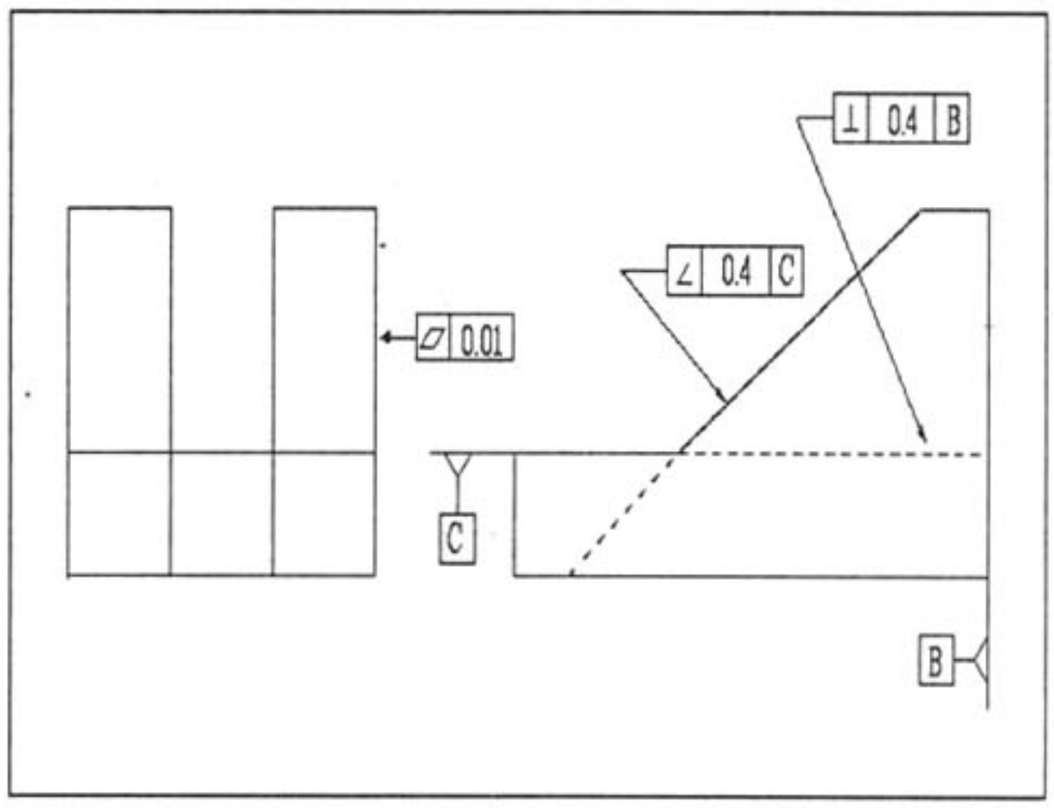


Figura 7. *Especificación de tolerancias geométricas.*

Tolerancia	T.Especif.	T.medida	No.pts	Resultado
Planeidad	10μm	10.8μm	20	Conforme
Perpend.	400μm	39μm	29	Conforme
Inclinac.	400μm	26μm	32	Conforme

Tabla 1. *Control de tolerancias utilizando la MMT.*

Los resultados muestran que las tres tolerancias especificadas son respetadas. Bien que el valor medido para la tolerancia de planeidad es mayor que 10mm, el valor está en el rango de dispersión de la MMT (5mm).

En la Figura 8 presentamos los subconjuntos de puntos 3D utilizados para el control de tolerancias sin contacto, estos subconjuntos fueron obtenidos después del proceso de segmentación. Para la tolerancia de planeidad sólo es necesario el subconjunto de puntos 3D relacionado directamente con la superficie bajo control. Para las tolerancias de perpendicularidad e inclinación además del subconjunto de la superficie bajo control se utilizó el subconjunto de puntos 3D relacionado con la superficie de referencia.

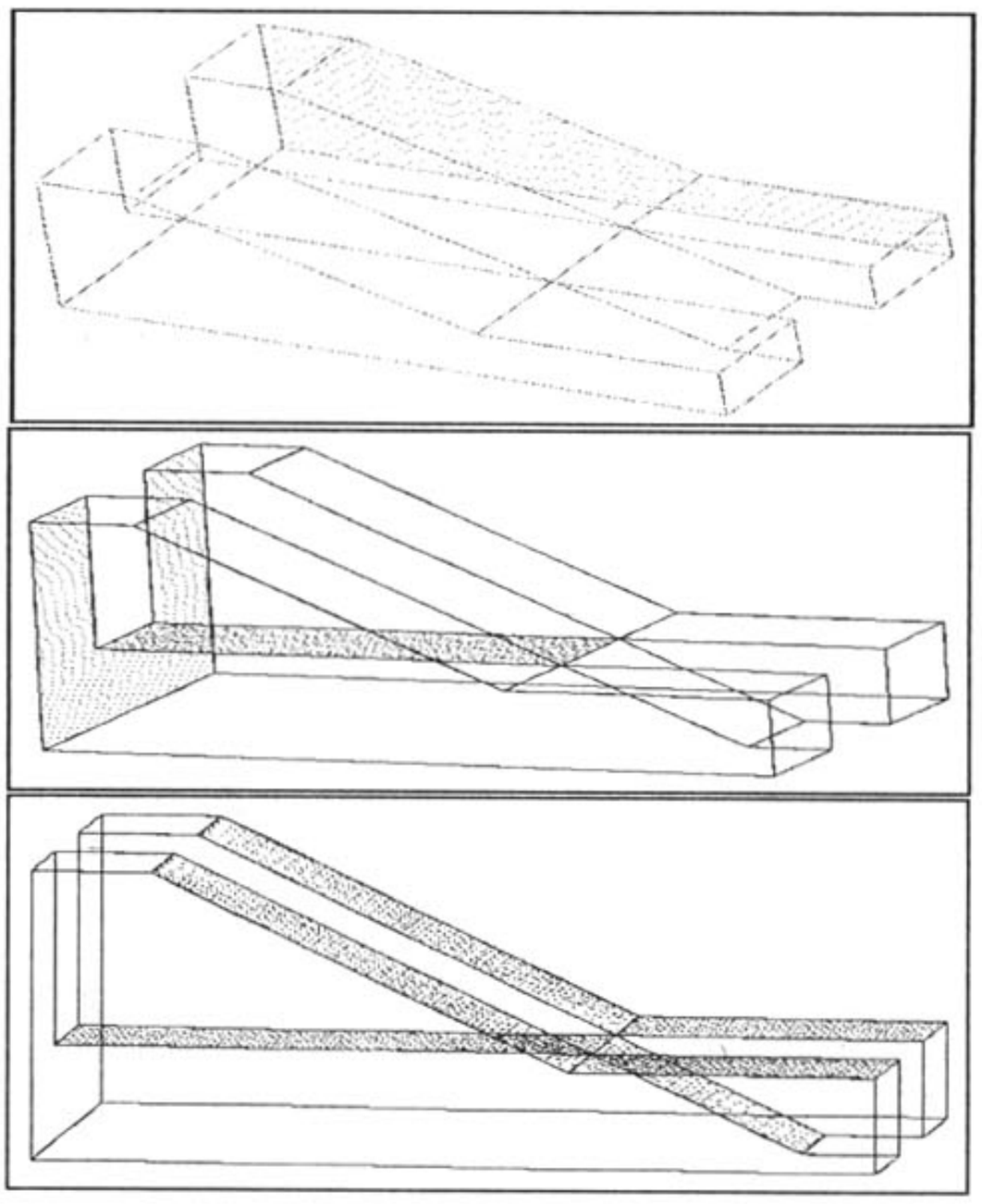


Figura 8. *Subconjuntos de puntos utilizados para el control de las tolerancias geométricas.*

En la Tabla 2 presentamos los resultados de control de tolerancias, cuando utilizamos el sistema de inspección automático sin contacto descrito en este trabajo.

Tolerancia	T.Especif.	T.medida	No.pts	Resultado
Planeidad	10μm	72μm	1467	No-conf.
Perpend.	400μm	134μm	2166	Conforme
Inclinac.	400μm	41μm	1745	Conforme

Tabla 2. *Control de tolerancias utilizando el sistema de inspección.*

Los resultados muestran que las tolerancias de perpendicularidad e inclinación son respetadas y que la tolerancia de planeidad no lo es. Este resultado es debido al valor de la especificación que es demasiado pequeño comparado con la precisión de la cámara (25mm). En general, este sistema de inspección es fiable para controlar especificaciones de tolerancias mayores o iguales a 75mm [17].

Una característica importante de este sistema de inspección es la cantidad de puntos de medida (columna *No. pts.*) comparado con las medidas realizadas cuando se utiliza la MMT. Además estos puntos están distribuídos uniformemente sobre todo la superficie lo que se traduce en una representación más exacta de la geometría de la superficie.

7. CONCLUSIONES

Un sistema automático de inspección de piezas industriales ha sido presentado. El sistema inicialmente realiza la puesta en correspondencia entre la imagen 3D y el modelo CAD de la pieza, luego segmenta los puntos 3D en las diferentes superficies del objeto, y finalmente selecciona los subconjuntos de puntos 3D relacionados con las superficies involucradas en la tolerancia especificada para realizar la inspección.

El proceso de segmentación no depende de la geometría de la pieza. El depende básicamente de la precisión de los puntos 3D y de manera más importante de la densidad de puntos en la superficie segmentada que nos permite obtener una buena estimación de las propiedades geométricas.

La precisión en los resultados de inspección es función de la precisión de los puntos 3D. En la actualidad se encuentran cámaras telemétricas de alta precisión, pero para poder aproximar la precisión de las MMTs, es necesario mejorar aun el hardware de la cámara o el proceso de digitalización de la pieza.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1.] RIOUX, M., "Laser range finder based on synchronized scanners", *Applied Optics,* Vol. 23, No. 21, p. 3837-3844, November 1984.

[2.] RIOUX, M., BECHTOLD, G., TAYLOR, D. and DUGGAN, M., "Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision", *Optical Engineering,* Vol. 26, No. 12, p. 1245-1250, 1987.

[3.] ZHANG, Z., "Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces", *International Journal of Computer Vision,* Vol. 13, No. 2, p. 119-192, 1994.

[4.] BERGEVIN, R., SOUCY, M., GAGNON, H. and LAURENDEAU, D., "Towards a general multi-view registration technique", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. 18, No. 5, p. 540-547, May 1996.

[5.] DORAI, C., WENG, J. and JAIN, A.K., "Optimal registration of objects views using range data", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. 19, No. 10, p. 1131-1138, October 1997.

[6.] BESL, P.J. and MCKAY, N.D., "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* Vol. 14, No. 2, p. 239-256, February 1992.

[7.] MASUDA, T. and YOKOYA, N., "A robust method for registration and segmentation of multiple range images", *Computer Vision and Image Understanding,* Vol. 61, No. 3, p. 296-267, May 1995.

[8.] MORON, V., "Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO: Application à l'inspection automatique", *Ph.D. dissertation: Laboratoire d'Automatique Industrielle,* INSA de Lyon, France, 216 p, December 1996.

[9.] MORON, V., BOULANGER, P., REDARCE, H.T. and JUTARD, A., "Mise en correspondance du modèle CAO d'un objet avec son image 3D: Application à l'inspection", *In: RIFIA'96, Congrès de Reconnaissances de Formes et Intelligence Artificielle*, Rennes, France, p. 913-922, 16-18 Janvier 1996.

[10.] ROUSSEUW, P.J. and LEROY, A.M., "Robust Regression & Outlier Detection", John Wiley & sons, Wiley series in probability and statistics, New York, 329 p, 1987.

[11.] NEWMAN, T.S. and JAIN, A.K., "A system for 3D CAD-based inspection using range images", *Pattern Recognition,* Vol. 28, No. 103, p. 1555-1574, March 1995.

[12.] TARBOX, G.H. and GOTTSCHLICH, S.N., "IVIS: An integrated volumetric system for robotic vision tasks", *Computer Vision and Image Understanding,* Vol. 61, No. 3, p. 430-444, May 1995.

[13.] TRUCCO, E., UMASUTHAN, M., WALLACA, A.M. and ROBERTO, V., "Model-based planning of optimal sensor placements for inspection", *IEEE Transactions on Robotics and Automation,* Vol. 13, No. 2, p. 182-194, April 1997.

[14.] PIEGL, L. and TILLER, W., "The NURBS book. 2nd edición, Springer-Verlag, New-York, 646 p, 1997.

[15.] BOULANGER, P., "Extraction multiéchelle d'éléments géométriques", *Ph.D. dissertation: Génie Electrique,* Université de Montreal, Canada, 226 p, 1994.

[16.] PRIETO, F., REDARCE, T., LEPAGE R. and BOULANGER, P., "Visual System for Fast and Automated Inspection of 3D Parts", *In Revue international de CFAO et d'informatique graphique*, HERMES Science Publications, Paris, France. Vol. 13, No. 6, pages 211-227, December 1998.

[17.] PRIETO, F., "Métrologie assistée par ordinateur: apport des capteurs 3D sans contact", *Ph.D. dissertation: Laboratoire d'Automatique Industrielle,* INSA de Lyon, France, 168 p, December 1999.

AUTORES

Flavio Augusto Prieto Ortiz. Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital, Bogotá, Colombia (1991), Magíster en Ingeniería eléctrica de la Universidad de los Andes (1995), Bogotá, Colombia, y Doctor en automática industrial del Institut National des Sciences Apliques de Lyon, Francia (1999). Desde febrero del 2000, Profesor en Ingeniería electrónica en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Richard Lepage. Ingeniero Electricista (1974), Magíster en Ingeniería Eléctrica (1982) y Ph.D en ingeniería Eléctrica (1993) Todos en la Universidad de Laval, Ste-Foy, Québec, Canadá. 15 años de experiencia como investigador en el centro de investigación para la defensa, Courcelette, Canadá. Desde septiembre de 1992, Profesor en la Escuela de Tecnología Superior, Universidad de Québec, Montreal, Canadá.

Pierre Boulanger. Físico (1980) y Magíster en Física (1982) en la Universidad de Labal, Québec, Canadá. Ph.D. en Ingeniería Eléctrica (1994) en la Escuela politécnica de la Universidad de Montreal, Montreal, Canadá. Desde Marzo de 1994 trabaja como Investigador en el grupo de Tecnología de la Información Visual del Consejo Nacional de Investigación de Canadá.

Tanneguy Redarce Ingeniero Electrónico, Ph.D. en Automática Industrial. Profesor en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon Francia.

Más de uno se equivocó por miedo a equivocarse

(G. E. Lessing)