

# INSPECCIÓN NO DETERMINISTA DE PARTES USANDO IMÁGENES 3D DE ALTA PRECISIÓN

FLAVIO A. PRIETO

*Grupo de Percepción y Control Inteligente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales*

PIERRE BOULANGER

*Department of Computing Science, University of Alberta*

Recibido para revisar 20 de Enero de 2003, aceptado 10 de Septiembre de 2003, versión final 3 de Marzo de 2004

**RESUMEN:** La inspección consiste en verificar la precisión de una parte con respecto a un conjunto de tolerancias especificadas. Este proceso se realiza en la industria mediante el uso de las Máquinas de Medición Tridimensional (MMT), las cuales pueden adquirir información de alta precisión pero son demasiado lentas. El desarrollo de los sensores de rango, que en los últimos años han incrementado la precisión y la velocidad de adquisición, ha permitido utilizarlos en los procesos inspección. Como a pesar de los avances, estos sensores no alcanzan la precisión de las MMT, se utiliza en este trabajo una estrategia de adquisición de imágenes 3D de alta precisión, la cual permite asociar a los puntos 3D un factor de incertidumbre. Este valor de incertidumbre actúa como un factor de ponderación en los resultados finales de inspección. Los resultados de la inspección se presentan sobre tolerancias dimensionales y geométricas.

**PALABRAS CLAVE:** Inspección visual, segmentación, imágenes 3D, estrategia de digitalización.

**ABSTRACT:** Inspection consists in verifying the accuracy of a part related to a given set of tolerances. The standard in the industry for inspection is the Coordinate Measuring Machine (CMM), which can acquire data of high precision but they are too slow. The development of range sensors, that in the last years have improved the precision and the speed of acquisition, has allowed to use them in the inspection process. In spite of the advances these sensors do not reach the precision of the CMM. So, in this work we use an acquisition strategy for obtain the 3D Data, which allows to associate to each 3D point a dispersion value. This value of dispersion acts as a weight factor in the inspection results. Inspection results are present on dimensional and geometric tolerances.

**KEYWORDS:** Visual inspection, segmentation, 3D images, acquisition strategy.

## 1 INTRODUCCIÓN

El diseño y la fabricación asistidos por computador (CAD/CAM: Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) son en la actualidad ampliamente utilizados en la industria. Después del diseño y la fabricación de una pieza, aun resta una tarea importante: la *inspección*. La inspección es el proceso de determinar si un producto se desvía de un conjunto de especificaciones definidas (tolerancias). Las Máquinas de Medición Tridimensional (MMT) son el mecanismo estándar en la industria para la validación de las partes, pero a pesar de su alta precisión, estas tienen importantes limitaciones como: la necesidad de un soporte mecánico, la baja velocidad de medida y la necesidad de ser reprogramada cada vez que una nueva parte es inspeccionada.

De otra parte, los avances recientes en los sensores de rango como las cámaras laser, con una gran mejora

en la velocidad de adquisición (cerca de 20000 puntos por segundo), permite que ellos sean usados en las tareas de inspección. La desventaja de estos sensores es su baja precisión cuando se compara con la de las MMT.

En este artículo utilizamos la metodología de inspección para el control de tolerancias dimensionales y geométricas presentada en (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001a). Esta utiliza el modelo CAD de la pieza y una imagen de alta precisión, obtenida después de digitalizar la pieza usando una estrategia de adquisición (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001b).

Se utilizó el modelo de ruido del proceso de digitalización, para estimar la precisión de la parte digitalizada mediante la asociación de un valor de dispersión a cada punto adquirido. El modelo de ruido también es introducido en el proceso de evaluación de toler-

ancias, para expresar los resultados de la inspección con un atributo probabilístico.

## 2 EL SENSOR DE RANGO

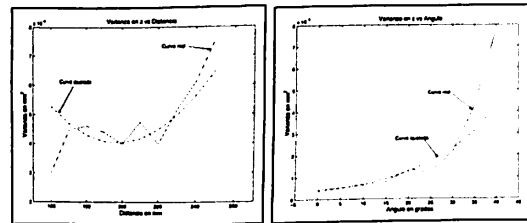
En esta sección describimos la precisión de los datos 3D, que puede ser obtenida en función de la ubicación del sensor. La cámara telemétrica, un sensor de rango auto-sincronizado, fue desarrollado en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRCC) (Blais, F., Rioux, M. and Beraldin, J.A., 1988).

Con el objeto de evaluar la precisión de la nube de puntos 3D obtenida por el proceso de digitalización, se realizaron 128 medidas, cada vez en diferentes posiciones de distancia y de orientación del sensor laser con respecto a la superficie de referencia.

En la Figura 1(a), se presenta la varianza (en  $mm^2$ ) en el eje de propagación del rayo laser (eje  $z$ ) contra la distancia (en  $mm$ ) de la cámara a la superficie. La curva punteada es un polinomio de segundo grado que ajusta de la mejor manera posible la curva real de varianzas. La curva de ajuste es definida como  $Var(d) = 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d + 3.81 \times 10^{-5}$ . De la Figura 1(a), se puede concluir que a pesar de las oscilaciones creadas por efectos de *speckle*, la varianza tiene la menor dispersión cuando la cámara está más cerca de la superficie. Para mejorar la precisión en las medidas mediante la selección de la mejor posición de digitalización, se define un rango de distancias para las posiciones como  $170mm \leq d \leq 240mm$ . Para distancias menores a  $170mm$ , la precisión es menor porque el rayo laser se encuentra fuera de foco.

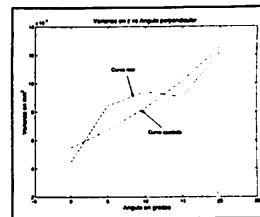
En la Figura 1(b), se presenta la varianza (en  $mm^2$ ) en el eje de propagación del rayo laser contra el ángulo incidente (en grados) con que el rayo laser alcanza la superficie. La curva punteada es una función exponencial  $Var(\alpha) = 3.77 \times 10^{-6} \cdot e^{6.01 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|}$  que ajusta de la mejor manera posible la curva real de varianzas. El ángulo incidente es medido en la misma dirección que el barrido del rayo laser. De la Figura 1(b) se observa que el menor valor de dispersión es producido para un ángulo incidente cerca a cero grados, o normal a la superficie. Se define un rango de barrido del rayo laser como  $-35^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ , para mejorar la precisión en las medidas mediante la selección de la mejor posición de digitalización. El rango inicia en  $-35^\circ$  y no  $0^\circ$  porque se tiene un resultado simétrico cuando el ángulo  $\alpha$  se incrementa en la dirección opuesta.

Otro parámetro que influencia el valor de la varianza es el ángulo incidente en la dirección perpendicular a la del barrido del rayo laser (ángulo  $(\beta)$ ). En la Figura 1(c), se presenta la varianza (en  $mm^2$ ) en el eje del proyección del rayo laser contra el ángulo incidente  $\beta$  (en grados). La curva punteada es una función exponencial  $Var(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|}$  que ajusta de la mejor manera posible la curva real de varianzas. De manera similar que para



(a) Varianza en Z contra distancia.

(b) Varianza en Z contra el ángulo incidente en la dirección de el barrido del rayo laser.



(c) Varianza en Z contra el ángulo incidente en la dirección perpendicular al barrido del rayo laser.

Figure 1: Varianza del sensor de rango en la dirección Z.

el ángulo  $\alpha$ , se puede concluir de la Figura 1(c) que la dispersión es menor cuando el ángulo incidente tiene un valor cercano a cero, o normal a la superficie. Para este parámetro se define el rango  $-15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$  en el cual se tendrán las mejores condiciones de precisión.

Estos resultados confirman que se puede mejorar la precisión de los datos adquiridos mediante la consideración de los criterios definidos previamente (dirección normal y distancia). Por lo tanto, para la realización de la tarea de inspección, utilizamos el sistema de adquisición de imágenes tridimensionales de alta precisión presentado en (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001b). Este sistema mejora la precisión de los datos 3D mediante la selección de la posición óptima de la cámara para el proceso de digitalización, usando el rango para los parámetros  $d$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  calculados en esta sección.

## 3 ESTRATEGIA DE ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN 3D

El principal objetivo de la estrategia es mejorar la precisión global de las medidas realizadas con el sensor de rango. En esta sección describimos brevemente la estrategia, una presentación detallada puede ser encontrada en (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001b). La estrategia consiste en calcular un conjunto  $X$  de puntos de vista (posición del sensor)  $x^i$  para obtener una imagen 3D completa y exacta de la superficie o de la pieza entera. Defini-

mos una imagen 3D exacta como una nube de puntos 3D adquiridos por el sistema de digitalización con la mayor exactitud posible. La estrategia consiste por lo tanto en encontrar la colección de puntos de vista para cada superficie. Si se desea digitalizar toda la pieza, el sistema solo tiene que agregar el conjunto  $X$  de todas las superficies en la pieza.

Definimos un punto de vista como un conjunto de siete parámetros  $x^i = \{x, y, z, \theta, \phi, \psi, \gamma\}^i$  (ver la Figura 2). Seis parámetros del soporte mecánico (MMT): tres parámetros de posición  $(x, y, z)$  y tres parámetros de orientación  $(\theta, \phi, \psi)$ . El ángulo  $\theta$  define la rotación alrededor del eje  $Z$ , el ángulo  $\phi$  define la rotación alrededor del eje  $Y$  y el ángulo  $\psi$  define la rotación alrededor del eje  $X$ . Un parámetro del sensor ASR que especifica el ángulo instantáneo del barrido (ángulo  $\gamma$ ).

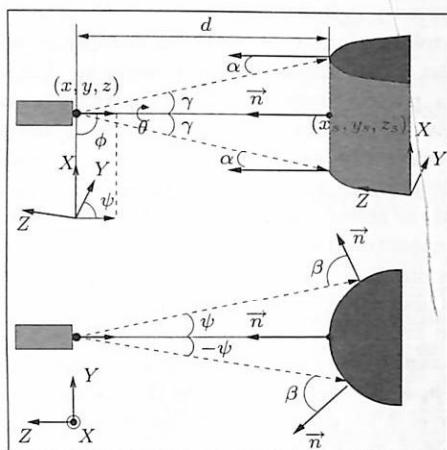


Figure 2: Parámetros del punto de vista

El conjunto  $X$  de puntos de vista  $x^i$  es definido como:  $X = \{x^1 x^2 \dots x^i \dots x^n\}$ , con  $n$  el número mínimo de puntos de vista para digitalizar una superficie o la pieza entera. Una imagen de rango es obtenida moviendo el sensor a través de todos los puntos de vista en el conjunto  $X$ . El movimiento del sensor entre dos puntos de vista consecutivos se realiza siguiendo una línea recta.

El algoritmo desarrollado como sistema de adquisición de imágenes 3D de alta precisión (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001b) es:

#### Estrategia de adquisición de imágenes 3D

##### 1. Información de entrada.

1.1. Lectura de información del modelo CAD.

1.2. Generación del modelo voxel.

##### 2. Búsqueda de los puntos de vista.

2.1. Puntos de vista proyectados en la superficie.

2.2. Mejor ubicación espacial del punto de vista.

##### 2.3. Ubicación sin problemas de oclusión.

3. Estimación de la exactitud de los puntos 3D.

4. Distribución del conjunto  $X$  de puntos de vista.

## 4 CONTROL DE TOLERANCIAS

Los métodos de fabricación son incapaces de producir partes industriales con formas perfectas. Por lo tanto, para una pieza, se pueden medir las propiedades dimensionales o geométricas y determinar si sus desviaciones están dentro del intervalo definido por la tolerancia especificada. En esta sección presentamos brevemente la metodología de control de tolerancias propuesta en (Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T., 2001a). La metodología utiliza una imagen 3D de la pieza y su modelo CAD. El proceso de inspección 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.

### 4.1 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. El método de puesta en correspondencia que se utiliza en este trabajo se basa en los trabajos de Besl and McKay (Besl, P.J. and McKay, N.D., 1992). El método utiliza el algoritmo ICP (Iterative Closest Point), el cual solo requiere encontrar el punto sobre la superficie NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) 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 (Masuda y Yokoya, 1995) 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. Moron (Moron, V., Boulanger, P., Redarce, H.T. and Jutard, A., 1996) implementó un algoritmo para la puesta en correspondencia entre una nube de puntos no ordenados y el modelo CAD de la pieza en formato STL o IGES.

## 4.2 Proceso de segmentación

En el proceso de puesta en correspondencia la imagen 3D es superpuesta con el modelo CAD. Como estamos interesados en controlar solo algunas superficies, se segmenta la imagen 3D en sus diferentes superficies y se utilizan 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. Las propiedades geométricas utilizadas son la normal a la superficie en el punto de interés, la curvatura gaussiana y la curvatura mediana.

## 4.3 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 geométricas y las tolerancias dimensionales. Las tolerancias geométricas pueden ser de tres tipos: Tolerancias de forma, Tolerancias de orientación y Tolerancias de posición.

### 4.3.1 Tolerancias 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 paralelas y distantes  $t_s$ , 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. La planitud, 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  $\pm 2\sigma$ , la tolerancia medida es definida por:  $t_m = 4\sigma$ . Para todas las tolerancias de forma, diremos que la superficie está de acuerdo a

las especificaciones si la relación  $t_m \leq t_s$  es respetada ( $t_s$  es la tolerancia especificada).

### 4.3.2 Tolerancias 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 gaussiana. 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  $d_i \leq d_1$ . 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  $d_i \geq d_2$ . 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.

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.

### 4.3.3 Tolerancias 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 las 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 debe 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:  $t_{1s} \leq t_{1m} < t_{2m} \leq t_{2s}$ . Donde  $t_{1s}$  y  $t_{2s}$  son las distancias a la superficie de referencia, ellas definen la zona de tolerancia especificada,  $t_{1m}$  y  $t_{2m}$  son las distancias a la superficie bajo control, ellas definen la tolerancia medida.

#### 4.3.4 Tolerancias dimensionales

Una tolerancia dimensional representa el intervalo que limita la dimensión efectiva de un elemento. El puede ser expresado por dos variaciones definiendo los límites superiores e inferiores de tolerancia. En este trabajo sólo podemos controlar la tolerancia dimensional correspondiente a las dimensiones entre dos superficies paralelas. Para dos nubes de puntos relacionados a superficies paralelas las cuales definen la dimensión a ser controlada, podemos calcular la distancia entre cada punto y su superficie CAD para determinar los valores  $\bar{d}$  y  $\sigma$ . La dimensión medida es entonces  $d_0 \pm 2(\sigma_1 + \sigma_2)$ , donde  $d_0$  es la distancia entre  $\bar{d}_1$  y  $\bar{d}_2$ .

### 5 INSPECCIÓN NO DETERMINISTA

Una imagen real no está exenta de ruido, por lo tanto se presentan incertidumbres en los atributos de las entidades resultantes del proceso de adquisición de imágenes. En el caso de imágenes 3D, estas entidades son subconjuntos de puntos 3D (después de proceso de segmentación) y los mismos puntos 3D. La incertidumbre en las entidades de una imagen introduce incertidumbre en las tareas de inspección. En esta sección se discute el efecto de la incertidumbre en los resultados de inspección. Se supone que las imágenes de rango fueron obtenidas utilizando la estrategia de adquisición que se presentó en la sección 3.

#### 5.1 Modelo de ruido

En la sección 2 se presentó el modelo de ruido del sistema de digitalización. Sea  $\tilde{r}_{ij}$  el valor exacto del punto  $(x_i, z_j)$  en la superficie, y sea  $(\hat{x}_i, \hat{z}_j)$  el valor medido del punto. El modelo de ruido para un punto medido por el sensor es:  $(\hat{x}_i, \hat{z}_j) = (x_i, z_j) + b(x_i, z_j)$ .

El ruido  $b(\tilde{r})$ , es descrito por una función de densidad de probabilidad con distribución gaussiana, con media cero y con una matriz de covarianza  $\Sigma$ , como sigue:

$$b(\tilde{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\Sigma|}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\tilde{r} - \bar{s})^T \Sigma^{-1}(\tilde{r} - \bar{s})\right), \quad (1)$$

donde  $\bar{s}$  es un vector bidimensional, correspondiente al punto en la superficie NURBS más cercana a  $\tilde{r}$  y  $\Sigma(\tilde{r})$  es la matriz de covarianza para el punto  $\tilde{r}$ .

Las propiedades de la función de ruido  $b(\tilde{r})$  pueden ser interpretadas geométricamente, asignando un

valor de probabilidad constante a la intersección de la función  $b(\tilde{r})$  con un plano horizontal. Estas intersecciones forman una familia de elipses. Cuando el centro de una elipse coincide con el origen del eje de referencia, la forma y orientación de la elipse están completamente definidas por  $\Sigma$ . Además, la longitud del eje mayor y del eje menor pueden ser calculados fácilmente como la raíz cuadrada de los valores propios de  $\Sigma$ . La longitud de los ejes de la elipse de dispersión para el punto  $\tilde{r}$  puede ser entonces calculada por:

$$L_x(\tilde{r}) = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}(\tilde{r}) + \sigma_{zz}(\tilde{r}))},$$

$$L_z(\tilde{r}) = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{zz}(\tilde{r}) - \sigma_{xx}(\tilde{r}))}, \quad (2)$$

donde  $L_x(\tilde{r})$  es la longitud del eje menor y  $L_z(\tilde{r})$  es la longitud del eje mayor, ya que para el punto  $\tilde{r}$  sabemos que  $\sigma_{zz}(\tilde{r}) > \sigma_{xx}(\tilde{r})$  (Sección 2).

#### 5.2 Consideración del ruido en el proceso de inspección

La matriz de covarianza  $\Sigma$  es función de los parámetros de digitalización tales como: el ángulo de incidencia  $\alpha$  del rayo laser sobre la superficie en la dirección del barrido del laser, de el ángulo  $\beta$  del rayo laser sobre la superficie en la dirección perpendicular al barrido del laser y de la distancia  $d$  desde el sensor a la superficie.

La forma de la varianza en el punto  $\tilde{r}$  es una elipse, donde el eje mayor muestra la mayor dispersión del punto  $\tilde{r}$ . Calculamos el eje mayor (ecuación 2) usando  $\sigma_{xx}(\tilde{r})$  y  $\sigma_{zz}(\tilde{r})$  calculados similarmente que en la Sección 2:

$$\sigma_{xx}(\tilde{r}) = \sigma_{xx}(\alpha) + \sigma_{xx}(\beta) + \sigma_{xx}(d), \quad (3)$$

donde:  $\sigma_{xx}(\alpha) = 6.47 \times 10^{-7} \cdot e^{5.91 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|}$ ,  $\sigma_{xx}(\beta) = 8.30 \times 10^{-7} \cdot e^{4.40 \times 10^{-2} \cdot |\beta|}$  y  $\sigma_{xx}(d) = 9.92 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 3.82 \times 10^{-8} \cdot d + 4.34 \times 10^{-6}$ .

Y:

$$\sigma_{zz}(\tilde{r}) = \sigma_{zz}(\alpha) + \sigma_{zz}(\beta) + \sigma_{zz}(d), \quad (4)$$

donde:  $\sigma_{zz}(\alpha) = 3.77 \times 10^{-6} \cdot e^{6.01 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|}$ ,  $\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|}$  y  $\sigma_{zz}(d) = 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d + 3.81 \times 10^{-5}$ .

Sea  $L_{z \min}$  el mínimo valor de  $L_z$  obtenido en condiciones de digitalización óptima, por lo tanto:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$  y  $d = 170mm$ . Sea  $L_{z \max}$  el máximo valor de  $L_z$  obtenido en condiciones de digitalización extremas, por lo tanto:  $|\alpha| = 35^\circ$ ,  $|\beta| = 15^\circ$  y  $d = 240mm$ .

Definimos el valor medio de las dispersión de una nube de puntos como:

$$\bar{L}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_z(\tilde{r}_i), \quad (5)$$

con  $n$  el número de puntos 3D en la nube.

Sea  $t_s$  una tolerancia especificada y  $t_m$  la desviación medida de una pieza que está siendo controlada. La inspección determinista sugiere que la pieza está conforme a las especificaciones si  $t_m \leq t_s$ . En la inspección no determinista el resultado de la inspección debe tener en cuenta la dispersión de los puntos usados para realizar el control de la tolerancia. En la Figura 3 se presentan las posibles regiones  $t_m$  que se pueden obtener relacionadas con  $t_s$ .

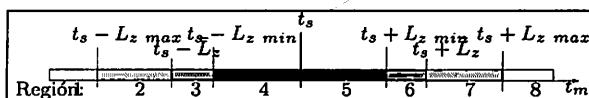


Figure 3: Ubicación de  $t_m$  relacionada con  $t_s$ .

La ubicación de  $t_m$  relacionada con  $t_s$  es usada para cuantificar el resultado del control de tolerancia por un valor cualitativo de confiabilidad. En la Tabla 1 se resume la cuantización de los resultados de inspección de acuerdo a las posibles regiones.

La cuantización *Poco confiable* y *No confiable* indican que el sistema de inspección no es lo suficientemente preciso para controlar la tolerancia especificada. Por lo tanto sería necesario mejorar la precisión de los datos 3D (para reducir  $\bar{L}_z$  tanto como sea posible), o utilizar otro método de inspección.

## 6 RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados de inspección de las siguientes tolerancias: Tolerancia dimensional entre dos superficies paralelas cuya especificación es  $45 \pm 0.3 \text{ mm}$ . Tolerancia de planeidad en la superficie de una pieza cuya especificación es  $0.01 \text{ mm}$ . Tolerancia de perpendicularidad de una superficie comparada con una superficie de referencia y cuya especificación es  $0.4 \text{ mm}$ . Finalmente una tolerancia de angularidad en una superficie conectada con una superficie de referencia con especificación de  $0.4 \text{ mm}$ .

### 6.1 Inspección estándar

Con el objeto de conocer las desviaciones exactas de estas tolerancias, se llevó a cabo el control de las tolerancias con una MMT con precisión de  $5 \mu\text{m}$ . Los resultados de esta inspección son presentados en la Tabla 2, con la tolerancia bajo control, el valor de la tolerancia especificada ( $t_s$ ), el valor medido ( $t_m$ ) y el resultado de inspección.

**Inspección usando datos 3D provenientes del proceso de digitalización estándar.** Estos resultados son presentados en la Tabla 3. Los resultados similares a los obtenidos con la MMT, pero la

columna de valor de tolerancia medida muestra que estos valores son menos precisos que los logrados con la MMT.

**Inspección usando datos 3D provenientes del proceso de digitalización con la estrategia de adquisición.** En la Tabla 4 presentamos los resultados de este proceso de inspección. Los resultados obtenidos son idénticos al caso precedente (proceso de digitalización estándar), pero los valores de las tolerancias medidas son más pequeños, convergiendo hacia los resultados de inspección obtenidos con la MMT.

Finalmente presentamos en la Tabla 5, el número de puntos 3D utilizados para el control de las tolerancias, para cada uno de los tres procesos: MMT, digitalización estándar y digitalización con la estrategia de adquisición.

Usando el sensor de rango el número de puntos 3D es, en general, mayor que 1000 puntos por superficie, distribuidos uniformemente en toda la superficie. Este es un aspecto muy favorable para esta clase de inspección. En la inspección con un sensor de contacto como la MMT es imposible, desde el punto de vista práctico, adquirir tantos puntos ya que esto requeriría muchas horas de trabajo por superficie.

### 6.2 Inspección no determinista

Usando la estrategia de adquisición para el proceso de digitalización conocemos los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $d$ . Por lo tanto podemos calcular  $L_{z \min}$ ,  $L_{z \max}$  y  $\bar{L}_z$  y realizar una inspección no determinista (como se presentó en la Sección 5). En la Tabla 6 se presentan los resultados de esta inspección.

La tolerancia dimensional como las tolerancias geométricas de perpendicularidad y angularidad fueron encontradas conforme a las especificaciones, con un valor de confiabilidad *altamente confiable*. La tolerancia geométrica de planeidad fue encontrada no conforme a la especificación, con un valor de confiabilidad *no confiable*. El valor de confiabilidad *no confiable* es debido al pequeño valor de la especificación ( $10 \mu\text{m}$ ) más pequeño que la precisión del sistema de adquisición, y por lo tanto se recomienda utilizar otro método de control de tolerancias.

## 7 CONCLUSIONES

Se presentó un sistema de inspección de piezas industriales que utiliza imágenes de profundidad de alta precisión, obtenidos mediante la utilización de una estrategia de adquisición. La inclusión del modelo de ruido en el proceso de digitalización de la pieza, con el objeto de adicionar a la medida un valor de dispersión, es la contribución más importante de este trabajo.

Table 1: Cuantización de los resultados de inspección no determinista.

Reg.	Ubicación de $t_m$ relacionado con $t_s$	Resultado de inspección	Valor de confiabilidad
1	$t_m < t_s - L_z \max$	Conforme a la tolerancia especificada	Altamente confiable
2	$t_s - L_z \max \leq t_m < t_s - \bar{L}_z$	Conforme a la tolerancia especificada	Muy confiable
3	$t_s - \bar{L}_z \leq t_m < t_s - L_z \min$	Conforme a la tolerancia especificada	Poco confiable
4	$t_s - L_z \min \leq t_m < t_s$	Conforme a la tolerancia especificada	No confiable
5	$t_s \leq t_m < t_s + L_z \min$	No conforme a la tolerancia especificada	No confiable
6	$t_s + L_z \min \leq t_m < t_s + \bar{L}_z$	No conforme a la tolerancia especificada	Poco confiable
7	$t_s + \bar{L}_z \leq t_m < t_s + L_z \max$	No conforme a la tolerancia especificada	Muy confiable
8	$t_s + L_z \max \leq t_m$	No conforme a la tolerancia especificada	Altamente confiable

Table 2: Control de tolerancias usando la MMT.

Tolerancia	Valor especificado	Valor medido	Resultado
Tol. dimensional	$45 \pm 0.3 \text{ mm}$	$45.016 \pm 0.001 \text{ mm}$	Conforme
Planeidad	$10 \mu\text{m}$	$10.8 \mu\text{m}$	No conforme
Perpendicularidad	$400 \mu\text{m}$	$39 \mu\text{m}$	Conforme
Angularidad	$400 \mu\text{m}$	$26 \mu\text{m}$	Conforme

La metodología de inspección utiliza una imagen 3D y el modelo CAD de la pieza. Después de la puesta en correspondencia de la imagen 3D con el modelo CAD de la pieza, los puntos 3D son segmentados en sus diferentes superficies utilizando para esto el modelo CAD. A partir del modelo CAD se tiene la descripción exacta de la pieza, por lo que la metodología implementada se puede utilizar para realizar la inspección de piezas con superficies complejas.

profundidad son mejorados con el uso de la estrategia de adquisición. Esta alta precisión en los datos 3D es particularmente interesante cuando una inspección muy fina es requerida. La estrategia de adquisición permite introducir un valor de confiabilidad al resultado de la inspección y desarrollar así la inspección no determinista. El valor de confiabilidad constituye una ayuda a la toma de decisión de aceptación o rechazo de la pieza bajo control

Table 5: Número de puntos 3D usados para el control de la tolerancia.

Tolerancia	CMM	estándar	Estrategia
Tol. dimensional	25	2321	2043
Planeidad	20	1467	1215
Perpendicularidad	29	2166	2768
Angularidad	32	1745	1912

Table 6: Control no determinista de tolerancias.

Tolerancia	Resultado	Valor de confiab.
Tol. dimens.	Conforme	Altamente conf.
Planeidad	No conforme	No conf.
Perpendicul.	Conforme	Altamente conf.
Angularidad	Conforme	Altamente conf.

Los resultados presentados muestran que la precisión de los datos 3D obtenidos con un sensor de

## REFERENCES

- Besl, P.J. and McKay, N.D. (1992), 'A method for registration of 3-D shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14(2), 239-256.
- Blais, F., Rioux, M. and Beraldin, J.A. (1988), Practical considerations for a design of a high precision 3-D laser scanner system, in 'SPIE Optomechanical and Electro-Optical Design of Industrial Systems', Bellingham, pp. 225-246.
- Masuda, T. y Yokoya, N. (1995), 'A robust method for registration and segmentation of multiple range images', *Computer Vision and Image Understanding* 61(3), 295-307.
- Moron, V., Boulanger, P., Redarce, H.T. and Jutard, A. (1996), 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, pp. 913-922.

Table 3: Control de tolerancias usando datos 3D adquiridos con el proceso estándar de digitalización.

Tolerance	Valor especificado	Valor medido	Resultado
Tol. dimensional	$45 \pm 0.3 \text{ mm}$	$44.993 \pm 0.038 \text{ mm}$	Conforme
Planeidad	$10 \mu\text{m}$	$72 \mu\text{m}$	No conforme
Perpendicularidad	$400 \mu\text{m}$	$134 \mu\text{m}$	Conforme
Angularidad	$400 \mu\text{m}$	$41 \mu\text{m}$	Conforme

Table 4: Control de tolerancias usando datos 3D provenientes del proceso de digitalización con la estrategia de digitalización.

Tolerancia	Valor especificado	Valor medido	Resultado
Tol. dimensional	$45 \pm 0.3 \text{ mm}$	$44.999 \pm 0.012 \text{ mm}$	Conforme
Planeidad	$10 \mu\text{m}$	$13 \mu\text{m}$	No conforme
Perpendicularidad	$400 \mu\text{m}$	$93 \mu\text{m}$	Conforme
Angularidad	$400 \mu\text{m}$	$34 \mu\text{m}$	Conforme

Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T. (2001a), 'Control de tolerancias geométricas usando imágenes 3D', *Revista Energía y Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Colombia* X(1), 29-39.

(2001b), 'Sistema de Adquisición de Imágenes Tridimensionales de Alta Precisión', *Revista de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Colombia* 68(134), 33-46.

Prieto, F., Lepage, R., Boulanger, P. y Redarce, T.