



Interciencia

ISSN: 0378-1844

interciencia@ivic.ve

Asociación Interciencia

Venezuela

González Galván, Emilio Jorge; Cruz Ramírez, Sergio Rolando; Durán García, Héctor Martín
Aplicación de sensores múltiples para el posicionamiento tridimensional de robots usando visión
Interciencia, vol. 26, núm. 11, noviembre, 2001, pp. 541-546
Asociación Interciencia
Caracas, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33906203>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

APLICACIÓN DE SENSORES MÚLTIPLES PARA EL POSICIONAMIENTO TRIDIMENSIONAL DE ROBOTS USANDO VISIÓN

EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN,
SERGIO ROLANDO CRUZ RAMÍREZ
y HÉCTOR MARTÍN DURÁN GARCÍA

En distintas aplicaciones de robótica industrial y espacial, el uso de múltiples sensores para la realización de una maniobra ha permitido el incrementar las condiciones de seguridad, confiabilidad, adaptabilidad y reducción de costos (Abidi y González, 1990). Tales características son deseables, por ejemplo, en operaciones en ambientes peligrosos como la colocación de boquillas de paso en generadores de vapor, presentes en tareas de mantenimiento de plantas nucleares (Malis *et al.*, 2001). En este caso, el objetivo es colocar un disco de 1m de diámetro aproximadamente, que debe tapar completamente un orificio de igual tamaño. En un ambiente típico, la ubicación exacta del orificio con respecto a la tapa no se conoce de manera precisa, por lo que se requiere del uso de visión para automatizar esta operación. El gran tamaño del objeto a manipular exige el empleo de múltiples cámaras que observen distintas partes de la pieza, de tal modo que un error de posicionamiento mínimo en cada uno de los sensores participantes garantiza un posicionamiento exitoso de la voluminosa pieza de trabajo

En el contexto del trabajo que aquí se describe, el uso de sensores múltiples -un mínimo de dos cámaras- tie-

ne el efecto de aumentar la precisión del sistema, tal y como se sugiere en Skaar *et al.* (1991). Además, puede también considerarse como un medio que permita el incremento del volumen de trabajo donde el manipulador pueda realizar tareas de posicionamiento en forma precisa.

Respecto a este último punto, las referencias (Nelson y Khosla, 1993; 1994) presentan medios para incrementar el volumen de trabajo del manipulador, usando técnicas que involucran la retroalimentación de información obtenida por medio de cámaras (VS por las siglas del término en inglés *Visual Servoing*). Los reportes hablan de resultados exitosos para el caso de una maniobra de seguimiento de trayectorias, con el enfoque de cámara montada en el extremo del robot, dentro de un área limitada. En contraste, los experimentos reportados en Korde *et al.* (1992) donde se aplica el método de manipulación de espacio de cámara (CSM por sus siglas en inglés), hablan de incrementos en el volumen de trabajo considerablemente mayores a los reportados para VS.

Los métodos con retroalimentación por medio de visión comparan con CSM la característica de que los objetivos de la maniobra se definen en el

marco de referencia de las imágenes bidimensionales obtenidas de las cámaras. Las diferencias que existen entre ambas metodologías se describen en forma más detallada en Seelinger *et al.* (1998).

El método de manipulación de espacio de cámara, aunque ha recibido considerablemente menos atención que VS, puede ser más eficiente en situaciones donde las cámaras no calibradas usadas para controlar la maniobra permanecen estacionarias en el intervalo de tiempo entre la detección de la pieza de trabajo y la culminación de la tarea. Esta situación describe el caso de los experimentos que atañen al presente trabajo. En Korde *et al.* (1992) se discuten los medios para incrementar el espacio de trabajo del robot usando cámaras montadas sobre plataformas móviles controladas por computadora. En contraste, el presente reporte describe algunos aspectos fundamentales que permiten alcanzar un objetivo similar, para el caso en que se usan múltiples cámaras estacionarias.

Descripción General de una Tarea de Posicionamiento

En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo con la meto-

PALABRAS CLAVE / Robótica / Visión Artificial / Multisensores /

Recibido: 18/07/2001. Aceptado: 19/09/2001

Emilio Jorge González Galván. **Ingeniero Mecánico y Maestro en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, México. Ph.D. en Ingeniería Mecánica, Universidad de Notre Dame, EEUU. Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (UASLP). Dirección: CIEP-Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava No. 8, Edificio P, Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, S.L.P., México. e-mail: egonzale@uaslp.mx**

Sergio Rolando Cruz Ramírez. **Ingeniero en Electrónica, UASLP. Asistente de Investigador y Posgrado en Ingeniería Eléctrica, UASLP.**

Héctor Martín Durán García. **Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma de Chapingo, México. Maestro en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, México. Master en diseño de maquinaria agrícola, Universidad de Tsukuba, Japón. Doctor Ingeniero Agrónomo, Universidad Politécnica de Madrid, España.**

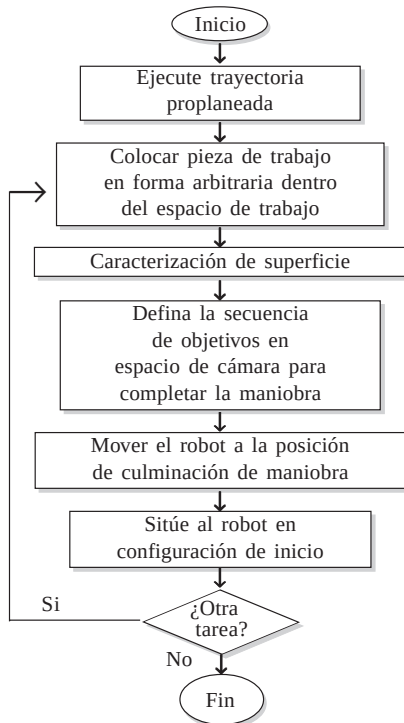


Figura 1. Diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento.

dología general para el desarrollo de una tarea de posicionamiento. Dicha representación describe el caso límite en el que una maniobra se realiza una sola vez. Este enfoque contrasta con el uso actual que se le ha dado a los manipuladores industriales en el sentido de que, en la mayoría de los casos, se programan una sola vez y la maniobra se repite constantemente durante toda la vida útil del robot. Situaciones como las que se describen en este reporte resultan de mayor utilidad para aquellos usuarios

con volúmenes de producción limitados, como puede ser el caso de pequeñas y medianas industrias.

La pieza se coloca en forma arbitraria dentro del espacio de trabajo del manipulador. Las cámaras usadas para el control de la maniobra abarcan distintas regiones de la mencionada pieza, tal y como se ilustra en la Figura 2. Como restricción se tiene el hecho de que un mínimo de dos cámaras deben detectar una misma región de la pieza no manipulada, que permanece estática durante todo el transcurso de la maniobra.

En las siguientes secciones se describen con más detalle algunos de los aspectos asociados al desarrollo de la maniobra, incluidos en el diagrama de flujo de la Figura 1.

Caracterización de Superficie

La presente sección describe el proceso de caracterización de la superficie de trabajo sobre la que el manipulador realizará la maniobra de posicionamiento. Dicha caracterización consiste en evaluar, en forma aproximada, la geometría tridimensional de la mencionada superficie, basándose exclusivamente de la detección de marcas visuales colocadas sobre la pieza de trabajo. Para tal efecto se decidió hacer uso de un apuntador láser con el propósito de generar marcas no permanentes sobre la superficie, las cuales son detectadas con las cámaras de video usadas en los experimentos.

La primera parte del proceso involucra el establecimiento de una correspondencia entre las marcas detectadas por cada una de las cámaras participantes. Esta relación es importante porque permite establecer puntos objetivo compatibles en el espacio de cada una de las cámaras de control utilizadas en la maniobra. La segunda parte, tendiente a incrementar el volumen de información que se tiene de la pieza, considera la colocación de un gran número de marcas láser. Tal representación compacta de la superficie constituye un medio efectivo para hacer más precisa la designación de objetivos de maniobra en espacio de cámara, tal y como se explica adelante.

Correspondencia de imágenes

Con el objeto de reducir a un mínimo la complejidad en el análisis de las imágenes de la pieza de trabajo, se proyectó sobre ésta un haz de luz láser, proveniente de un apuntador, tal y como se muestra en la Figura 4. De este modo, una única marca visual es detectada en cada cámara y la ubicación de su centroide en la imagen, en píxeles, es determinada por medio de un algoritmo de análisis de imágenes. En Robinson (2001) pueden encontrarse ejemplos de tales algoritmos. Considerando $(x_c^{(1)}, y_c^{(1)})$ como la posición del centroide de la marca en una primera cámara, la relación existente entre la posición de las marcas en cada sensor puede modelarse como

$$x_c^{(1)} = \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j^{(2)} \quad (1)$$

$$y_c^{(1)} = \sum_{j=1}^n \beta_j f_j^{(2)}$$

donde $f_j^{(2)}$ representa los términos de una expansión polinomial de términos dependiente de las coordenadas del centroide detectado en una segunda cámara. El número de términos en la expansión depende del orden de la misma, de acuerdo a la relación

$$n = \sum_{i=1}^{\vartheta+1} i \quad (2)$$

donde ϑ representa el orden de la expansión polinomial. Por ejemplo, para una expansión de segundo orden ($\vartheta=2$) se tiene

$$n = 6$$

$$\begin{aligned} f_1^{(2)} &= (x_c^{(2)})^2 \\ f_2^{(2)} &= (y_c^{(2)})^2 \\ f_3^{(2)} &= x_c^{(2)} y_c^{(2)} \\ f_4^{(2)} &= x_c^{(2)} \\ f_5^{(2)} &= y_c^{(2)} \\ f_6^{(2)} &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Los coeficientes α_j y β_j , $j=1, \dots, n$ que determinan la correspondencia aproximada entre la ubicación de las marcas en la primera y segunda cámara se determinan a partir de un proceso de estimación lineal que involucra la minimización de la función escalar

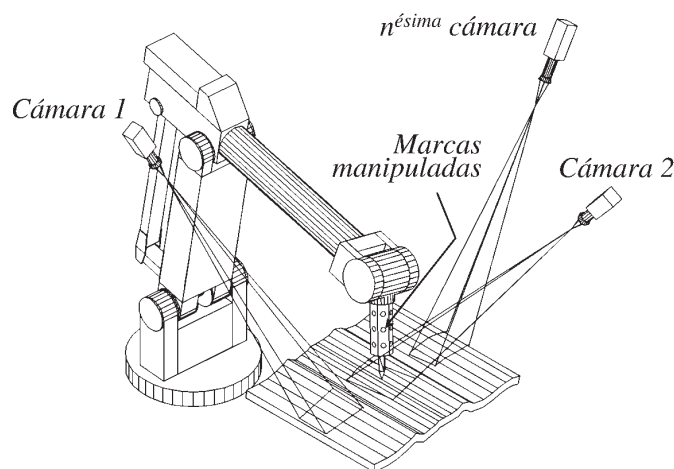


Figura 2. Cámaras de control usadas en la maniobra.

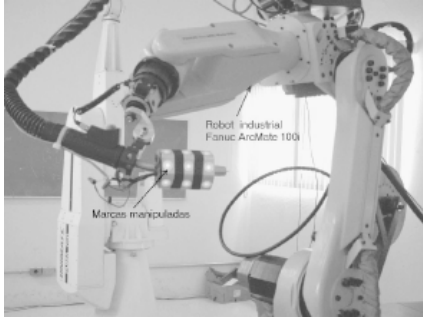


Figura 3. Robot industrial usado en la fase experimental.

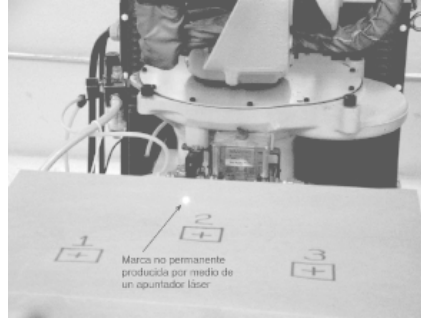


Figura 4. Marca no permanente producida por un haz de luz láser.

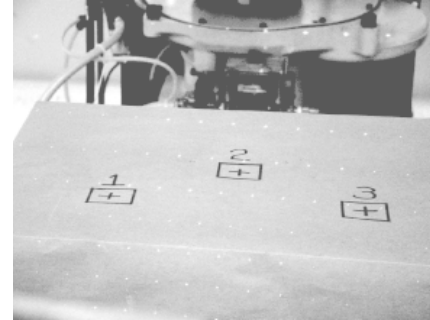


Figura 5. Luz láser estructurada sobre la superficie de trabajo.

$$v = \sum_{r=1}^m \left\{ \left[x_c^{(1)} - \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j^{(2)} \right]^2 + \left[y_c^{(1)} - \sum_{j=1}^n \beta_j f_j^{(2)} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

para m muestras de la posición de las marcas en las dos cámaras que se busca relacionar. Dichas muestras se obtienen al ubicar el apuntador láser en distintas posiciones sobre la superficie de trabajo. Puede demostrarse que los vectores $A=[\alpha_1 \dots \alpha_n]^T$ y $B=[\beta_1 \dots \beta_n]^T$ se obtienen a partir de las expresiones matriciales

$$\begin{aligned} A &= M_c^{-1} V_x \\ B &= M_c^{-1} V_y \end{aligned} \quad (5)$$

donde

$$M_c = \begin{bmatrix} \sum (f_1^{(2)})^2 & \sum f_1^{(2)} f_2^{(2)} & \dots & \sum f_1^{(2)} f_n^{(2)} \\ & \sum (f_2^{(2)})^2 & \dots & \sum f_2^{(2)} f_n^{(2)} \\ & & \ddots & \vdots \\ \text{Simétrica} & & & \sum (f_n^{(2)})^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$V_x = \begin{bmatrix} \sum x_c^{(1)} f_1^{(2)} \\ \sum x_c^{(1)} f_2^{(2)} \\ \vdots \\ \sum x_c^{(1)} f_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V_y = \begin{bmatrix} \sum y_c^{(1)} f_1^{(2)} \\ \sum y_c^{(1)} f_2^{(2)} \\ \vdots \\ \sum y_c^{(1)} f_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

En las expresiones anteriores las sumatorias se desarrollan desde 1

hasta m muestras obtenidas para cada cámara. Por otro lado, existe una suposición implícita de que la matriz M_c no es singular, situación que puede presentarse cuando el número de muestras utilizadas en la minimización de la ecuación (4) no es adecuado. Es importante señalar que el número más pequeño de muestras que se requiere para minimizar la expresión (4) corresponde exactamente al número n de términos de la expansión polinomial de orden ϑ , tal y como se indica en la ecuación (2). Es conveniente indicar que dicho orden depende de la complejidad de la superficie a caracterizar, pudiendo ser suficiente un orden de 1 para el caso de superficies planas, o superior para el caso de superficies más complejas. En general, el orden de la expansión polinomial se determina experimentalmente buscando que la distancia en píxeles entre la posición real de una marca y su predicción, definida por la ecuación (1), sea menor a un valor predeterminado. Dicho valor será usado en la siguiente sección para establecer la correspondencia entre marcas detectadas en distintas cámaras, cuando se proyecta una gran cantidad de haces de luz láser en forma simultánea.

Representación compacta de la superficie de trabajo

Una vez establecido un modelo aproximado de la correspondencia en la ubicación de marcas visuales en distintas cámaras de control, por medio de la ecuación (1), se procede a obtener una representación tridimensional compacta de la superficie de trabajo. Con este fin se proyecta sobre ésta un tipo de luz estructurada láser consistente de una matriz de 7×7 haces, tal y como se muestra en la Figura 5.

Se utilizó el modelo de cámara ortográfica para describir la relación entre la ubicación tridimensional de los centroides de las marcas láser y su correspondiente proyección en espacio de cámara. Dicho modelo se define como

$$\begin{aligned} f_x(x, y, z; C) &= b_1 x + b_2 y + b_3 z + b_4 \\ f_y(x, y, z; C) &= b_5 x + b_6 y + b_7 z + b_8 \end{aligned} \quad (9)$$

donde f_x y f_y representan la proyección del mencionado punto láser en las imágenes obtenidas de las cámaras, (x, y, z) es su posición tridimensional y b_1 a b_8 son funciones que incluyen a seis parámetros de visión $C=[C_1, \dots, C_6]^T$:

$$\begin{aligned} b_1 &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 \\ b_2 &= 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) \\ b_3 &= 2(C_2 C_4 - C_1 C_3) \\ b_4 &= C_5 \\ b_5 &= 2(C_2 C_3 - C_1 C_4) \\ b_6 &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 \\ b_7 &= 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) \\ b_8 &= C_6 \end{aligned} \quad (10)$$

El cálculo de los seis parámetros de visión se realiza independientemente para cada cámara a partir de un proceso de estimación no lineal que involucra muestras en espacio de cámara y espacio físico de las marcas manipuladas ilustradas tanto en la Figura 2 como en la fotografía de la Figura 3, tal y como se describe en González y Skaar (1996). Para los desarrollos subsecuentes se ha hecho la suposición de que se ha aplicado una medida para incrementar la precisión del sistema, conocida como *flattening* (González et al., 1997). Esta medida consiste en modificar las muestras obtenidas de las marcas visuales, de

manera que sean compatibles con un modelo ortográfico de cámara. Los parámetros de visión se actualizan continuamente, usando muestras obtenidas durante la ejecución de la maniobra. Las marcas visuales manipuladas, ilustradas en la Figura 3, consisten de diodos emisores de luz cubiertos con acrílico, colocados sobre una herramienta especialmente diseñada para contenerlos, de geometría conocida. La posición física de las señales visuales se evalúa a partir de la geometría de la herramienta, considerando el modelo cinemático nominal del robot.

La estimación de la posición física de cada marca que se proyecta sobre la superficie de trabajo, como las de la Figura 5, se realiza tomando en cuenta los parámetros de visión asociados a cada cámara de control. Dicha estimación se realiza en forma lineal al minimizar la función escalar

$$\phi = \sum_{j=1}^{n_c} \{ [x_{ci}^j - b_1^j x_i - b_2^j y_i - b_3^j z_i - b_4^j]^2 + [y_{ci}^j - b_5^j x_i - b_6^j y_i - b_7^j z_i - b_8^j]^2 \} \delta_i^j \quad (11)$$

considerando como variables a estimar las coordenadas (x_i, y_i, z_i) que describen la posición física de la $i^{\text{ésima}}$ marca detectada, con respecto al sistema estacionario $X_0 Y_0 Z_0$ indicado en la Figura 6. Se consideran n_c cámaras de control, donde (x_{ci}^j, y_{ci}^j) describe la posición en espacio de cámara de las mismas señales.

Los parámetros a, b_1^j a b_8^j para la $j^{\text{ésima}}$ cámara están descritos en la ecuación (10). El valor de δ_i^j se considera como

$$\delta_i^j = \begin{cases} 1 & \text{Si la } i^{\text{ésima}} \text{ marca se ve en el } j^{\text{ésimo}} \text{ sensor} \\ 0 & \text{Si no es vista} \end{cases} \quad (12)$$

La posición física de las marcas proyectadas por el láser sobre la superficie de trabajo se agrupan en una sola matriz de momentos simétrica

$$\mathbf{M}_T^i = \begin{bmatrix} \sum x_j^2 & \sum x_j y_j & \sum x_j z_j & \sum x_j \\ & \sum y_j^2 & \sum y_j z_j & \sum y_j \\ & & \sum z_j^2 & \sum z_j \\ \text{Simétrica} & & & n_t \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde las sumatorias son en j desde 1 hasta el número n_t de puntos detectados en la $i^{\text{ésima}}$ cámara. Dicha matriz de momentos repre-

senta un medio eficiente de agrupar a todos los puntos detectados en cada cámara participante, de manera que puedan utilizarse como objetivos de la maniobra, tal y como se describe en el procedimiento descrito en la siguiente sección. Aunque no se ha demostrado formalmente (González *et al.*, 1999), el uso de todos los puntos detectados sobre la superficie de trabajo, como puntos objetivo, sugiere un mínimo de error en el posicionamiento de la herramienta con respecto a la superficie de trabajo.

Determinación de la Configuración Interna del Manipulador

La configuración interna del manipulador se determina a partir de un proceso de estimación no lineal que involucra la minimización de la función escalar de la ecuación (14), para los valores de la configuración interna del mani-

(11) y los parámetros b, a, b_8 aparecen en la ecuación (10), tomando en cuenta los parámetros de visión de cada cámara.

La posición física de las marcas láser sobre la pieza de trabajo $(r_x(\Theta), r_y(\Theta), r_z(\Theta))$ en la ecuación (14), puede expresarse en función de las coordenadas (x, y, z) obtenidas al minimizar la ecuación (11) como

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

siendo $\mathbf{T}$ una matriz (de dimensión 4×4) de transformación homogénea definida como el producto,

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_k(\Theta) \Gamma D^{-1} \quad (17)$$

donde las matrices de transformación homogénea $\mathbf{T}_k(\Theta)$, Γ y D están representadas esquemáticamente en la Figura 6, donde la matriz $\mathbf{T}_k(\Theta)$ representa al modelo cinemático directo del robot y permite establecer una transformación entre el marco de referencia estático $X_0 Y_0 Z_0$, en la base del robot,

y el sistema $X_T Y_T Z_T$ unido a la herramienta. La matriz Γ constituye una transformación entre el sistema en la herramienta y el sistema $X_i Y_i Z_i$ adherido a la pieza de trabajo. Dicha matriz se usa para definir la trayectoria de aproximación del extremo del manipulador hasta la superficie de trabajo. Finalmente, la matriz D se utiliza para definir la ubicación del sistema unido a la pieza de trabajo, con respecto al marco de referencia en la base del robot. Esta matriz se actualiza continuamente durante la ejecución de una maniobra de posicionamiento.

A partir de las transformaciones listadas anteriormente, es posible establecer un modelo que describa la ubicación de los puntos objetivo en espacio de cámara, que depende de la configuración del manipulador como sigue

La introducción de las ecuaciones (15) y (18) en la expresión escalar (14) permite

pulador $\Theta = [\Theta_1, \dots, \Theta_{gdl}]^T$, siendo gdl el número de grados de libertad del robot. Dichas variables están incluidas en forma no lineal dentro del escalar

$$\gamma(\Theta) = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_t(i)} \{ [x_{ij}^i - f_x(r_{xj}^i(\Theta), r_{yj}^i(\Theta), r_{zj}^i(\Theta); C^i)]^2 + [y_{ij}^i - f_y(r_{xj}^i(\Theta), r_{yj}^i(\Theta), r_{zj}^i(\Theta); C^i)]^2 \} \quad (14)$$

donde $f_x(\dots)$ y $f_y(\dots)$ representan al modelo de cámara ortográfico de la ecuación (9), n_c representa al número total de cámaras de control usadas en la maniobra, mientras que $n_t(i)$ representa el total de marcas láser detectadas sobre la superficie de trabajo, que en general son diferentes para cámara de control usada en la maniobra.

La ubicación de los puntos objetivo en espacio de cámara (x, y) puede definirse a partir del modelo ortográfico y de la ubicación de las marcas láser colocadas sobre la superficie de trabajo como se indica en (15)

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_8 \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde, para aumentar la claridad, se han eliminado los índices. En esta expresión (x, y, z) representa la posición física de las marcas, obtenida al minimizar la ecuación

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_x & r_y & r_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_8 \end{bmatrix} \quad (18)$$

la obtención de la siguiente expresión alternativa que depende del conjunto total de puntos objetivo,

$$\gamma(\Theta) = \sum_{i=1}^{n_c} \mathbf{R}^i \begin{bmatrix} \mathbf{M}_T^i & : & 0 \\ \dots & : & \dots \\ 0 & : & \mathbf{M}_T^i \end{bmatrix} \mathbf{R}^i \quad (19)$$

para n_c sensores, donde $\mathbf{M}_T^i$ está definida en la ecuación (13) mientras que el vector de dimensión 8×1 $\mathbf{R}^i$, asociado a la $i^{\text{ésima}}$ cámara, se puede definir como

$$\mathbf{R}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_4 - \mathbf{T}^T & : & 0 \\ \dots & : & \dots \\ 0 & : & \mathbf{I}_4 - \mathbf{T}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1^i \\ \vdots \\ b_8^i \end{bmatrix} \quad (20)$$

siendo $\mathbf{I}_4$ una matriz unitaria de 4×4 . La matriz $\mathbf{T}$ está definida en la ecuación (17) y contiene a las variables $\Theta = [\Theta_1, \dots, \Theta_{gdl}]^T$ que definen la configuración del manipulador. Los valores de b_1 a b_8 , dependientes de los parámetros de visión relacionados a la $i^{\text{ésima}}$ cámara, se encuentran en la ecuación (10).

La minimización de la función escalar $\gamma(\Theta)$ de la ecuación (19) se realiza basándose en un proceso de estimación no lineal conocido como corrección diferencial de mínimos cuadrados, que se describe en detalle en Jenkins (1978). Dicho proceso iterativo puede ser afectado, entre otras causas, por una deficiente selección del valor de inicio de la configuración del robot dentro del proceso de solución, además del grado de no linealidad en que dicha configuración aparece dentro de la ecuación (14) o (19). En general, durante los experimentos efectuados hasta ahora, la minimización descrita ha podido realizarse de manera satisfactoria, alcanzando la convergencia en un número reducido de iteraciones.

Descripción del Marco Experimental

Los experimentos realizados para probar la metodología descrita en el presente reporte se llevaron a cabo en el laboratorio de robótica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Se utilizó un manipulador industrial Fanuc ArcMate 100i, el cual cuenta con equipo de soldadura Mig integrado. Los algoritmos fueron desarrollados en una computadora PC convencional y fueron escritos usando Visual C++ de Microsoft. La comunicación entre el equipo de cómputo y el manipulador se realiza a través de ethernet, usando el protocolo TCP/IP. Es importante hacer mención que este medio de comunicación se ha vuelto estándar en la mayoría de los equipos industriales, para aplicarse principalmente al monitoreo de tales dispositivos.

Bajo el esquema seguido en el presente trabajo, la comunicación con el manipulador es requerida, en primer lugar, para obtener muestras de la posición del robot mientras se mueve hacia su objetivo, con el objeto de actualizar los parámetros de visión que aparecen en la ecuación (10). En segundo lugar, el enlace con el robot se utiliza para dirigirlo a la configuración determinada por la minimización de la ecuación (14).

La principal desventaja que se ha observado al utilizar la comunicación con el robot por medio de ethernet es el retraso de tiempo que se observa al enviar y recibir información a y desde el equipo de cómputo. Esta desventaja limita seriamente la posible aplicación de los métodos que usan retroalimentación por medio de visión (VS), a los que se hizo referencia en la introducción de este reporte. Tal y como se explica en Hutchinson *et al.* (1996) los sistemas de lazo cerrado, como los que utilizan las técnicas de VS, pueden volverse inestables al presentarse retrasos de tiempo en el sistema. Esta limitación no existe en el caso del método aplicado en el

presente trabajo. Como se explica en Seelinger *et al.* (1998), en CSM la relación entrada/salida de la planta es usada para avanzar la maniobra en lazo abierto al estado terminal. Tal característica reduce la sensibilidad de nuestra metodología a retardos causados, también, por el demandante proceso de análisis de imágenes.

Para la caracterización de superficie se utilizó un diodo láser comercial de 5mW y 635 nm de longitud de onda, con una cabeza de proyección intercambiable que produce un arreglo matricial de 7×7 haces de luz. Al detectarse con las cámaras de control CCD Sony MPT304 usadas en el experimento, la luz láser proyectada sobre la superficie produce una mancha de color blanco, cuyo centroide es detectado fácilmente por medio de un algoritmo de análisis de imágenes diseñado para tal fin. Las imágenes son digitalizadas usando una tarjeta de adquisición de imágenes Data Translation DT3155 instalada en el interior de la computadora. La imagen resultante consta de un arreglo matricial de píxeles con niveles de gris desde 0 que representa al color negro hasta 255 que es el blanco. Tanto las marcas dejadas por el láser como las marcas manipuladas ilustradas en la Figura 3 tienen una intensidad cercana al blanco en las imágenes digitalizadas obtenidas en la computadora.

En los experimentos realizados hasta la fecha, se utilizaron dos cámaras de control en los que se define un punto objetivo en espacio de cámara, para cada sensor utilizado. La posición tridimensional de dicho punto se evalúa a partir de la minimización de la ecuación (11), que se utiliza para definir el origen del sistema coordinado $X_i Y_i Z_i$, utilizando la matriz de transformación D , tal y como se ilustra en la Figura 6. La orientación del sistema en la pieza de trabajo se define de manera tal que los ejes son paralelos a los del marco de referencia fijo $X_0 Y_0 Z_0$. Al finalizar la maniobra, la matriz Γ es unitaria, lo que denota el hecho de que al terminar de colocar a la herramienta sobre la pieza de trabajo, los sistemas coordinados al extremo del robot y sobre la superficie de trabajo, son coincidentes. De este modo, los experimentos se han enfocado a demostrar la viabilidad de la metodología descrita en pruebas que involucran el posicionamiento de un punto en la herramienta con respecto a otro punto definido sobre la superficie de trabajo.

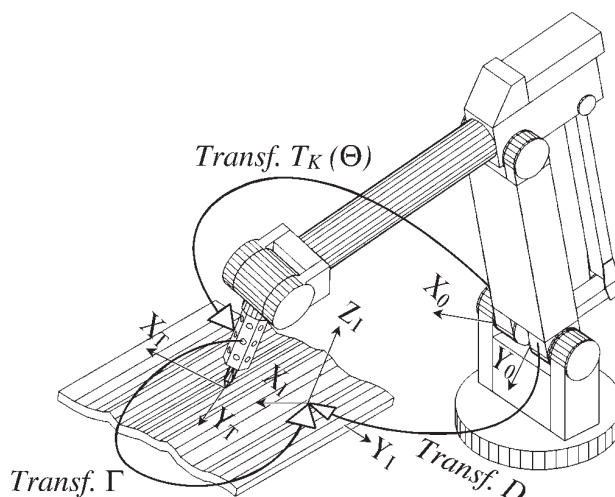


Figura 6. Sistemas coordinados asociados a la maniobra.

A partir de las múltiples pruebas realizadas hasta ahora en condiciones de laboratorio, se ha podido establecer que el error máximo en la tarea de posicionamiento es del orden de 1mm. Se observó también que dicho error depende en gran medida de la habilidad del operario para definir el punto objetivo en el marco de referencia de las imágenes obtenidas de los sensores. Se estima que una medida conveniente para reducir este error consiste en desarrollar un amplificador de imágenes por medio de software, que permita establecer los objetivos de la maniobra con una precisión de fracción de píxeles.

Conclusiones

Se ha probado la factibilidad de la metodología para el control de robots usando visión descrita en el presente trabajo, para producir un posicionamiento preciso de la herramienta manipulada con respecto a una pieza de trabajo arbitraria, colocada también en forma arbitraria dentro del volumen de trabajo del robot.

Los resultados obtenidos hasta ahora permiten establecer que la creación de un sistema que permita facilitar la programación de robots industriales en tareas no repetitivas es realizable. Dicho sistema sería de utilidad en los casos en los que se pretende aplicar un manipulador en tareas que deban repetirse un número limitado de ocasiones, como puede ser el caso de la manufactura de piezas por parte de pequeños industriales. Con el método presentado, el robot industrial no necesita de modificación alguna, pudiendo trabajar con los sistemas estándar con que cuentan actualmente, como es el caso de comunicación con el exterior vía ethernet. Tal característica no está disponible para otras técnicas que usan visión por los retardos involucrados en este tipo de comunicación.

Por otro lado, el método propuesto en este reporte permitiría incluso que la programación de un robot pueda realizarse a distancia, a partir de un enfoque que se ha denominado como de "autonomía supervisada" (Backes, 1994). Dicho término fue originalmente aplicado al caso de robótica espacial en la que un operador designa desde la base las maniobras que después debe realizar el manipulador en forma autónoma. Este concepto puede extenderse al caso de manufactura asistida por robots en la industria en el que un operador, con una experiencia y capacidad limitada, puede especificar las maniobras que el robot debe realizar utilizando una interface gráfica, basada en las ideas expresadas en el presente artículo. Las "órdenes" que el operario designe para el robot podrían transmitirse por medio de internet, de manera que el robot no necesariamente tiene que estar presente en el sitio donde se encuentra el operario, lo cual permite aumentar las condiciones de seguridad en el empleo de robots a nivel industrial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México y al Fondo de Apoyo a la Investigación de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por el apoyo al presente proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- Abidi MA, González RC (1990) The Use of Multisensor Data for Robotic Applications. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 6(2): 159-177.
- Backes PG (1994) Supervised Autonomy for Space Telerobotics. En Skaar SB, Ruoff CF (Eds.) *Teleoperation and Robotics in Space*. Progress in Astronautics and Aeronautics, 161, AIAA. pp. 139-158.
- González-Galván EJ, Skaar SB (1996) Efficient Camera-Space Manipulation Using Moments. *Proc. IEEE Internat. Conf. Robotics and Automation*: 3407-3412.
- González-Galván EJ, Skaar SB, Korde UA, Chen WZ (1997) Application of a precision enhancing measure in 3-D rigid-body positioning using camera-space manipulation. *Internat. J. of Robotics Res.* 16(2): 240-257.
- González-Galván EJ, Skaar SB, Seelinger MJ (1999) Efficient Camera-Space Target Disposition in a Matrix of Moments Structure Using Camera-Space Manipulation. *Internat. J. of Robotics Res.* 18(8): 809-818.
- Hutchinson S, Hager GD, Corke PI (1996) A Tutorial On Visual Servo Control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12: 651-670.
- Junkins JL (1978) *An Introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems*. Alphen Aan Den Rijn. Stijthoff & Noordhoff. pp. 29-40.
- Korde UA, González-Galván EJ, Skaar SB (1992) Three dimensional camera-space manipulation using servoable cameras. *Proc. Intell. Robots and Computer Vision SPIE OE/Tech. Conf.* pp. 658-667.
- Malis E, Morel G, Chaumette F (2001) Robot control using disparate multiple sensors. *Internat. J. Robotics Res.* 20(5): 364-377.
- Nelson B, Khosla PK (1993) Increasing the tracking region of an eye-in-hand system by singularity and joint limit avoidance. *Proc. IEEE Internat. Conf. Robotics and Automation*: 418-423.
- Nelson B, Khosla PK (1994) Integrating Sensor Placement and Visual Tracking Strategies. *Proc. IEEE Internat. Conf. Robotics and Automation*: 1351-1356.
- Robinson ML (2001) *A Structured Lighting Approach to Image Analysis for Robotic Applications Using Camera-Space Manipulation*. Disertación doctoral. University of Notre Dame. Notre Dame, Indiana. pp. 65-83.
- Seelinger M, Skaar SB, Robinson M (1998) An Alternative Approach for Image-Plane Control of Robots. En Kriegman DJ, Hager GD, Morse AS (Eds.) *The Confluence of Vision and Control*. Springer-Verlag. London. pp. 41-65.
- Skaar SB, Brockman WH, Jang WS (1991) Three Dimensional Camera-Space Manipulation. *Internat. J. Robotics Res.* 9(4): 22-39.