

# SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRIDIMENSIONALES DE ALTA PRECISIÓN

FLAVIO PRIETO

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

RICHARD LEPAGE

*École de Technologie Supérieure, Laboratoire d'Imagerie, de Vision et d'Intelligence Artificielle, Montreal, Canada*

PIERRE BOULANGER

*Department of Computing Science, University of Alberta, Alberta, Canada*

TANNEGUY REDARCE

*Laboratoire d'Automatique Industrielle, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Francia*

Recibido para revisión Febrero 8 de 2002, aceptado Mayo 3 de 2002; versión final recibida Mayo 17 de 2002

**RESUMEN:** El uso de sensores de profundidad basados en sistemas láser permite un gran incremento en la velocidad de adquisición de imágenes 3D y en la densidad de puntos, pero no iguala la precisión que se obtiene con el uso de Máquinas de Medición Tridimensional (MMT). Con el fin de obtener datos 3D precisos utilizando un sensor de profundidad para tareas de control de tolerancias, se presenta un sistema para la adquisición de imágenes tridimensionales de alta precisión. El sistema produce, basado en el modelo computacional de la pieza, un conjunto de puntos de vista (posición y orientación) que debe tomar el sensor para así digitalizar la superficie o pieza en las mejores condiciones de precisión. Se utilizó un sensor de profundidad auto-sincronizado montado en una MMT.

**PALABRAS CLAVES:** Adquisición de imágenes, imágenes tridimensionales, sensor de profundidad.

**ABSTRACT:** The use of a laser range sensor in the 3D digitalization process allows very significant improvement in acquisition speed and in 3D measurement points density, but if we want to use this 3D data in applications that require data with a high degree of accuracy like inspection tasks, it is mandatory that the 3D points be acquired in the best conditions of accuracy. The sensing plan is composed of the set of viewpoints which defines the exact position and orientation of the camera relative to the part. An auto-synchronized range sensor fixed on a coordinate measuring machine were used. The strategy proposed to find the acquisition plan guarantees that the viewpoints meet the best accuracy conditions in the scanning process, solving the occlusion problems.

**KEY WORDS:** Image acquisition, 3D image, range sensor.

## 1 INTRODUCCIÓN

La inspección automática utilizando sensores de profundidad es una tarea compleja que requiere una exacta definición geométrica de la pieza y un gran número de puntos de medida. El uso de la Máquina de Medición Tridimensional (MMT) como dispositivo de posicionamiento y los progresos recientes en sensores de alta precisión basados en tecnologías laser, combinan precisión en las medidas y gran velocidad de adquisición, lo que permite obtener un gran número de puntos de medida 3D con alta precisión. Estos puntos forman

una descripción de las superficies de un objeto. Además el conocimiento de los modelos computacionales (modelo CAD) permite tener una descripción matemática de la forma exacta de un objeto.

Con el fin de aprovechar la velocidad de adquisición de los sensores de profundidad instalados sobre un soporte mecánico preciso (MMT), e intentar igualar la precisión de las MMT, es necesario definir sistemas de adquisición que permitan digitalizar las piezas en las mejores condiciones de precisión. En este trabajo presentamos un sistema de adquisición para mejorar la precisión global de los datos

obtenidos. El sistema utiliza como entrada el modelo computacional de la pieza en formato IGES y debe conocer la posición y orientación exacta de la pieza, lo cual se logra con un sistema de puesta en correspondencia. La salida es un conjunto de puntos de vista (posición y orientación) que debe tomar la cámara laser. El sistema resuelve los problemas de oclusión y además garantiza que los datos adquiridos tendrán la mejor precisión posible.

El problema de planificación para la adquisición de imágenes en visión por computador, fue presentado por Tarabanis (*Tarabanis et al*, 1995b) de la siguiente manera: para cierta información, concerniente con el ambiente (objeto bajo observación, sensor disponible) y concerniente con la tarea que el sistema debe realizar (detección de características, reconocimiento de objetos, reconstrucción de escena), desarrollar una estrategia automática para determinar los parámetros del sistema de visión (la posición, la orientación y los parámetros ópticos del sensor) para realizar la tarea cumpliendo algunos criterios. La mayoría de los trabajos realizados en el campo de la planificación de la posición del sensor, están orientados a encontrar el mínimo número de puntos de vista para digitalizar completamente un objeto (*Mason*, 1995; *Tarabanis*, 1995; *Tarbox*, 1995; *Tarbox*, 1995b; *Tarabanis*, 1996; *Abrams*, 1997; *Trucco*, 1997). En el sistema que presentamos, los puntos de vista resultantes permiten digitalizar la pieza obteniendo medidas 3D con alta precisión.

## 2 SISTEMA DE ADQUISICION DE IMAGENES

La cámara, un sensor de profundidad auto-sincronizado (sensor ASR), desarrollado en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (NRCC) (*Blais*, 1988a; *Rioux*, 1984), sincroniza el rayo laser proyectado con el rayo reflejado por la superficie, el cual es detectado por una cámara CCD. El resultado de la digitalización de una superficie o pieza utilizando el sensor ASR, es una nube de puntos tridimensionales ( $x, y, z$ ) (imagen 3D). El sensor ASR 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 20000 puntos por segundo.

Para digitalizar la pieza entera y permitir el registro mecánico exacto entre las vistas, el sensor de profundidad tiene que ser fijado en un soporte mecánico. Para el desarrollo experimental, el sensor ASR se montó en una MMT. La MMT permite tener seis grados de libertad, incluyendo tres para la posición espacial y tres para la orientación del sensor. El sistema de adquisición: soporte mecánico y sensor ASR, limita el espacio de trabajo, o el espacio donde la pieza a ser digitalizada debe ser incluida. Para nuestro sistema, este espacio es un paralelepípedo donde los lados  $ws_x$ ,  $ws_y$  y  $ws_z$  representan respectivamente los máximos desplazamientos del sensor en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , de una manera tal que el sensor se oriente siempre hacia el centro del espacio de trabajo. Las dimensiones del espacio de trabajo son:  $ws_x = 80cm$ ,  $ws_y = 30cm$  y  $ws_z = 30cm$ .

### 2.1 Modelo de Ruido del Sensor ASR

Para modelar el ruido, estamos interesados en la obtención de una caracterización del ruido introducido en cada punto 3D obtenido. Esta caracterización está relacionada con cierto número de parámetros tales como la distancia del sensor a la superficie y el ángulo de incidencia entre el rayo laser, cuando alcanza la superficie, y el vector normal a la superficie. Si suponemos que el ruido en una imagen es aditivo y aleatorio, es decir una señal aleatoria  $b(x, z)$  es agregada al valor real de la imagen  $(x, z)$ , tal que:  $(\hat{x}, \hat{z}) = (x, z) + b(x, z)$ . La cantidad de ruido en una imagen es estimada por la matriz de covarianza  $\Sigma$ . En general, el ruido se modela como una función aleatoria con una distribución gaussiana de media cero:

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

donde  $\vec{s}$  es un vector bi-dimensional que co-

rresponde al punto en la superficie del modelo computacional más cercano a  $\vec{r}$ , y  $\Sigma$  es la matriz de covarianza del punto  $\vec{r}$ . La matriz de covarianza en la ecuación 2, define para el punto  $\vec{r}$ , una elipse cuya forma (longitud de los ejes) es una función de la distancia del sensor a la superficie y del ángulo de incidencia del rayo laser sobre la superficie.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Las componentes de la matriz de covarianza son:  $\sigma_{xx}$ , varianza en  $x$ ,  $\sigma_{xz}$  ( $\sigma_{zx}$ ), covarianza entre  $x$  ( $z$ ) y  $z$  ( $x$ ) y  $\sigma_{zz}$ , varianza en  $z$ .

Para evaluar la exactitud de los puntos 3D obtenidos por el proceso de adquisición, se realizaron 128 medidas, para diversas posiciones de distancia y orientación del sensor laser con respecto a una superficie de referencia. Las medidas fueron realizadas después del proceso de la calibración del sensor ASR y las posiciones del sensor fueron cercanas a las de calibración.

El objetivo de estas medidas es determinar la matriz de covarianza  $\Sigma$ , definida por:

$$\Sigma = \Sigma(\alpha) + \Sigma(\beta) + \Sigma(d) \quad (3)$$

donde:

-  $\alpha$  es el ángulo de incidencia del rayo laser en la superficie en la dirección del barrido del rayo laser. Rotación alrededor del eje  $Y$  en la Figura 1. En la figura el sensor ASR es visto lateralmente (perpendicular al plano  $XZ$ ), las líneas punteadas representan los extremos del barrido del rayo laser (el cual es a lo largo del eje  $X$ ).

-  $\beta$  es el ángulo de incidencia del rayo laser en la superficie, en la dirección perpendicular del barrido del laser. Rotación alrededor del eje  $X$  en la Figura 2. En la figura el sensor ASR es visto desde arriba (perpendicular al plano  $YZ$ ), el barrido del rayo laser es hecho moviéndose a lo largo del eje  $X$  (alineado con la proyección del rayo laser, representado por la línea continua del sensor a la superficie).

-  $d$  es la distancia del sensor ASR a la superficie.

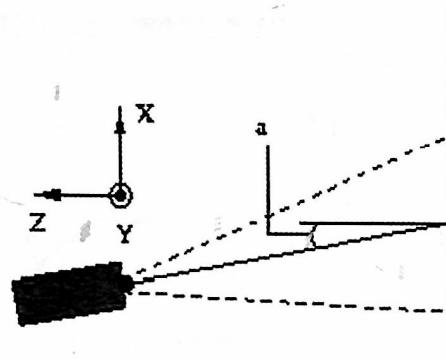


Figura 1. Ángulo incidente  $\alpha$ .

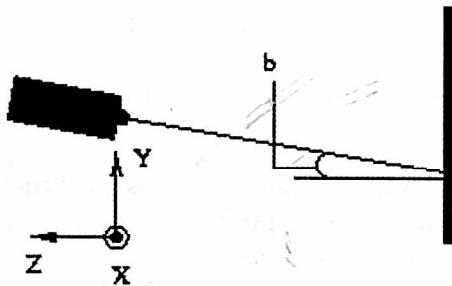


Figura 2. Ángulo incidente  $\beta$  sobre una pieza.

## 2.2 Matriz de covarianza para el parámetro $\alpha$

Para determinar los componentes de la matriz de la covarianza según el ángulo incidente  $\alpha$ , cambiamos el ángulo de orientación del sensor siguiendo la dirección del barrido del rayo laser. El ángulo  $\beta$  y la distancia  $d$  fueron fijados a los valores  $\beta = 0^\circ$  y  $d = 200\text{mm}$ .

En la Figura ?? presentamos la forma de la varianza en  $z$ , o sea  $\sigma_{zz}$ . En esta figura la curva continua representa las medidas y la curva punteada es la curva que mejor aproxima la curva verdadera. La ecuación siguiente define la curva que mejor se ajusta a los valores verdaderos.

$$\sigma_{zz}(\alpha) = 3.77 \times 10^{-6} \cdot e^{6.01 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \quad (4)$$

De manera similar encontramos las covarianzas  $\sigma_{xz}$  y  $\sigma_{xx}$ , de las cuales sólo presentamos las ecuaciones.

$$\sigma_{xz}(\alpha) = \sigma_{zx}(\alpha) = 6.47 \times 10^{-7} \cdot e^{5.91 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \quad (5)$$

$$\sigma_{xx}(\alpha) = 1.42 \times 10^{-7} \cdot e^{5.46 \times 10^{-2} \cdot |\alpha|} \quad (6)$$

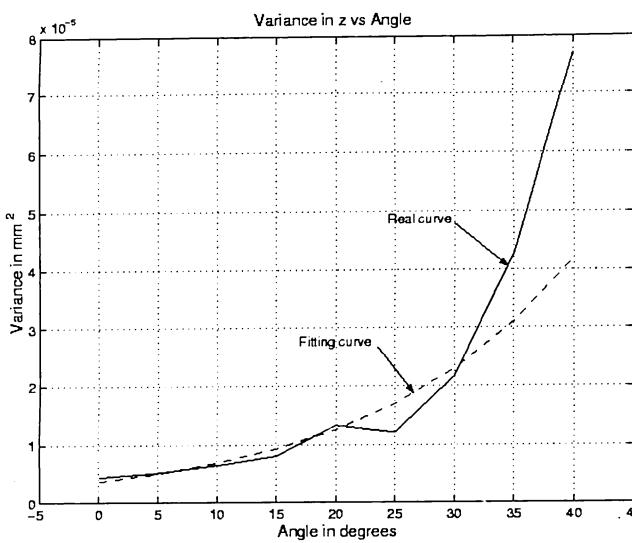


Figura 3. Varianza en Z contra el ángulo incidente.

El comportamiento de los parámetros de la matriz de covarianza es exponencial, por lo tanto el valor más pequeño de la dispersión se produce para un ángulo de incidencia cerca de cero grados, lo que sugiere el lugar óptimo para la ubicación del sensor en la dirección normal a la superficie. Las ecuaciones obtenidas son válidas en el intervalo  $0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ , por lo tanto en el momento de la digitalización de una superficie, el ángulo de incidencia del rayo laser en superficie debe estar en dicho intervalo.

### 2.3 Matriz de covarianza para el parámetro $\beta$

La matriz de covarianza según el ángulo de incidencia  $\beta$ ,  $\sigma(\beta)$  fue determinada cambiando la orientación del sensor ASR, en una dirección perpendicular a la del barrido del rayo laser. Para este caso, el ángulo  $\alpha$  y la distancia  $d$  fueron fijados a:  $\alpha = 0^\circ$  y  $d = 200\text{mm}$ . Los resultados obtenidos fueron:

$$\sigma_{xx}(\beta) = 1.59 \times 10^{-7} \cdot e^{4.59 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (7)$$

$$\sigma_{xz}(\beta) = \sigma_{zx}(\beta) = 8.30 \times 10^{-7} \cdot e^{4.40 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (8)$$

$$\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (9)$$

En el momento de la numerización, el án-

gulo de incidencia  $\beta$  debe estar en el intervalo  $-15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ .

### 2.4 Matriz de covarianza para el parámetro $d$

Cambiando la distancia del sensor a la superficie, hemos determinado la matriz de covarianza para el parámetro  $d$ . Los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  fueron fijados a  $0^\circ$ .

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(d) &= 1.14 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 4.20 \times 10^{-9} \cdot d \\ &\quad + 5.20 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(d) &= \sigma_{zx}(d) = 9.92 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 3.82 \times 10^{-8} \cdot d \\ &\quad + 4.34 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(d) &= 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d \\ &\quad + 3.81 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (12)$$

Concluimos que en el momento de la digitalización el sensor se debe colocar en el intervalo de distancia:  $170\text{mm} \leq d \leq 240\text{mm}$ .

## 3 LA ESTRATEGIA DE ADQUISICION

Los resultados en la Sección 2 confirman que podemos mejorar la precisión de los datos 3D, siguiendo en el proceso de adquisición algunos criterios definidos previamente (dirección, distancia). Así pues, hemos diseñado una estrategia de adquisición. Tal 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. Definimos una imagen 3D exacta como una nube de puntos 3D adquiridos por el sistema de digitalización con la mayor exactitud posible. Nuestra 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 sólo tiene que agregar el conjunto  $X$  de todas las superficies en la pieza.

Definimos un punto de vista como un conjunto de siete parámetros  $x^i = \{x, y, z, \theta, \phi, \psi, \gamma\}^i$ . 1. 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

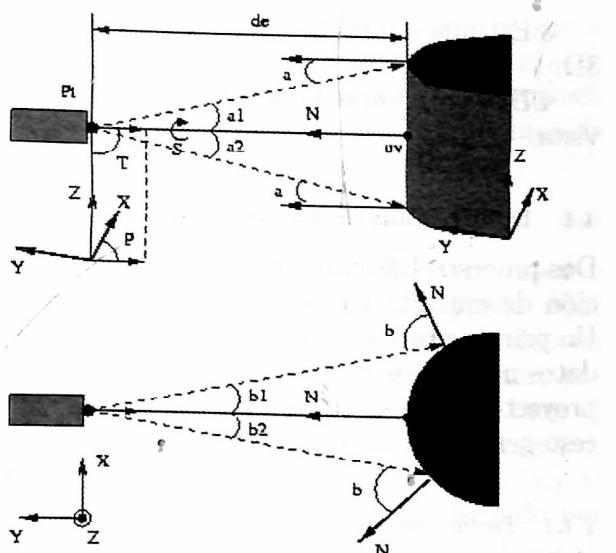


Figura 4. Parámetros del punto de vista.

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  $\gamma$ ). La Figura 4 muestra un punto de vista con todos sus parámetros. Estos parámetros podrían cambiar y otros podrían ser necesarios según el tipo de sensor de profundidad y de soporte mecánico utilizado.

El conjunto  $X$  de puntos de vista  $x^i$  se define 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 ASR entre dos puntos de vista consecutivos se realiza siguiendo una línea recta.

### 3.1 Requerimientos de la Estrategia

Los requerimientos impuestos al sistema, sabiendo que el objetivo es tener datos 3D con un alto grado de exactitud, son los siguientes: tamaño de la pieza, conocimiento de la posición y orientación inicial de la pieza y conocimiento del modelo CAD (en formato IGES) de la pieza.

Tamaño de la pieza. La pieza a numerizar

debe estar comprendida totalmente dentro del espacio de trabajo del sistema de adquisición. Como hemos indicado en la Sección 2 el soporte mecánico utilizado (MMT) tiene un espacio de trabajo definido por:  $wk_x = 80cm$ ,  $wk_y = 30cm$  y  $wk_z = 30cm$ . Las dimensiones de todas las piezas utilizadas en este trabajo están incluidas en un volumen  $100mm \times 50mm \times 50mm$ .

Posición y orientación de la pieza. El conocimiento de la posición y orientación de la pieza nos permite encontrar la transformación que superpone el sistema de la referencia de la pieza con el del soporte mecánico del sensor ASR.

Modelo computacional. El sistema utiliza el modelo computacional (CAD) de pieza, en formato IGES, no solamente en el proceso de superposición de los sistemas de referencia, sino también para buscar el conjunto  $X$  de puntos de vista para la digitalización.

### 3.2 El problema de Optimización

En la Sección 2 se encontró el modelo del ruido del sistema de digitalización. El modelo de ruido fue descrito en la ecuación (1) como una función de la densidad de probabilidad con una distribución gaussiana. Las propiedades de la función del ruido  $b(\vec{r})$  se pueden interpretar geométricamente, asignando un valor constante de probabilidad a la intersección de la función  $b(\vec{r})$  con el plano horizontal. Estas intersecciones forman una familia de elipses. Cuando el centro de la elipse coincide con el origen del sistema de referencia, la forma y la orientación están totalmente definidas por  $\Sigma$ . De hecho, la longitud de los ejes mayor y menor se puede calcular fácilmente como la raíz cuadrada de los valores propios de  $\sigma$ . La longitud de los ejes de la elipse de dispersión para el punto  $\vec{r}$  puede entonces ser calculado por:

$$\begin{aligned} L_x(\vec{r}) &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}(\vec{r}) + \sigma_{zz}(\vec{r}))} \\ L_z(\vec{r}) &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xz}(\vec{r}) + \sigma_{zz}(\vec{r}))} \end{aligned} \quad (13)$$

donde  $L_x(\vec{r})$  es la longitud del eje menor y

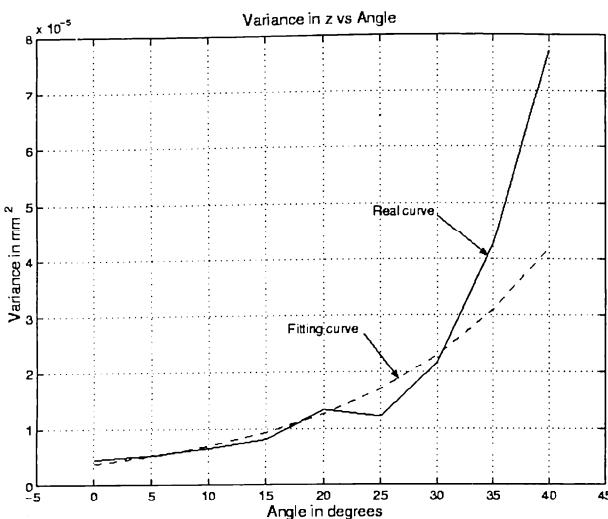


Figura 3. Varianza en Z contra el ángulo incidente.

El comportamiento de los parámetros de la matriz de covarianza es exponencial, por lo tanto el valor más pequeño de la dispersión se produce para un ángulo de incidencia cerca de cero grados, lo que sugiere el lugar óptimo para la ubicación del sensor en la dirección normal a la superficie. Las ecuaciones obtenidas son válidas en el intervalo  $0^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ , por lo tanto en el momento de la digitalización de una superficie, el ángulo de incidencia del rayo laser en superficie debe estar en dicho intervalo.

### 2.3 Matriz de covarianza para el parámetro $\beta$

La matriz de covarianza según el ángulo de incidencia  $\beta$ ,  $\sigma(\beta)$  fue determinada cambiando la orientación del sensor ASR, en una dirección perpendicular a la del barrido del rayo laser. Para este caso, el ángulo  $\alpha$  y la distancia  $d$  fueron fijados a:  $\alpha = 0^\circ$  y  $d = 200\text{mm}$ . Los resultados obtenidos fueron:

$$\sigma_{xx}(\beta) = 1.59 \times 10^{-7} \cdot e^{4.59 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (7)$$

$$\sigma_{xz}(\beta) = \sigma_{zx}(\beta) = 8.30 \times 10^{-7} \cdot e^{4.40 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (8)$$

$$\sigma_{zz}(\beta) = 5.47 \times 10^{-6} \cdot e^{4.15 \times 10^{-2} \cdot |\beta|} \quad (9)$$

En el momento de la numerización, el án-

gulo de incidencia  $\beta$  debe estar en el intervalo  $-15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ .

### 2.4 Matriz de covarianza para el parámetro $d$

Cambiando la distancia del sensor a la superficie, hemos determinado la matriz de covarianza para el parámetro  $d$ . Los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  fueron fijados a  $0^\circ$ .

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(d) &= 1.14 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 4.20 \times 10^{-9} \cdot d \\ &\quad + 5.20 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(d) &= \sigma_{zx}(d) = 9.92 \times 10^{-11} \cdot d^2 - 3.82 \times 10^{-8} \cdot d \\ &\quad + 4.34 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(d) &= 8.86 \times 10^{-10} \cdot d^2 - 3.47 \times 10^{-7} \cdot d \\ &\quad + 3.81 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (12)$$

Concluimos que en el momento de la digitalización el sensor se debe colocar en el intervalo de distancia:  $170\text{mm} \leq d \leq 240\text{mm}$ .

## 3 LA ESTRATEGIA DE ADQUISICION

Los resultados en la Sección 2 confirman que podemos mejorar la precisión de los datos 3D, siguiendo en el proceso de adquisición algunos criterios definidos previamente (dirección, distancia). Así pues, hemos diseñado una estrategia de adquisición. Tal 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. Definimos una imagen 3D exacta como una nube de puntos 3D adquiridos por el sistema de digitalización con la mayor exactitud posible. Nuestra 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 sólo tiene que agregar el conjunto  $X$  de todas las superficies en la pieza.

Definimos un punto de vista como un conjunto de siete parámetros  $x^i = \{x, y, z, \theta, \phi, \psi, \gamma\}^i$ . 1. 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

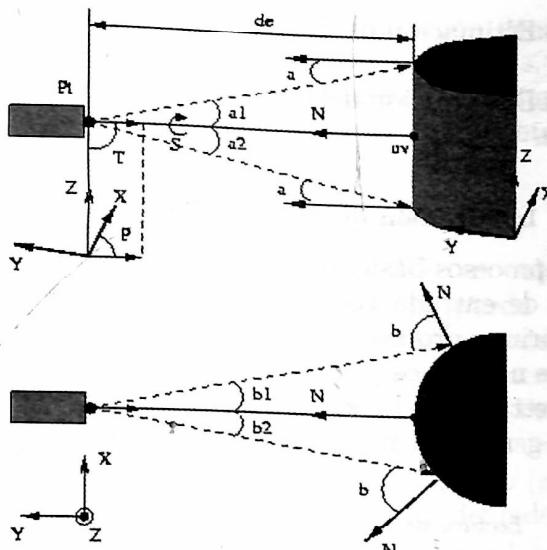


Figura 4. Parámetros del punto de vista.

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  $\gamma$ ). La Figura 4 muestra un punto de vista con todos sus parámetros. Estos parámetros podrían cambiar y otros podrían ser necesarios según el tipo de sensor de profundidad y de soporte mecánico utilizado.

El conjunto  $X$  de puntos de vista  $x^i$  se define 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 ASR entre dos puntos de vista consecutivos se realiza siguiendo una línea recta.

### 3.1 Requerimientos de la Estrategia

Los requerimientos impuestos al sistema, sabiendo que el objetivo es tener datos 3D con un alto grado de exactitud, son los siguientes: tamaño de la pieza, conocimiento de la posición y orientación inicial de la pieza y conocimiento del modelo CAD (en formato IGES) de la pieza.

Tamaño de la pieza. La pieza a numerizar

debe estar comprendida totalmente dentro del espacio de trabajo del sistema de adquisición. Como hemos indicado en la Sección 2 el soporte mecánico utilizado (MMT) tiene un espacio de trabajo definido por:  $wk_x = 80cm$ ,  $wk_y = 30cm$  y  $wk_z = 30cm$ . Las dimensiones de todas las piezas utilizadas en este trabajo están incluidas en un volumen  $100mm \times 50mm \times 50mm$ .

Posición y orientación de la pieza. El conocimiento de la posición y orientación de la pieza nos permite encontrar la transformación que superpone el sistema de referencia de la pieza con el del soporte mecánico del sensor ASR.

Modelo computacional. El sistema utiliza el modelo computacional (CAD) de pieza, en formato IGES, no solamente en el proceso de superposición de los sistemas de referencia, sino también para buscar el conjunto  $X$  de puntos de vista para la digitalización.

### 3.2 El problema de Optimización

En la Sección 2 se encontró el modelo del ruido del sistema de digitalización. El modelo de ruido fue descrito en la ecuación (1) como una función de la densidad de probabilidad con una distribución gaussiana. Las propiedades de la función del ruido  $b(\vec{r})$  se pueden interpretar geométricamente, asignando un valor constante de probabilidad a la intersección de la función  $b(\vec{r})$  con el plano horizontal. Estas intersecciones forman una familia de elipses. Cuando el centro de la elipse coincide con el origen del sistema de referencia, la forma y la orientación están totalmente definidas por  $\Sigma$ . De hecho, la longitud de los ejes mayor y menor se puede calcular fácilmente como la raíz cuadrada de los valores propios de  $\sigma$ . La longitud de los ejes de la elipse de dispersión para el punto  $\vec{r}$  puede entonces ser calculado por:

$$\begin{aligned} L_x(\vec{r}) &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}(\vec{r}) + \sigma_{zz}(\vec{r}))} \\ L_z(\vec{r}) &= \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xz}(\vec{r}) + \sigma_{zz}(\vec{r}))} \end{aligned} \quad (13)$$

donde  $L_x(\vec{r})$  es la longitud del eje menor y

$L_z(\vec{r})$  es la longitud del eje mayor, ya que para el punto  $\vec{r}$  sabemos que  $\sigma_{zz}(\vec{r}) > \sigma_{xz}(\vec{r})$  (Sección 2).

Así, para obtener los datos 3D óptimos con respecto a la precisión, debemos optimizar  $L_z$  con respecto a los parámetros  $\alpha, \beta$  y  $d$ , ya que  $L_z$  dependen de estos parámetros. Podemos plantear nuestro problema como un problema de minimización, como sigue:

$$\begin{aligned} \text{minimizar: } & \sigma_{xz}(\alpha) + \sigma_{xz}(\beta) + \sigma_{xz}(d) \\ & + \sigma_{zz}(\alpha) + \sigma_{zz}(\beta) + \sigma_{zz}(d) \\ \text{sujeto a: } & |\alpha| \leq 35^\circ \\ & |\beta| \leq 15^\circ \\ & 170\text{mm} \leq d \leq 240\text{mm} \end{aligned} \quad (14)$$

Las condiciones de minimización fueron obtenidos en la Sección 2. En la misma sección encontramos los valores de :  $\sigma_{xz}(\alpha), \sigma_{xz}(\beta), \sigma_{xz}(d), \sigma_{zz}(\alpha), \sigma_{zz}(\beta), \sigma_{zz}(d)$  (ver ecuaciones (5), (8), (11), (4), (9), (12) respectivamente).

La solución a este problema de la minimización, obtenido usando el método del gradiente descendente, fue:  $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$  y  $d = 195\text{mm}$ . Esos valores corresponden al caso donde el rayo laser, cuando el ángulo de barrido es igual a cero ( $\gamma = 0^\circ$ ), alcanza la superficie de manera perpendicular ( $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$ ) y el sensor ASR está situado a una distancia ( $d$ ) de 195mm.

## 4 EL ALGORITMO DESARROLLADO

Ahora describiremos el algoritmo desarrollado como solución al problema de la estrategia de la adquisición.

### 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.

##### 4.1 Información de entrada

Dos procesos básicamente generan la información de entrada requerida para el algoritmo. Un primer proceso extrae del archivo CAD los datos necesarios para buscar el punto de vista proyectado en la superficie. El segundo proceso genera un modelo voxel de la pieza.

###### 4.1.1 Lectura de información del modelo CAD

El modelo CAD de la pieza, en formato IGES, es una entrada del algoritmo. El formato IGES contiene la representación exacta de la pieza usando superficies NURBS (Piegl et al., 1997). Una superficie NURBS de orden  $p$  en la dirección paramétrica  $u$  y de orden  $q$  en la dirección paramétrica  $v$  está definida por la ecuación siguiente:

$$\vec{s}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} \vec{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (15)$$

con  $n$  y  $m$  el número de puntos de control en la dirección paramétrica  $u$  y  $v$  respectivamente,  $\vec{P}_{i,j}$  el punto de control,  $w_{i,j}$  el peso asociado al punto de control  $\vec{P}_{i,j}$ ,  $N_{i,p}$  (o  $N_{j,q}$ ) la base de la función B-Spline definida por la siguiente fórmula recurrente:

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

$$y \\ N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_{i-1} \leq u \leq u_i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}, \text{ donde } u_i, v_j \text{ son}$$

los nodos internos pertenecientes al vector de nodos de la superficie NURBS,  $u_i \in [u_0, u_1]$  y  $v_j \in [v_0, v_1]$ .

###### 4.1.2 Generación del modelo voxel

Sea  $T$  una transformación lineal que transforma un punto  $(u, v)$  en el espacio paramétrico en un punto  $(x, y, z)$  en el espacio tridimensional (3D), tal que  $T(f(u, v)) = (X(f(u, v)), Y(f(u, v)), Z(f(u, v)))$ . Sea  $P(u, v)$  la representación 3D de una superficie

de una pieza, definida por la unión de sus  $N$  superficies paramétricas  $P(u, v) = \sum_{i=1}^N \vec{s}_i(u, v)$ . Sea  $P(x, y, z)$  la representación de las superficies de una pieza en el espacio 3D, obtenida por:

$$P(x, y, z) = T(P(u, v)) \quad (16)$$

Si dividimos el espacio 3D, en cubos o voxels (VOLUME ELEMENT), se puede decir que cada punto de  $(x, y, z)$  será contenido en uno de estos voxels. Sea  $Inf(x)$  el número entero más grande inferior o igual a  $x$ . Para el punto  $(x, y, z)$  se puede encontrar  $x_i = Inf(x)$ ,  $y_j = Inf(y)$  y  $z_k = Inf(z)$ . Así, el punto  $(x, y, z)$  estará contenido en el voxel  $V_{ijk}$  definido por las coordenadas  $(x_i, y_j, z_k)$  y  $(x_i + 1, y_j + 1, z_k + 1)$ . Si ampliamos el concepto de una imagen binaria bi-dimensional, donde cada pixel  $(r, s)$  puede tomar apenas uno de dos valores, cada voxel  $(i, j, k)$  en el espacio 3D puede tomar uno de dos valores: 0 (libre) o 1 (ocupado). Un voxel ocupado contiene una cierta porción de alguna de las superficies que conforman la pieza.

Dividamos cada superficie  $s_i(u, v)$  en  $N_{u_i} \times N_{v_i}$  partes, con  $N_{u_i}$  y  $N_{v_i}$  dos umbrales que garanticen que cuando una superficie es recorrida a lo largo, más de un voxel será tocado en el espacio 3D. Así, cuando nos movemos en una superficie, siguiendo sus coordenadas paramétricas, por pasos de tamaño  $\Delta u_i = \frac{u_{i1}-u_{i0}}{N_{u_i}}$  y  $\Delta v_i = \frac{v_{i1}-v_{i0}}{N_{v_i}}$ , es posible encontrar todos los voxels en el espacio 3D que esta superficie toca (los voxels ocupados). La adición de todos los voxels ocupados generados para la representación 3D de la superficie de una parte  $P(u, v)$ , es el modelo voxel 3D de la pieza  $P_D(x, y, z)$ . Claramente  $P(x, y, z) \subseteq P_D(x, y, z)$ .

#### 4.2 Búsqueda de los puntos de vista

La búsqueda del conjunto de puntos de vista es independiente para cada superficie de interés, ella es realizada en tres etapas. En una primera etapa una representación binaria 2D de la superficie es creada (a partir de la superficie NURBS) y es procesada para obtener los puntos de vista proyectados en la superfi-

cie. Entonces, el conjunto de puntos de vista proyectados es utilizado para obtener el punto de vista óptimo en el espacio, definiendo todos sus parámetros (segunda etapa). Finalmente, en caso de necesidad, el punto de vista se modifica para garantizar la visibilidad (sin occlusión) de la superficie a digitalizar (tercera etapa).

##### 4.2.1 Puntos de vista proyectados en la superficie

Definimos una proyección del punto de vista en la superficie como el punto donde el rayo laser alcanza la superficie cuando el ángulo de barrido  $\gamma$  es igual a cero grados. De ahora en adelante llamaremos este punto: punto de vista proyectado. Una representación 2D de cada superficie es creada, esta imagen 2D es procesada para obtener el conjunto de puntos de vista proyectados. Denotamos como  $PVP_{s_i}$  el conjunto de puntos de vista proyectados en la superficie  $\vec{s}_i$ .

Representación 2D discreta y binaria de una superficie:

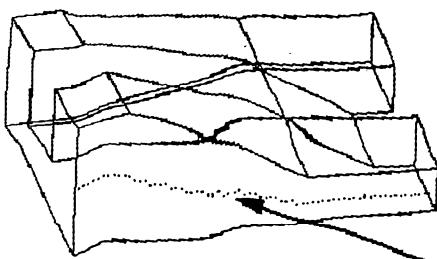
Sea  $\vec{s}(u, v)$  una superficie paramétrica obtenida del modelo CAD. El dominio de variación de los parámetros  $u$  y  $v$  es definido por:  $D = \{(u, v) | u_0 \leq u \leq u_1, v_0 \leq v \leq v_1 \text{ y } (u, v) \in A \cap B\}$ , con  $A$  la región interna de la curva cerrada externa y  $B$  la unión de las regiones externas de las curvas cerradas internas.

Definimos la rejilla  $M$  en el espacio paramétrico  $(u, v)$ , con un paso de muestreo  $\Delta_{uv}$  tal que:

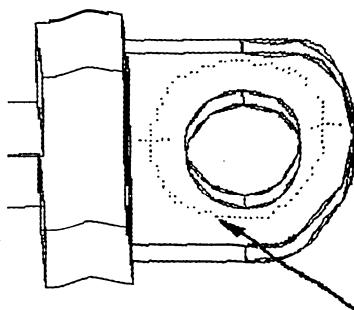
$$\begin{aligned} & \| \vec{s}(u_i, v_j) - \vec{s}(u_i + \Delta_{uv}, v_j) \| \\ & = \| \vec{s}(u_i, v_j) - \vec{s}(u_i, v_j + \Delta_{uv}) \| = 1 \end{aligned} \quad (17)$$

donde  $\|\vec{p}_1 - \vec{p}_2\|$  representa la distancia Euclidea en  $R^3$  entre los puntos  $\vec{p}_1$  y  $\vec{p}_2$ . Para la rejilla  $M$ , definimos el espacio discreto  $(u^d, v^d)$  tal que  $u^d = 0, 1, 2, \dots, q$  y  $v^d = 0, 1, 2, \dots, r$ , con  $q = Int(\frac{u_1-u_0}{\Delta_{uv}} + 1)$  y  $r = Int(\frac{v_1-v_0}{\Delta_{uv}} + 1)$  e  $Int(a)$  la parte entera de  $a$ .

La representación 2D discreta y binaria  $\vec{s}_{db}(u^d, v^d)$  para la superficie  $\vec{s}$  está definida por



**Figura 5.** Conjunto de puntos de vista proyectados para superficies planas.



**Figura 6.** Conjunto de puntos de vista proyectados para superficies curvas.

la ecuación siguiente:

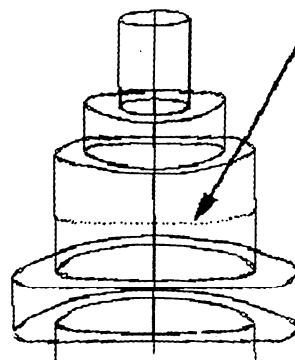
$$\vec{s}_{db}(u^d, v^d) = \begin{cases} 1 & \text{si } (u^d, v^d) \in A \cap B \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (18)$$

en otras palabras,  $\vec{s}_{db}$  es igual al conjunto de puntos  $(u^d, v^d)$  de la rejilla que está incluida en  $\vec{s}$ .

#### Conjunto de puntos de vista proyectados:

La representación 2D ( $\vec{s}_{db}(u^d, v^d)$ ) de cada superficie se procesa para obtener el conjunto de puntos de vista proyectados en la superficie ( $PVP_{S_i} \in \vec{s}_{db}(u^d, v^d)$ ). El proceso que elegimos se basa en el concepto del esqueleto de la imagen. El esqueleto es una representación que es centrada y representativa de la forma objeto. En las Figuras 5, 6 y 7, ilustramos el conjunto de los puntos de vista proyectados que fueron encontrados para dos superficies planas y para una superficie curva (en la figura los puntos de vista se resaltan por una flecha).

La orientación del barrido del rayo laser (parámetro  $\theta$  del punto de vista) debe ser



**Figura 7.** Conjunto de puntos de vista proyectados para superficies curvas.

perpendicular a la dirección del movimiento del sensor entre los puntos de vista proyectados, para tener una distancia mínima entre estos puntos y los bordes de la superficie. Siguiendo las direcciones paramétricas de la superficie  $\vec{s}_{db}$ , determinamos la mejor dirección de barrido del rayo laser, como ésa donde la variación del ángulo de la incidencia, durante un barrido completo de un borde de la superficie al otro, es menor. El esqueleto es obligado a tener su dirección de propagación perpendicular a la mejor dirección de barrido del rayo laser.

La MMT se mueve entre dos puntos de vista en el espacio siguiendo la línea que conecta los puntos de vista. El barrido del rayo laser es perpendicular a esta línea. La orientación del sensor ASR durante este movimiento es constante. Si la velocidad de este movimiento es más pequeña que la rata de barrido del rayo laser (generalmente lo es), entonces la porción de superficie digitalizada entre dos puntos está definida por el rectángulo  $R = a \cdot b$ . Los parámetros  $a$  y  $b$  son función de la distancia  $d$  del sensor a la pieza, del campo visual del sensor (2 veces  $\gamma$  máximo,  $2\gamma_{max}$ ) y de la distancia entre los dos puntos de vista proyectados. La mayoría de veces el campo visual del sensor es fijo, para el sensor ASR es de 15 grados ( $\gamma_{max} = \pm 7.5$  grados). La distancia  $d$  es un parámetro calculado por la estrategia de adquisición según el modelo del ruido del sensor, y se obliga a permanecer entre 170mm y 240mm (véase la Sección 2).

Para nuestro sistema,  $a$  es la línea formada por la proyección del rayo laser en la superficie e igual  $a \simeq 2d \cdot \tan(\gamma_{max})$ , y  $b$  es la distancia entre los dos puntos de vista proyectados. La exactitud de los puntos medidos por un sensor ASR es función de la distancia  $d$  entre la cámara y la pieza, y del ángulo de incidencia del rayo laser en la superficie, por lo tanto relacionada directamente con los parámetros  $a$  y  $b$ .

#### 4.2.2 Mejor ubicación espacial del punto de vista

En la etapa 2.1 encontramos el conjunto de puntos de vista proyectados de la superficie ( $PVP_{s_i}$ ). Sabemos de la Sección 2 que la exactitud de los datos 3D depende de los parámetros  $\alpha, \beta$  y  $d$ . También sabemos de Sección 2 que un punto de vista es definido por siete parámetros:  $(x, y, z, \theta, \phi, \psi, \gamma)$ . Ahora analizaremos cómo los parámetros del punto de vista se relacionan con los parámetros que controlan la exactitud de los datos 3D, para así poder definir la mejor ubicación del punto de vista para la adquisición de datos 3D de alta precisión.

Sea  $P_{s_i} = (x_{P_s}, y_{P_s}, z_{P_s})$  un punto de vista proyectado. Sea  $P$  el punto de vista asociado al punto de vista proyectado  $P_{s_i}$ . Los parámetros para el punto de vista  $P$  son:

- Parámetro  $\gamma$ , define la amplitud del barrido del rayo laser. No afecta la posición del punto de vista. El rayo laser proveniente del punto de vista  $P$  alcanza el punto de vista proyectado  $P_{s_i}$  cuando  $\gamma = 0^\circ$ .

- Parámetro  $\theta$ , define la orientación del barrido del rayo laser cuando el sensor ASR se desplaza de un punto de vista al siguiente. No afecta la posición del punto de vista.

- Parámetros  $\phi$  y  $\psi$ , son los ángulos incidentes en la dirección  $Y$  y  $X$  respectivamente, entre el rayo laser, cuando el alcanza el punto de vista proyectado en la superficie, y el vector normal a este punto.

- Parámetros de posición  $(x, y, z)$ , están definidos basados en los parámetros  $\phi$  y  $\psi$  como:

$$\begin{aligned} x &= x_{P_s} + d \cdot \sin(\phi) \\ y &= y_{P_s} + d \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\psi) \\ z &= z_{P_s} + d \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\psi) \end{aligned} \quad (19)$$

Para el punto  $P_{s_i}$ , alcanzado cuando  $\gamma = 0^\circ$ , se cumple que el ángulo  $\phi$  es igual al ángulo  $\alpha$  y que el ángulo  $\psi$  es igual al ángulo  $\beta$  (ver Figuras 1 y 2). Por lo tanto los parámetros del punto de vista  $P$  relacionado con el punto de vista proyectado  $P_{s_i}$ , de acuerdo a los parámetros  $\alpha, \beta$  y  $d$  que definen la precisión de los datos 3D, son definidos por:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0^\circ \\ \theta &= \text{cualquiera entre } [-90^\circ, 90^\circ] \\ \phi &= \alpha \\ \psi &= \beta \\ x &= x_{P_s} + d \cdot \sin(\alpha) \\ y &= y_{P_s} + d \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \\ z &= z_{P_s} + d \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \quad (20)$$

Para calcular los parámetros  $\phi$  y  $\psi$ , necesitamos el vector normal a la superficie  $\vec{s}_i$  en el punto de vista proyectado  $P_{s_i}$ . Así, determinamos para  $P_{s_i}$  su punto equivalente  $(u, v) \in \vec{s}_i$  (usando la ecuación 16), y usando los parámetros de la superficie NURBS. El vector normal al punto  $(u, v)$  está definido por:

$$\vec{n} = \frac{\frac{\partial}{\partial u} \vec{s}(u, v) \times \frac{\partial}{\partial v} \vec{s}(u, v)}{\| \frac{\partial}{\partial u} \vec{s}(u, v) \times \frac{\partial}{\partial v} \vec{s}(u, v) \|^2} \quad (21)$$

Ahora podemos encontrar la ubicación del punto de vista en el espacio 3D. Sabemos de la Sección 3.2 que la precisión de los datos 3D será la mejor cuando los valores del punto de vista  $\alpha, \beta$  y  $d$  son  $0^\circ, 0^\circ$  y  $195mm$  respectivamente. Así, si no hay problemas de oclusión, el punto de vista es definido por:  $(\gamma, \theta, \phi = 0^\circ, x = x_{P_s}, y = y_{P_s}, z = z_{P_s} + d)$  y siguiendo la dirección normal al punto de vista proyectado. Para cada punto que pertenece al conjunto de puntos de vista proyectados en el espacio discreto  $s_{db}(u^d, v^d)$ , ubicamos los puntos de vista con las condiciones óptimas de distancia y orientación. En la etapa 2.3 explicaremos cómo los parámetros  $\alpha, \beta$  y  $d$  son relajados cuando hay problemas de oclusión.

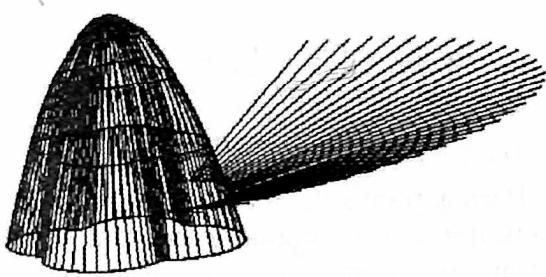


Figura 8. Conjunto de puntos de vista para digitalizar una superficie utilizando la estrategia de adquisición.

En la Figura 8 ilustramos los puntos de vista encontrados para digitalizar una pequeña región de una pieza curva (una superficie en el modelo CAD). Cada línea representa la proyección del rayo laser del punto de vista donde el sensor se coloca al punto de vista proyectado cuando el ángulo de barrido ( $\gamma$ ) es igual a cero. El extremo libre de la línea (en el espacio) representa los parámetros ( $x, y, z$ ). El punto donde la línea alcanza la superficie representa un punto de vista proyectado. Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son iguales a cero, así que la propagación del rayo laser sigue la dirección normal para cada punto de vista proyectado. El parámetro  $d$  es la distancia euclídea del punto de vista al punto de vista proyectado, o sea la longitud de línea.

Caso cuando no todo el ancho de la superficie es barrido:

El ancho de la superficie  $sw(P_{s_i})$  para un punto del esqueleto, es la suma de las distancias del punto a cada borde de la superficie. Sea  $sw(P_{s_i})$  la distancia mínima que debe barrer el rayo laser (pasando por el punto  $P_{s_i}$ ) para digitalizar toda la superficie a lo ancho. El valor óptimo de  $a$  (parámetro del rectángulo de digitalización), llamado  $a_0$ , se obtiene cuando el punto de vista se ubica bajo las mejores condiciones de precisión ( $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$  y  $d = 195mm$ ) con respecto al punto de proyectado ( $P_{s_i}$ ) y cuando  $\gamma_{max} = \pm 7.5^\circ$ , así  $a_0 = 51mm$ . Para el punto  $P_{s_i}$  dos casos pueden presentarse:  $sw_i \leq a_0$  o  $sw_i > a_0$ . En el primer caso, a excepción de problemas de oclusión, el punto de vista está definido con las condi-

ciones óptimas de precisión. Para el segundo caso, debemos modificar los parámetros del punto de vista.

Tenemos dos tipos de modificación de los parámetros para ampliar el tamaño de  $a$ . El primero consiste en la modificación del parámetro  $d$  hasta su valor máximo, o sea  $d = 240mm$ , para este valor definimos  $a_1 = 63mm$ . Modificamos  $d$  para no aumentar el número de puntos de vista, aún perdiendo precisión en los puntos 3D. La otra modificación consiste en definir nuevos puntos de vista proyectados. Si  $sw_i > a_1$ , nuevos puntos de vista proyectados se definen y se colocan en la misma línea del barrido del rayo laser, a una distancia equidistante entre el punto y el borde de la superficie. Estos procesos se repiten hasta que el ancho de la superficie es digitalizado completamente.

#### 4.2.3 Ubicación sin problemas de oclusión

Hasta ahora, los puntos de vista fueron encontrados para tener las mejores condiciones de precisión, es decir, ubicando el punto en la distancia óptima y con la orientación óptima. La siguiente etapa de la estrategia es verificar si el punto de vista está libre de problemas de oclusión. Libre de problemas de oclusión significa que desde el punto de vista podemos digitalizar el área de la superficie para la cual el punto fue definido, es decir que el rayo laser no es interceptado por ningún objeto y puede alcanzar la superficie deseada. Para la evaluación de las condiciones de no-occlusión, se envía un rayo desde el punto de vista hacia el área a digitalizar. La estrategia controla (con el modelo voxel de la pieza:  $P_D(x, y, z)$ ) que ninguna porción de la pieza sea intersectada por el rayo, es decir que el rayo alcance su objetivo.

Cuando se detecta un problema de oclusión, el sistema busca un nuevo punto de vista cambiando sus parámetros  $\alpha$  o  $\beta$ . El parámetro  $d$  no se cambia porque, en general, no soluciona problemas de oclusión. El movimiento es hecho aumentando o disminuyendo el ángulo de la incidencia del rayo laser, en la dirección del barrido del rayo laser para

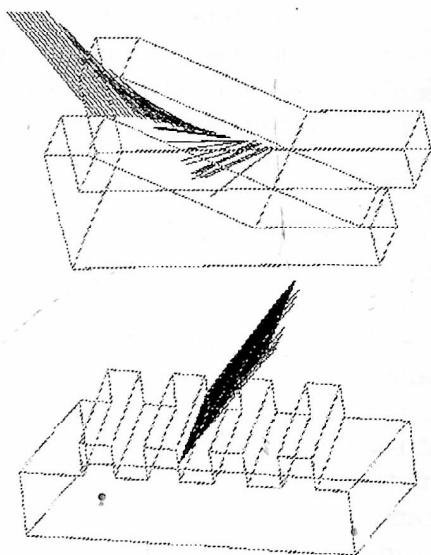


Figura 9. Nuevos puntos de vista sobre puntos de occlusión.

el parámetro  $\alpha$  o el perpendicular a este barrido para el parámetro  $\beta$ .

Para obtener un nuevo punto de vista, utilizamos la Ecuación (14) pero cambiamos las condiciones impuestas a  $\alpha$  y  $\beta$  para que estén entre los valores encontrados ( $\alpha_{fo}$ ,  $\beta_{fo}$ ) y el valor máximo, o sea:  $\alpha_{fo} \leq \alpha \leq 35^\circ$  y  $\beta_{fo} \leq \beta \leq 15^\circ$ . La solución de la Ecuación (14), nos permite definir la ubicación del nuevo punto de vista capaz de digitalizar el área deseada, con las mejores condiciones en cuanto a la precisión de los datos 3D. Algunas veces  $\alpha_{fo}$  y  $\beta_{fo}$ , los valores de los parámetros encontrados, son tales que  $\alpha_{fo} > 35^\circ$  y  $\beta_{fo} > 15^\circ$ , en este caso no hay solución al problema de occlusión.

Las Figura 9 muestra los nuevos puntos de vista encontrados para solucionar los problemas de la occlusión para el sistema de digitalización, se observa que los nuevos puntos de vista se mantienen tan cerca como es posible a la dirección normal. En la figura, cada línea representa la proyección del rayo laser desde el sensor al punto de vista proyectado en la superficie.

#### 4.3 Estimación de la exactitud de los puntos 3D

Una vez que todos los puntos de vista han sido ubicados en las mejores condiciones y sin

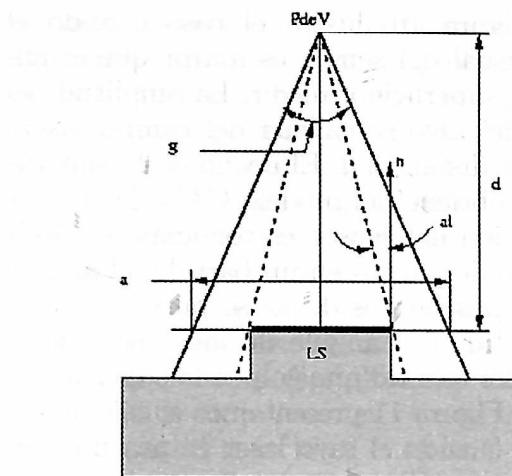


Figura 10. Campo de visión mayor que el ancho de la superficie.

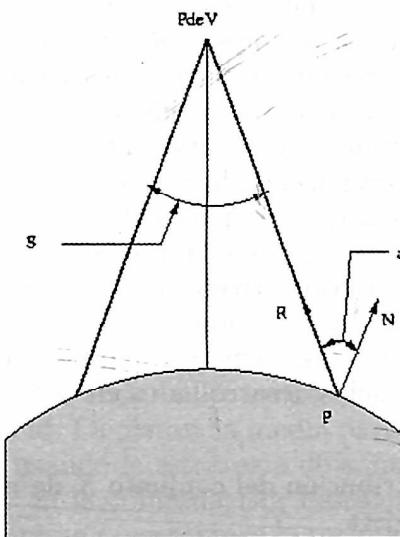


Figura 11. Estimación en una superficie curva

problemas de occlusión, la estrategia calcula la precisión de los puntos 3D obtenidos. Sabemos (Sección 2) que la precisión de los puntos obtenidos por el sensor ASR es función de la distancia  $d$  entre el sensor y la pieza a digitalizar y de los ángulos de incidencia del rayo laser  $\alpha$  y  $\beta$ . Así, para estimar la precisión de puntos medidos, debemos calcular estos parámetros a cada punto 3D adquirido. Aquí el ángulo  $\alpha$  depende del ángulo de barrido instantáneo  $\gamma$ . Las Figuras 10 y 11 ilustran algunas configuraciones especiales para la determinación de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ .

La Figura 10 ilustra el caso cuando el campo visual del sensor es mayor que el ancho de la superficie a medir. La amplitud del barrido del rayo se calcula del campo visual  $2\gamma$  y de la distancia  $d$ . El ancho de la superficie  $sw$  se obtiene del modelo CAD. Dado que la resolución del sensor es conocida, es decir el número de puntos en un barrido, el ángulo entre los dos bordes de  $sw$  se puede calcular y por lo tanto el ángulo de incidencia de la porción del barrido que golpea la superficie.

En la Figura 11 presentamos el cálculo del ángulo  $\alpha$  cuando el rayo laser golpea una superficie curva. El punto donde el rayo toca la superficie es calculado usando el modelo de la superficie. La normal a la superficie en este punto se obtiene de la superficie NURBS. El ángulo  $\alpha$  se calcula desarrollando el producto interno de los vectores  $\vec{r}_i \cdot \vec{n}$ . Cuando la superficie es curva en las direcciones paramétricas ( $u$  y  $v$ ), los ángulos de incidencia  $\alpha$  y  $\beta$  son calculados usando las componentes de la normal en las direcciones de la variación de  $\alpha$  y  $\beta$ .

Una vez que los parámetros  $d$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son conocidos, se calcula la precisión como una suma del ruido introducido por cada punto 3D usando la Ecuación (1). Las dispersiones introducidas por cada parámetro se obtienen de los modelos desarrollados en la Sección 2.

#### 4.4 Distribución del conjunto $X$ de puntos de vista

La última etapa de la estrategia consiste en distribuir el conjunto  $X$  de puntos de vista de tal manera que los parámetros de puntos consecutivos sean tan similares como sea posible. El movimiento entre los puntos de vista es realizado por el soporte mecánico. Se desea que los cambios de los parámetros de un punto de vista a otro sean mínimos para reducir el tiempo de digitalización.

Para el sistema de adquisición utilizado, el conjunto  $X$  es obtenido a partir del esqueleto de la superficie, por lo que hemos planteado el problema como uno de buscar el camino de costo mínimo en un grafo. El problema se soluciona para cada superficie independientemente. Los componentes críticos

de este método son: tener un buen punto de partida, saber como los resultados obtenidos influencian la selección del punto siguiente y definir un buen criterio para terminar.

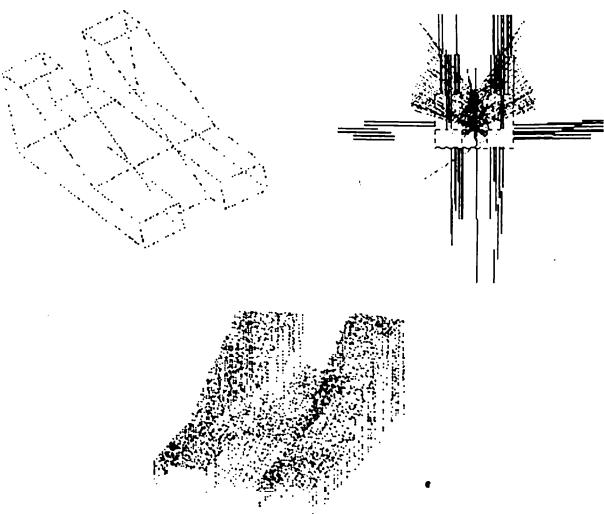
Sea  $P_{s,i}$  el  $i^{th}$  punto de vista proyectado del conjunto  $PVP_{s,i}$ , y sea  $V_8(P_{s,i})$  el número de puntos con conectividad 8. Definimos como puntos extremos los puntos que poseen menos vecinos con conectividad 8, estos puntos son los puntos de inicio o de parada del camino de digitalización. Definimos como puntos de bifurcación los puntos que tienen por lo menos tres puntos con conectividad 8.

El punto de partida es el punto extremo más cercano al origen de la superficie en el espacio paramétrico. Los parámetros  $(x, y, z)$  de este punto son comparados con los de todos los puntos restantes mediante el cálculo de la distancia euclídea. El punto más cercano se selecciona como punto siguiente. Si hay varios puntos a igual distancia, la distancia entre los parámetros  $(\theta, \phi, \psi)$  es utilizada. Cuando un punto de bifurcación es encontrado, se selecciona el camino que reduce la distancia, y tan pronto como se llega a un punto extremo, se regresa al punto de bifurcación para recorrer las bifurcaciones restantes. El proceso se repite hasta que todos los puntos son considerados. Como el conjunto de puntos de vista proyectados ( $PVP_{s,i}$ ) es finito, entonces el conjunto de puntos de vista también lo es, lo que garantiza que este proceso tendrá fin.

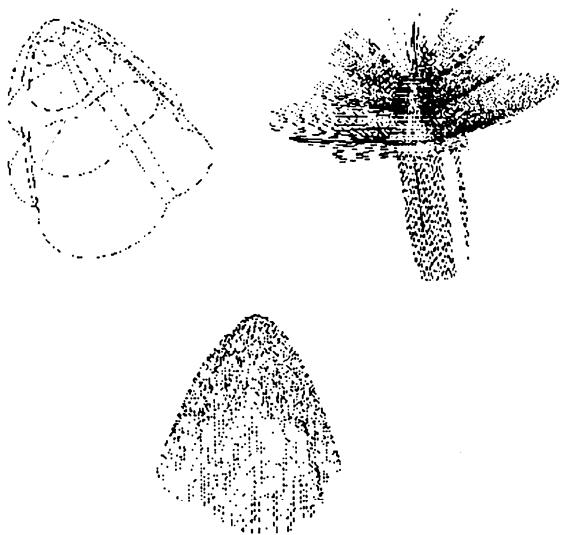
## 5 RESULTADOS DE LA ESTRATEGIA DE ADQUISICIÓN

En la sección anterior, describimos la estrategia para determinar automáticamente la ubicación de un sensor ASR para adquirir de manera precisa la geometría de una superficie o de la pieza completa. En esta sección presentamos algunos resultados de la estrategia de adquisición para la digitalización completa de algunas piezas manufacturadas.

En las Figuras 12 y 13 mostramos: el modelo CAD, la estrategia de adquisición para la digitalización y las imágenes de profundidad de dos piezas manufacturadas, respectivamente. La Pieza 1 (Figura 12) compuesta



**Figura 12.** Pieza 1, compuesta de superficies planas



**Figura 13.** Pieza 4, compuesta de superficies curvas

de superficies planas. La Pieza 4 (Figura 13) compuesta de superficies curvas.

El modelo CAD de cada pieza es un modelo de alambres que representa sus superficies NURBS. La estrategia de adquisición para la digitalización de la pieza (puntos de vista), es para un sistema compuesto por un sensor ASR montado en una MMT. Todos los puntos de vista son representados por una línea que es la proyección del rayo laser del punto donde el sensor se ubica (el extremo libre) al punto

de vista proyectado en la superficie. Para las superficies internas, algunos problemas de la oclusión fueron solucionados. Los puntos de vista siempre se mantienen tan cerca como sea posible a la dirección normal de la superficie. Las imágenes de profundidad de las piezas fueron adquiridas por el sistema, usando la estrategia de adquisición.

Llamamos digitalización estándar la digitalización hecha sin el uso de la estrategia de adquisición. La digitalización estándar de una pieza es un proceso en el cual la pieza es barrida por el rayo laser cuando el sensor es movido desde algún punto de vista preestablecido a otro. Este punto de vista tiene una orientación fija con respecto a la pieza, en este trabajo la orientación fue una inclinación de 45° mirando hacia la pieza.

Para evaluar la mejora de la precisión en los datos 3D cuando la imagen fue adquirida usando la estrategia de adquisición, una digitalización estándar de cada pieza fue hecha. La evaluación de la precisión de las dos imágenes se realizó usando un algoritmo que calcula la distancia entre cada punto medido y el punto más cercano en la superficie NURBS. En la Tabla 1 presentamos los resultados para cuatro piezas. La distancia media para la digitalización estándar se muestra en la columna Dig Estand. La distancia media para la digitalización usando la estrategia de adquisición se presenta en la columna Dig Estrat. En la última columna presentamos la mejora obtenida cuando se utilizó la estrategia.

**Table 1.** Distancia media entre cada punto adquirido y el punto más cercano en la superficie NURBS

Pieza	Dig Estand	Dig Estrat	Mejora
Pieza 1	73 $\mu m$	48 $\mu m$	25 $\mu m$ (34%)
Pieza 2	153 $\mu m$	100 $\mu m$	53 $\mu m$ (35%)
Pieza 3	99 $\mu m$	66 $\mu m$	33 $\mu m$ (33%)
Pieza 4	106 $\mu m$	92 $\mu m$	14 $\mu m$ (13%)

La distancia media más pequeña se obtiene

para las piezas 1 y 3, estas piezas se componen de superficies planas. Para estas dos piezas obtenemos una mejora de alrededor del 33%. Para la pieza curva (Pieza 2), obtenemos una mejora del 35%. Es mejor porque el rayo laser, en el proceso de digitalización es más perpendicular cuando utilizamos la estrategia. Finalmente, para la pieza 4, algunas oclusiones no permiten obtener una mejora mayor al 13%.

## 6 CONCLUSIONES

Hemos presentado una estrategia de adquisición para mejorar la precisión en una imagen 3D. La estrategia calcula un conjunto de puntos de vista para obtener una imagen 3D completa y exacta de la pieza o de las superficies seleccionadas. Los puntos de vista son escogidos de manera tal que tengan las mejores condiciones de precisión. Para el sensor de profundidad usado, se mostró que la precisión de los puntos 3D medidos es función de la distancia del sensor a la pieza y del ángulo del incidencia con el cual el rayo laser alcanza la superficie.

El sistema no tiene ninguna limitación en cuanto a la geometría de las piezas, esto significa que trabaja con piezas planas o curvas. El conocimiento de la posición y de la orientación de la pieza y su modelo CAD son los únicos requisitos del sistema. La estrategia se puede adaptar fácilmente para utilizar otro tipo de sensores de profundidad y de soporte mecánico. Para eso, un nuevo modelo del ruido del sensor tiene que ser encontrado.

La estrategia de adquisición nos permite digitalizar la pieza entera o las superficies de interés. Esta característica es importante para las tareas de control de tolerancias, donde la mayoría del tiempo estamos interesados en verificar la tolerancia de sólo algunas superficies.

Aunque algunas partes del algoritmo pueden ser costosos en tiempo de cálculo, como la generación del modelo voxel o la solución de los problemas de oclusión, todos los procesos de planificación de la adquisición son realizados fuera de línea.

## REFERENCIAS

- Abrams, S., Allen, P., Tarabanis, K. *Computing camera viewpoints in an active robot workcell*. Columbia University, Department of Computer Science, New York, 1997.
- Blais, F., Rioux, M., Beraldin, J.A. *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, 1988.
- Mason, S.O., Grun, A. Automatic Sensor Placement for Accurate Dimensional Inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(3):454-467, 1995.
- Piegl, L., Tiller, W. *The NURBS book*. Springer-Verlag, 2<sup>nd</sup> edition, New York, 1997.
- Rioux, M. Laser range finder based on synchronized scanners. *Applied Optics*, 23(21):3837-3844, 1984.
- Tarabanis, K.A., Allen, P.K., Tsai, R.Y. A survey of sensor planning in computer vision. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(1):86-104, 1995.
- Tarabanis, K.A., Tsai, R.Y., Allen, P.K. The MVP sensor planning system for robotic vision tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(1):72-85, 1995.
- Tarabanis, K.A., Tsai, R.Y., Anil, K. Computing occlusion-free viewpoints. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(3):279-292, 1996.
- Tarbox, G.H., Gottschlich, S.N. IVIS: An integrated volumetric inspection system. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(3):430-444, 1995.
- Tarbox, G.H., Gottschlich, S.N. Planning for complete sensor coverage in inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(1):84-111, 1995.
- Trucco, E., Umasuthan, M., Wallace, A.M., Roberto, V. Model-based planning of optimal sensor placements for inspection. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13(2):182-194, 1997.