

DONACION

Núm. Reg. FMT 4870

Catalogador HRHA

Fecha 12/08/2010



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS DE POSGRADO

“Cámaras rotatorias para la designación de
maniobras de manufactura asistidas por robots”

Tesis

Que para obtener el grado de
Maestría en Ingeniería Eléctrica
Opción
Control Automático

Presenta:

Ing. César Alejandro Chávez Olivares

Asesor:

Dr. Emilio J. González Galván

San Luis Potosí, S.L.P

Agosto 2009

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Maestría en Ingeniería Eléctrica
Opción Control automático



“Cámaras rotatorias para la designación de maniobras de manufactura asistidas por robots”

Presenta :

César Alejandro Chávez Olivares

Comité:

Dr. Emilio Jorge González Galván

Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro

Dr. José Guadalupe Nieto Navarro

Dr. José Salomé Murguía Ibarra

San Luis Potosí, S.L.P. a 21 de agosto de 2009.



**AL ING. CÉSAR ALEJANDRO CHÁVEZ OLIVARES
P R E S E N T E. –**

En atención a su solicitud de Tema y Temario, presentada por el **Dr. Emilio Jorge González Galván**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestría en Ingeniería Eléctrica**. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 25 de junio del presente año, fue aprobado el Tema y Temario propuesto:

TEMARIO:

**“CÁMARAS ROTATORIAS PARA LA DESIGNACIÓN DE MANIOBRAS DE
MANUFACTURA ASISTIDAS POR ROBOTS”**

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES.

INTRODUCCIÓN.

1. ANTECEDENTES Y ALCANCES DEL PROYECTO.
 2. EL MÉTODO DE MANIPULACIÓN EN ESPACIO DE CÁMARA.
 3. RECUPERACIÓN DE PARÁMETROS DE CÁMARA.
 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.
- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.
APÉNDICE.
BIBLIOGRAFÍA.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E


**ING. ARMANDO VIRAMONTES ALDANA
DIRECTOR**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP-78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

A mis padres, hermanos y Liz, por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Juan Chávez Rodríguez y Rosa María Olivares Ramos, por darme la vida y su apoyo incondicional.

A mis hermanos Adrian y Araceli, por apoyarme cuando los necesito.

A Lizvette por la paciencia que ha sabido demostrar, por su cariño y comprensión.

Al Doctor Emilio Jorge González Galván por compartir sus conocimientos, por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de investigación y por ser un excelente asesor y director de tesis.

Al Mtro. Javier de Lara Silva y su familia, por todo el apoyo proporcionado durante la estancia en el posgrado.

A mi amigo José de Jesús Palos García, por su apoyo e intercambio de ideas.

A mis amigos y compañeros de investigación Isela, Marco y el Dr. Ambrocio, por hacer el trabajo más ameno y su apoyo.

A mis amigos y compañeros de generación Emanuel y Carlos Daniel, por las asesorías y el intercambio de ideas, además de hacer la estancia más agradable.

A mis amigos Francisco Villalobos, Juan Ponce y Erika, por prestarme su ayuda cada que fue requerida, además de las largas charlas y consejos.

A los Doctores del CIEP por compartir sus conocimientos.

Al CONACyT por la beca otorgada.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	IX
CAPÍTULO UNO.....	1
1. ANTECEDENTES Y ALCANCES DEL PROYECTO.....	1
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Trabajo realizado anteriormente.....	5
1.3 Objetivos y aportaciones del proyecto.....	5
CAPÍTULO DOS.....	7
2. EL MÉTODO DE MANIPULACIÓN EN ESPACIO DE CÁMARA.....	7
2.1 Detección de centroides de marcas artificiales.....	9
2.2 Cinemática del manipulador.....	12
2.3 Modelo de cámara de perspectiva.....	17
2.4 Estimación de parámetros de cámara.....	19
2.4.1 Determinación de los parámetros P_1, \dots, P_6	20
2.4.2 Determinación del parámetro P_7	24
2.5 Localización tridimensional de marcas visuales.....	25
2.6 Determinación de los valores de junta.....	27
2.7 Posición tridimensional de las referencias visuales en la antorcha.....	29
CAPÍTULO TRES.....	36
3. RECUPERACIÓN DE PARÁMETROS DE CÁMARA.....	36
3.1 Modelo cinemático asociado a la unidad pan/tilt.....	37
3.2 Algoritmo de recuperación de parámetros de cámara.....	39
3.2.1 Ajuste de parámetros de cámara.....	41
3.2.2 Algoritmo de estimación de ángulos de rotación.....	45
CAPÍTULO CUATRO.....	47
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	47
4.1 El protocolo RS-485.....	48
4.2 El protocolo PELCO-P.....	49
4.3 La tarjeta de conversión RS-232 a RS-485.....	50

4.4	Experimentos de estimación de ángulos de rotación.....	51
4.5	Repetibilidad en la estimación de los ángulos de rotación.....	53
4.6	Verificación de parámetros obtenidos mediante el procedimiento de estimación propuesto	55
4.7	Tarea de posicionamiento con cámaras móviles y el concepto de información artificial ...	56
4.7.1	Información artificial.....	58
4.8	Experimentos de posicionamiento con cámaras móviles.....	65
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		75
Conclusiones.....		75
Trabajo Futuro		76
APÉNDICE.....		78
PANTALLAS DE LA INTERFAZ VISUAL		78
TARJETA DE CONVERSIÓN RS-232 A RS-485		81
ÍNDICE DE FIGURAS.....		83
ÍNDICE DE TABLAS.....		85
BIBLIOGRAFÍA.....		86

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
CONACyT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CIEP	Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
CSM	Manipulación en el Espacio de Cámara (por sus siglas en inglés)
Pan/Tilt	Movimientos giratorios de plataformas de 2 grados de libertad, asociados al movimiento panorámico y al cabeceo, respectivamente
USB	Bus Serial Universal (por sus siglas en inglés)
LED	Diodo Emisor de Luz (por sus siglas en inglés)
Mbps	Megabits por segundo
Kbps	Kilobits por segundo
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (por sus siglas en inglés)
OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos (por sus siglas en inglés)
0x	Prefijo usado para indicar numeración hexadecimal
(c_x, c_y)	Coordenada del centroide de una mancha en espacio de imagen
(x, y)	Coordenada de un punto perteneciente al contorno de una mancha
$Rot_a(\theta)$	Rotación de θ grados alrededor del eje a
$Transl_{xyz}(X, Y, Z)$	Traslación sobre los ejes x, y y z en cantidades X, Y y Z respectivamente.
A_i	Transformación homogénea asociada al $i^{ésimo}$ eslabón del manipulador
E	Transformación homogénea asociada a la herramienta instalada en el manipulador
T_c	Modelo cinemático del manipulador
M_c	Transformación homogénea asociada a la cámara
(x_c, y_c)	Coordenadas en el plano de la imagen obtenida de la $i^{ésima}$ cámara
e_1, \dots, e_4	Números de Euler o cuaterniones
f	Distancia focal
P	Vector de parámetros de cámara de perspectiva
$J(P)$	Función escalar de minimización del vector P
m	Número de muestras en un proceso de minimización
W_i	Ponderación o peso relativo asignado a la $i^{ésima}$ muestra
P'	Vector de parámetros extrínsecos de cámara
$\Delta P'$	Correcciones diferenciales al vector P'
ΔY	Residuales actuales para la corrección $\Delta P'$
b	Parámetros de visión representados en forma de coeficientes
W	Matriz de ponderaciones
$[\hat{c}B]$	Matriz de derivadas parciales en los parámetros de visión
B	Vector de parámetros de visión representados en forma de coeficientes
$[M_s], [M_n]$	Matrices de momentos donde se compacta la información requerida para la estimación de los parámetros de visión

M_1, M_2, M_3, M_4	Submatrices de momentos que componen a las matrices anteriores
M_x, M_y, M_z	
ϕ	Función escalar de minimización para localizar una marca visual en espacio tridimensional
n_d	Número de cámaras que ven un punto
$\gamma(\Theta)$	Función escalar de minimización para conocer la configuración interna del manipulador
\vec{F}	Vector de posición homogéneo tridimensional referido al sistema coordinado unido a la herramienta
\vec{C}	Vector dirigido al origen del sistema coordinado unido a la cámara, desde el origen del sistema coordinado unido a la base del manipulador
\vec{D}	Vector dirigido al origen del sistema coordinado unido a la cámara, desde una marca visual en la antorcha de corte del manipulador
$\rho(\alpha, \beta)$	Transformación homogénea asociada a la cámara antes y después del movimiento de la plataforma giratoria
$\ P\ $	Norma asociada al vector P
M	Transformación homogénea asociada a la cámara en la nueva orientación
$\gamma(\alpha, \beta)$	Función escalar de minimización para conocer los ángulos de rotación
$Tr(M)$	Traza de la matriz M
e_1^*, \dots, e_4^*	Números de Euler asociados a la cámara con la nueva orientación
P^*	Vector de parámetros de cámara de perspectiva en la nueva orientación
$\alpha\beta$	Vector que contiene a los ángulos de rotación α y β de la plataforma
$\Delta\alpha\beta'$	Correcciones diferenciales del vector $\alpha\beta$
A_γ	Matriz de derivadas parciales con respecto a los ángulos de rotación, de las funciones de proyección de un punto en espacio de imagen en la nueva orientación
$\Delta\gamma_c$	Residuales actuales de la corrección $\Delta\alpha\beta'$
(H_x, H_y, H_z)	Punto que ubica la posición de la aguja colocada en la punta de la herramienta, con respecto al sistema coordinado ubicado en la base del manipulador

INTRODUCCIÓN

Al aplicar técnicas de control de manipuladores basadas en visión, la precisión del sistema guarda una relación directa con la razón entre la resolución de la imagen y el espacio físico observado. Así, para un sensor con una resolución definida, un campo visual amplio permite un gran espacio de trabajo con una precisión reducida. Un método para incrementar el campo visual sin detrimento de la precisión, es el uso de cámaras montadas sobre plataformas giratorias.

En el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería, en la UASLP, se tiene instalado un robot industrial FANUC M16i/B con una gran amplitud de espacio de trabajo (3.5 m de desplazamiento lineal y 1.5 m de alcance). Dicho dispositivo se utilizará para la designación de tareas que involucren un seguimiento preciso de trayectorias, así como en la reproducción de superficies. Para este objetivo se utilizará un método basado en visión, conocido como "manipulación en espacio de cámara" o CSM por sus siglas en inglés.

Una parte importante del algoritmo de control por visión lo constituye la evaluación de los parámetros de cámara, los cuales se requieren para establecer una relación algebraica no lineal entre la imagen obtenida por la cámara y la configuración del robot. Tradicionalmente estos parámetros de cámara, conocidos también como parámetros de visión, se determinan a través de una serie de muestras obtenidas durante la ejecución de una trayectoria pre-planeada y se depuran durante la ejecución de la maniobra. Una reciente mejora del método de manipulación de espacio de cámara incluyó la sustitución de un modelo ortográfico, por uno de perspectiva. Bajo esta premisa, lo que se busca con el presente proyecto de tesis es el desarrollo del método citado, considerando que los parámetros de cámara se deben actualizar cada vez que la cámara gire para abarcar una nueva zona del espacio de trabajo.

Debido al diseño de las plataformas rotatorias, no es posible conocer el ángulo de giro, por lo que se planteó la recuperación de los parámetros de cámara a partir de información obtenida de la ubicación de una serie de marcas artificiales, colocadas sobre la herramienta del robot. La tesis plantea entonces el desarrollo de algoritmos para la recuperación de los parámetros de cámara una vez que ésta ha girado. Además, su aplicación a tareas de posicionamiento, necesarias para realizar tareas de manufactura.

La combinación de una técnica de control como CSM y cámaras giratorias sin sensores de posición, dan como resultado un método libre de calibración para incrementar el campo visual de un robot controlado por visión y, en consecuencia, el espacio donde puede actuar un manipulador industrial. Una de las aplicaciones potenciales de esta técnica es la realización de tareas de manufactura, usando soldadura o corte por plasma, sobre piezas de trabajo de gran amplitud, por medio de manipuladores industriales.

CAPÍTULO UNO

1. ANTECEDENTES Y ALCANCES DEL PROYECTO

La tecnología de los robots tiene un amplio desarrollo en aplicaciones industriales, sin embargo, existen todavía muchas áreas de oportunidad para la innovación. Por ejemplo, eliminar la necesidad de rutinas de calibración del robot o facilitar la programación de estos dispositivos a usuarios con experiencia limitada en el área de robótica.

Una de las características más importantes que definen a un *robot* es la capacidad de reprogramación. Sin embargo, esta característica no ha sido muy explotada. Las tareas que ejecutan actualmente los robots industriales son, en general, secuencias pre-programadas de movimientos previamente establecidos por un usuario usando un control de mando portátil (*teach-pendant*). Además, debido a la complejidad de integrar en el sistema robótico sensores que permitan la interacción con su entorno, los robots se utilizan principalmente en tareas repetitivas.

Una solución para incrementar las capacidades del robot de interactuar de manera inteligente y flexible con su entorno, es el uso de visión artificial. La visión artificial o *visión por computadora*, provee al robot, a través de un sistema de cómputo, usando un sofisticado mecanismo de percepción, la capacidad de responder a su entorno de una manera inteligente y flexible. De esta forma es posible que el robot sea entrenado para realizar tareas más complejas.

Los sistemas de visión son usados para realizar tareas entre las que se incluyen, por ejemplo, la selección de objetos que se orientan aleatoriamente desde un recipiente o un transportador, la identificación de objetos y la inspección limitada. Estas capacidades se utilizan, de forma selectiva, en aplicaciones tradicionales para reducir el costo de los montajes de sujeción de la pieza o la herramienta y para adaptarse a variaciones limitadas de su entorno.

Algunas tareas de manufactura se realizan sobre espacios de trabajo amplios. Al aplicar técnicas de control de manipuladores basadas en visión, la precisión del sistema guarda una relación directa con la razón entre la resolución de la imagen y el espacio físico observado. Así, para un sensor con una resolución definida, un campo visual amplio permite un gran espacio de trabajo con una precisión reducida.

Existen algunas maneras de incrementar el campo visual y, por lo tanto, el espacio de trabajo donde un robot puede actuar. Por ejemplo, solo para citar algunas:

1. El uso de lentes tipo ojo de pescado
2. El uso de lentes catadióptricos
3. El uso de múltiples cámaras
4. El uso de espejos fijos o montados sobre un robot
5. El uso de cámaras montadas sobre plataformas giratorias

El problema de las opciones 1 y 2 basadas en el uso de lentes que deforman la imagen, es que en algunas regiones de la imagen la proporción entre pixeles y distancia real suele ser muy grande, en tanto en otras puede ser muy pequeña. Modelar la distorsión de la lente resulta muy complicado (véase [1] y [2]) e implica mayor procesamiento de imagen (véase [3]). En cuanto a las proporciones entre

distancias grandes y una resolución reducida esto implica pérdida de precisión. En la Figura 1a se muestra la imagen de una cámara con un lente tipo ojo de pescado, y en la Figura 1b con un lente catadióptrico.



Figura 1. Uso de lentes para incrementar el campo visual

La opción 3 basada en el uso de múltiples cámaras es costosa, pues el precio para implementarse se incrementa proporcionalmente con el número de sensores usados. Además, este método implica organizar la información proveniente de los sensores visuales (véase [4] y [5]). En la Figura 2 se muestra un esquema de esta solución.

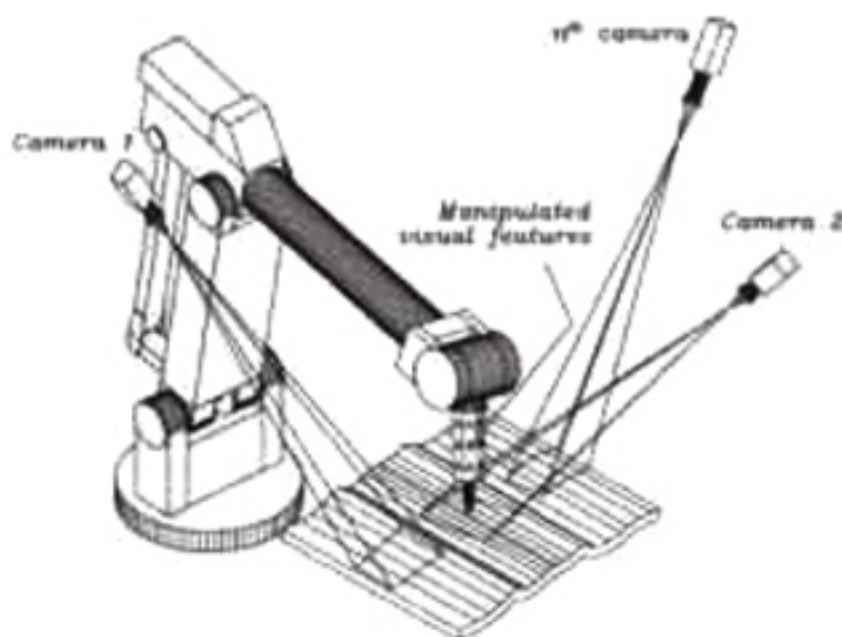
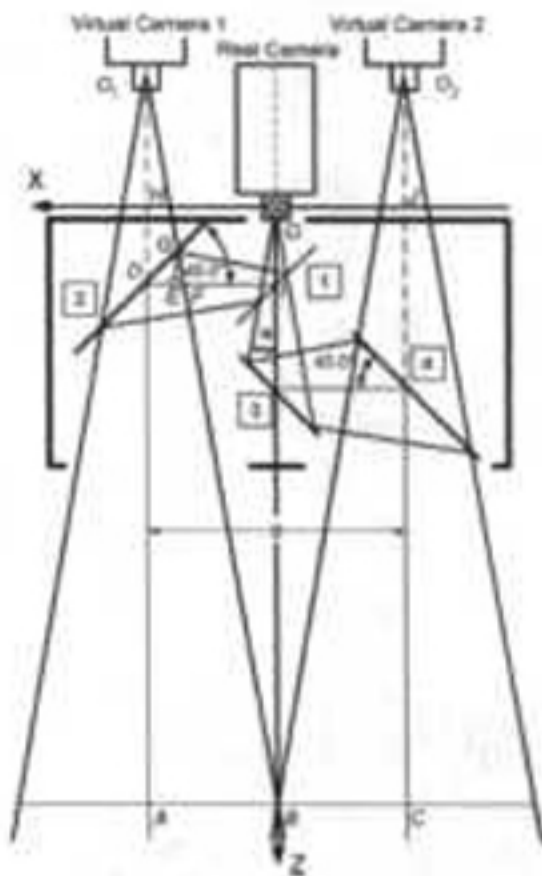


Figura 2. Uso de múltiples cámaras para incrementar el campo visual

La opción 4 que considera a la cámara apuntando a un conjunto de espejos simultáneamente, permite obtener con un solo sensor la imagen de la pieza de trabajo desde varias perspectivas diferentes (véase [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] y [16]). Esta solución resulta ser una solución económica. La desventaja principal es que reduce la precisión, debido al espacio de imagen por unidad de espacio físico. En la Figura 3a se muestra un esquema usando un par de espejos y en la Figura 3b espejos en un arreglo piramidal.



a)



b)

Figura 3. Uso de múltiples espejos para incrementar el campo visual

En la opción 5, que involucra el uso de cámaras montadas sobre plataformas giratorias, existe el problema de no conocer con precisión el ángulo de rotación de las cámaras [véase [17], [18], [19], [20], [21], [22] y [23]], pero tiene la ventaja de ser económica, y no causa detrimento de la precisión. En la Figura 4 se muestra una cámara montada debajo de una plataforma giratoria.



Figura 4. Cámara montada en una plataforma giratoria

Esta metodología implica la actualización de parámetros de cámara cada vez que se realiza un movimiento en la plataforma giratoria. La facilidad para realizar el ajuste de dichos parámetros depende de la arquitectura de la plataforma giratoria y del modelo de cámara usado.

1.1 Antecedentes

Recientemente en el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se instaló un robot industrial con una gran amplitud de espacio de trabajo, ilustrado en la Figura 5. Este dispositivo tiene 3.5 m de desplazamiento lineal, 1.5 m de alcance y capacidad de carga de 20 kg. Dicho manipulador, equipado con un sistema de corte con plasma, se utilizará para la designación de tareas que involucren un seguimiento preciso de trayectorias, así como en la reproducción de superficies. Para este objetivo se utilizará un método basado en visión, conocido como "manipulación en espacio de cámara" que se explicará en detalle en el siguiente capítulo. Este método requiere del uso combinado de cámaras fijas y cámaras montadas sobre plataformas giratorias.



Figura 5. Robot FANUC M-16iB

Una parte importante del algoritmo de control por visión lo constituye la evaluación de los parámetros de cámara, los cuales se requieren para establecer una relación algebraica no lineal entre la imagen obtenida por la cámara y la configuración del robot. Tradicionalmente estos parámetros de cámara, conocidos también como parámetros de visión, se determinan a través de una serie de muestras obtenidas durante la ejecución de una trayectoria pre-planeada y se depuran durante la ejecución de la maniobra. Una reciente mejora del método de manipulación de espacio de cámara incluyó la sustitución de un modelo ortográfico, por uno de perspectiva (véase [32]). Bajo esta premisa, lo que se busca con el presente proyecto de tesis es el desarrollo del método citado, considerando que los parámetros de cámara se deben actualizar cada vez que la cámara gire para abarcar una nueva zona del espacio de trabajo.

Debido al diseño no sofisticado de las plataformas giratorias usadas o unidades pan/tilt, como se denominan también, no es posible conocer el ángulo de giro, por lo que se planteó la recuperación de los parámetros de cámara a partir de información obtenida de la ubicación de una serie de marcas artificiales colocadas sobre la herramienta del robot. La tesis plantea entonces el desarrollo de algoritmos para la

recuperación de los parámetros de cámara una vez que ésta ha girado. Además, su aplicación a tareas de posicionamiento, necesarias para realizar tareas de manufactura.

1.2 Trabajo realizado anteriormente

En la literatura se reportan trabajos relacionados al uso de cámaras montadas en plataformas giratorias, aunque la mayoría utilizan métodos que necesitan calibración y medición de los ángulos de rotación. Por ejemplo, en [17], [19], [20], [21] y [22] se trabaja la calibración de cámaras montadas en unidades pan/tilt. En [23] se propone controlar estas unidades por medio de retroalimentación por visión.

Con respecto a cámaras no calibradas, en [33] se usan cámaras montadas sobre plataformas giratorias para incrementar el campo visual. Se utiliza la técnica de control basada en visión CSM. En dicho trabajo, se utiliza el modelo ortográfico de cámara, que utiliza seis parámetros de visión. Además, hace uso de sensores de posición para medir los ángulos de rotación. Con esas mediciones se actualizan solo cuatro de los parámetros y necesita una observación para actualizar los otros dos. Cabe recalcar que en el presente trabajo de tesis no se hace uso de dichos sensores de posición y se usa el modelo de cámara de perspectiva.

En cuanto al trabajo previo desarrollado en el Laboratorio de Robótica mencionado anteriormente, se logró la convergencia en el método de estimación de parámetros del modelo de cámara de perspectiva. Se realizó también la estimación de coordenadas tridimensionales a partir de marcas visuales detectadas en espacio de imagen. Además, se diseñó el algoritmo para la estimación de la configuración del manipulador para alcanzar un objetivo en coordenadas tridimensionales. Con todo lo anterior, se realizaron tareas de posicionamiento con el robot FANUC M16iB utilizando la técnica CSM. Cabe mencionar que estos logros y experimentos se hicieron con cámaras fijas, situación que contrasta con lo reportado en este trabajo.

1.3 Objetivos y aportaciones del proyecto

El objetivo general del proyecto es el de desarrollar un método para incrementar el campo visual de un manipulador industrial y, por consecuencia, el espacio donde puede actuar un manipulador industrial controlado por visión.

Los objetivos particulares son como sigue:

- Desarrollar un algoritmo para recuperar los parámetros de cámara del modelo de perspectiva, con cámaras montadas en plataformas giratorias de 2 grados de libertad, usando el método de control basado en visión *Manipulación en el Espacio de Cámara* (CSM por sus siglas en inglés).
- Comunicar la PC con el actuador de las plataformas giratorias.
- Realizar experimentos de posicionamiento para validar la técnica desarrollada con cámaras montadas sobre plataformas giratorias. En dicha parte experimental, hacer uso del robot FANUC M-16iB.
- Desarrollar una interfaz visual que integre todos los algoritmos de control de manipulador (CSM) y de los actuadores de las plataformas giratorias, además de los algoritmos de recuperación de parámetros de cámara.

La recuperación de los parámetros de las cámaras montadas sobre plataformas giratorias se realizará haciendo uso de referencias visuales artificiales, las cuales están montadas cerca de la herramienta de trabajo del robot, que se encienden y apagan a voluntad. En otras palabras, no se utilizarán sensores de posición para la plataforma rotatoria. Se utilizará el modelo de cámara de perspectiva con el método de control basado en visión CSM.

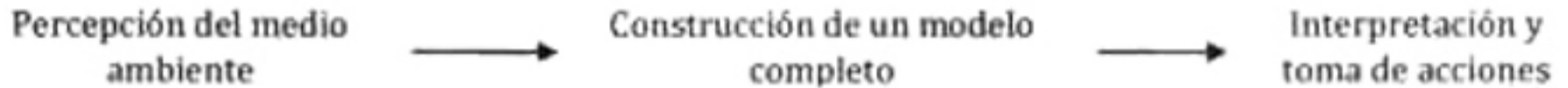
La aportación principal de la tesis es la creación de un algoritmo para la recuperación de parámetros de cámaras montadas sobre plataformas giratorias sin usar sensores de posición. Además, al ser utilizado el *Método de Manipulación en Espacio de Cámara*, se crea un método libre de calibración para incrementar el campo visual y por consecuencia, el espacio donde puede actuar un manipulador industrial.

Entre las aplicaciones potenciales del presente proyecto se encuentran aquellas en las que se realizan tareas de soldadura o de corte con plasma, sobre piezas de trabajo de grandes dimensiones con robots industriales. Por ejemplo, tareas soldadura en grandes tanques de proceso o tareas de corte sobre placas de lámina para estructuras.

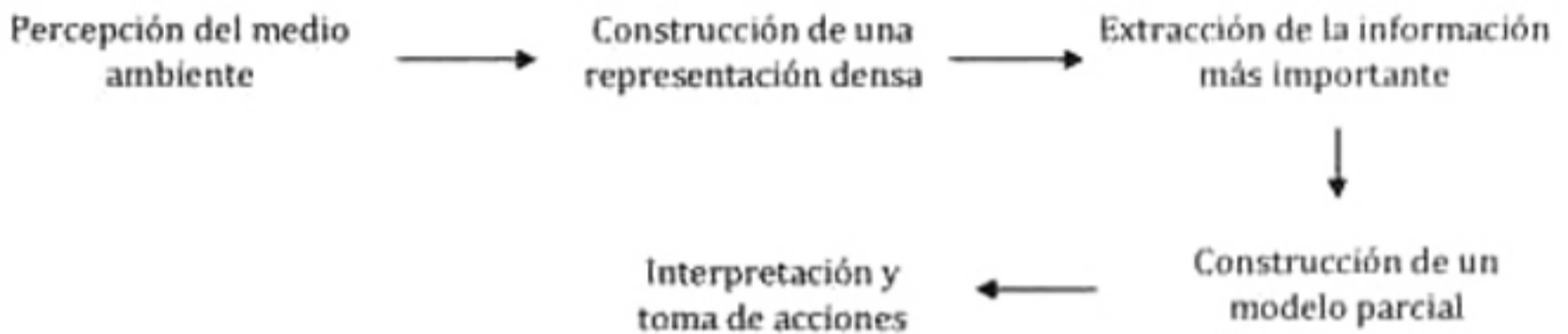
CAPÍTULO DOS

2. EL MÉTODO DE MANIPULACIÓN EN ESPACIO DE CÁMARA

Como se mencionó en el capítulo anterior, se usa la visión por computadora para incrementar las capacidades de un robot de interactuar de manera inteligente y flexible con su entorno. Un sistema ideal que involucre visión por computadora constaría de las siguientes etapas:



Sin embargo, de manera práctica, un sistema que involucre visión por computadora constaría de los siguientes procesos:



Los dos primeros procesos pueden clasificarse como visión de bajo nivel. Los dos siguientes como visión de nivel intermedio y el último como visión de alto nivel.

Visión de bajo nivel lo constituyen las acciones destinadas a la adquisición de una imagen adecuada para su procesamiento. La visión de nivel intermedio la constituyen los procesos que extraen, caracterizan y etiquetan componentes en una imagen obtenida del proceso de bajo nivel. Visión de alto nivel se refiere a los procesos que intentan imitar cierto nivel de inteligencia.

La información visual se convierte en señales eléctricas por medio de sensores visuales. Dentro de éstos existen dos modalidades: Scanner y cámaras. En ambos casos se obtiene una *representación densa*, la cual consiste de un arreglo matricial con un número relativamente grande de renglones y columnas. Cada elemento de este arreglo matricial recibe el nombre de elemento de imagen, elemento de fotografía o pixel. Su valor está asociado al nivel de gris, para el caso de imágenes en blanco y negro o al porcentaje de color rojo, verde y azul, para el caso de imágenes a color.

La representación densa obtenida por medio de los sensores es analizada con el objeto de extraer información pertinente, como lo puede ser la presencia de puntos, señales distintivas, bordes, etc. que pueden ser usadas para generar algún tipo de accionamiento por parte del manipulador.

El método de manipulación en espacio de cámara es una técnica de control de robots basada en visión, que utiliza como principal recurso la teoría de estimación. Esta técnica no requiere de un proceso de calibración ni del manipulador ni del sistema de visión. Una característica importante del

método es que los objetivos de la maniobra se definen y persiguen en el marco de referencia de las imágenes bidimensionales obtenidas por medio de cada una de las cámaras participantes.

En la aplicación del método CSM se requiere de por lo menos 2 cámaras de video que permanecen estacionarias en el intervalo de tiempo entre la detección de la pieza de trabajo y la culminación de la tarea, y constituyen los principales sensores del sistema. Estas cámaras están conectadas a un puerto de una computadora, que realiza todos los cálculos y efectúa las funciones requeridas por el método.

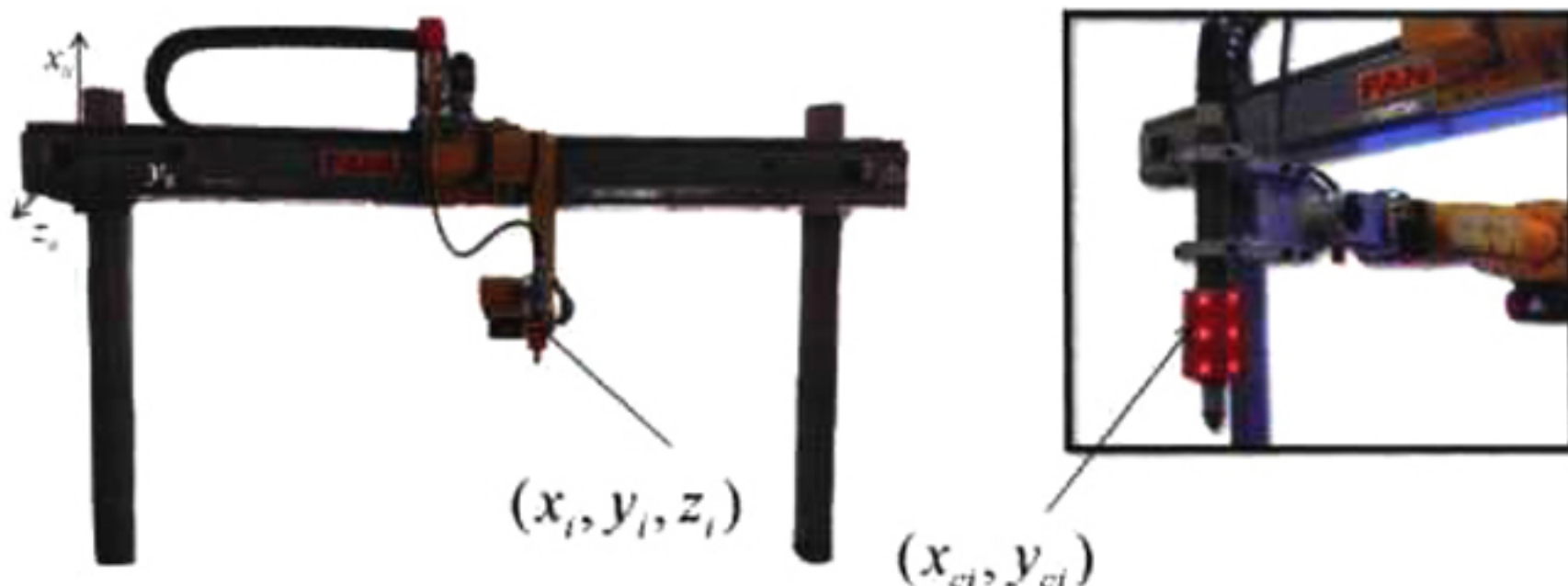


Figura 6. Relación de coordenadas tridimensionales y bidimensionales de las marcas visuales artificiales

En este método se requiere simultáneamente de la información tridimensional generada por la cinemática del manipulador y la información bidimensional asociado al espacio de cámara, como se ilustra en la Figura 6.



Figura 7. Marcas visuales artificiales colocadas alrededor de la herramienta de corte

Para simplificar el proceso de análisis de imágenes y lograr relacionar la información tridimensional con la bidimensional, se colocaron marcas visuales artificiales en un soporte especial alrededor de la herramienta de corte, una antorcha en este caso, como se muestra en la Figura 7.

2.1 Detección de centroides de marcas artificiales

Una parte muy importante de un sistema que use visión por computadora lo constituye la sección dedicada a la extracción de información o rasgos distintivos a partir de una imagen. Este proceso cae dentro de las acciones clasificadas como visión de nivel intermedio.

Existe un número significativo de técnicas para obtener los rasgos distintivos de una imagen bidimensional, pero solo unos pocos satisfacen los requerimientos de velocidad computacional y bajo costo de implementación, esenciales para una aplicación a nivel industrial.

En el presente trabajo se consideraron solamente dos alternativas para la extracción de información, las cuales están relacionadas al uso de un rayo láser para la designación de la posición de un punto proyectado sobre la superficie de trabajo, y las marcas visuales artificiales manipuladas mencionadas anteriormente:

1. Diferenciación de imágenes.
2. Detección de bordes.

La primera técnica permite obtener una imagen que contiene exclusivamente las marcas generadas al incidir el láser sobre una superficie, aprovechando el hecho que se tiene control sobre el encendido y apagado de la fuente luminosa. En este caso, el procedimiento consiste en obtener una imagen con el láser encendido y una segunda imagen de la misma superficie, pero esta vez con el láser apagado. La diferencia de las dos imágenes consiste de un fondo oscuro en el que resaltan de manera muy evidente las manchas producidas por la fuente luminosa. Para el caso de las marcas de la antorcha, el proceso de detección es similar. Las marcas visuales artificiales en la antorcha son LEDs que se encienden y apagan a voluntad. Se toma una imagen con los dispositivos optoelectrónicos encendidos y otra con los dispositivos apagados. Computacionalmente, la imagen consiste en un arreglo matricial con un número de filas equivalente a la altura de la imagen en pixeles mientras que el número de columnas equivale a la anchura.

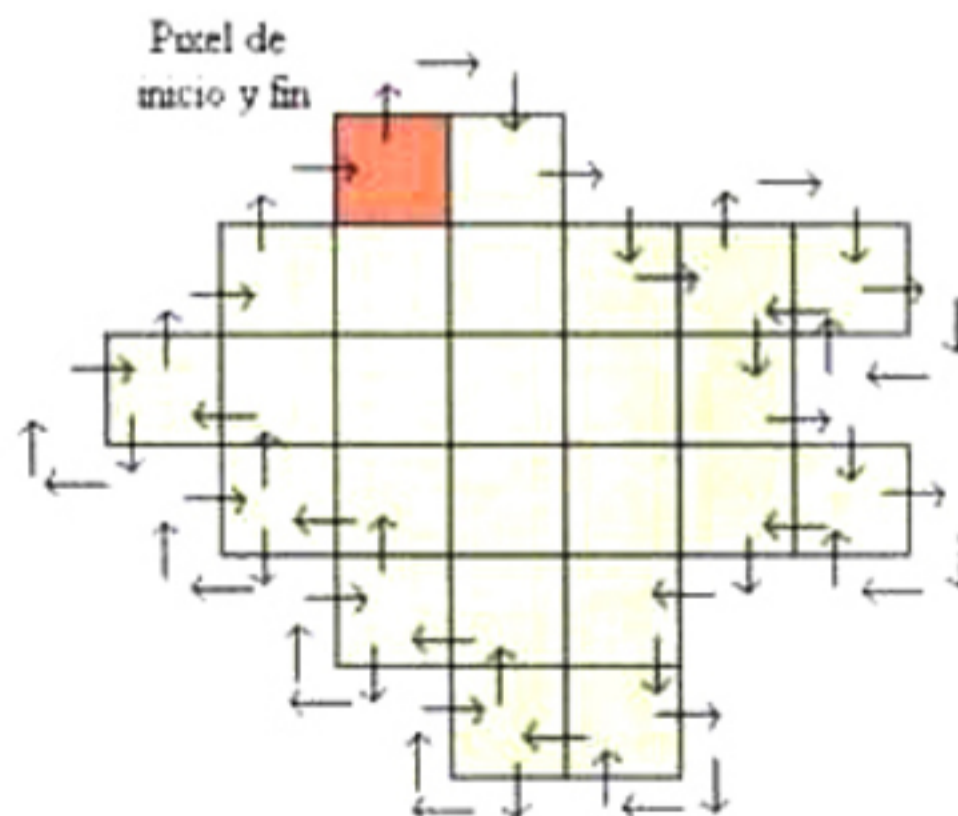


Figura 8. Detección de bordes

Para la segunda técnica, se diseñó un algoritmo en el que se recorre el contorno de las manchas que aparecen en la imagen. El diagrama de flujo equivalente a este algoritmo se ilustra en la Figura 9. En la Figura 8 se muestra la forma en la que se recorre una mancha por los bordes.

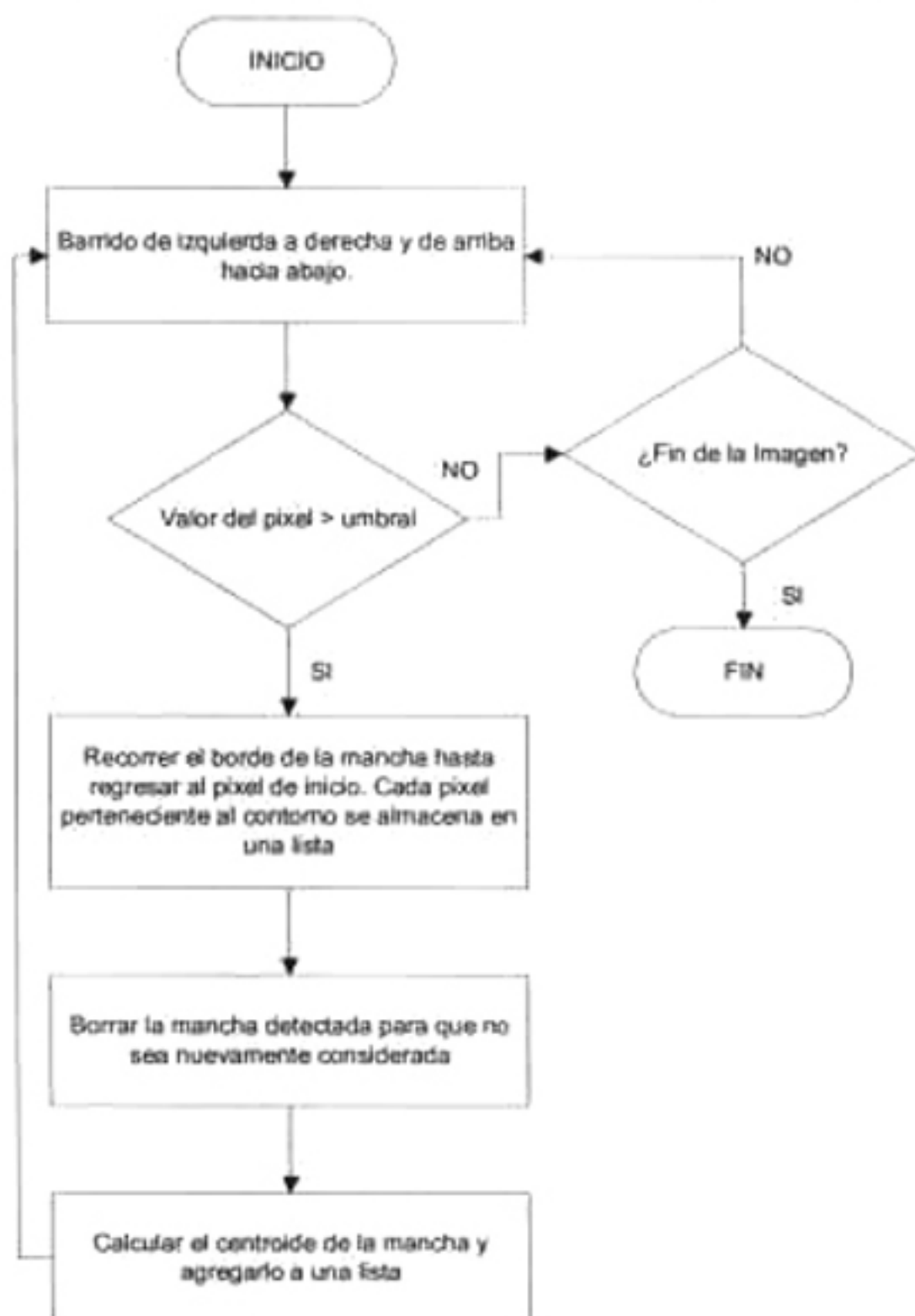


Figura 9. Diagrama de flujo para reconocer los contornos de manchas en una imagen

Una forma para calcular el centroide de una mancha, es aproximando el contorno a una elipse. En este caso, se utilizó un algoritmo de estimación lineal de mínimos cuadrados para minimizar una función de error.

A partir de la ecuación general de las rectas de segundo orden [34]

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + 1 = 0 \quad (2.1)$$

Los parámetros desconocidos son a, b, c, d y e .

Se parte de la ecuación (2.1) para definir la función a minimizar ϕ dada por,

$$\phi = \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + 2bx_iy_i + cy_i^2 + 2dx_i + 2ey_i + 1)^2 \quad (2.2)$$

donde n es el número de puntos que pertenecen al contorno.

En seguida, se toman las derivadas parciales de ϕ con respecto a cada uno de los parámetros para formar la ecuación matricial dada en la siguiente expresión,

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^4 & 2\sum x_i^3y_i & \sum x_i^2y_i^2 & 2\sum x_i^3 & 2\sum x_i^2y_i \\ \sum x_i^3y_i & 2\sum x_i^2y_i^2 & \sum x_iy_i^3 & 2\sum x_i^2y_i & 2\sum x_iy_i^2 \\ \sum x_i^2y_i^2 & 2\sum x_iy_i^3 & \sum y_i^4 & 2\sum x_iy_i^2 & 2\sum y_i^3 \\ \sum x_i^3 & 2\sum x_i^2y_i & \sum x_iy_i^2 & 2\sum x_i^2 & 2\sum x_iy_i \\ \sum x_i^2y_i & 2\sum x_iy_i^2 & \sum y_i^3 & 2\sum x_iy_i & 2\sum y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sum x_i^2 \\ -\sum x_iy_i \\ -\sum y_i^2 \\ -\sum x_i \\ -\sum y_i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

donde las sumatorias van desde 1 hasta n . Una vez que se resuelve (2.3), el centroide puede encontrarse por medio de las siguientes expresiones,

$$c_x = \frac{be - cd}{\delta} \quad (2.4)$$

$$c_y = \frac{bd - ae}{\delta} \quad (2.5)$$

donde $\delta = ac - b^2$. En la práctica se encontró que las manchas generadas por las marcas de la antorcha son muy semejantes a elipses y, por lo tanto, el algoritmo de aproximación propuesto funcionó adecuadamente.

En el caso de las manchas generadas por un punto láser, surgió la necesidad de calcular el centroide por otro método, en particular, el método del centro de masa del contorno. El problema es que, dependiendo la superficie donde se proyecta el punto láser, la marca se distorsiona de tal forma que su forma se parece a una estrella. Para calcular el centroide por este último método, se utilizan las ecuaciones siguientes,

$$c_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.6)$$

$$c_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.7)$$

donde n es el número de puntos pertenecientes al contorno, mientras que (x_i, y_i) es la coordenada del $i^{\text{ésimo}}$ punto del contorno.

2.2 Cinemática del manipulador

El desarrollo de un sistema que ejecute tareas de manufactura por medio de un manipulador implica, entre otros aspectos, el conocimiento de un modelo que describa el comportamiento cinemático del dispositivo. Este modelo permite predecir de manera confiable tanto la posición como la orientación del efector final en términos del valor de los pares cinemáticos relacionados con cada uno de los grados de libertad del manipulador.

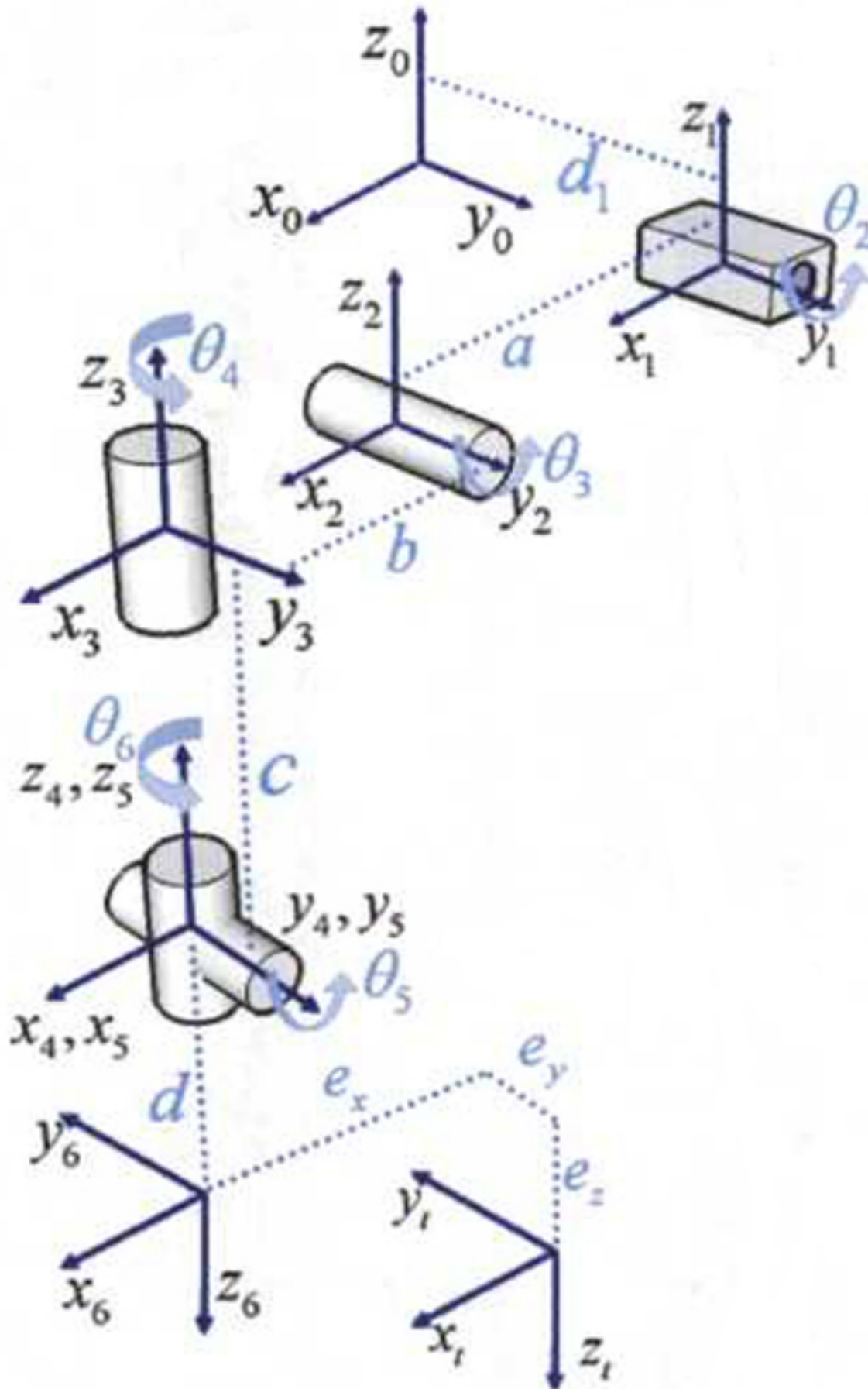


Figura 10. Modelo cinemático del Robot FANUC M16i/B

Los manipuladores mecánicos están compuestos de *eslabones* conectados por juntas para formar una *cadena cinemática abierta*. El robot utilizado en este caso cuenta con la primer junta prismática que realiza un movimiento lineal y cinco más de revoluta, que ejecutan un movimiento giratorio.

El robot FANUC M16iB es un manipulador de tipo antropomórfico de seis grados de libertad accionados por servomotores. Los grados de libertad se muestran en la Figura 10. En dicha figura también se describe el movimiento de cada uno de los ejes, donde los tres primeros sirven en general para el posicionamiento y los últimos tres, que forman la muñeca, para la orientación. La muñeca tiene una configuración esférica, esto es, sus ejes se intersectan en un punto en común.

El objetivo del análisis cinemático directo es determinar las ecuaciones que describen el comportamiento geométrico del robot, relacionando los desplazamientos angulares con la posición y orientación del elemento terminal. Este análisis requiere de la designación de un marco de referencia o sistema coordinado unido a cada eslabón del mismo y de una referencia fija que generalmente está situada en la base del robot. También es usado para ubicar la posición de las marcas visuales artificiales con respecto al mismo sistema coordinado, como se explica en la sección 2.7. Se emplea el concepto de transformación homogénea para describir, con respecto a un sistema de referencia fijo, la posición y orientación de los eslabones que componen el brazo del robot.

La Figura 10 muestra los elementos necesarios para obtener el modelo cinemático del robot utilizado en los experimentos. Cada cilindro representa a una junta de revoluta, es decir, una rotación alrededor de un eje asociado a la junta. El prisma representa a una junta prismática, o sea, una traslación en forma lineal a lo largo de un eje asociado a la junta.

En la Tabla 1 se describen las dimensiones del robot y, en la Tabla 2, las dimensiones de la herramienta, ambas en milímetros. Las dimensiones se asocian a las indicadas en la Figura 10.

Tabla 1. Dimensiones del robot FANUC M16iB

Segmento	Dimensión (mm)
a	770
b	100
c	740
d	100

Tabla 2. Dimensiones de la herramienta

Segmento	Dimensión (mm)
e_x	266.05
e_y	1.036
e_z	378.023

Para hacer uso de las matrices de transformación homogénea y su descripción, se definen los términos $C(\theta) = \cos(\theta)$ y $S(\theta) = \sin(\theta)$.

La relación matricial (2.8) es la correspondiente a la rotación alrededor del eje x .

$$Rot_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C(\theta) & -S(\theta) & 0 \\ 0 & S(\theta) & C(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

La relación matricial (2.9) corresponde a una rotación alrededor del eje y .

$$Rot_y(\theta) = \begin{bmatrix} C(\theta) & 0 & S(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S(\theta) & 0 & C(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La relación matricial (2.10) es la correspondiente a una rotación alrededor del eje z .

$$Rot_z(\theta) = \begin{bmatrix} C(\theta) & -S(\theta) & 0 & 0 \\ S(\theta) & C(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La relación matricial (2.11) corresponde a una traslación en los ejes x , y y z en cantidades X , Y y Z respectivamente.

$$Transl_{xyz}(X, Y, Z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 0 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

La transformación homogénea A_i es aquella que relaciona al sistema coordenado i con el sistema coordenado $i-1$. Para el caso de la primera junta, esta relación se expresa en la ecuación (2.12) y significa una traslación a lo largo del eje y y un desplazamiento d_1 .

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = A_1(d_1) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_1(d_1) = Transl_{xyz}(0, d_1, 0) \quad (2.12)$$

Para definir la siguiente transformación, la cual relaciona al sistema coordenado 2 con el sistema coordenado 1, es necesario hacer referencia a la Figura 11. En esta figura se puede observar que al girar la segunda junta se genera un movimiento que simula una configuración en paralelogramo.

Esta acción es inherente al sistema robótico utilizado y se realiza, tal vez, con fines de reutilizar el software de control de algún otro robot con esta característica.

La Figura 11a muestra una posición inicial para estos ángulos. Al realizar un giro de cierta magnitud en θ_2 , θ_1 es desplazado la misma magnitud pero en sentido contrario, como se muestra en la Figura 11b.

Por esto, la matriz homogénea A_2 se modela como una traslación dependiente de un ángulo θ_2 . La relación que involucra esta matriz homogénea se describe enseguida,

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = A_2(\theta_2) \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_2(\theta_2) = \text{Transl}_{\text{rot}}(aC(\theta_2), 0, -aS(\theta_2)) \quad (2.13)$$

donde el a se especifica en la Tabla 1.

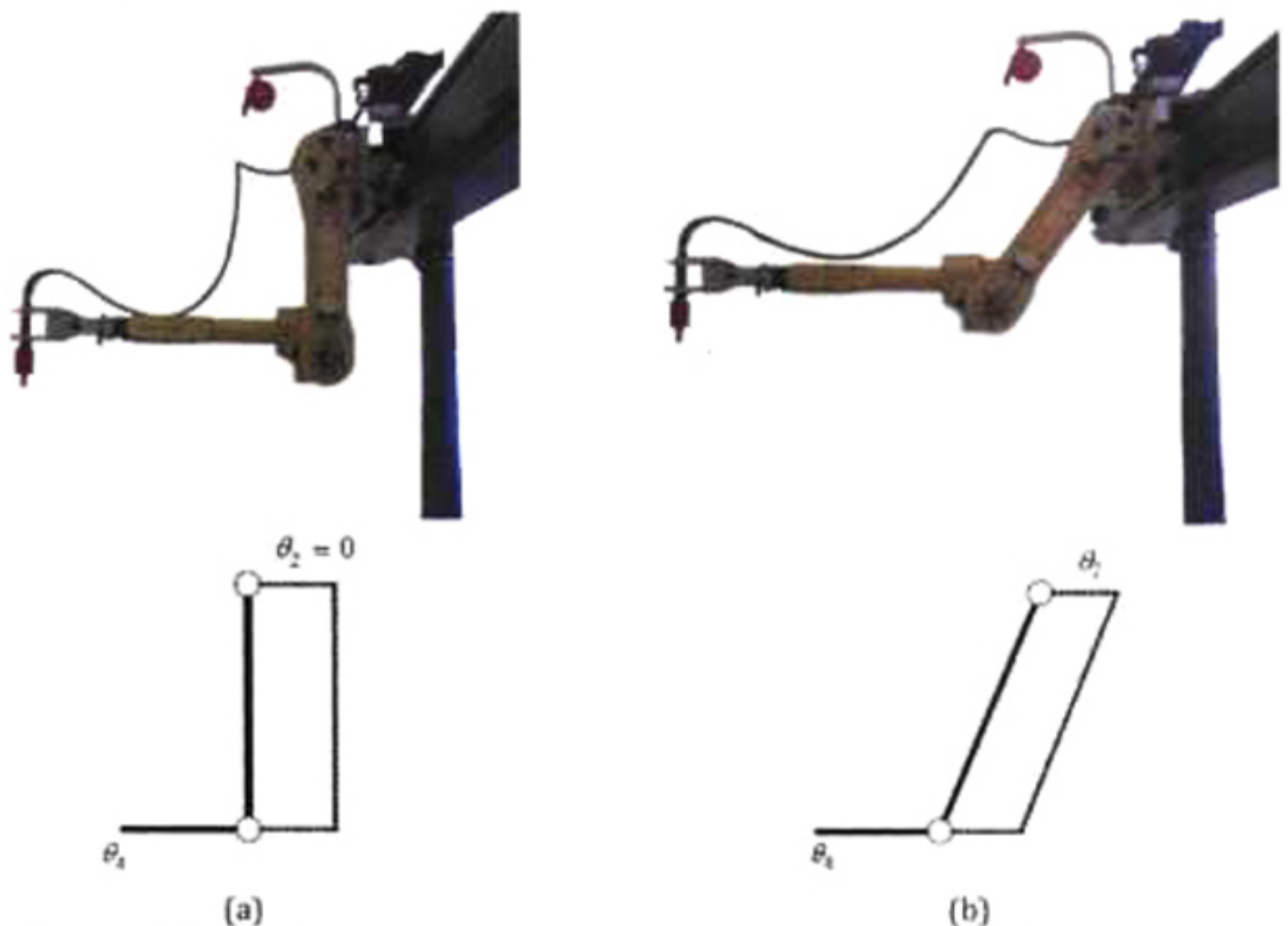


Figura 11. Emulación de la configuración paralelogramo en el robot FANUC M-16iB

La tercera transformación homogénea es aquella que relaciona al sistema coordenado 3 con el sistema coordenado 2. Esta relación se expresa en la ecuación (2.14) que implica una rotación sobre el eje y un valor $-\theta_3$, seguida de una traslación en el eje x una cantidad b indicada en la Tabla 1.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = A_3(\theta_3) \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_3(\theta_3) = Rot_x(-\theta_3)Transl_{xyz}(b, 0, 0) \quad (2.14)$$

Las transformaciones siguientes son calculadas de una manera similar a como se obtuvo A_3 en la ecuación (2.14), las cuales están compuestas por rotaciones y traslaciones. A continuación se muestran las relaciones entre los sistemas coordenados siguientes,

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = A_4(\theta_4) \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_4(\theta_4) = Rot_z(-\theta_4)Transl_{xyz}(0, 0, -c) \quad (2.15)$$

donde la cantidad c se especifica en la Tabla 1.

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \\ 1 \end{bmatrix} = A_5(\theta_5) \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_5(\theta_5) = Rot_x(-\theta_5) \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \\ 1 \end{bmatrix} = A_6(\theta_6) \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad A_6(\theta_6) = Rot_z(\theta_6) \quad (2.17)$$

Las matrices A_1, \dots, A_6 se usan para describir la posición-orientación del extremo libre del robot (ELR)¹ con respecto al sistema coordenado en la base del manipulador x_0, y_0, z_0 . La relación que describe la posición y orientación del extremo de la herramienta con referencia al ELR se muestra enseguida,

$$\begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \\ 1 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \\ 1 \end{bmatrix}, \quad E = Transl_{xyz}(0, 0, -d)Rot_x(\pi)Transl_{xyz}(-e_x, e_y, e_z) \quad (2.18)$$

donde la cantidad d se indica en la Tabla 1. Las cantidades e_x , e_y y e_z están especificadas en la Tabla 2.

La matriz homogénea final que transforma las coordenadas de un punto desde el marco de referencia asociado a la herramienta al sistema coordenado de referencia colocado en la base del robot

¹ Conocido en inglés como *face plate*

x_0, y_0, z_0 se puede obtener realizando el producto matricial de las matrices A_1, \dots, A_6 y la matriz E . Dicha relación matricial se define como sigue,

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_K(d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

donde:

$$T_K(d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = A_1(d_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)A_4(\theta_4)A_5(\theta_5)A_6(\theta_6)E \quad (2.20)$$

2.3 Modelo de cámara de perspectiva

Se puede obtener una expresión en forma matricial dada por la ecuación (2.21), que relaciona a los sistemas coordenados asociados al modelo de cámara de perspectiva ilustrado en la Figura 12. Dicho modelo permite establecer la correspondencia entre un espacio físico tridimensional y el plano de la imagen bidimensional.

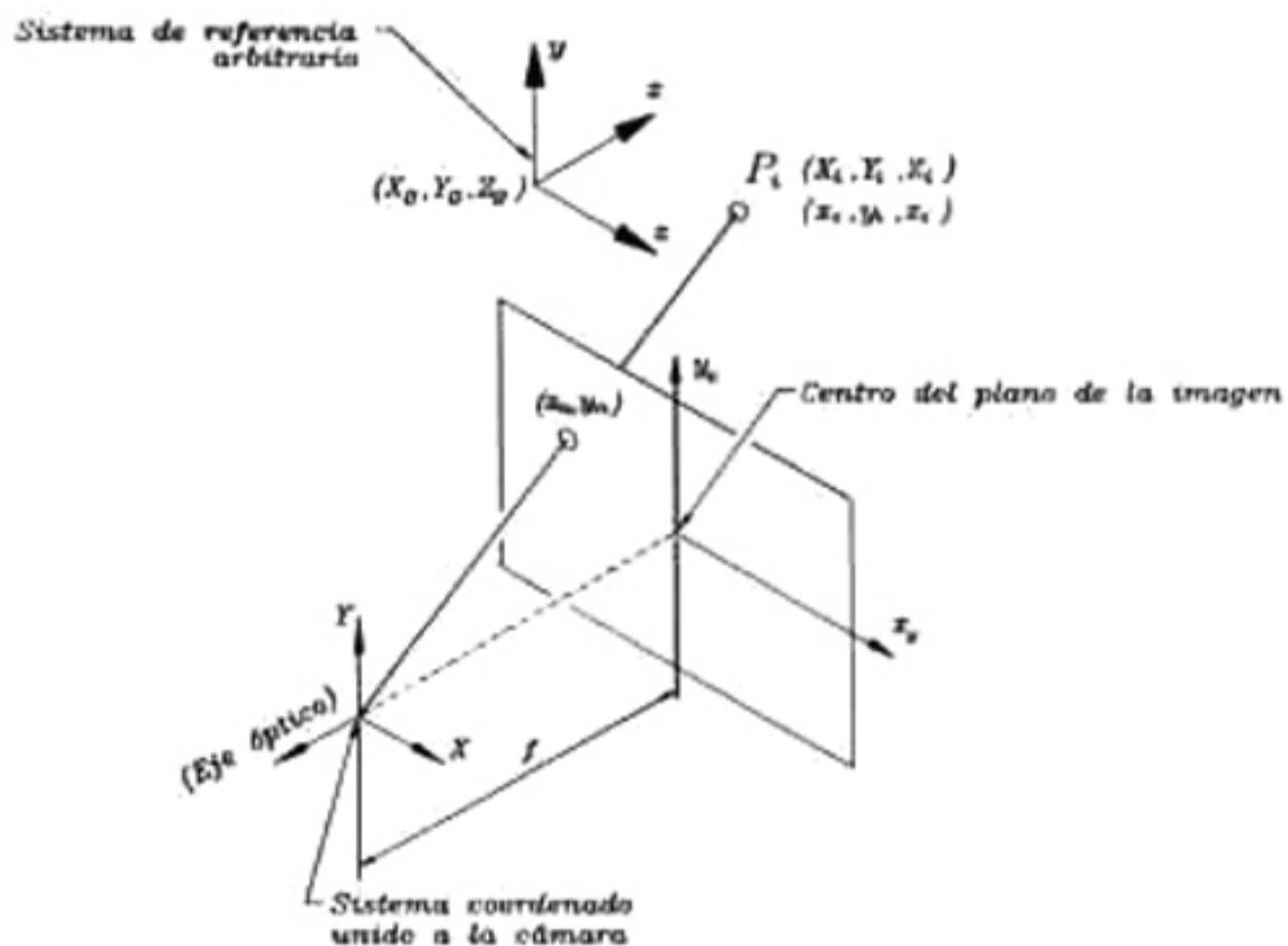


Figura 12. Sistemas coordenados asociados al modelo de cámara de perspectiva

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_E(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

donde:

$$M_E(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0) = \begin{bmatrix} e_1^2 + e_2^2 - e_3^2 - e_4^2 & 2(e_2e_3 + e_1e_4) & 2(e_2e_4 - e_1e_3) & X_0 \\ 2(e_2e_3 - e_1e_4) & e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 - e_4^2 & 2(e_3e_4 + e_1e_2) & Y_0 \\ 2(e_2e_4 + e_1e_3) & 2(e_3e_4 - e_1e_2) & e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 + e_4^2 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La proyección de un punto (x_i, y_i, z_i) con respecto a la base del robot, en espacio de imagen, está dado por las siguientes ecuaciones,

$$x_{oi} = f \frac{X_i}{Z_i} \quad (2.23)$$

$$y_{oi} = f \frac{Y_i}{Z_i} \quad (2.24)$$

Desarrollando las expresiones X_i, Y_i y Z_i de (2.21) se obtiene,

$$x_{oi} = f \frac{R_{11}x_i + R_{12}y_i + R_{13}z_i + X_0}{R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0} \quad (2.25)$$

$$y_{oi} = f \frac{R_{21}x_i + R_{22}y_i + R_{23}z_i + Y_0}{R_{31}x_i + R_{32}y_i + R_{33}z_i + Z_0} \quad (2.26)$$

donde

$$\begin{aligned} R_{11} &= e_1^2 + e_2^2 - e_3^2 - e_4^2 \\ R_{12} &= 2(e_2e_3 + e_1e_4) \\ R_{13} &= 2(e_2e_4 - e_1e_3) \\ R_{21} &= 2(e_2e_3 - e_1e_4) \\ R_{22} &= e_1^2 - e_2^2 + e_3^2 - e_4^2 \\ R_{23} &= 2(e_3e_4 + e_1e_2) \\ R_{31} &= 2(e_2e_4 + e_1e_3) \\ R_{32} &= 2(e_3e_4 - e_1e_2) \\ R_{33} &= e_1^2 - e_2^2 - e_3^2 + e_4^2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

El punto (X_0, Y_0, Z_0) localiza el origen del sistema de coordenadas xyz relativo al sistema de coordenadas XYZ asociado a la cámara. Las cantidades e_1, e_2, e_3 y e_4 representan los cuatro parámetros de Euler, los cuales satisfacen la siguiente restricción,

$$e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 = 1 \quad (2.28)$$

Los parámetros $P_i, i = 1, \dots, 7$ se definen como sigue,

$$\begin{aligned} P_1^2 &= \frac{f}{Z_0} e_i^2, i = 1, \dots, 4 \\ P_5 &= f \frac{X_0}{Z_0} \\ P_6 &= f \frac{Y_0}{Z_0} \\ P_7 &= -\frac{1}{f} \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.4 Estimación de parámetros de cámara

Para encontrar los valores de los parámetros de cámara $P_i, i = 1, \dots, 7$ se define una trayectoria pre-planeada, como se ilustra en la Figura 13. Esta trayectoria se configura de tal forma que la antorcha del manipulador aparezca en el espacio de imagen, con el objetivo de tomar una serie de muestras. Dichas muestras son utilizadas para minimizar la función $J(P)$ dada en la siguiente expresión. La minimización se lleva a cabo usando el algoritmo de corrección diferencial por mínimos cuadrados [36].

$$J(P) = \sum_{i=1}^m \{ [x_{ci} - f_x(x_i, y_i, z_i, x_{ci}; P)]^2 + [y_{ci} - f_y(x_i, y_i, z_i, y_{ci}; P)]^2 \} W_i \quad (2.30)$$

donde m es el total de muestras. Las funciones $f_x(\dots)$ y $f_y(\dots)$ son,

$$\begin{aligned} f_x(x_i, y_i, z_i, x_{ci}; P) &= \mathcal{O}_x(x_i, y_i, z_i; P) + \mathcal{P}_x(x_i, y_i, z_i, x_{ci}; P) \\ f_y(x_i, y_i, z_i, y_{ci}; P) &= \mathcal{O}_y(x_i, y_i, z_i; P) + \mathcal{P}_y(x_i, y_i, z_i, y_{ci}; P) \end{aligned} \quad (2.31)$$

a su vez, las funciones $\mathcal{O}_x, \mathcal{P}_x, \mathcal{O}_y$ y \mathcal{P}_y se describen como sigue,

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_x(x_i, y_i, z_i; P) &= b_1(P)x_i + b_2(P)y_i + b_3(P)z_i + b_4(P) \\ \mathcal{P}_x(x_i, y_i, z_i, x_{ci}; P) &= b_9(P)x_i x_{ci} + b_{10}(P)y_i x_{ci} + b_{11}(P)z_i x_{ci} \\ \mathcal{O}_y(x_i, y_i, z_i; P) &= b_5(P)x_i + b_6(P)y_i + b_7(P)z_i + b_8(P) \\ \mathcal{P}_y(x_i, y_i, z_i, y_{ci}; P) &= b_0(P)x_i y_{ci} + b_{10}(P)y_i y_{ci} + b_{11}(P)z_i y_{ci} \end{aligned} \quad (2.32)$$

donde

$$\begin{aligned}
 b_1(P) &= P_1^2 + P_2^2 - P_3^2 - P_4^2 \\
 b_2(P) &= 2(P_2P_3 + P_1P_4) \\
 b_3(P) &= 2(P_2P_4 - P_1P_3) \\
 b_4(P) &= P_5 \\
 b_5(P) &= 2(P_2P_3 - P_1P_4) \\
 b_6(P) &= P_1^2 - P_2^2 + P_3^2 - P_4^2 \\
 b_7(P) &= 2(P_1P_2 - P_3P_4) \\
 b_8(P) &= P_6 \\
 b_9(P) &= 2P_7(P_2P_4 + P_1P_3) \\
 b_{10}(P) &= 2P_7(P_3P_4 - P_1P_2) \\
 b_{11}(P) &= P_7(P_1^2 - P_2^2 - P_3^2 + P_4^2)
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

El procedimiento propuesto en [35] consiste en determinar independientemente los primeros seis parámetros $P' = [P_1, \dots, P_6]^T$ del parámetro P_7 . La magnitud de este parámetro depende sólo de una característica intrínseca de la cámara, en este caso, la inversa de la distancia focal f .

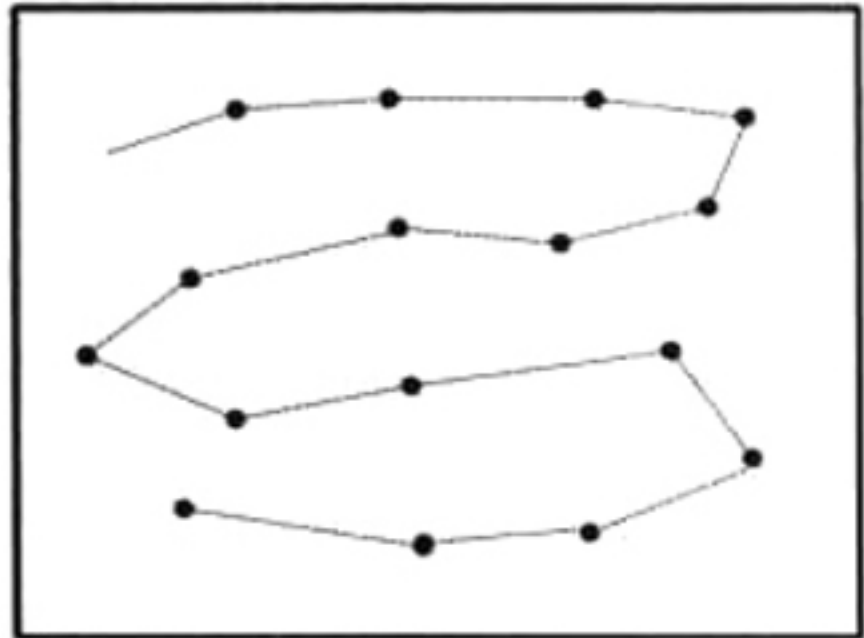
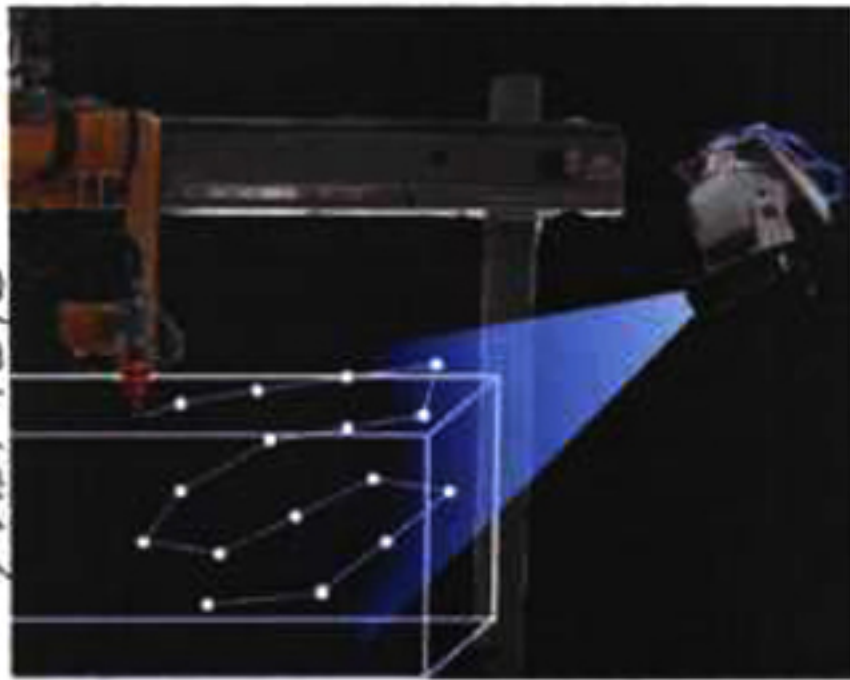


Figura 13. Trayectoria pre-planeada y su proyección en espacio de imagen

2.4.1 Determinación de los parámetros P_1, \dots, P_6

Tal y como se presenta en [35], la evaluación de los primeros seis parámetros de visión se consigue usando el método conocido como corrección diferencial de mínimos cuadrados. Este procedimiento iterativo consiste en determinar un incremento $\Delta P' = [\Delta P_1, \dots, \Delta P_6]$, considerando un valor constante del parámetro P_7 . El incremento $\Delta P'$ es evaluado usando la expresión (2.34), basada en la condición necesaria para la minimización de una aproximación lineal de la función escalar (2.30).

$$\Delta P' = [A^T W A]^{-1} [A^T W \Delta Y] \quad (2.34)$$

donde $[A^T W A]$ representa una matriz no-singular de 6x6, mientras que $[A^T W \Delta Y]$ es un vector de 6x1 definido como sigue:

$$[A^T W A] = [\partial B]^T [M_A] [\partial B] \quad (2.35)$$

y

$$[A^T W \Delta Y] = [\partial B]^T [M_B] [B] \quad (2.36)$$

donde $[\partial B]$ y B se describen, respectivamente, como

$$[\partial B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial b_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial b_1}{\partial P_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial b_{11}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial b_{11}}{\partial P_6} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$B = \begin{bmatrix} -1 \\ -b_1 \\ \vdots \\ -b_{11} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

en estas expresiones, b_1, \dots, b_{11} son presentadas en (2.33) y son evaluadas usando los valores actuales de parámetros de cámara. La forma particular del modelo de cámara en (2.31) permite la posibilidad de compactar toda la información requerida para la estimación de parámetros, esto es, m muestras de coordenadas en espacio de cámara (x_c, y_c) con su correspondiente localización física (x_i, y_i, z_i) , y el peso relativo W_i dado a la $i^{\text{ésima}}$ muestra. Esta información es compactada en las matrices M_A y M_B como sigue:

$$[M_A] = \begin{bmatrix} M_1 & \vdots & 0 & \vdots & M_2 \\ \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots \\ 0 & \vdots & M_1 & \vdots & M_3 \\ \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots \\ M_2^T & \vdots & M_3^T & \vdots & M_4 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$[M_\theta] = \begin{bmatrix} M_x & \vdots & M_1 & \vdots & 0 & \vdots & M_2 \\ \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots \\ M_y & \vdots & 0 & \vdots & M_1 & \vdots & M_3 \\ \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot & \dots \\ M_{xy} & \vdots & M_2^T & \vdots & M_3^T & \vdots & M_4 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

donde las matrices $M_1, M_2, M_3, M_4, M_x, M_y, M_{xy}$ incluyen las observaciones históricas, como se muestran a continuación,

$$M_1 = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 W_i & \sum x_i y_i W_i & \sum x_i z_i W_i & \sum x_i W_i \\ & \sum y_i^2 W_i & \sum y_i z_i W_i & \sum y_i W_i \\ & & \sum z_i^2 W_i & \sum z_i W_i \\ \text{simétrica} & & & \sum W_i \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 x_c W_i & \sum x_i y_i x_c W_i & \sum x_i z_i x_c W_i \\ \sum x_i y_i x_c W_i & \sum y_i^2 x_c W_i & \sum y_i z_i x_c W_i \\ \sum x_i z_i x_c W_i & \sum y_i z_i x_c W_i & \sum z_i^2 x_c W_i \\ \sum x_i x_c W_i & \sum y_i x_c W_i & \sum z_i x_c W_i \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 y_c W_i & \sum x_i y_i y_c W_i & \sum x_i z_i y_c W_i \\ \sum x_i y_i y_c W_i & \sum y_i^2 y_c W_i & \sum y_i z_i y_c W_i \\ \sum x_i z_i y_c W_i & \sum y_i z_i y_c W_i & \sum z_i^2 y_c W_i \\ \sum x_i y_c W_i & \sum y_i y_c W_i & \sum z_i y_c W_i \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} M4_{11} & M4_{12} & M4_{13} \\ & M4_{22} & M4_{23} \\ \text{simétrica} & & M4_{33} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

donde

$$\begin{aligned} M4_{11} &= \sum x_i^2 (x_c^2 + y_c^2) W_i \\ M4_{12} &= \sum x_i y_i (x_c^2 + y_c^2) W_i \\ M4_{13} &= \sum x_i z_i (x_c^2 + y_c^2) W_i \\ M4_{22} &= \sum y_i^2 (x_c^2 + y_c^2) W_i \\ M4_{23} &= \sum y_i z_i (x_c^2 + y_c^2) W_i \\ M4_{33} &= \sum z_i^2 (x_c^2 + y_c^2) W_i \end{aligned} \quad (2.45)$$

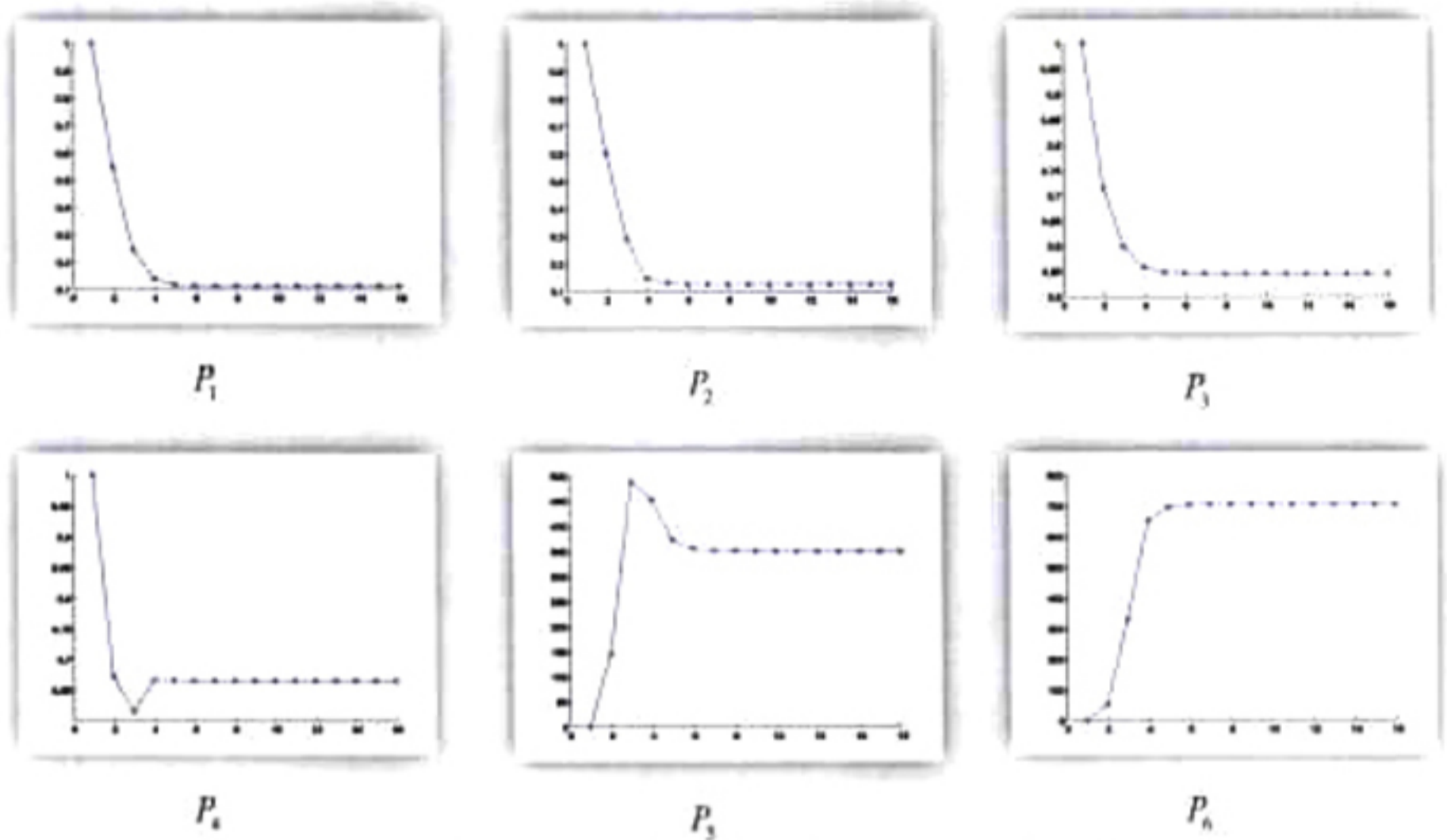


Figura 14. Convergencia típica de los 6 parámetros de visión

$$M_x = \begin{bmatrix} \sum x_i x_{ci} W_i \\ \sum y_i x_{ci} W_i \\ \sum z_i x_{ci} W_i \\ \sum x_{ci} W_i \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} \sum x_i y_{ci} W_i \\ \sum y_i y_{ci} W_i \\ \sum z_i y_{ci} W_i \\ \sum y_{ci} W_i \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$M_w = \begin{bmatrix} \sum x_i (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) W_i \\ \sum y_i (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) W_i \\ \sum z_i (x_{ci}^2 + y_{ci}^2) W_i \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

donde la sumatoria de las expresiones anteriores va de 1 a m observaciones. El procedimiento iterativo continúa evaluando un conjunto de parámetros actualizados como sigue:

$$P^{n(\text{nuevo})} = P^{n(\text{anterior})} + \Delta P^n \quad (2.49)$$

hasta que se alcanza la convergencia.

Una convergencia típica de los 6 parámetros se muestra en la Figura 14. El eje horizontal corresponde al número de iteración y el eje vertical es correspondiente al valor del parámetro respectivo.

2.4.2 Determinación del parámetro P_7

La magnitud del parámetro P_7 corresponde, de acuerdo a la ecuación (2.29), al inverso de la distancia focal f , como se ilustra en la Figura 12. Este parámetro intrínseco de cámara puede ser evaluado de forma iterativa, como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 15. Esta metodología, ajusta el parámetro P_7 de tal forma que minimiza la función $J(P)$ descrita en (2.30).

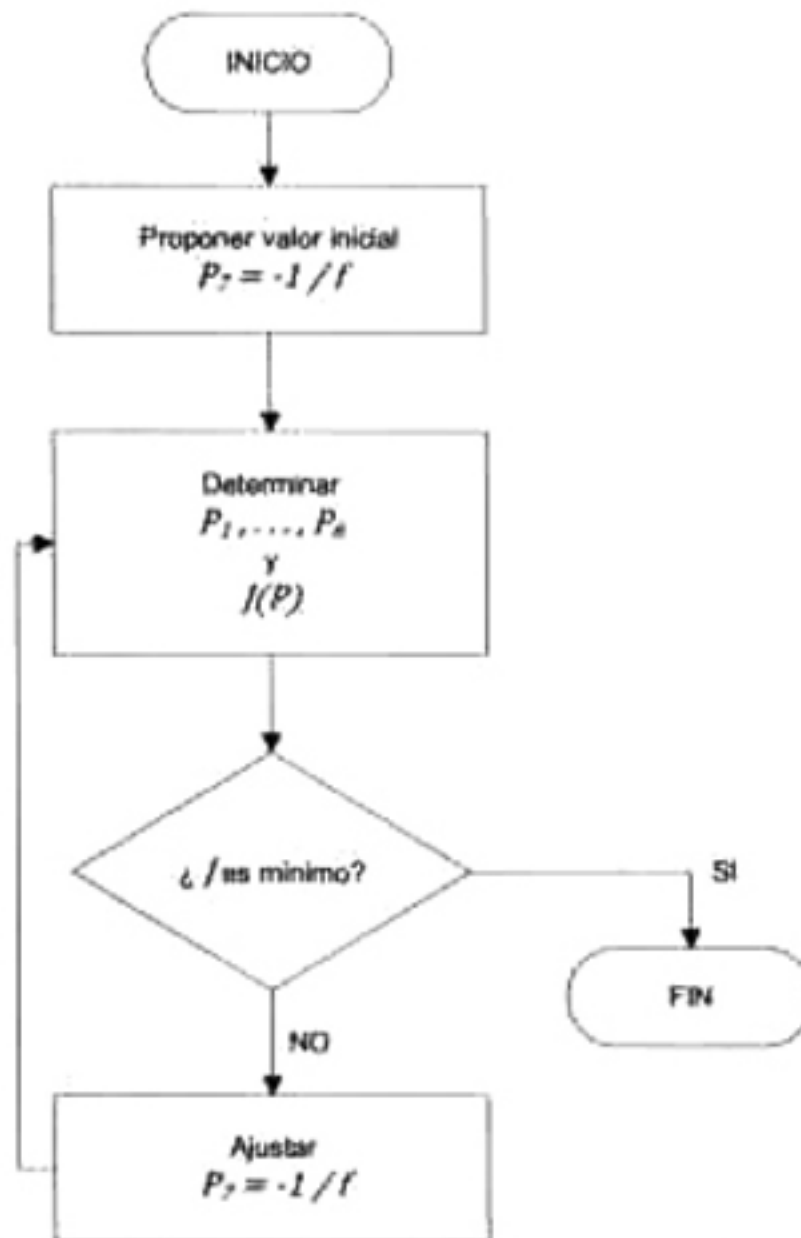


Figura 15. Proceso de determinación de los parámetros de cámara

La forma de ajustar el parámetro P_7 no es única. En este caso en particular, se implementó el método de bisección aplicado a la pendiente de $J(P)$. Una curva típica de la distancia focal f vs $J(P)$ se muestra en la Figura 16. La pendiente de esa curva típica se muestra en la Figura 17. El valor mínimo de $J(P)$ se logra cuando $\frac{\partial J(P)}{\partial f} = 0$.

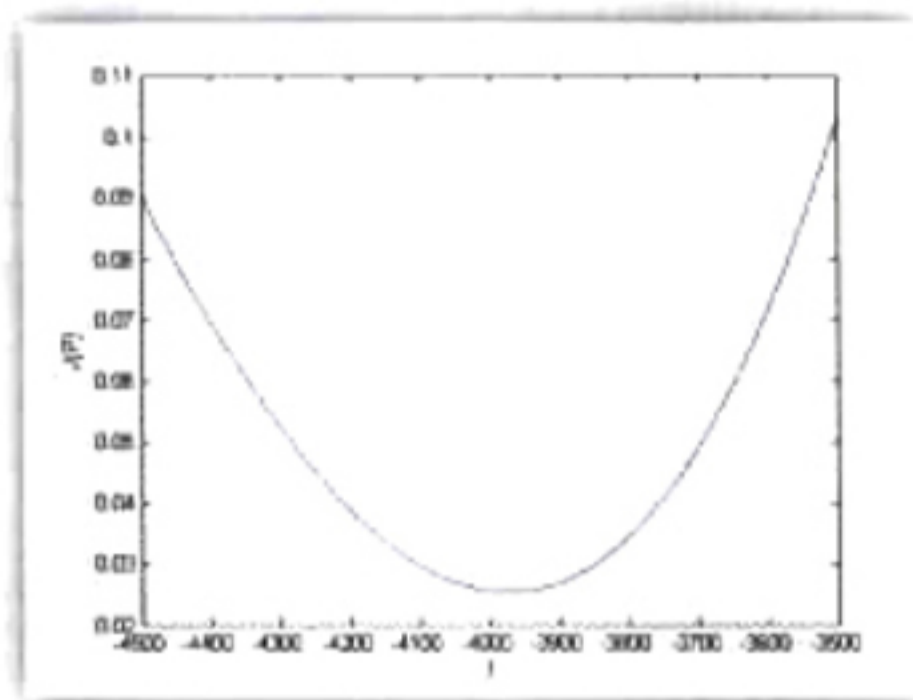


Figura 16. Curva típica de f vs $J(P)$

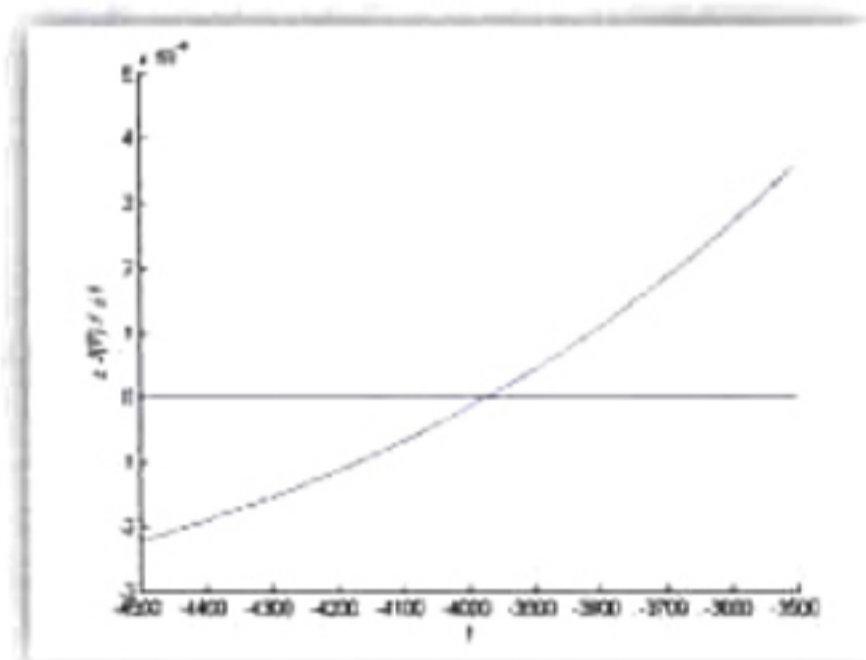


Figura 17. f vs pendiente de $J(P)$

2.5 Localización tridimensional de marcas visuales

Un aspecto importante, asociado al desarrollo de tareas de posicionamiento tridimensional, consiste en determinar la posición física de referencias visuales localizadas en la pieza de trabajo. En general, la geometría de la superficie no es conocida, por ello es que se usan las referencias visuales sobre la pieza de trabajo para determinarla. Se utilizan puntos láser para producir dichas referencias visuales, ya que tienen la ventaja de no producir una marca permanente sobre la superficie y así, se usan métodos sencillos de análisis de imágenes para localizarlas en espacio de cámara.

La localización física de una referencia visual puede ser estimada cuando aparece al menos en 2 cámaras, como se ilustra en la Figura 18. Esto se realiza minimizando la función escalar ϕ en la siguiente ecuación,

$$\phi = \sum_{i=1}^{n_j} [x_c^{(i)} - f_x(x, y, z, x_c^{(i)}; P^{(i)})]^2 + [y_c^{(i)} - f_y(x, y, z, y_c^{(i)}; P^{(i)})]^2 \quad (2.50)$$

donde n_j ($n_j \geq 2$) es el número de cámaras que ven el punto cuyas coordenadas tridimensionales son (x, y, z) . Las expresiones para f_x y f_y están dadas en (2.31). Para la $i^{\text{ésima}}$ cámara, el correspondiente lugar en espacio de imagen del punto es $(x_c^{(i)}, y_c^{(i)})$ y los parámetros asociados $P^{(i)}$.

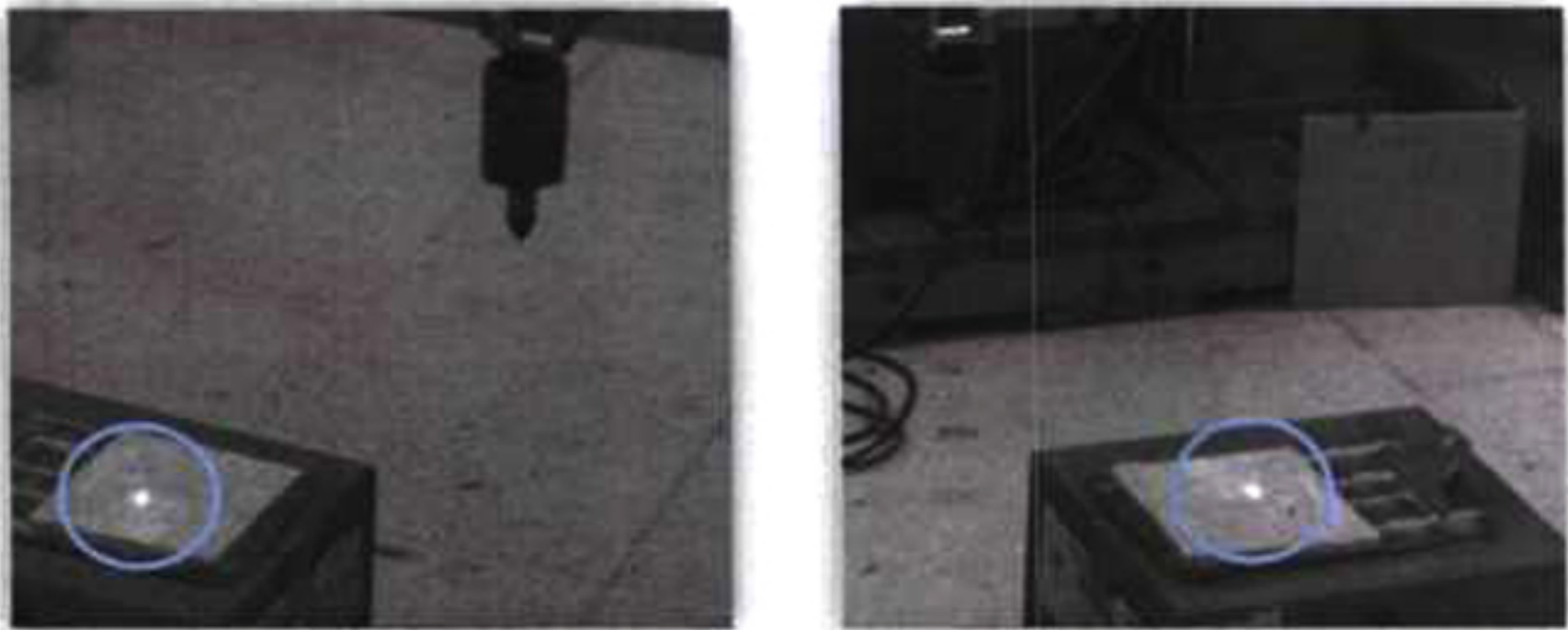


Figura 18. Un punto láser visto en 2 cámaras

La condición necesaria para la minimización de ϕ conduce a la siguiente solución para (x, y, z)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^{-1}B \quad (2.51)$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Cada uno de los términos de estas dos matrices están dados por:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_1^{(i)} + b_9^{(i)} x_c^{(i)})^2 + (b_5^{(i)} + b_6^{(i)} y_c^{(i)})^2 \\
A_{12} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_1^{(i)} + b_9^{(i)} x_c^{(i)})(b_2^{(i)} + b_{10}^{(i)} x_c^{(i)}) + (b_5^{(i)} + b_6^{(i)} y_c^{(i)})(b_8^{(i)} + b_{10}^{(i)} y_c^{(i)}) \\
A_{13} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_1^{(i)} + b_9^{(i)} x_c^{(i)})(b_3^{(i)} + b_{11}^{(i)} x_c^{(i)}) + (b_5^{(i)} + b_6^{(i)} y_c^{(i)})(b_7^{(i)} + b_{11}^{(i)} y_c^{(i)}) \\
A_{22} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_2^{(i)} + b_{10}^{(i)} x_c^{(i)})^2 + (b_8^{(i)} + b_{10}^{(i)} y_c^{(i)})^2 \\
A_{23} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_2^{(i)} + b_{10}^{(i)} x_c^{(i)})(b_3^{(i)} + b_{11}^{(i)} x_c^{(i)}) + (b_8^{(i)} + b_{10}^{(i)} y_c^{(i)})(b_7^{(i)} + b_{11}^{(i)} y_c^{(i)}) \\
A_{33} &= \sum_{i=1}^{n_c} (b_3^{(i)} + b_{11}^{(i)} x_c^{(i)})^2 + (b_7^{(i)} + b_{11}^{(i)} y_c^{(i)})^2
\end{aligned} \tag{2.53}$$

y

$$\begin{aligned}
B_1 &= \sum_{i=1}^{n_c} (x_c^{(i)} - b_4^{(i)})(b_1^{(i)} + b_9^{(i)} x_c^{(i)}) + (y_c^{(i)} - b_8^{(i)})(b_5^{(i)} + b_6^{(i)} y_c^{(i)}) \\
B_2 &= \sum_{i=1}^{n_c} (x_c^{(i)} - b_4^{(i)})(b_2^{(i)} + b_{10}^{(i)} x_c^{(i)}) + (y_c^{(i)} - b_8^{(i)})(b_8^{(i)} + b_{10}^{(i)} y_c^{(i)}) \\
B_3 &= \sum_{i=1}^{n_c} (x_c^{(i)} - b_4^{(i)})(b_3^{(i)} + b_{11}^{(i)} x_c^{(i)}) + (y_c^{(i)} - b_8^{(i)})(b_7^{(i)} + b_{11}^{(i)} y_c^{(i)})
\end{aligned} \tag{2.54}$$

donde los parámetros correspondientes a la $i^{\text{ésima}}$ cámara se incluyen en las expresiones $b_1^{(i)}, \dots, b_{11}^{(i)}$, tal y como se definen en (2.33). Este proceso de estimación lineal se repite para cada uno de los puntos proyectados sobre la superficie, con una densidad tal que permita conocer la geometría de la misma. Al proceso de proyectar y conocer la posición de las marcas visuales colocadas sobre la superficie de trabajo, se le llama caracterización de superficies.

2.6 Determinación de los valores de junta

En CSM, una tarea de posicionamiento se planea y se persigue en espacio de imagen. La forma de conseguirlo, es utilizando los mencionados puntos láser para generar marcas artificiales temporales. El diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento se muestra en la Figura 19.

Una vez que es definido el objetivo de la maniobra en espacio de cámara, es necesario conocer la configuración interna del manipulador para lograr que la punta de la herramienta satisfaga la posición deseada. La determinación de los valores de junta se logra mediante un proceso de estimación no lineal. El procedimiento consiste en minimizar la función escalar $\gamma(\Theta)$ mediante corrección diferencial de mínimos cuadrados [36].

$$\gamma(\Theta) = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i^{(i)}} [x_i^{(j)} - f_x(r_x^{(j)}(\Theta), r_y^{(j)}(\Theta), r_z^{(j)}(\Theta), x_i^{(j)}; P^{(i)})]^2 + [y_i^{(j)} - f_y(r_x^{(j)}(\Theta), r_y^{(j)}(\Theta), r_z^{(j)}(\Theta), y_i^{(j)}; P^{(i)})]^2 \quad (2.55)$$

donde f_x y f_y se obtienen de (2.31), considerando los parámetros obtenidos para cada cámara; $(x_i^{(j)}, y_i^{(j)})$ representa la localización en el espacio de cámara del j ésimo punto objetivo, mientras $(r_x^{(j)}(\Theta), r_y^{(j)}(\Theta), r_z^{(j)}(\Theta))$ representa la correspondiente localización física.

En la Figura 20 se muestra una convergencia típica del algoritmo de estimación de valores de junta. Para que se obtenga una configuración como arriba, cuando la configuración actual es la misma, es recomendable utilizar como valor inicial de las juntas en el algoritmo iterativo, los valores actuales.

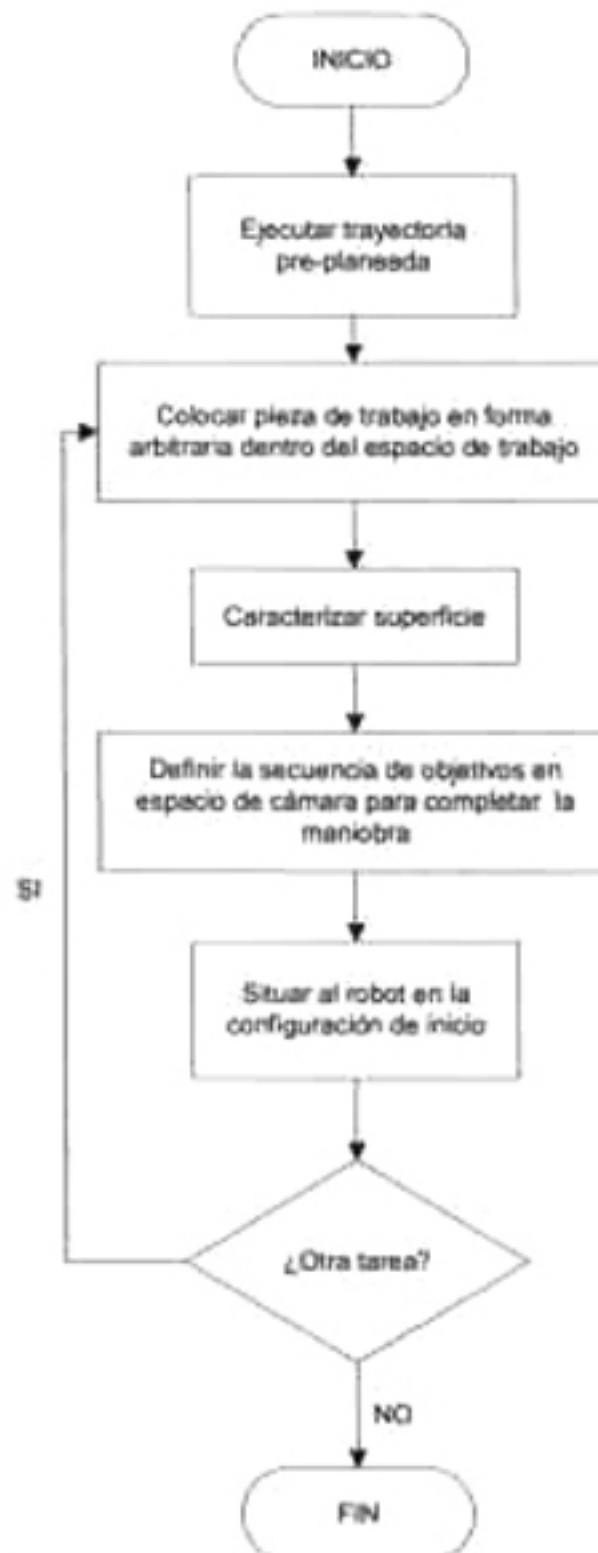


Figura 19. Diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento

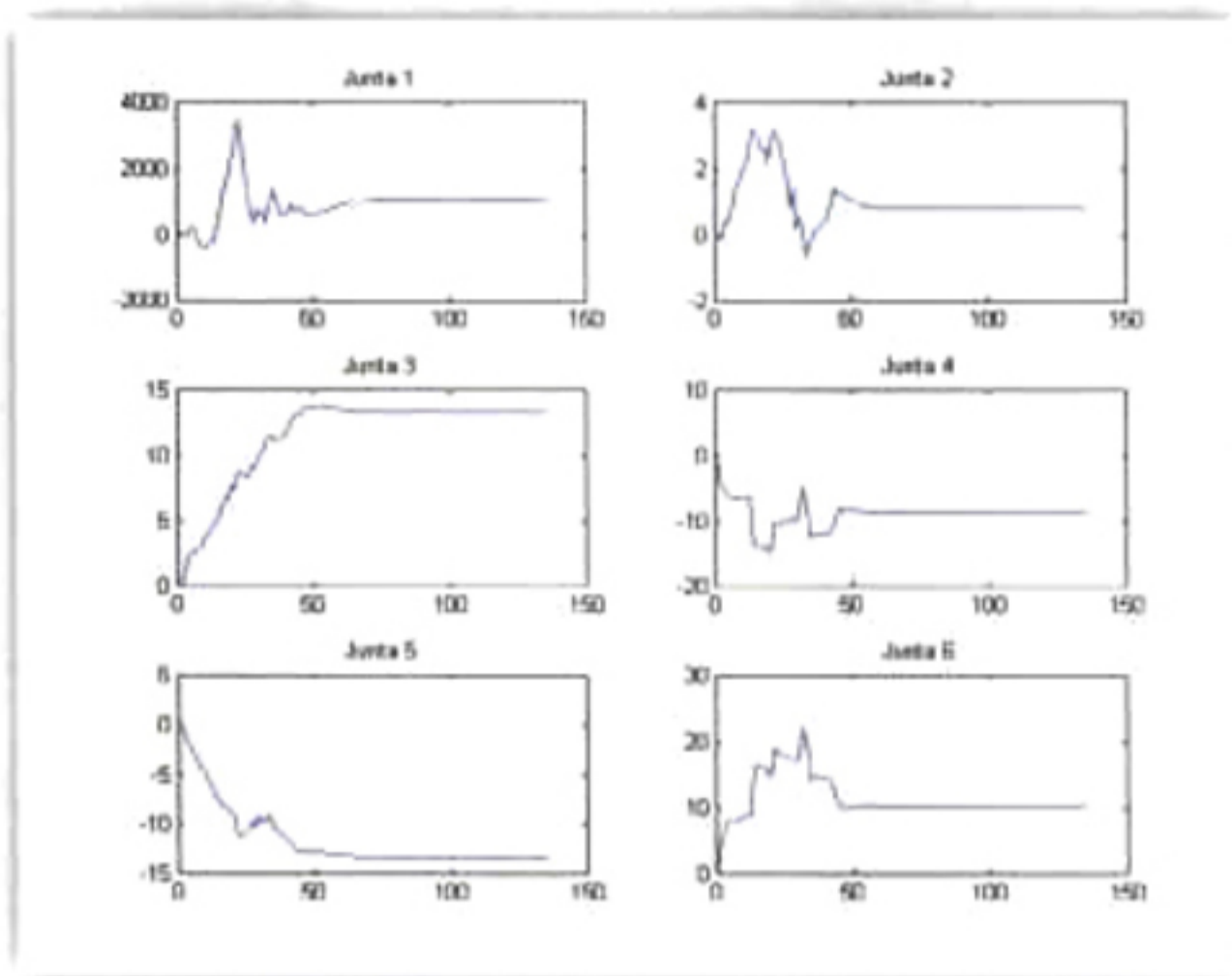


Figura 20. Convergencia típica de los valores de junta

2.7 Posición tridimensional de las referencias visuales en la antorcha

Durante el proceso de estimación de los parámetros de visión es necesario obtener muestras de la posición de un punto en el espacio tridimensional del robot, así como su correspondencia dentro del espacio bidimensional de la cámara.

El uso de marcas luminosas colocadas sobre el extremo del manipulador facilita la obtención de las muestras requeridas para la determinación del modelo de cámara de perspectiva. Para realizar este proceso, se necesita la determinación de las coordenadas en el espacio de cámara donde aparecen las marcas junto con la configuración actual del robot, y el modelo cinemático.

En la Figura 7 se muestra un aditamento especial colocado alrededor del tubo de la antorcha de corte con que cuenta el robot. Este dispositivo provee al extremo del manipulador con un conjunto de señales luminosas de las que es posible controlar el encendido y apagado desde la computadora usada en la maniobra.

La herramienta cuenta con 18 leds de alta luminosidad colocados alrededor de un prisma hexagonal, de tal forma que en cada cara aparecen solo 3 leds.

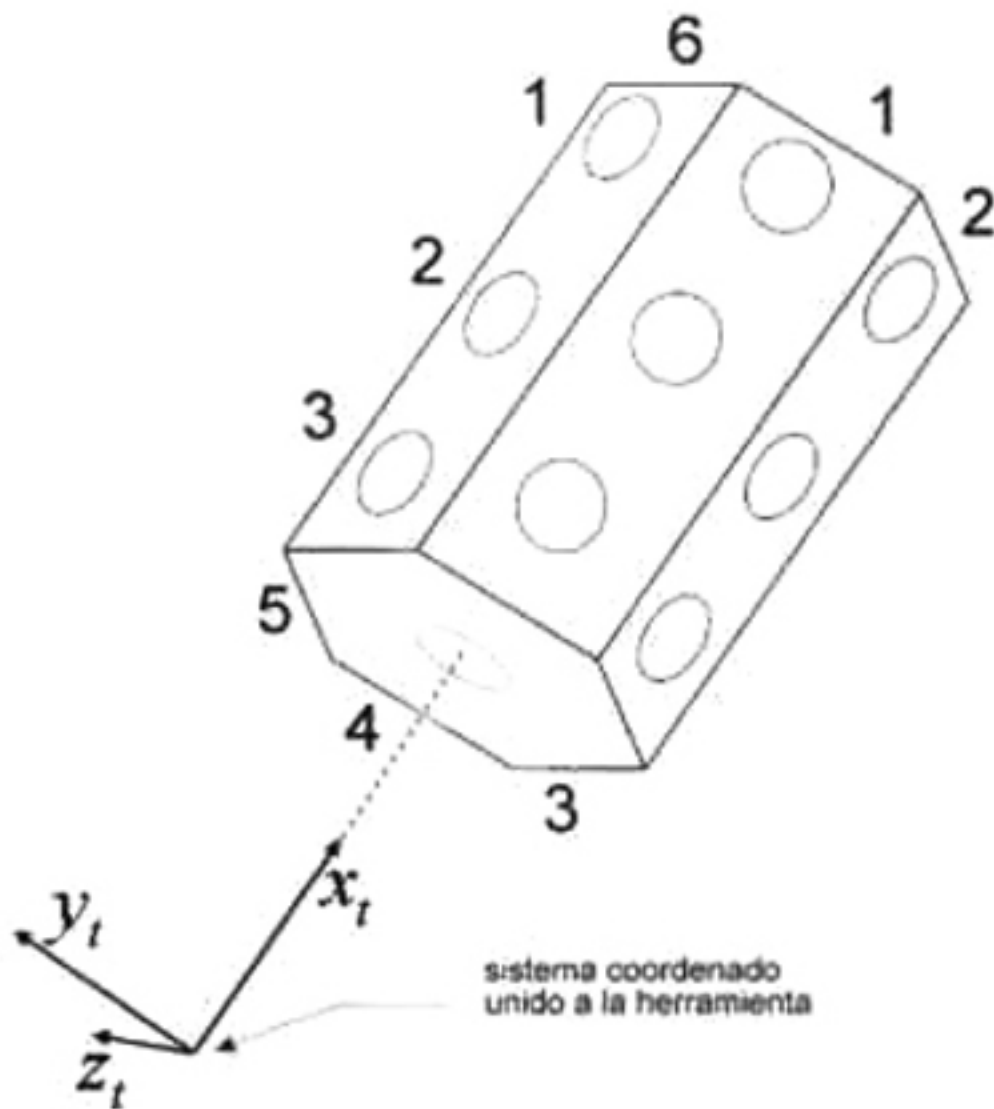


Figura 21. Distribución de las marcas visuales colocadas sobre la herramienta del manipulador

El modelo cinemático dado en la ecuación (2.20) proporciona la posición y orientación de algún punto referido al sistema coordenado asociado a la herramienta. Dicha posición depende de la configuración interna del manipulador. Al utilizar el dispositivo de la Figura 7 se presenta la necesidad de conocer la posición, en el espacio de trabajo del manipulador, de las marcas luminosas. La ubicación de los puntos sobre la herramienta está descrita por un vector de posición homogéneo tridimensional \vec{F} en (2.56), referido al sistema x, y, z , cuyo origen coincide con el extremo de la antorcha de la Figura 7.

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

donde F_x , F_y y F_z representan las coordenadas visuales de cada una de las marcas visuales. Estos parámetros son conocidos a partir del diseño de la herramienta, teniendo en cuenta la dirección de los ejes coordenados de los ejes de referencia.

En la Figura 21 se muestra un esquema de la herramienta junto con su sistema coordinado. Cada led es referido por una coordenada (renglón-columna), de acuerdo con una estructura matricial descrita por los números que aparecen rodeando la estructura indicados en la figura. En la Tabla 3 se presentan los valores utilizados por cada led dentro del vector \vec{F} obtenidos de las dimensiones físicas de la herramienta.

Tabla 3. Ubicación de cada centroide de LED con respecto al sistema coordinado unido a la herramienta

$LED(r, c)$	$F_x(\text{mm})$	$F_y(\text{mm})$	$F_z(\text{mm})$
(1,1)	152.0	-17.6	30.35
(1,2)	152.0	-35.3	1.0
(1,3)	152.0	-17.44	-30.017
(1,4)	152.0	17.55	-29.6
(1,5)	152.0	34.55	0.2
(1,6)	152.0	17.4	30.40
(2,1)	113.0	-17.3	30.2
(2,2)	112.15	-34.4	0.27
(2,3)	113.0	-17.2	-30.0
(2,4)	113.15	17.5	-29.8
(2,5)	113.0	34.8	0.4
(2,6)	113.0	17.5	30.40
(3,1)	73.75	-17.7	30.0
(3,2)	73.7	-34.4	0.327
(3,3)	74.0	-17.1	-30.225
(3,4)	74.26	17.7	-30.0
(3,5)	74.0	34.8	0.5
(3,6)	73.7	17.6	30.40

Cabe mencionar que en la trayectoria pre-planeada usada para estimar los primeros valores de los parámetros de visión se usa solo una marca luminosa conocida como *led de referencia*. Usando información de este led solamente se obtiene una primera estimación de los parámetros de visión. Después, al encenderlos todos, el modelo de cámara se utiliza para determinar la correspondencia de cada led con su respectiva ubicación en espacio de cámara, como se detalla a continuación.

El led de referencia es designado por los valores de $LED(1,1)$ de la Tabla 3, y su posición con respecto a la base del robot está descrita por:

$$\vec{F}(d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)_{1,1} = T_X(d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \begin{bmatrix} 152 \\ -17.6 \\ 30.35 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

donde T_X es el modelo cinemático del robot, descrito en (2.20).

Con esta transformación se obtienen las muestras de la posición, en el espacio tridimensional, del led encendido para realizar el procedimiento de estimación de parámetros de visión descrito en la sección 2.4.

Una vez que se tiene un conjunto estimado de parámetros de visión, es posible encender todas las marcas luminosas. El uso de todas las marcas luminosas se hace durante la ejecución de una tarea de posicionamiento, ya que permite obtener un mayor número de muestras conforme se acerca al objetivo, lo que permite enriquecer de información al modelo de la cámara para aumentar la validez local de los parámetros en la posición final.

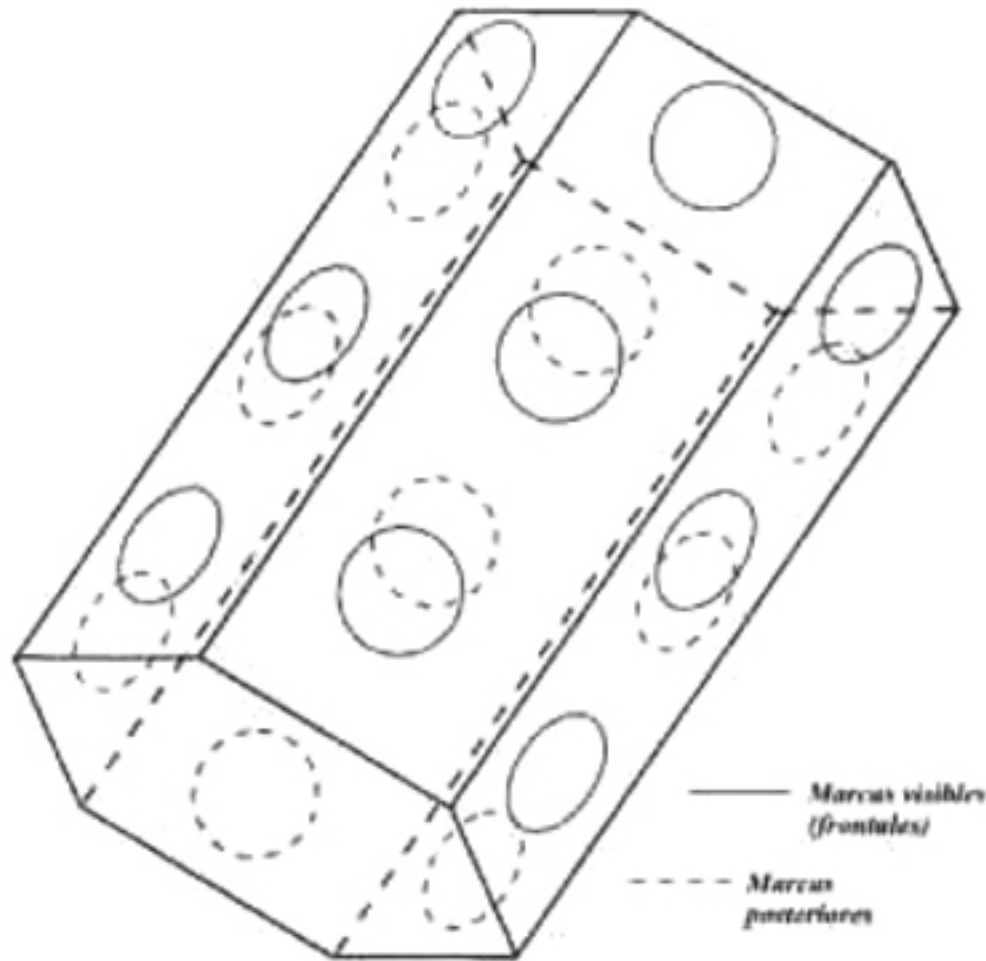


Figura 22. Superposición de las marcas luminosas en espacio de imagen

Con la ayuda del modelo descrito por los parámetros de cámara de perspectiva y la transformación \hat{F} asociada a cada led, se realiza un procedimiento de búsqueda en la imagen que permite asociar la coordenada tridimensional de una marca con su correspondiente posición en espacio de imagen. El procedimiento se describe en los siguientes pasos:

1. Al encender todos los leds, en la imagen sólo aparecen como máximo 9 marcas luminosas visibles, debido a la geometría del aditamento que los contiene. Usando el vector \hat{F} se encuentra la posición tridimensional de los 18 leds de la herramienta.
2. Para encontrar la posición en espacio de imagen de dichas posiciones tridimensionales se utilizan las ecuaciones (2.23) y (2.24).
3. Dicha posición es comparada con cada una de las coordenadas encontradas en la imagen y es seleccionada aquella que tenga el menor error promedio, además de un criterio que permita discernir si la mancha que se está proyectando en la imagen pertenece a un led visible o un led oculto.

Este último concepto es muy importante ya que, como se puede apreciar en la Figura 22, al tomar solamente en cuenta la distancia promedio, existe la probabilidad de considerar marcas que en realidad no son visibles en la imagen bidimensional. Como se mencionó anteriormente, del total de los 18 leds con que cuenta la herramienta, solo son visibles un máximo de 9 marcas luminosas en la imagen, ya que el resto se encuentra oculto en la cara posterior de la herramienta.

La necesidad de poder determinar, en todo momento, cuáles son los leds visibles dentro del espacio de cada cámara, surge en el momento en que se quiere determinar la concordancia con las posiciones en espacio tridimensional. El no hacerlo correctamente provocará la introducción de datos erróneos al modelo de la cámara y lo más probable es que no se complete la tarea de posicionamiento con resultados satisfactorios o, en el peor de los casos, que se tenga que detener por completo el sistema y volver a comenzar.

En trabajos anteriores se usaba un método en que se asignaba un vector unitario normal al plano de cada columna del aditamento hexagonal. Se realizaba el producto escalar de dicho vector con un vector que salía del plano de la imagen. Si el producto escalar resultaba negativo, se determinaba que esa columna era vista en el espacio de imagen [37]. En este trabajo se utilizó un método diferente que funcionó adecuadamente. Dicho método se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 23.

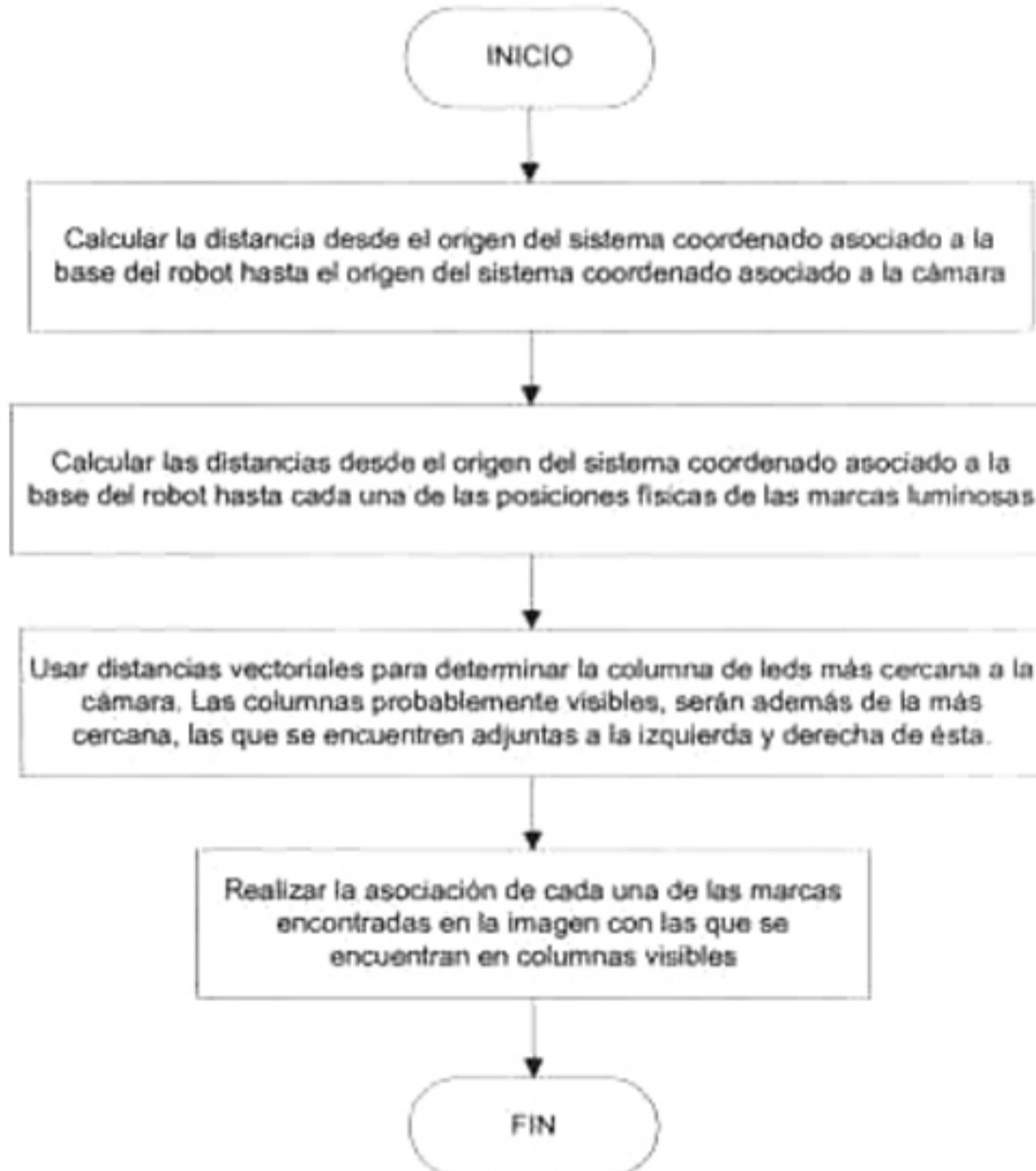


Figura 23. Diagrama de flujo para empatar las marcas visuales en la antorcha

Para encontrar la distancia desde el origen del sistema coordenado asociado a la base del robot hasta el de la cámara, se considera la ecuación (2.21). Esta relación describe la posición y orientación de un punto (x_i, y_i, z_i) referido a la base del robot xyz con respecto al sistema coordenado asociado a la cámara XYZ .

Es posible usar la inversa matricial de (2.22) para encontrar una relación con respecto a la base del robot. Esta relación es dada en la siguiente expresión,

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = [M_E(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0)]^{-1} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

A partir de la ecuación (2.58) se puede encontrar el vector dirigido al origen del sistema coordenado unido a la cámara desde el origen del sistema coordenado asociado a la base del robot. Dicho vector \vec{C} es dado como sigue,

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 1 \end{bmatrix} = [M_E(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0)]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Una vez que se tienen los vectores \vec{F} y \vec{C} se encuentra un vector \vec{D} definido en (2.60), el cual es un vector dirigido desde la posición del led hasta el origen del sistema coordenado atado a la cámara, como se puede observar en la Figura 24.

$$\vec{D} = \vec{C} - \vec{F} \quad (2.60)$$

La distancia d desde un led hasta la cámara se encuentra usando la magnitud del vector, es decir, como se define enseguida,

$$d = \sqrt{(C_x - F_x)^2 + (C_y - F_y)^2 + (C_z - F_z)^2} \quad (2.61)$$

Para determinar cuál es la columna de leds más cercana a la cámara, se siguen los siguientes pasos:

1. Se obtienen todas las distancias de los leds a la cámara. Estas distancias se colocan en un arreglo matricial correspondiente a la numeración de leds ilustrada en la Figura 21.
2. Se hace un barrido por filas en la matriz para encontrar la distancia mínima en cada una. El valor que se almacena en este paso, es el número de la columna que tiene la distancia mínima.
3. Si al menos 2 de los números almacenados son iguales, se considera que esta cifra es el número de la columna más cercana.

Cabe mencionar que en los experimentos realizados no se presentó algún caso en el que no se pudiera determinar la columna más cercana, y por consecuencia, no poder determinar la visibilidad de las columnas. Al proceso de asociar las marcas vistas en la imagen con las marcas visuales en su espacio tridimensional, se le conoce como *empatar las marcas visuales en la antorcha*.

El encendido de todas las marcas luminosas y el correspondiente *empate de marcas visuales en la antorcha*, se utiliza para completar una tarea de posicionamiento, ya que la información que se obtiene de la antorcha es densa y sirve para refinar los parámetros de cámara de perspectiva conforme se acerca al punto objetivo.

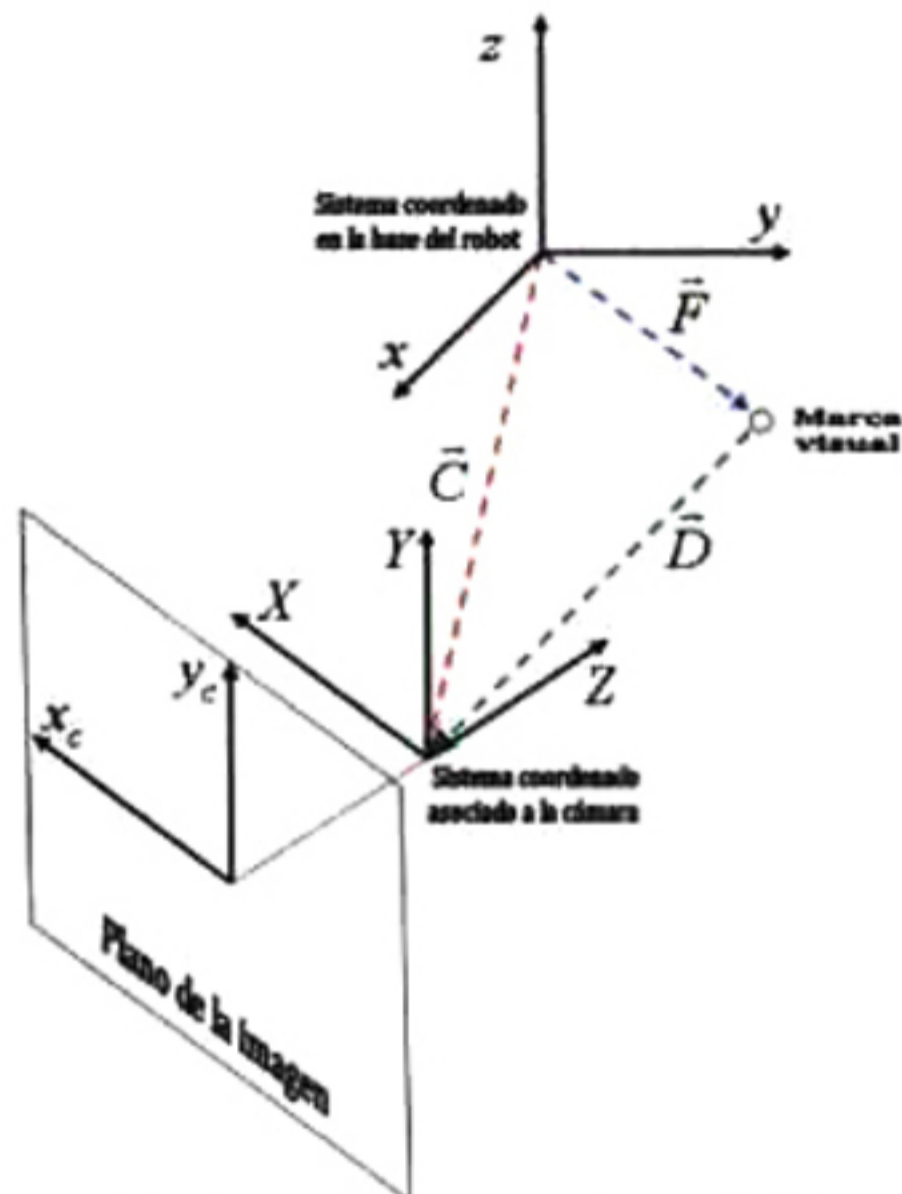


Figura 24. Sistemas coordinados implicados en la determinación de las marcas visibles

Las diferentes estrategias definidas en el presente capítulo serán probadas en maniobras de posicionamiento y se documentan en el capítulo dedicado a describir los resultados experimentales.

CAPÍTULO TRES

3. RECUPERACIÓN DE PARÁMETROS DE CÁMARA

La ejecución de una serie de tareas de posicionamiento con cierto orden en particular, es una característica que comparten diversos procesos de manufactura. En una aplicación de control basada en visión, donde se trabaja con un manipulador industrial que cuenta con un espacio de trabajo de grandes proporciones, es importante abarcarlo con el campo visual de las cámaras de video. Una solución económica y práctica es usar cámaras montadas en plataformas rotatorias o unidades pan/tilt. Un esquema que ilustra esta idea se muestra en la Figura 25.

El uso de plataformas rotatorias permite abarcar una amplia región física con el campo de visión de las cámaras, mientras se conserva una resolución aproximadamente constante del plano de imagen por unidad de espacio físico observado. El problema radica en obtener un nuevo conjunto de parámetros de cámara sin la necesidad de pasar por un proceso de calibración, ya que dicho proceso consume tiempo tanto para hacer los movimientos necesarios para recolectar datos con el manipulador, como para realizar los cálculos necesarios para el análisis de dichos datos.

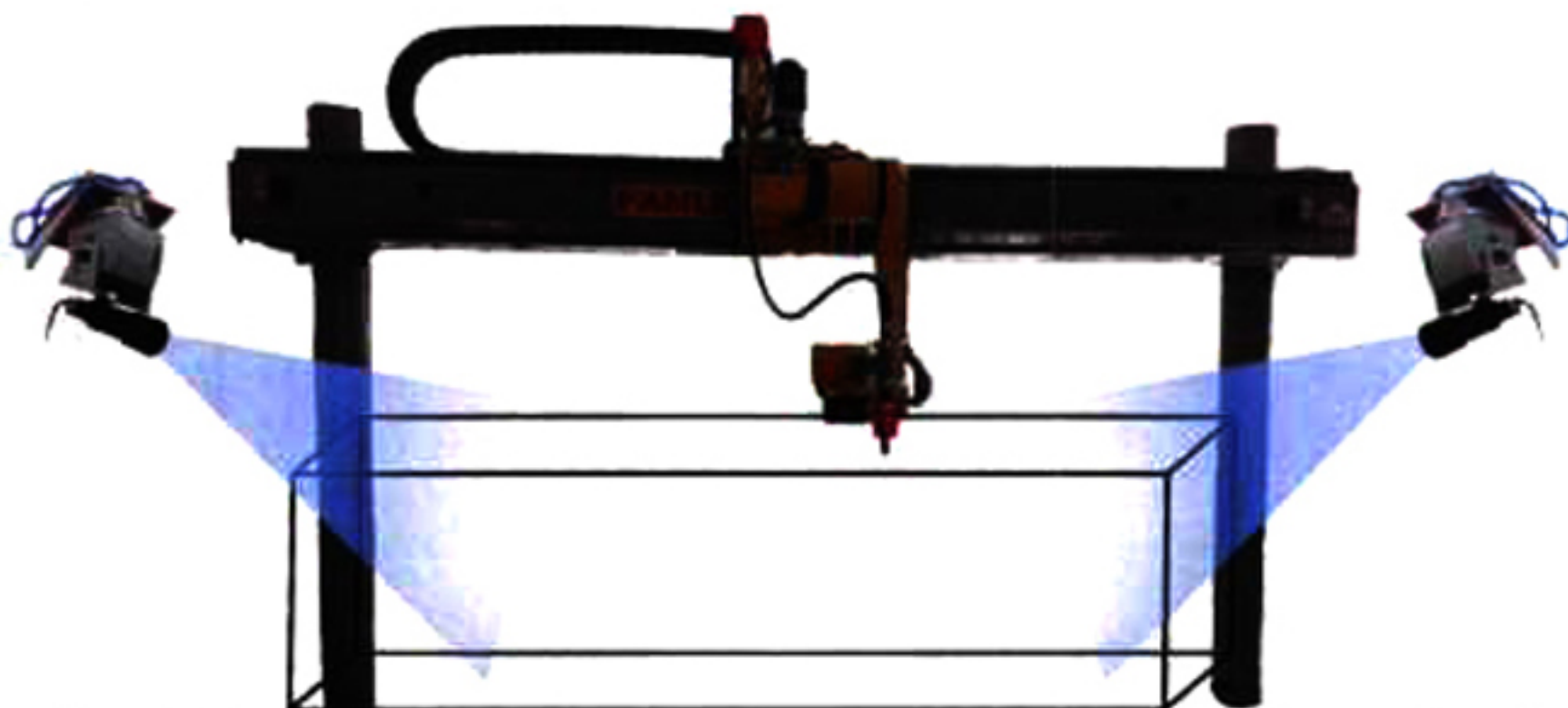


Figura 25. Ampliación del campo visual usando cámaras montadas sobre plataformas giratorias

La determinación de un nuevo conjunto de parámetros de visión correspondiente a la orientación actual de las cámaras puede lograrse por medio de teoría de estimación. La actualización se logra tomando una muestra de una marca artificial colocada en una herramienta unida a la antorcha de corte del manipulador. La posición tridimensional de la marca se calcula usando el modelo cinemático directo del manipulador mientras que la posición en espacio de imagen se obtiene de la imagen obtenida del sensor.

La posición tridimensional de la marca es usada para calcular las coordenadas en el espacio de imagen, correspondientes con la proyección en la cámara de modelo de perspectiva. Usando el conjunto de parámetros válidos antes del movimiento y la información mencionada, se formula una

función de error que involucra los ángulos de rotación. Dicha función toma en cuenta la posición real de la marca y la posición de la proyección, en función de los ángulos de rotación de la cámara. La función se minimiza, como se menciona más adelante, usando teoría de estimación no lineal.

La estimación de los ángulos de rotación de la cámara evita la necesidad de contar con sensores de posición en la plataforma donde está montada. Se listan a continuación, diferentes argumentos a favor de contar con una plataforma sin sensores de posición:

- La ausencia de este tipo de sensores disminuye considerablemente el costo de la plataforma.
- Entre menos sensores existen en un sistema, menor es la probabilidad de falla.
- No es necesario calibrar la unidad si ésta no tiene sensores de posición.

Una vez estimados los ángulos de rotación, se encuentran todos los parámetros válidos para la nueva orientación, usando la metodología que se presenta en este capítulo.

Al igual que el presente proyecto, el trabajo reportado en [33] y [35] se refiere al incremento del campo visual de un manipulador usando cámaras montadas en plataformas giratorias. Sin embargo, se mencionan algunas diferencias muy importantes del presente proyecto con relación a trabajos previos:

Tabla 4. Diferencias del proyecto presente con respecto a trabajos anteriores

Trabajos anteriores	Proyecto presente
Se utiliza el modelo de cámara ortográfico.	Se usa el modelo de cámara de perspectiva.
Se usan sensores de posición para medir los ángulos de rotación.	Los ángulos de rotación se calculan a partir de una muestra usando teoría de estimación.
Cuatro de los seis parámetros de cámara correspondientes a la nueva orientación, se actualizan usando la información de los ángulos de rotación.	Todos los parámetros de cámara se actualizan usando los valores estimados de los ángulos de rotación.
Se necesita una muestra en la nueva orientación para aproximar los dos parámetros restantes.	Los parámetros se refinan usando una muestra con la cámara en la nueva orientación, con todas las marcas visuales encendidas.

El presente capítulo incluye la descripción de una metodología original para encontrar los parámetros de una cámara montada en una plataforma giratoria, cuando se encuentra en una nueva orientación y no se tiene información de los ángulos de rotación.

3.1 Modelo cinemático asociado a la unidad pan/tilt

Al igual que en la sección 2.2, aquí se utiliza el concepto de matrices de transformación homogéneas. Se utilizan dichas matrices para encontrar una relación entre los sistemas coordenados asociados a la cinemática de la plataforma giratoria ilustrada en la Figura 4.

El objetivo de obtener dicho modelo cinemático es contar con una descripción que involucre al sistema coordinado asociado a la base del robot y el sistema coordinado unido a la cámara, tanto antes de realizar el movimiento giratorio como el asociado a la nueva orientación.

En la Figura 26 se muestran los sistemas asociados al modelo de la plataforma giratoria usada en el presente trabajo. El sistema XYZ es el correspondiente a la posición de la cámara antes del movimiento de la unidad pan/tilt mientras que el sistema $X^*Y^*Z^*$ es el asociado a la cámara en la nueva posición, después de girar. El sistema $X_{PT}Y_{PT}Z_{PT}$ está fijo, unido a la base de la plataforma y su origen se ubica en el lugar donde se cruzan los ejes de rotación. La relación entre los sistemas $X^*Y^*Z^*$ y XYZ viene dada por (3.1). Los parámetros ε_1 , ε_2 y ε_3 son cantidades constantes que dependen de la geometría de la plataforma giratoria.

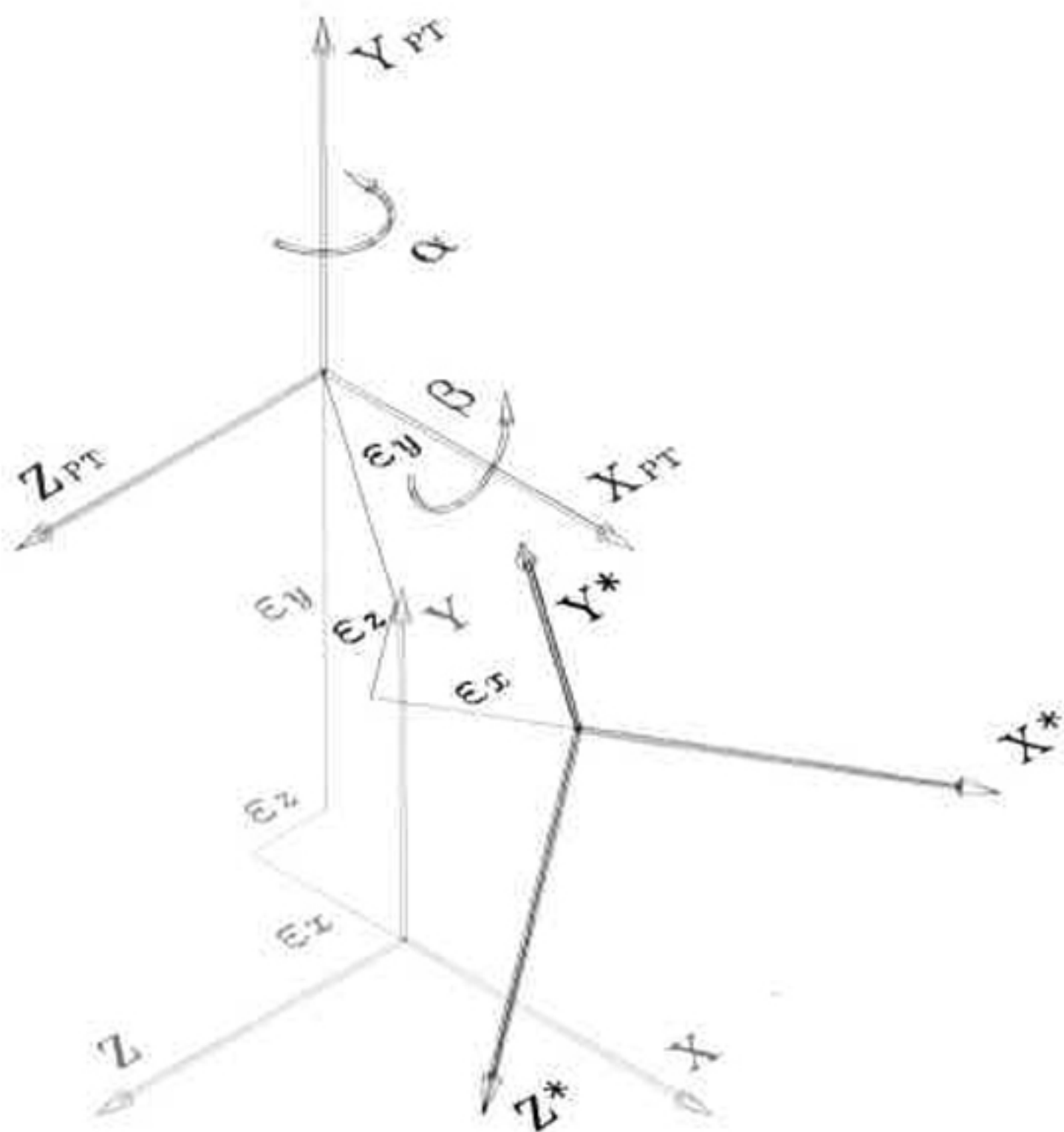


Figura 26. Sistemas coordinados asociados a la unidad pan/tilt PTS-302

$$\begin{bmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \\ Z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = \rho(\alpha, \beta) \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde:

$$\rho(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} C(\alpha) & S(\alpha)S(\beta) & -S(\alpha)C(\beta) & \\ 0 & C(\beta) & S(\beta) & \\ S(\alpha) & -C(\alpha)S(\beta) & C(\alpha)C(\beta) & \\ 0 & 0 & 0 & \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} -C(\alpha)\varepsilon_x + S(\alpha)S(\beta)\varepsilon_y + S(\alpha)C(\beta)\varepsilon_z + \varepsilon_x \\ C(\beta)\varepsilon_y - S(\beta)\varepsilon_z - \varepsilon_y \\ -S(\alpha)\varepsilon_x - C(\alpha)S(\beta)\varepsilon_y - C(\alpha)C(\beta)\varepsilon_z + \varepsilon_x \\ 1 \end{bmatrix}$$

La relación matricial (3.1) describe la forma en la que están involucrados los sistemas asociados a la cámara antes y después del movimiento.

3.2 Algoritmo de recuperación de parámetros de cámara.

Una vez que se tiene un modelo en el que se involucran los sistemas coordenados asociados a la cámara antes y después de un movimiento de la plataforma giratoria, es posible ajustar los parámetros de visión a la nueva orientación de la cámara. El objetivo es utilizar la información de los ángulos de giro sin usar sensores de posición.

En la práctica se encontraron dos métodos para lograr el objetivo mencionado. El primero requiere de mayor tiempo y proceso computacional que el segundo, sin embargo, este último surgió a partir de la idea de mejorar el tiempo requerido en el primero, para luego ser optimizado. En el primer método, descrito en el diagrama de flujo de la Figura 27, se obtiene una aproximación de los ángulos de rotación con la caracterización del movimiento de la plataforma giratoria y se aplica la metodología de ajuste descrita en la sección 3.2.1. Este método tiene algunos inconvenientes, que se listan a continuación.

- Es necesario tener una buena caracterización del movimiento de la plataforma giratoria, lo que implica un tipo de calibración de la unidad. La caracterización consiste en conocer los ángulos de rotación cuando son accionados los motores de la plataforma, en un tiempo determinado. Por esta razón, es necesario ejecutar una rutina de caracterización para cada plataforma giratoria, pues la dinámica de una y otra no son exactamente iguales.
- En el caso de caracterización sencilla, es decir, que no sea una calibración como tal, es necesario realizar un segundo ajuste de parámetros pues los ángulos proporcionados por la información del movimiento no son los correctos.

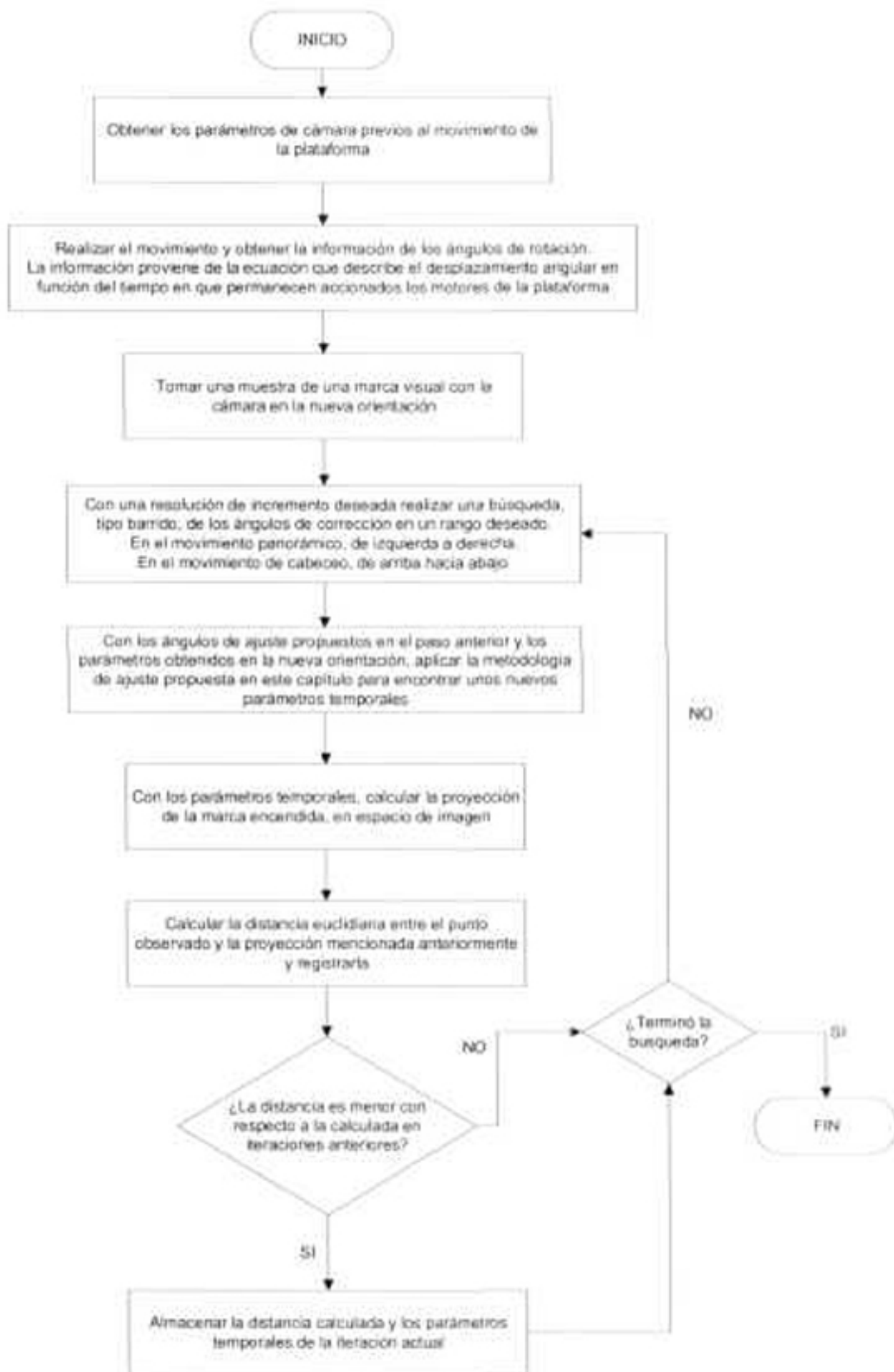


Figura 27. Diagrama de flujo para realizar el ajuste de parámetros de cámara realizando una búsqueda de los ángulos de rotación

- Se requiere información de una observación en la nueva orientación para ejecutar un algoritmo de búsqueda de los ángulos faltantes y, con esta información, aplicar un segundo ajuste de parámetros.
- El algoritmo de búsqueda requiere de procesamiento y tiempo computacional para encontrar los ángulos faltantes con una precisión razonable. La resolución de búsqueda y los respectivos rangos en los ángulos de rotación, son definidos durante los experimentos.

El segundo método no requiere un segundo ajuste y se logra usando teoría de estimación no lineal para conocer los ángulos de rotación, por lo cual, se usó para realizar los experimentos que se describen en el capítulo siguiente.

3.2.1 Ajuste de parámetros de cámara

Debido a que el modelo de la cámara de perspectiva tiene una validez local, es posible determinar los parámetros del mismo una vez que se ha realizado el movimiento de la plataforma pan/tilt, sin necesidad de medir los ángulos de giro. Para lograrlo, se utiliza una muestra de una marca visual artificial adjunta a la herramienta de corte del manipulador, con la cámara colocada en la nueva posición.

El objetivo buscado en esta sección es modelar la proyección de un punto en la nueva posición que involucre a los ángulos de rotación. En la práctica, el modelo usado para la cámara de perspectiva utiliza los parámetros P_1, \dots, P_7 y, en la metodología presentada a continuación, se utilizan los parámetros e_1, e_2, e_3 y e_4 , además de las cantidades X_0, Y_0 y Z_0 que aparecen en la ecuación (2.22). Se detalla a continuación la forma de hacer la conversión de estos parámetros a partir de los parámetros de cámara.

Haciendo uso de la restricción (2.28) y los parámetros definidos en (2.29), se define $\|P\|$ a continuación,

$$\|P\| = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 = \frac{f}{Z_0} \quad (3.3)$$

Usando el grupo de ecuaciones (2.29) y (3.3) se obtienen los parámetros siguientes,

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{P_5}{\|P\|} \\ Y_0 &= \frac{P_6}{\|P\|} \\ Z_0 &= \frac{-1}{P_7 \|P\|} \\ e_i &= \frac{P_i}{\sqrt{\|P\|}}, i = 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Para modelar la proyección en espacio de imagen de un punto, con la cámara colocada en la nueva posición, es necesario considerar la relación entre el sistema asociado a la cámara en la nueva posición y el sistema asociado a la base del robot. Dicha relación está dada por,

$$\begin{bmatrix} X_i^* \\ Y_i^* \\ Z_i^* \\ 1 \end{bmatrix} = M(e_1^*, e_2^*, e_3^*, e_4^*, X_0^*, Y_0^*, Z_0^*) \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

donde:

$$M(e_1^*, e_2^*, e_3^*, e_4^*, X_0^*, Y_0^*, Z_0^*) = \rho(\alpha, \beta) M_e(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0) \quad (3.6)$$

Para esta última expresión, $\rho(\alpha, \beta)$ está dada en (3.2) y $M_e(e_1, e_2, e_3, e_4, X_0, Y_0, Z_0)$ se define en (2.22).

Cabe mencionar que la configuración del lente no se altera, por lo que la distancia focal f se mantiene constante antes y después del giro de la plataforma pan/tilt. Por lo tanto, la proyección en espacio de imagen (x_{ci}, y_{ci}) , de un punto tridimensional (x_i, y_i, z_i) con la cámara colocada en la nueva posición, está dada por las ecuaciones siguientes,

$$x_{ci} = f \frac{X_i^*}{Z_i^*} \quad (3.7)$$

$$y_{ci} = f \frac{Y_i^*}{Z_i^*} \quad (3.8)$$

donde, X_i^* , Y_i^* y Z_i^* se obtienen desarrollando (3.5) como sigue,

$$\begin{aligned} X_i^* = & (\cos(\alpha)R_{11} + \sin(\alpha)\sin(\beta)R_{21} - \sin(\alpha)\cos(\beta)R_{31})x_i \\ & + (\cos(\alpha)R_{12} + \sin(\alpha)\sin(\beta)R_{22} - \sin(\alpha)\cos(\beta)R_{32})y_i \\ & + (\cos(\alpha)R_{13} + \sin(\alpha)\sin(\beta)R_{23} - \sin(\alpha)\cos(\beta)R_{33})z_i \\ & + \cos(\alpha)X_0 + \sin(\alpha)\sin(\beta)Y_0 - \sin(\alpha)\cos(\beta)Z_0 \\ & + (1 - \cos(\alpha))\varepsilon_x + \sin(\alpha)\sin(\beta)\varepsilon_y + \sin(\alpha)\cos(\beta)\varepsilon_z \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} Y_i^* = & (\cos(\beta)R_{21} + \sin(\beta)R_{31})x_i \\ & + (\cos(\beta)R_{22} + \sin(\beta)R_{32})y_i \\ & + (\cos(\beta)R_{23} + \sin(\beta)R_{33})z_i \\ & + \cos(\beta)Y_0 + \sin(\beta)Z_0 \\ & + (\cos(\beta) - 1)\varepsilon_y - \sin(\beta)\varepsilon_z \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
Z_i^* = & (\sin(\alpha) R_{11} - \cos(\alpha) \sin(\beta) R_{21} + \cos(\alpha) \cos(\beta) R_{31}) x_i \\
& + (\sin(\alpha) R_{12} - \cos(\alpha) \sin(\beta) R_{22} + \cos(\alpha) \cos(\beta) R_{32}) y_i \\
& + (\sin(\alpha) R_{13} - \cos(\alpha) \sin(\beta) R_{23} + \cos(\alpha) \cos(\beta) R_{33}) z_i \\
& + \sin(\alpha) X_0 - \cos(\alpha) \sin(\beta) Y_0 + \cos(\alpha) \cos(\beta) Z_0 \\
& - \sin(\alpha) \varepsilon_x - \cos(\alpha) \sin(\beta) \varepsilon_y + (1 - \cos(\alpha) \cos(\beta)) \varepsilon_z
\end{aligned} \tag{3.11}$$

En estas últimas expresiones, $R_{kl}, k, l = 1, \dots, 3$ se definen en (2.27), α corresponde al ángulo de rotación en el eje Y_{PT} y β al ángulo de rotación en el eje X_{PT} , ambos ilustrados en la Figura 26.

La idea de considerar la distancia focal constante o independiente del movimiento, surge a partir del hecho de que la configuración del lente no se altera. Se realizaron algunos experimentos de estimación de parámetros con diferentes orientaciones para la cámara, con el fin de conocer la diferencia del valor de la distancia focal estimada entre un experimento y otro. Puesto que se considera muy importante este concepto, se muestran algunos resultados experimentales en esta sección.

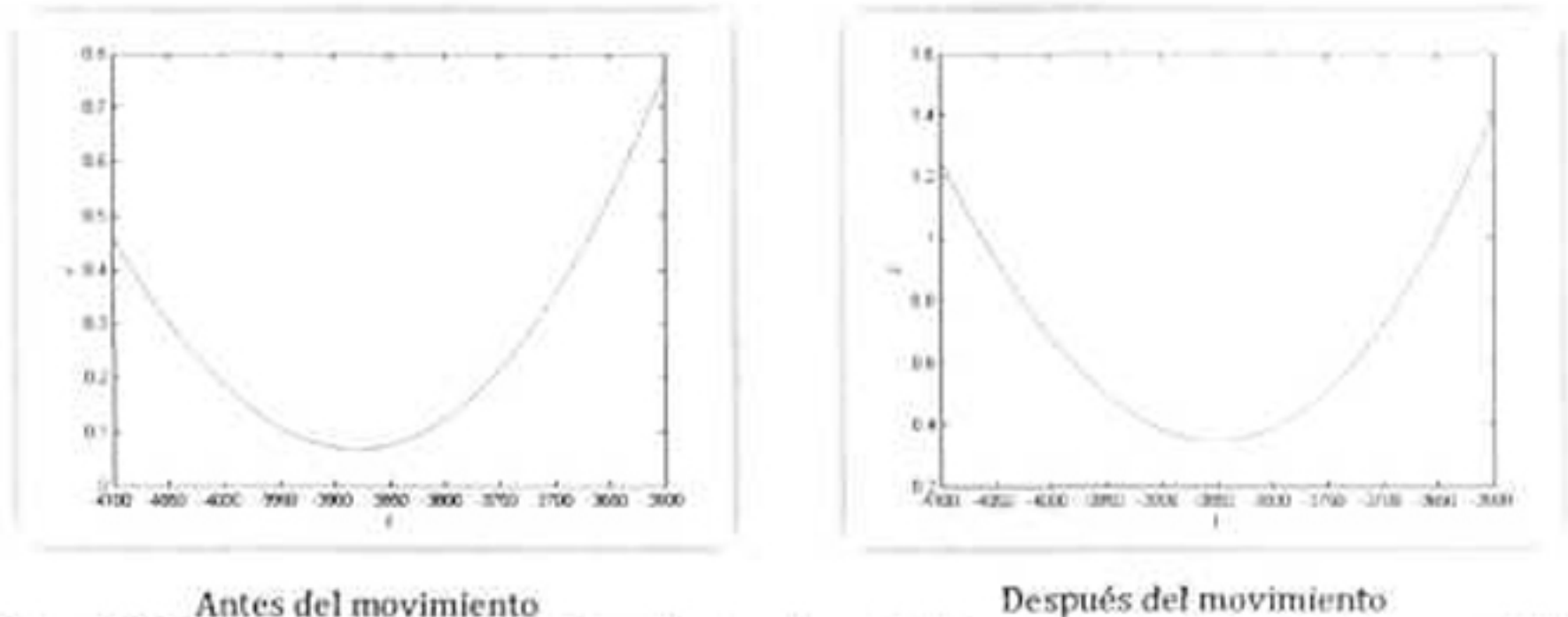


Figura 28. Estimación de la distancia focal antes y después del movimiento de la plataforma pan/tilt

En la Figura 28 se muestran gráficas de la distancia focal f vs $J(P)$, definida en (2.30), obtenidas por estimación, utilizando una trayectoria pre-planeada antes y después del movimiento de la plataforma pan/tilt. La forma de obtener dichas gráficas está descrita en la sección 2.4.2 usando el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la Figura 15. En este experimento en particular, el valor de la distancia focal calculada antes del movimiento es aproximadamente $f = -3878.35$ mm y después del movimiento $f = -3848.27$ mm, es decir, presenta una variación aproximada del 0.77%.

Tomando una muestra de una marca artificial adjunta al robot, en la nueva posición de la cámara, es posible estimar las cantidades α y β , correspondientes a los ángulos de rotación pan/tilt respectivamente, con lo que se logra evitar los sensores de posición de la unidad giratoria. Para este objetivo, se minimiza la función no lineal $\gamma(\alpha, \beta)$ descrita en (3.12), usando el algoritmo de corrección

diferencial de mínimos cuadrados descrito en [36]. El algoritmo de estimación de ángulos de rotación se explica en detalle en la sección 3.2.2.

$$\gamma(\alpha, \beta) = \left(x_{i'} - f \frac{X_i^*}{Z_i^*} \right)^2 + \left(y_{i'} - f \frac{Y_i^*}{Z_i^*} \right)^2 \quad (3.12)$$

Una vez que se conocen los parámetros α y β , se encuentra la matriz (3.6). Es posible conocer los nuevos parámetros P^* a partir de los nuevos $e_1^*, e_2^*, e_3^*, e_4^*, X_0^*, Y_0^*$ y Z_0^* a partir del siguiente grupo de ecuaciones,

$$\begin{aligned} e_1^* &= \sqrt{\frac{\text{Tr}(M)+1}{4}} \\ e_2^* &= \frac{(M_{2,3} - M_{1,2})}{4e_1^*} \\ e_3^* &= \frac{(M_{3,1} - M_{1,3})}{4e_1^*} \\ e_4^* &= \frac{(M_{1,2} - M_{2,1})}{4e_1^*} \\ X_0^* &= M_{1,4} \\ Y_0^* &= M_{2,4} \\ Z_0^* &= M_{3,4} \end{aligned} \quad (3.13)$$

donde $\text{Tr}(M)$ es la traza de M definida en la ecuación (3.6) y $M_{i,j}$ es el elemento en el $i^{\text{ésimo}}$ renglón y $j^{\text{ésimo}}$ columna de esta matriz.

Usando (3.13) y (2.29) se encuentran los nuevos parámetros P^* con el siguiente grupo de ecuaciones,

$$\begin{aligned} P_i^* &= \frac{f}{Z_0^*} e_i^*, i = 1, \dots, 4 \\ P_5^* &= f \frac{X_0^*}{Z_0^*} \\ P_6^* &= f \frac{Y_0^*}{Z_0^*} \\ P_7^* &= -\frac{1}{f} \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.2.2 Algoritmo de estimación de ángulos de rotación

El algoritmo de estimación de los ángulos de rotación de la unidad pan/tilt es un procedimiento iterativo que consiste en determinar un incremento $\Delta\alpha\beta' = [\Delta\alpha, \Delta\beta]'$. Este incremento es evaluado usando la expresión (3.15), basada en la condición necesaria para la minimización de una aproximación lineal de la función escalar γ en (3.12).

$$\Delta\alpha\beta' = [A_r^T A_r]^{-1} [A_r \Delta\gamma_c] \quad (3.15)$$

donde $[A_r^T A_r]$ representa una matriz no singular de 2x2, mientras $[A_r \Delta\gamma_c]$ es un vector de 2x1. Las expresiones A_r y $\Delta\gamma_c$ están descritas como sigue:

$$A_r = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial x_{co}}{\partial \alpha} & \frac{\partial x_{co}}{\partial \beta} \\ \frac{\partial y_{co}}{\partial \alpha} & \frac{\partial y_{co}}{\partial \beta} \end{array} \right]_{\alpha_c, \beta_c} \quad (3.16)$$

$$\Delta\gamma_c = \left[\begin{array}{c} x_{co} - x_{co}(\alpha, \beta) \\ y_{co} - y_{co}(\alpha, \beta) \end{array} \right]_{\alpha_c, \beta_c} \quad (3.17)$$

en estas expresiones, las cantidades x_{co} y y_{co} son evaluadas con los valores actuales de α y β .

El procedimiento iterativo continúa con la evaluación y actualización de α y β como sigue:

$$\alpha\beta^{n+1} = \alpha\beta^{n+1} + \Delta\alpha\beta' \quad (3.18)$$

hasta que la convergencia se alcanza.

En la Figura 29 se muestra una convergencia típica en el algoritmo de estimación de los ángulos de rotación.

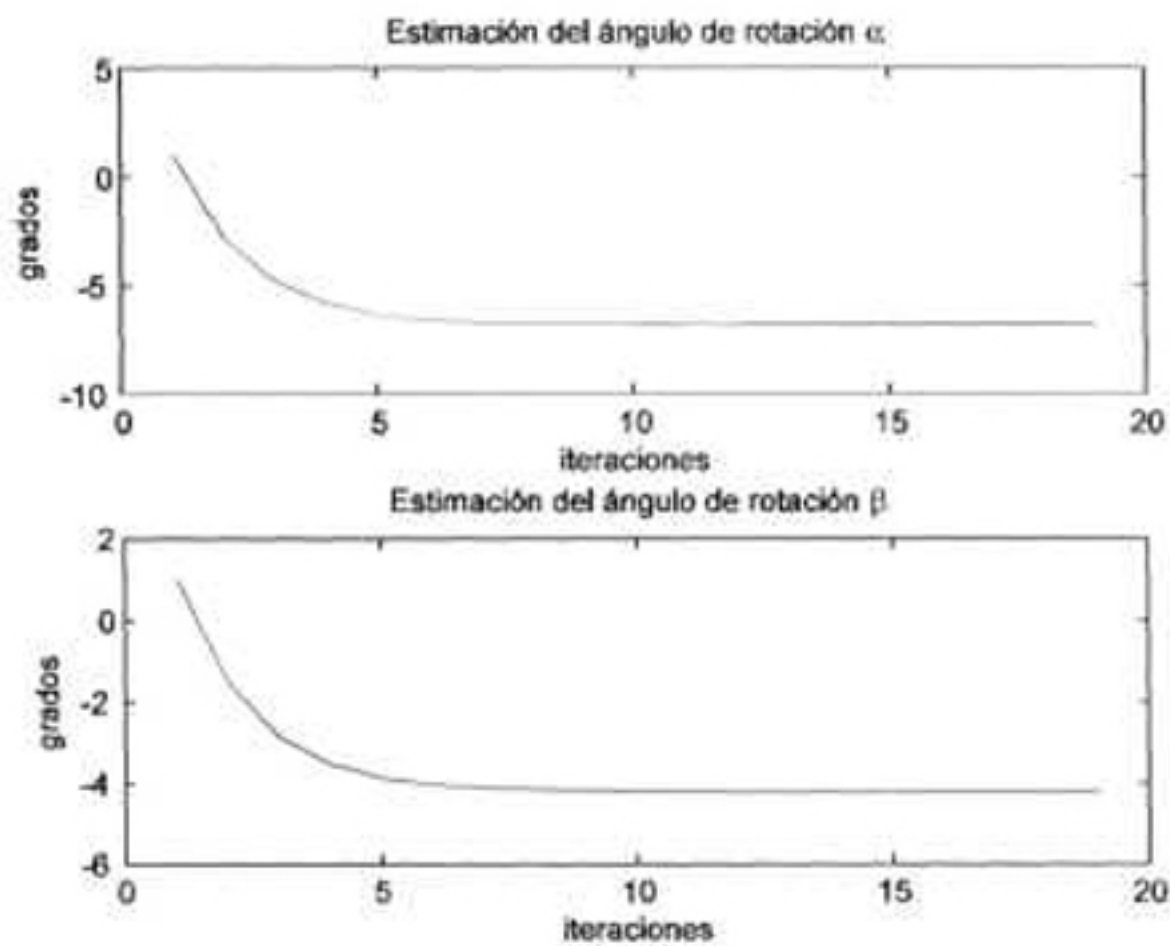


Figura 29. Convergencia típica en la estimación de los ángulos de rotación

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se presentan ahora los resultados obtenidos al implementar experimentalmente las técnicas desarrolladas en los capítulos anteriores. Además, se presenta la consideración relacionada al uso de información artificial, discutida en la sección 4.7.1. Dicha información es necesaria para completar una tarea de posicionamiento una vez que se cambia de orientación una cámara de control montada en una plataforma giratoria.

Se incluyen resultados de la estimación de parámetros de cámara con cierta orientación y su contraparte con los parámetros ajustados con el algoritmo presentado en el capítulo anterior. Además, se analiza la mejora de los parámetros utilizando información artificial.

Entre otros resultados, se incluye un análisis de repetibilidad del algoritmo de estimación de ángulos de rotación. De los resultados más importantes, se analiza el desempeño de tareas de posicionamiento realizadas en diferentes regiones del espacio de trabajo del manipulador.

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. El equipo utilizado es el siguiente:

1. Un robot Fanuc M-16iB, cuyas características se describen en la sección 2.2.
2. Dos unidades pan/tilt PTS-302, como la que se muestra en la Figura 4.
3. Cuatro cámaras a color con interfaz USB. Cuentan con una resolución de 1280x1024 píxeles. Estas cámaras se utilizaron en posiciones fijas como apoyo para técnicas de análisis de imágenes y algoritmos similares, más no para la aplicación principal del trabajo de tesis.
4. Dos cámaras monocromáticas de interfaz USB. También cuentan con una resolución de 1280x1024 píxeles. Estas cámaras se utilizaron montadas en las unidades pan/tilt y por consecuencia, fueron las destinadas para la aplicación principal del trabajo de tesis.
5. Dos actuadores para las unidades pan/tilt. Dichos actuadores son multiprotocolo para cámaras de seguridad y trabajan con el protocolo RS-485. Las siguientes secciones describen con más detalle los conceptos y la información relacionada con dichos dispositivos.
6. Para la medición de los errores de posicionamiento, se utilizó un vernier de precisión en milésimas de pulgada. Dicha herramienta de medición se ilustra en la Figura 53.

Cabe mencionar que, para realizar los experimentos aquí presentados, se desarrolló una interfaz gráfica que implementa los algoritmos de control de las cámaras y el manipulador, así como todos los cálculos implicados en la metodología CSM. En el apéndice se muestran algunas pantallas capturadas de dicha interfaz. Ésta fue desarrollada en el lenguaje Visual C++ de la suite de programación Visual Studio 2008™.

4.1 El protocolo RS-485

Frecuentemente, los actuadores de las unidades pan/tilt se usan lejos de la fuente de mando y, por lo tanto, están diseñadas para comunicarse usando un protocolo industrial. En este caso en particular, con el protocolo RS-485 (bus de capa física del modelo OSI). A continuación se detallan algunas características que lo hacen especial para comunicaciones industriales a corta distancia:

- Se crean sistemas de bus de transmisión multipunto diferencial ideal para transmitir en ocasiones hasta largas distancias, a una velocidad de 35 Mbps hasta 10 metros y con una velocidad de 100 Kbps hasta 1200 metros.
- El medio físico es un par trenzado que admite hasta 32 estaciones en un solo hilo
- El rango del bus es de -7 V hasta +12 V

En la Figura 30 se muestran los voltajes a nivel de sincronía de los protocolos RS-232 y RS-485.

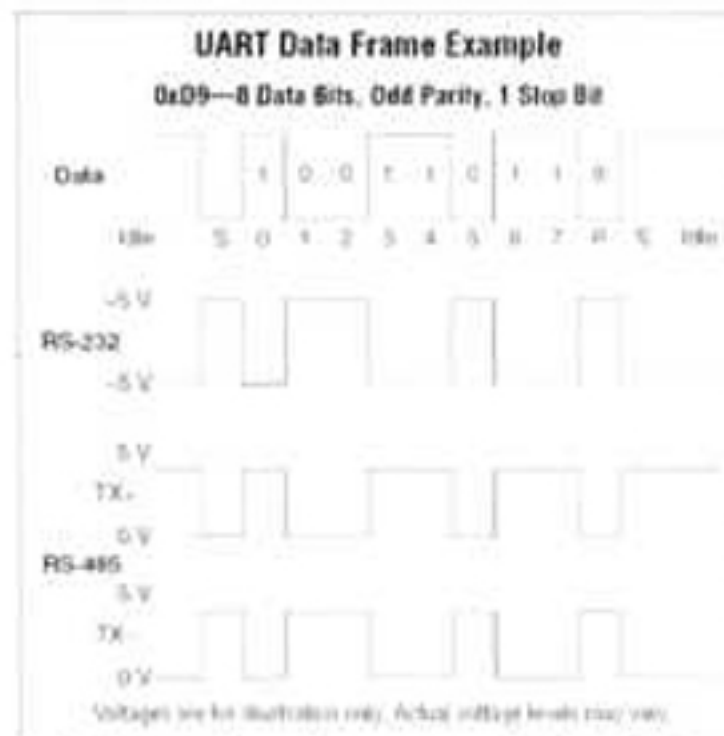


Figura 30. Sincronía en los protocolos RS-232 y RS-485

Se mencionan a continuación algunas aplicaciones del protocolo RS-485:

- Se usa con frecuencia en los UART's para comunicaciones de datos de poca velocidad en las cabinas de los aviones. Por ejemplo, algunas unidades de control del pasajero lo utilizan. Requiere cableado mínimo y puede compartir el cableado entre varios asientos, por lo que reduce el peso del sistema.
- Se utiliza en sistemas grandes de sonido, como los conciertos de música y las producciones de teatro. Se usa software especial para controlar remotamente el equipo de sonido de una computadora, y es utilizado más generalmente para los micrófonos.
- Es usado en la automatización de los edificios, pues es simple el cableado del bus y la longitud de cable es larga, por lo que es ideal para ensamblar los dispositivos que se encuentran alejados.

4.2 El protocolo PELCO-P

El actuador de las unidades pan/tilt, a nivel de datos, tiene la característica de ser multiprotocolo para cámaras de seguridad. Los protocolos que soporta el dispositivo se muestran en la Tabla 5. Debido a la disponibilidad de información, se eligió utilizar el protocolo PELCO-P [38].

Tabla 5. Protocolos de cámara de seguridad disponibles

No.	Protocolo de cámaras de seguridad
1	PELCO-D
2	HY
3	VICON(surveyor)
4	KALATEI (KTD-312) DCW0601
5	PELCO-P
6	HN-C
7	SAMSUNG
8	KODICOM-RX KRE-301RX
9	DH/KCL
10	NEOCAM
11	PIH1016 (lilin)
12	B01
13	RM110/S1601
14	PEARMAIN
15	V1200
16	SANTACHI-450/9600 KALATEI KDT348

El protocolo PELCO-P es indexado en cero, es decir, la primera dirección de cámara es la 0. En la Tabla 6 se muestra el formato que tienen los mensajes, los campos marcados con (*) corresponden al formato de la instrucción pan/tilt y se describen en la Tabla 7. El chequeo se calcula como el XOR de los bytes 2 al 6.

Tabla 6. Formato de los mensajes en el protocolo PELCO-P

Byte	Valor	Función
1	0xA0	Inicio de transmisión
2	0x00 → 0x1F	Dirección
3	DB1	(*)
4	DB2	(*)
5	DB3	(*)
6	DB4	(*)
7	0xAF	Fin de transmisión
8	0x00 → 0xFF	Chequeo

Tabla 7. Formato de la instrucción pan/tilt

	Número de Bit							
	7	6	5	4	3	2	1	0
DB1	0	Camera ON	Autiscan ON	Camera on/off	Iris Close	Iris Open	Focus Near	Focus Far
DB2	0	Zoom Wide	Zoom Tele	Tilt Down	Tilt Up	Pan Left	Pan Right	0 (for pan/tilt)
DB3				Pan Speed 0x00 → 0x3f, 0x40 for turbo				
DB4				Tilt Speed 0x00 → 0x3f				

4.3 La tarjeta de conversión RS-232 a RS-485

Debido a un problema de compatibilidad de un convertidor de protocolos comercial (específicamente el 3OneData USB485C, Figura 31) se optó por diseñar y fabricar una tarjeta electrónica que realiza la conversión de RS-232 a RS-485 utilizando el circuito comercial MAX485. Esto con el objetivo de hacer uso del puerto nativo RS-232 de la computadora donde se ejecutan las aplicaciones del manipulador. La tarjeta se muestra en la Figura 32, asimismo, el diagrama electrónico de conexión y la cara inferior del circuito impreso, se encuentran ilustrados en el apéndice. Además, se notó una mejora en la velocidad de respuesta de las aplicaciones, y una mejora en las señales de comunicación.



Figura 31. 3OneData USB485C



Figura 32. Tarjeta de conversión RS-232 a RS-485

El diagrama de conexión entre la computadora y las cámaras se muestra en la Figura 33



Figura 33. Diagrama de conexión de la computadora y las cámaras

4.4 Experimentos de estimación de ángulos de rotación

Con el objetivo de poder medir de forma aproximada los ángulos de giro en las plataformas giratorias, se colocaron graduaciones en los respectivos ejes de rotación, como se muestra en la Figura 34.

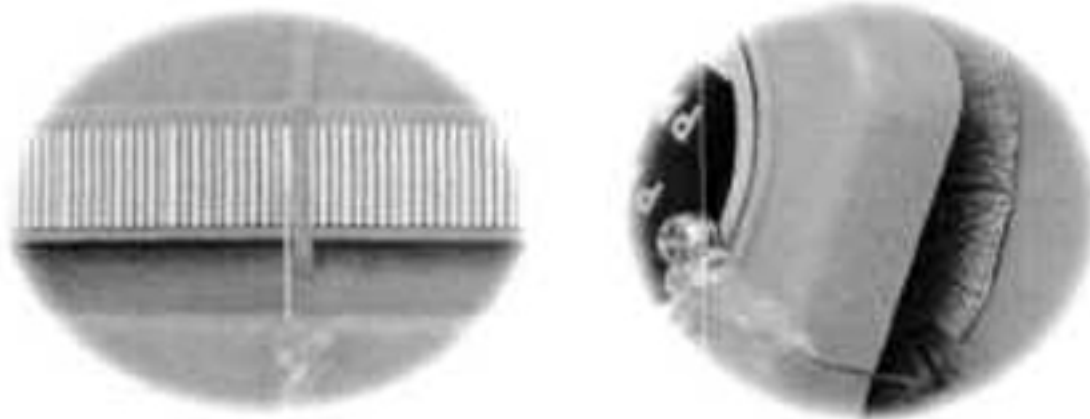


Figura 34. Graduación de las unidades pan/tilt

Para realizar una comparación entre los valores medidos y los valores estimados para algunos ángulos de rotación, se realizó un experimento como el que se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 35. Este experimento consiste en registrar los ángulos de rotación estimados y medidos para diferentes reorientaciones de la cámara, haciendo uso de los parámetros de cámara antes del movimiento. En la Tabla 8 y la Tabla 9 se muestra una comparación de los valores medidos contra los aproximados en la estimación de los ángulos de rotación α y β respectivamente, de algunos de los experimentos realizados.

Tabla 8. Comparación de la medición y la estimación del ángulo α

Medido	Ángulo α	
	Estimado	Variación
-12	-11.32	5.66666667 %
17	16.56	2.58823529 %
-17	-16.38	3.64705882 %
-5.5	-5.42	1.45454545 %
15.5	14.59	5.87096774 %

Tabla 9. Comparación de la medición y la estimación de β

Medido	Ángulo β	
	Estimado	Variación
10	9.93	0.7 %
-13.5	-12.595	6.7037037 %
13	12.69	2.38461538 %
-24	-22.197	7.5125 %
9.5	9.17	3.47368421 %

Se observa que la máxima variación en el ángulo de rotación α es del 5.8% y en β es del 7.5%. Cabe mencionar que una medición más precisa de los ángulos de rotación se logra usando sensores de posición, lo que resulta una paradoja, ya que es precisamente lo que se espera evitar con el algoritmo de estimación propuesto.

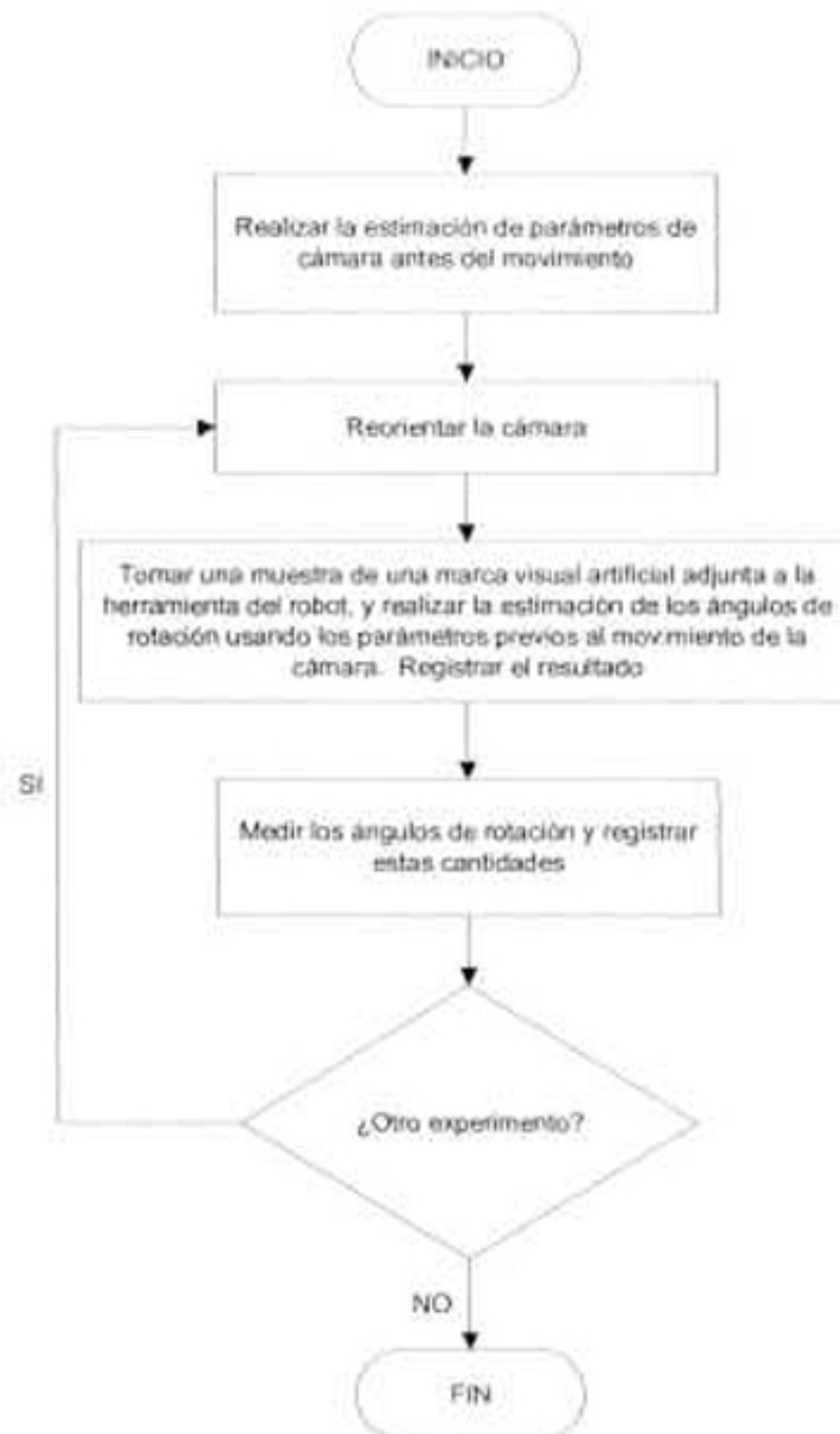


Figura 35. Diagrama de flujo para realizar los experimentos de estimación de ángulos de rotación, para diferentes orientaciones de la cámara

4.5 Repetibilidad en la estimación de los ángulos de rotación

Para analizar la repetibilidad que presenta el algoritmo de estimación de ángulos de rotación de la plataforma giratoria, se realizó un experimento como se describe en el diagrama de flujo de la Figura 36. El experimento consiste en estimar un cierto número de veces los ángulos de rotación, para solo una reorientación la cámara, es decir, se realiza solo un movimiento de cámara y se mantiene fija en la nueva posición durante la ejecución de una serie de pruebas. En cada prueba se mueve el manipulador a un lugar diferente y se enciende una de las marcas visuales artificiales para tomar la muestra necesaria para la estimación de los ángulos de rotación.

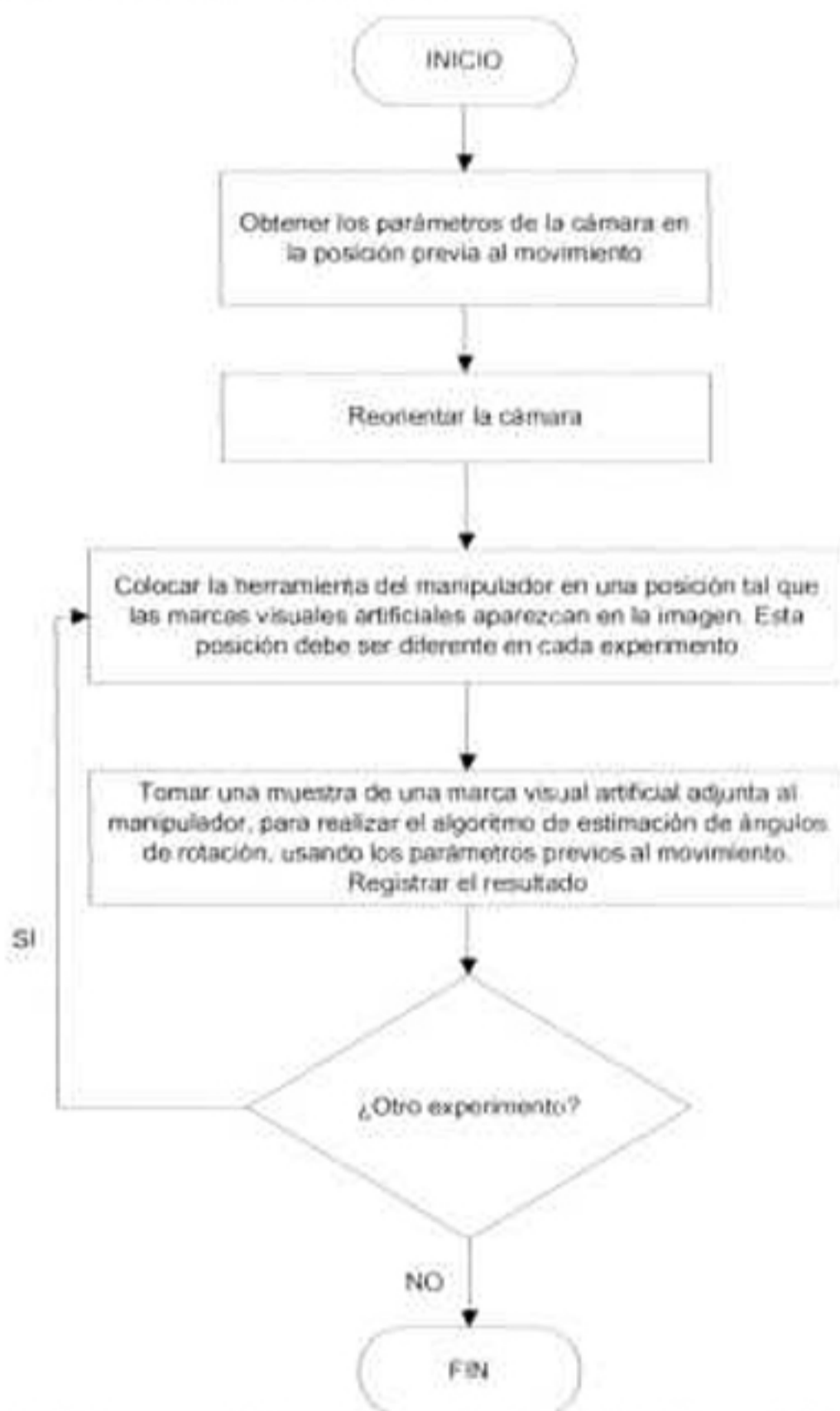


Figura 36. Diagrama de flujo para realizar una prueba de análisis de repetibilidad del algoritmo de estimación de ángulos de rotación

Se muestra el resultado de estos experimentos en la Figura 37 y la Figura 38, usando un ángulo de rotación diferente en cada caso y, por consecuencia, el desplazamiento sobre el riel. Dicho desplazamiento equivale aproximadamente a 1.5 m para el primer experimento y 3 m para el segundo. El eje horizontal corresponde al número de prueba y el vertical al valor estimado de cada ángulo. A partir de estas pruebas se ha establecido que la estimación de α tiene una repetibilidad el orden de 0.1 grados y β de 0.2 grados.

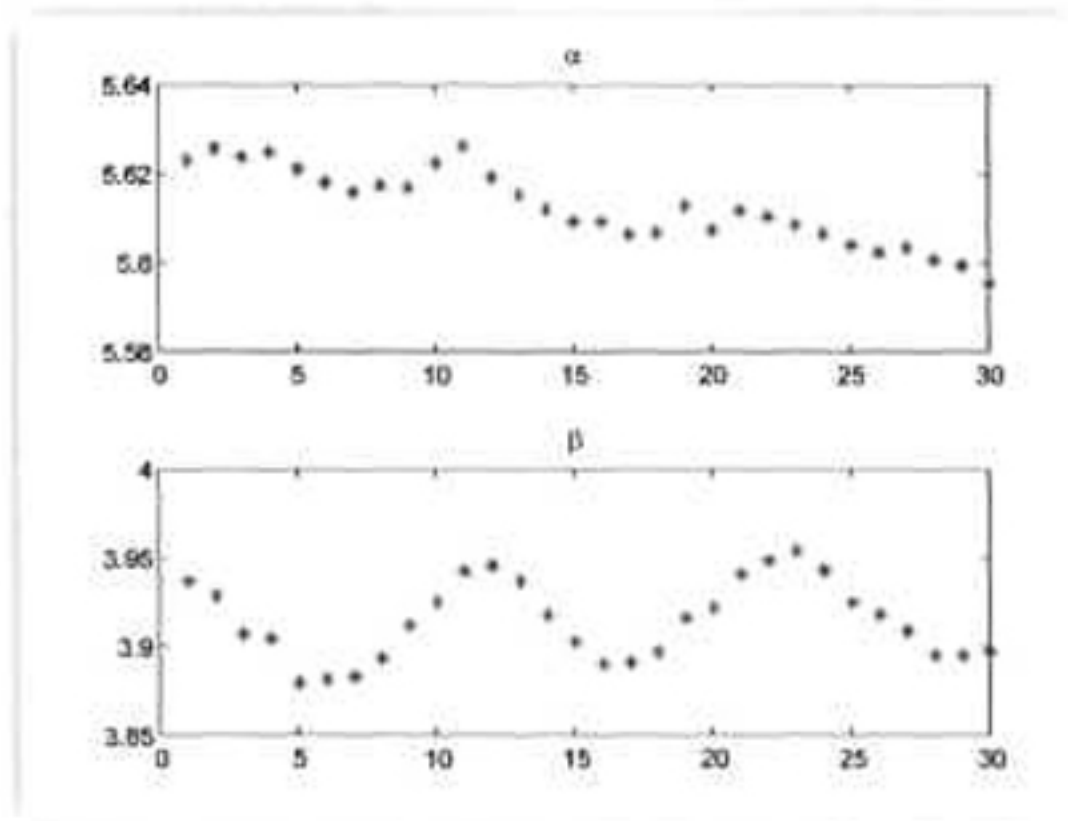


Figura 37. Experimento de repetibilidad en la estimación de ángulos de rotación

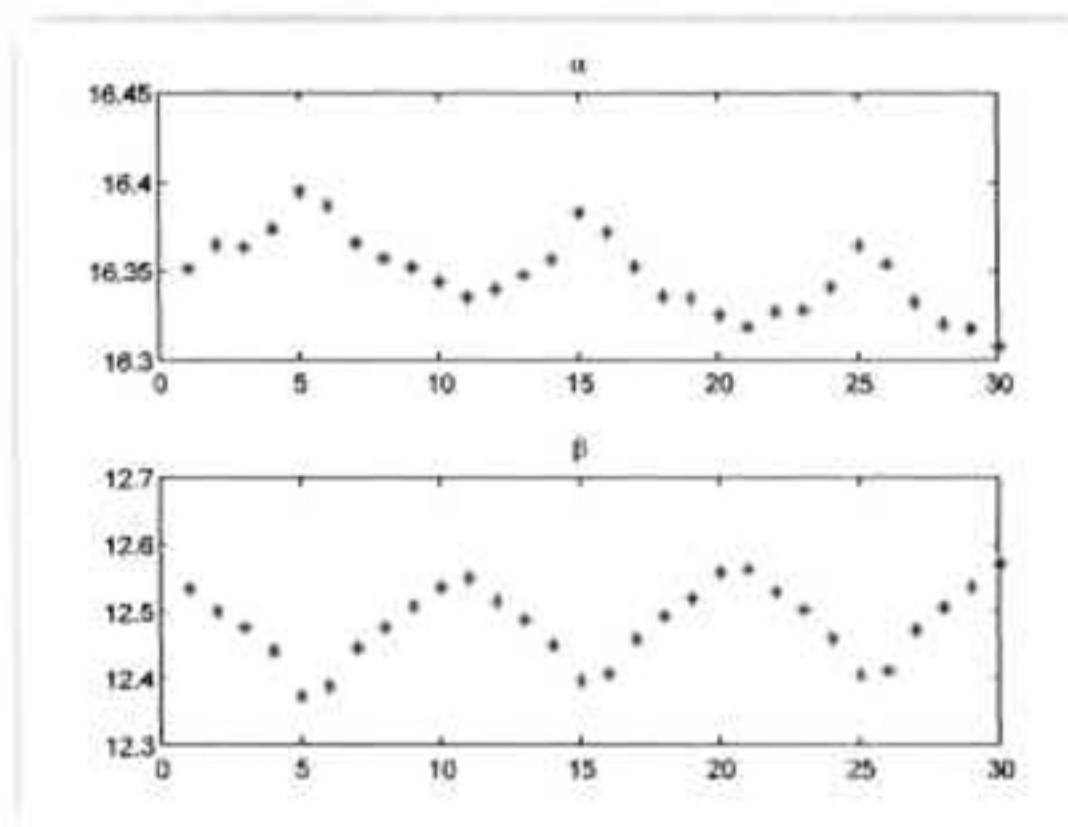


Figura 38. Experimento de repetibilidad en la estimación de ángulos de rotación

4.6 Verificación de parámetros obtenidos mediante el procedimiento de estimación propuesto

En la Tabla 10 se muestra una comparación de parámetros de cámara obtenidos mediante la metodología de estimación no lineal propuesta, y los que se estiman utilizando información obtenida a partir de una trayectoria pre-planeada, en la nueva orientación de la cámara. Esta tabla de valores es el resultado de un experimento típico, como el que se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 39. El experimento consistió esencialmente en obtener los parámetros de visión después de reorientar la cámara, haciendo uso de los parámetros previos al movimiento y la metodología propuesta en el presente trabajo y, por otro lado, se configura una trayectoria pre-planeada en la nueva orientación y se utiliza la información que se obtiene durante su ejecución para estimar los parámetros, usando el método descrito en la sección 2.4. Se observa que la máxima variación corresponde al 1.74% aproximadamente y se presenta en el parámetro P_1 .



Figura 39. Diagrama de flujo para realizar el experimento de comparación de parámetros de cámara antes y después de la reorientación.

Tabla 10. Comparación de parámetros: Estimados usando una trayectoria pre-planeada contra los ajustados a partir de la estimación de ángulos.

Parámetro	Usando trayectoria pre-planeada	Usando metodología de ajuste	Variación
P_1	0.114149549	0.116144453	1.747622941 %
P_2	0.125807867	0.12476614	0.828030103 %
P_3	0.545904817	0.545305414	0.109799786 %
P_4	0.666387501	0.665742409	0.096804280 %
P_5	351.9363111	345.8395977	1.732334268 %
P_6	705.8041741	708.5367298	0.387154933 %
P_7	0.000258219	0.000259281	0.411109704 %
f	-3872.682571	-3856.826782	0.409426512 %

Las orientaciones de la cámara usadas para obtener los parámetros, antes y después del movimiento, abarcan regiones del espacio de trabajo lo más separadas posibles, con el fin de verificar la robustez del método. En la Figura 40 se muestra un esquema del cambio de orientación en estas pruebas.

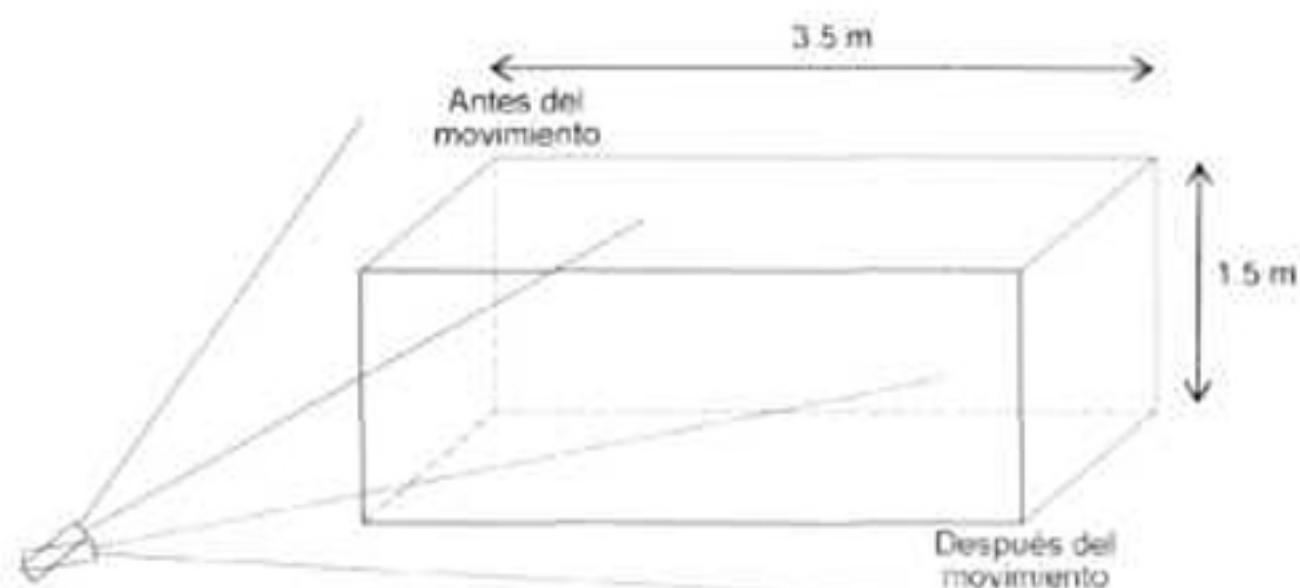


Figura 40. Orientaciones de la cámara para la verificación de los parámetros mediante el procedimiento propuesto

4.7 Tarea de posicionamiento con cámaras móviles y el concepto de información artificial

Como se mencionó anteriormente, al realizar una tarea de posicionamiento, se actualiza el modelo de la cámara conforme la herramienta del manipulador se acerca al objetivo. Una vez que la plataforma giratoria hace un movimiento, toda la información histórica almacenada en las matrices de momentos se vuelve incompatible con la nueva posición. Sin embargo, es necesario tener información almacenada para lograr la convergencia del algoritmo de estimación de parámetros en cada actualización y, además, asegurar que en cada movimiento de manipulador sea posible localizar las marcas visuales artificiales en las imágenes, ya que esta información enriquece al modelo en una región más cercana al objetivo de la maniobra.

La forma en que se resolvió el problema de la falta de información del mundo real, fue enriqueciendo al modelo de la cámara con información virtual o artificial, tal y como se explica en la sección 4.7.1. Esta información virtual se combina con información captada por la cámara en una observación hecha en la nueva orientación, es decir, en la misma donde se tomó la muestra para realizar la estimación de los ángulos de rotación.

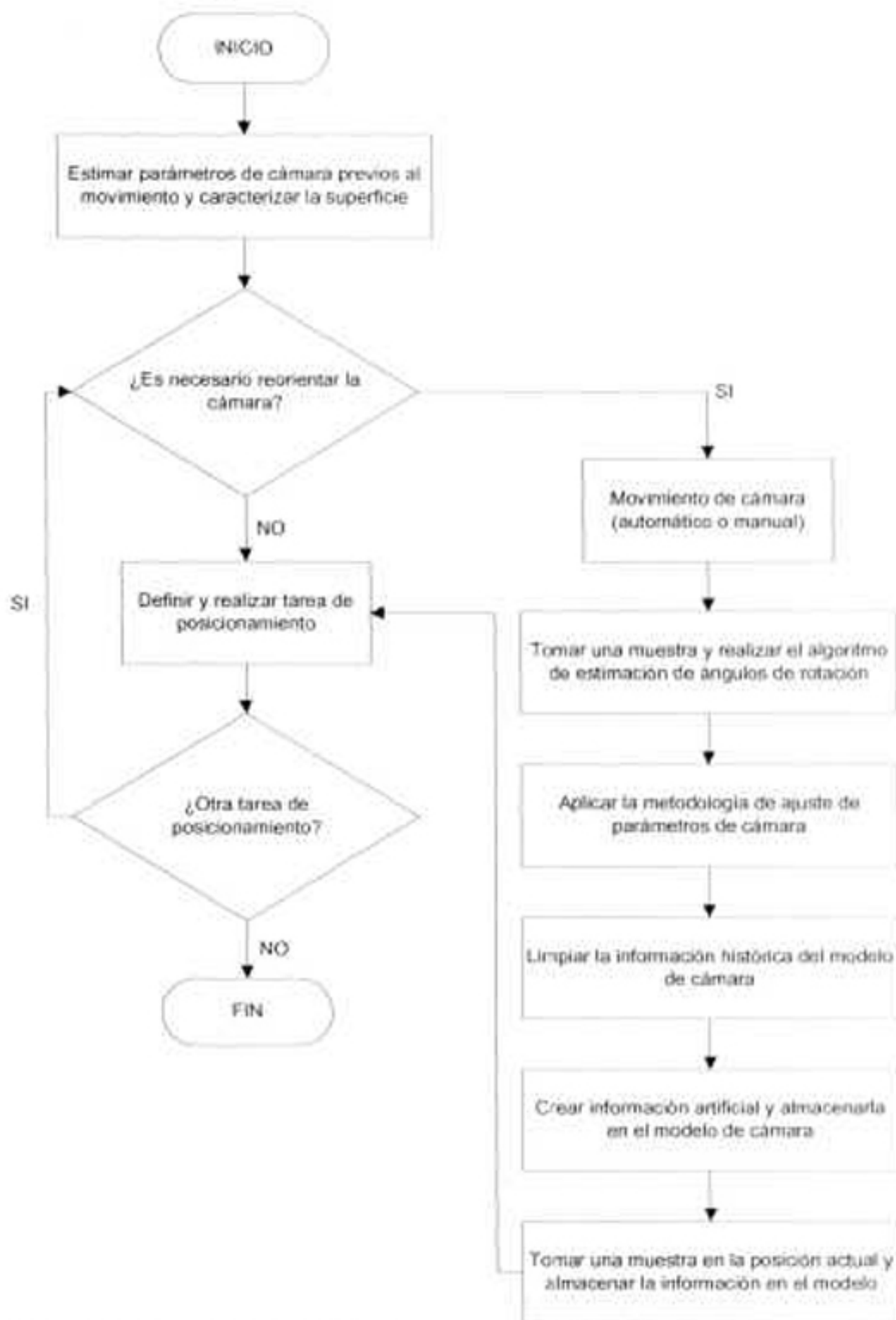


Figura 41. Diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento con cámaras móviles

En la Figura 41 se muestra un diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento usando cámaras móviles. El procedimiento consiste básicamente en estimar los parámetros de cámara correspondientes a la nueva orientación, para poder definir y alcanzar el objetivo en espacio de imagen. Para ello es necesario, además de la muestra requerida para estimar los ángulos de rotación, tomar una muestra en la nueva orientación para agregar información al modelo de la cámara y combinarla con la información artificial tal y como se menciona en la siguiente sección.

4.7.1 Información artificial

Se le llama información artificial a aquellos datos que no son obtenidos del mundo real, es decir, que no son adquiridos por una cámara y que, por el contrario, son generados por posiciones tridimensionales proyectadas en el espacio de imagen con el modelo de la cámara en su posición actual.

Surgen algunas preguntas al utilizar la información artificial, como por ejemplo:

- ¿Cómo se puede generar dicha información?
- ¿Qué restricciones tiene?
- ¿Cuál es la cantidad mínima requerida para lograr una tarea de posicionamiento?

Para responder a estas preguntas, se realizaron una serie de experimentos. En lo que respecta a las formas de generarla, puede existir un número muy grande de opciones. En el presente trabajo se experimentó solo con un pequeño conjunto razonable de éstas, como se listan a continuación:

1. Usar la ecuación de un plano paralelo a la superficie donde está montado el manipulador, de tal forma que los puntos contenidos en éste sean alterados por distancias aleatorias uniformemente distribuidas en una distancia equivalente al 10% de las dimensiones más pequeñas del plano. Las dimensiones del plano son equivalentes a las dimensiones del espacio de trabajo.
2. Usar una serie de puntos contenidos en espirales esféricas con el centro coincidente con la punta de la herramienta del manipulador, de tal forma que los puntos sean desplazados por distancias equivalentes al 10% del radio de la esfera. La dimensión de la esfera no deberá sobrepasar la distancia de alcance del manipulador y los puntos deberán estar contenidos dentro del espacio de trabajo del manipulador.
3. Usar puntos correspondientes a una trayectoria pre-planeada que cubra, en lo posible, todo el espacio de trabajo del manipulador. En cada punto de la trayectoria del manipulador, usar la posición de una de las marcas visuales artificiales de la herramienta.
4. Usar muestras aleatorias uniformemente distribuidas dentro de todo el espacio de trabajo.
5. Usar muestras aleatorias uniformemente distribuidas dentro de una esfera. El centro de ésta deberá coincidir con la punta de la herramienta del manipulador. Además, su dimensión no deberá sobrepasar la distancia de alcance del manipulador y las muestras deberán estar contenidas dentro del espacio de trabajo del manipulador.
6. Usar configuraciones aleatorias codo abajo del manipulador. Dichas posiciones deben estar uniformemente distribuidas dentro del espacio de trabajo, es decir, configuraciones realizables considerando las restricciones mecánicas. En cada posición usar la posición de una marca visual artificial.

La opción 1 no es recomendable, pues en la mayoría de las ocasiones, no es posible saber en dónde se desempeñará el manipulador y por ello en cada ocasión se deberá proporcionar al algoritmo la altura de trabajo. En la Figura 42 se ilustra esta opción.

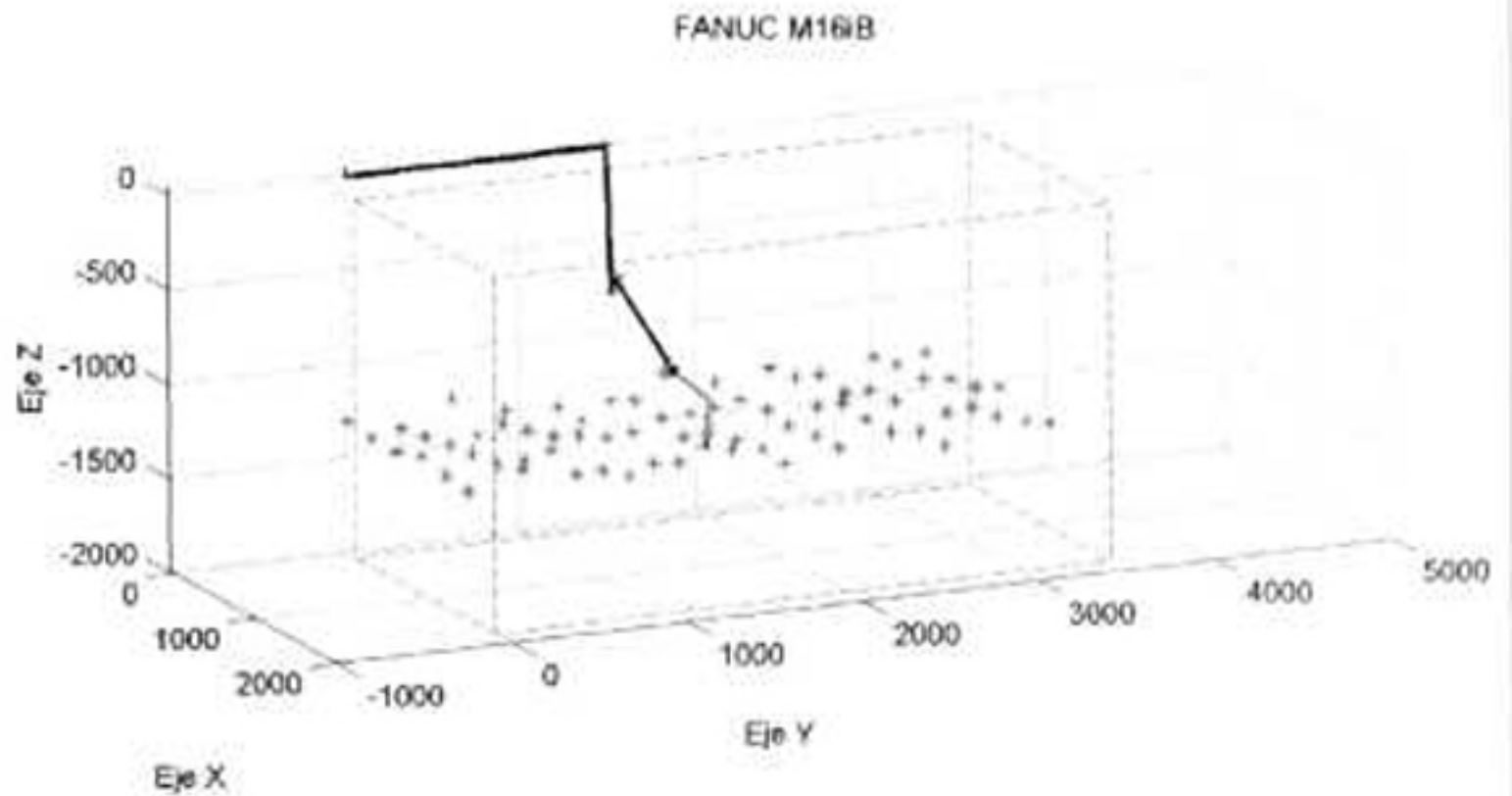


Figura 42. Información artificial: puntos ubicados aleatoriamente arriba y debajo de un plano

En la Figura 43 se ilustra la opción 2

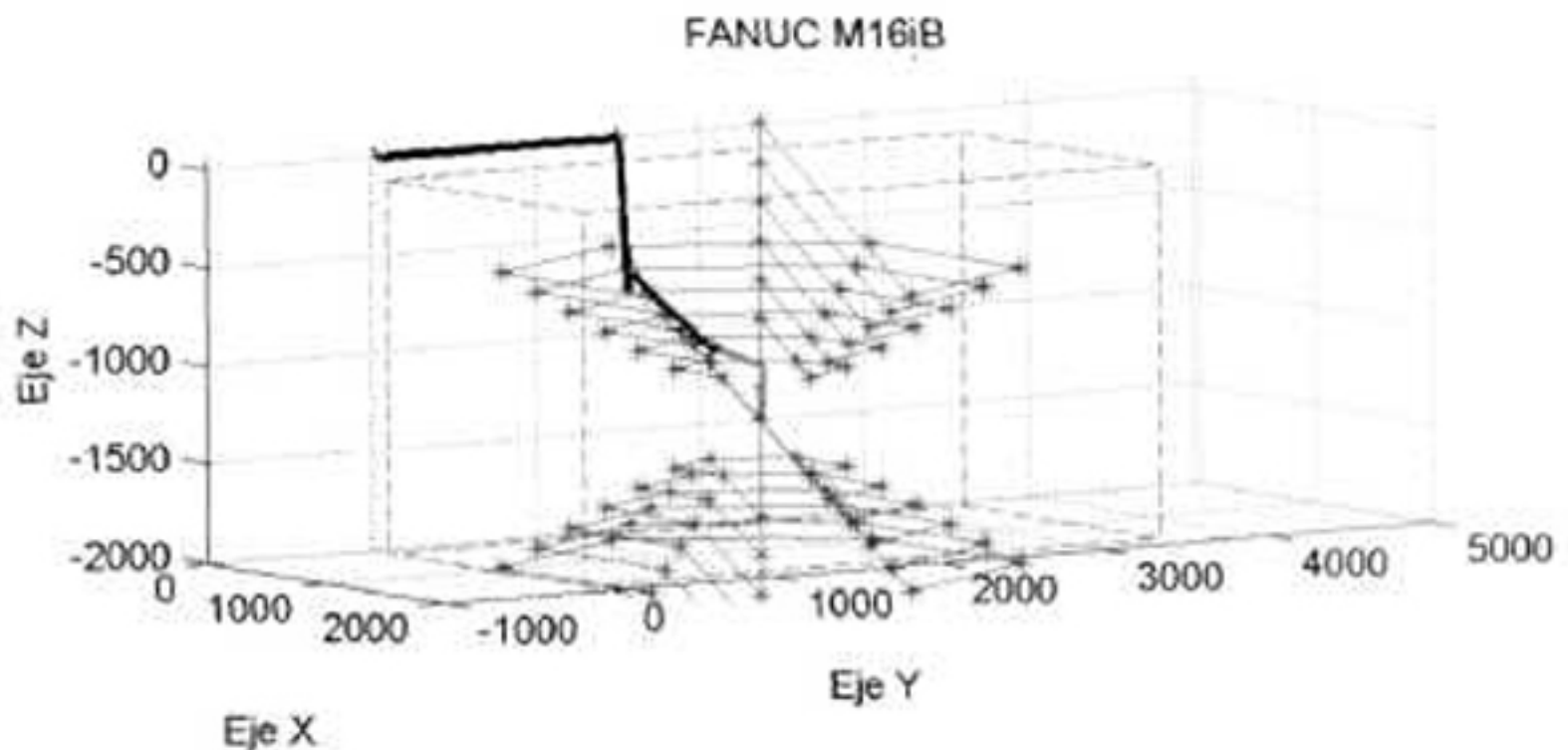


Figura 43. Información artificial: espirales esféricas alrededor de la herramienta

La opción 3 se ilustra en la Figura 44.

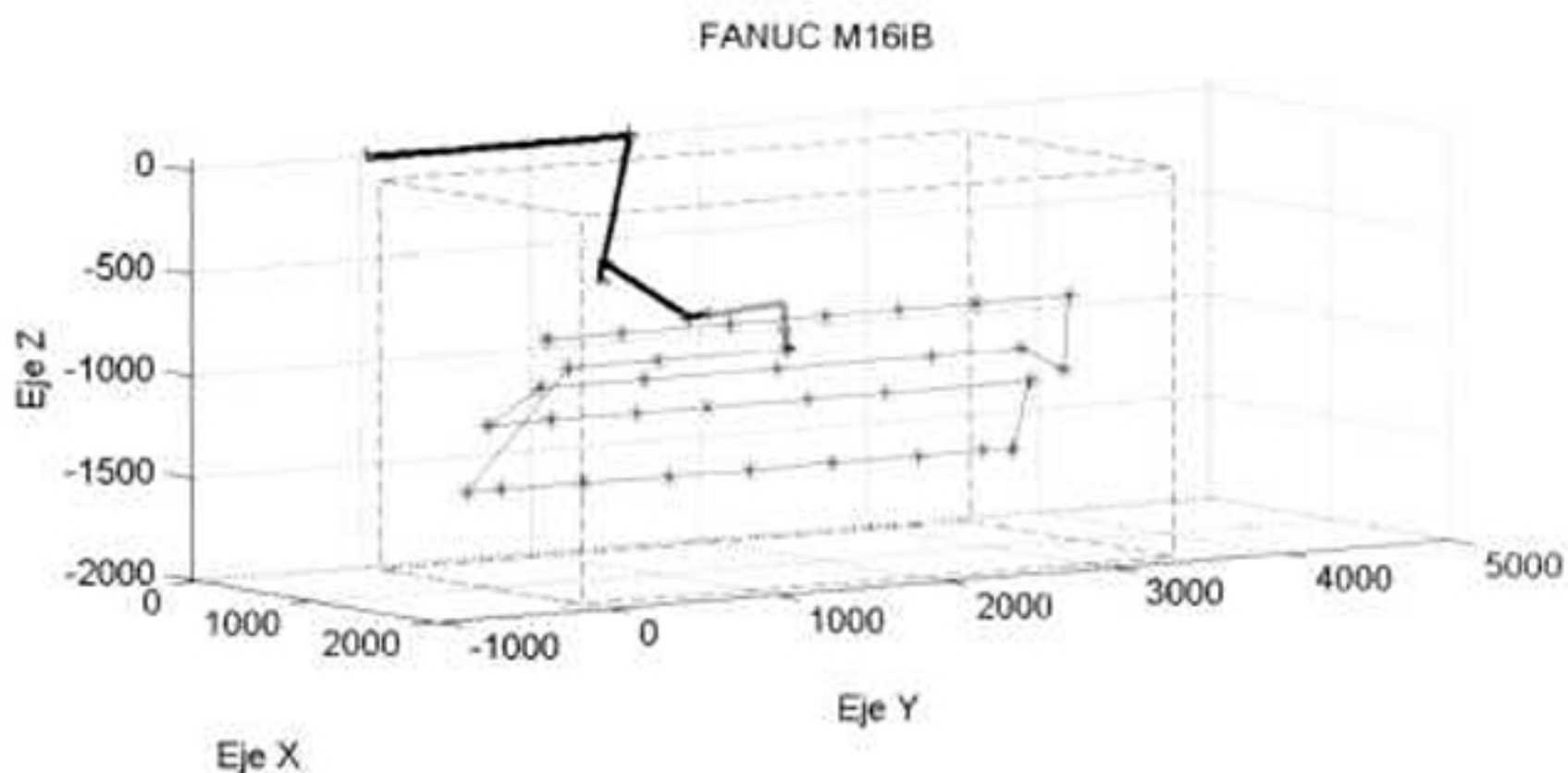


Figura 44. Información artificial: muestras correspondientes a una trayectoria pre-planeada

En la Figura 45 se ilustra en la opción 4.

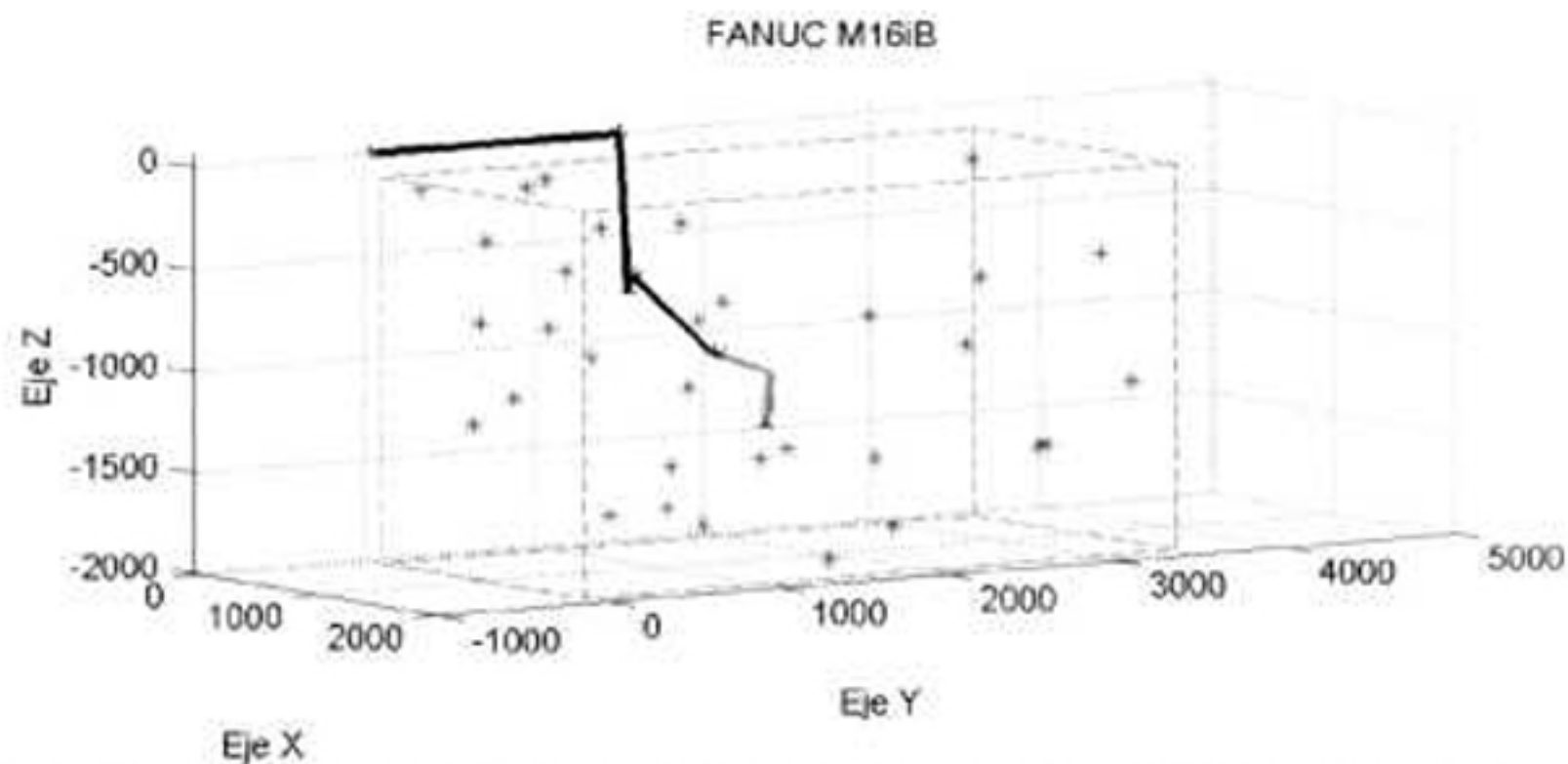


Figura 45. Información artificial: muestras aleatorias distribuidas dentro del espacio de trabajo

La opción 5 se ilustra en la Figura 46.

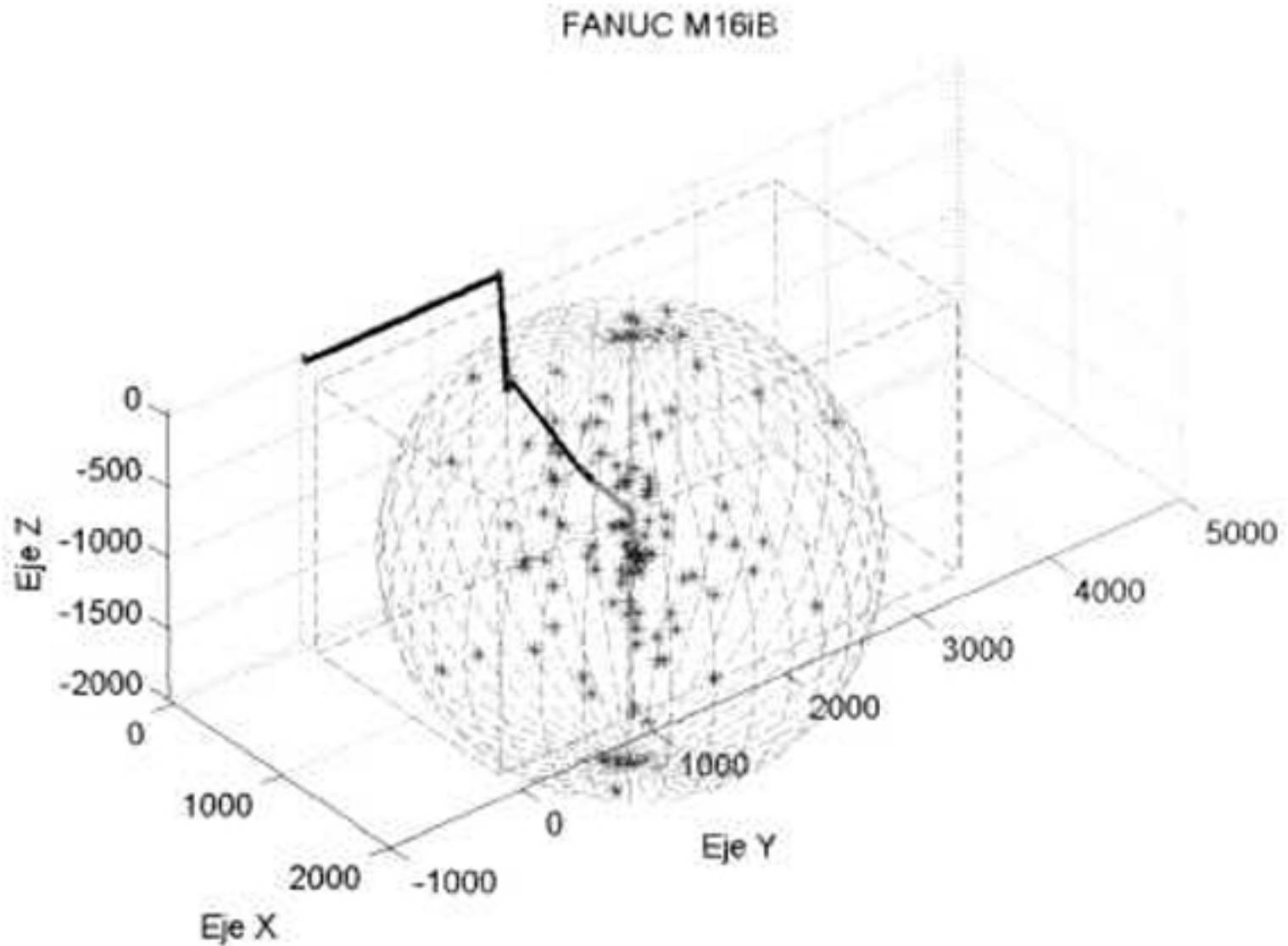


Figura 46. Información artificial: muestras aleatorias uniformemente distribuidas dentro de una esfera

La opción 6 tiene la característica de semejar a una trayectoria pre-planeada. Se proyecta el punto correspondiente a una de las marcas visuales artificiales, en espacio de imagen. Además, estos puntos están siempre dentro del espacio de trabajo y no tienen ningún patrón geométrico en específico, es por esto que la información artificial generada resulta parecida a la información que proporciona una trayectoria pre-planeada, sin ninguna secuencia o patrón especial. Esta opción se ilustra en la Figura 47.

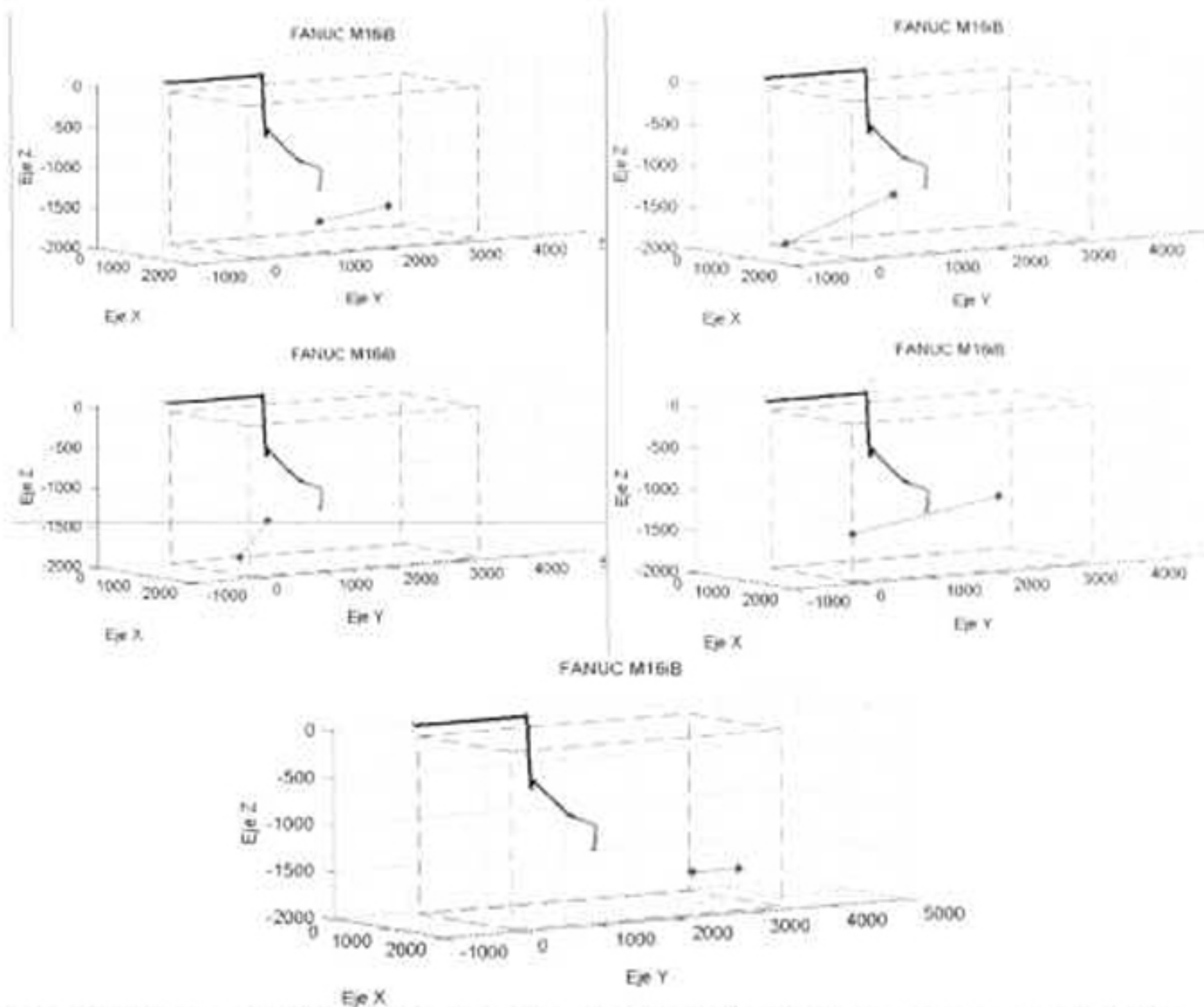


Figura 47. Información Artificial: configuraciones "codo abajo" aleatorias uniformemente distribuidas en el espacio de trabajo

Para el mismo experimento del que se obtuvo la Tabla 10, se estimaron los nuevos parámetros de cámara agregando información artificial y los datos que se obtienen de una observación de la antorcha en la misma posición usada para estimar los ángulos de rotación. En la Tabla 11 se muestra una comparación de estos parámetros contra los obtenidos con una trayectoria pre-planeada en la nueva orientación. Se observa que los parámetros ajustados con este paso adicional son más cercanos a los obtenidos mediante la trayectoria pre-planeada, en contraste con los obtenidos con solo la estimación de ángulos. La máxima variación corresponde al 0.84 % aproximadamente, presentándose en el parámetro P_3 .

Tabla 11. Comparación de parámetros: Obtenidos con pre-planeada contra los actualizados usando información artificial y una observación

Parámetro	Usando trayectoria pre-planeada	Usando información artificial y una observación	Variación
P_1	0.114149549	0.114869244	0.630484065 %
P_2	0.125807867	0.124858824	0.754358544 %
P_3	0.545904817	0.546445992	0.099133616 %
P_4	0.666387501	0.665432445	0.143318353 %
P_5	351.9363111	348.9524091	0.847852826 %
P_6	705.8041741	706.9153867	0.157439215 %
P_7	0.000258219	0.000259281	0.411109704 %
f	-3872.682571	-3856.826782	0.409426512 %

Para determinar la cantidad mínima de información artificial necesaria para completar una tarea de posicionamiento y además, conocer en todo momento la correspondencia de las marcas visuales artificiales con su proyección en espacio de imagen, se siguió el algoritmo ilustrado en el diagrama de flujo de la Figura 48. El algoritmo consiste básicamente en modificar de forma incremental el número de datos artificiales a usar, comenzando desde cero. Para cada cantidad de datos artificiales, se realiza una serie de pruebas en las que se define una tarea de posicionamiento y se intenta realizarla. Se contabiliza el número de pruebas exitosas y, en el caso de que una falle, se reinicia el conteo de éxitos y se incrementa la cantidad de datos artificiales.

De acuerdo al algoritmo mencionado, para efectos prácticos, se consideró que una cantidad de 100 pruebas exitosas y 0 fallidas son suficientes para determinar la cantidad mínima de muestras artificiales. A través de una serie de experimentos que superaron en gran cantidad este número de éxitos, se determinó que la cantidad mínima necesaria son 2 muestras artificiales. Aún más, se realizaron pruebas rebasando la cantidad mínima de datos artificiales para observar el comportamiento de la precisión y no se detectó ninguna mejoría.

En cuanto a las restricciones de estos datos, se pueden mencionar las siguientes:

- Las muestras no se deben proyectar en el mismo lugar en el espacio de imagen.
- Estos puntos siempre deben ser alcanzables por el manipulador. Como se describió anteriormente, la opción 6 siempre cumple este requisito.

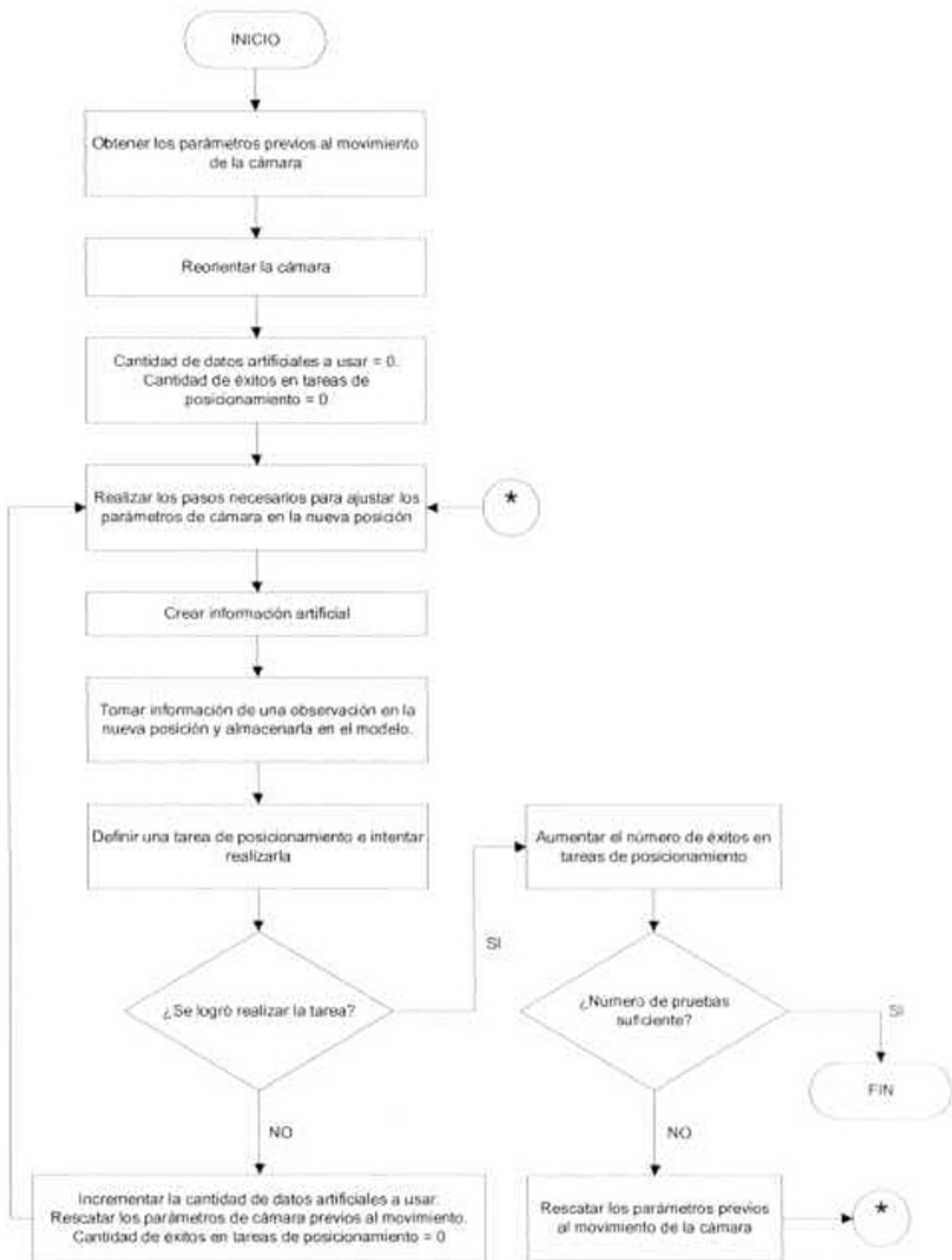


Figura 48. Diagrama de flujo para determinar la cantidad mínima de datos artificiales

4.8 Experimentos de posicionamiento con cámaras móviles

Se realizó una serie de experimentos de posicionamiento abarcando, en lo posible, todo el espacio de trabajo del manipulador. Los experimentos se realizaron ajustando los parámetros de cámara en una nueva orientación, es decir, aplicando la metodología descrita en el capítulo 3.

La serie de experimentos se dividió en regiones como se ilustra en la Figura 49, a una altura aproximada de 80 cm con respecto a la superficie donde se encuentra montado el manipulador.

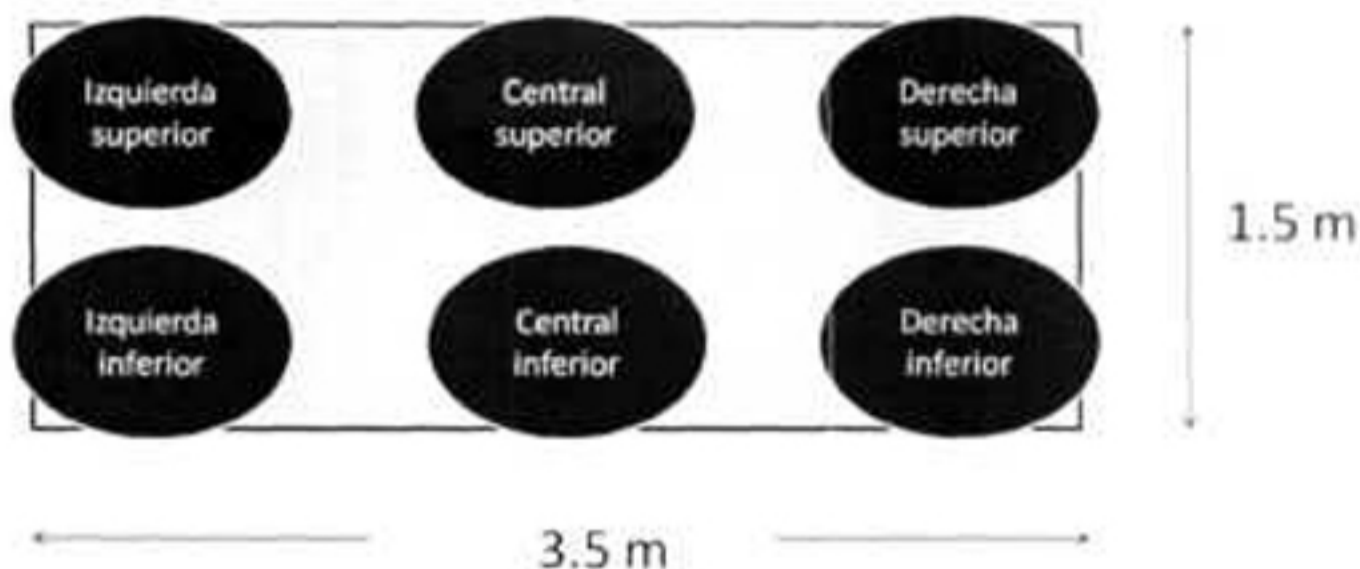


Figura 49. Regiones de las pruebas de posicionamiento con cámaras móviles

Para realizar los experimentos de posicionamiento, se utilizó la superficie de una barra de plastilina blanca como la que se muestra en la Figura 50, de dimensiones aproximadas de 30 cm x 30 cm y 1.5 cm de espesor. La razón de utilizar ese material para los experimentos es que permite la reflexión de un punto láser lo suficientemente brillante para ser captado por las cámaras. Además, la plastilina es un material maleable, por lo que no se requiere un gran esfuerzo en la herramienta para producir una marca por contacto.



Figura 50. Barra de plastilina usada en los experimentos de posicionamiento

Para hacer la proyección del punto láser sobre la superficie de trabajo, se montó un apuntador láser sobre la extensión que sujeta la herramienta de corte del manipulador. Dicho dispositivo se muestra en la Figura 51.

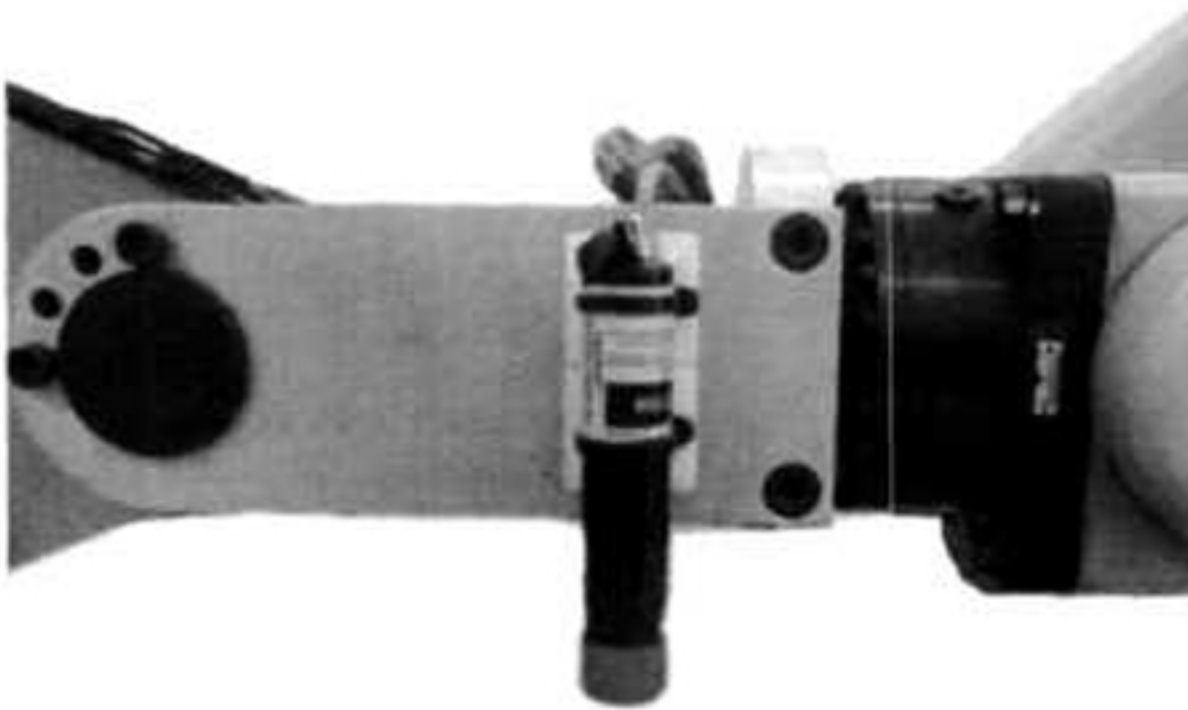


Figura 51. Apuntador láser colocado en la estructura móvil del manipulador

Además, para mejorar la precisión en las mediciones de posicionamiento, se colocó en la punta de la herramienta una aguja como se muestra en la Figura 52. El objetivo de esta pequeña herramienta, es clavarla en la superficie de plastilina. El orificio que provoca la aguja es usado como marca para realizar las mediciones de error de posicionamiento, como se explica más adelante.



Figura 52. Aguja colocada en la punta de la herramienta

A continuación se define el punto (H_x, H_y, H_z) , el cual describe la posición de la punta de la aguja con respecto al sistema coordenado ubicado en la base del robot. Este punto se calcula usando la expresión (4.1), que considera el modelo cinemático para la herramienta descrito en (2.20) y la dimensión de la aguja. La orientación de la aguja es la misma que la de la herramienta, pues la primera se considera una extensión de la segunda.

$$H = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \\ 1 \end{bmatrix} = T_k(d_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) \begin{bmatrix} -L_H \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

donde L_H es la longitud de la aguja de aproximadamente 13 mm.

Para realizar un experimento de posicionamiento y cuantificar el error, se siguieron los siguientes pasos:

1. Con el robot, se proyecta el punto láser sobre la superficie para definir una tarea de posicionamiento, como se muestra en la Figura 55. En la Figura 56 se muestra un acercamiento a la superficie con el punto láser.
2. Conforme se acerca al objetivo, la posición final se depura utilizando muestras obtenidas durante la maniobra de aproximación. Se prevee que la aguja perfora la superficie suave para generar una marca en el punto objetivo alcanzado. En la Figura 57 se muestra el manipulador culminando la tarea de posicionamiento, es decir, produciendo una marca en la superficie.
3. Se regresa el manipulador a la posición usada para proyectar el punto láser sobre la superficie.
4. Se mide la distancia entre el centro del orificio en la plastilina y el centro del punto láser. Dicha distancia corresponde al error de posicionamiento en el plano xy . El error en el eje z , perpendicular a la superficie, corresponde a la diferencia entre el nivel de profundidad deseado, cuando una marca sobre la aguja coincide con la superficie, y el alcanzado. La herramienta de medición es un vernier de graduación en milésimas de pulgada, como el que se ilustra en la Figura 53. En la Figura 54 se muestra un esquema de la medición de errores a lo largo de los diferentes ejes.

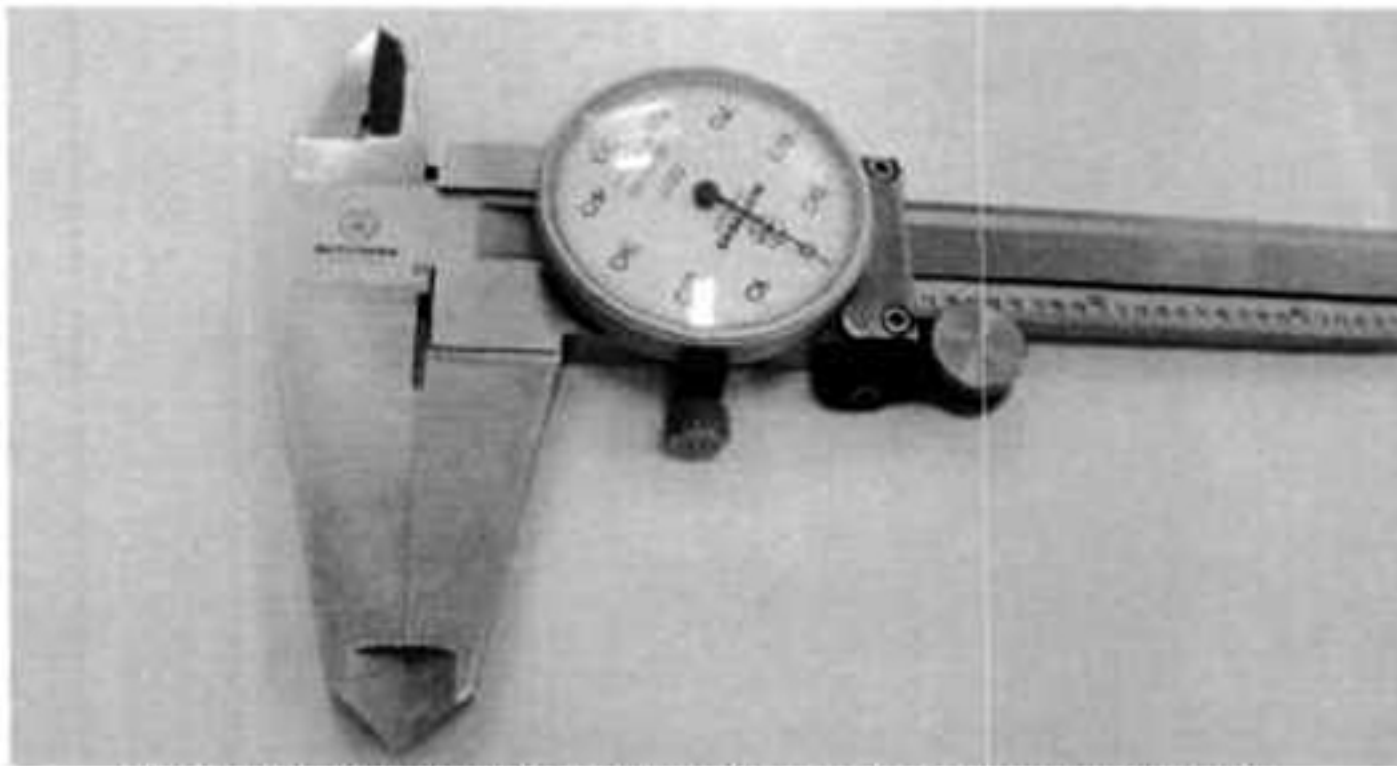


Figura 53. Vernier usado para medir los errores de posicionamiento

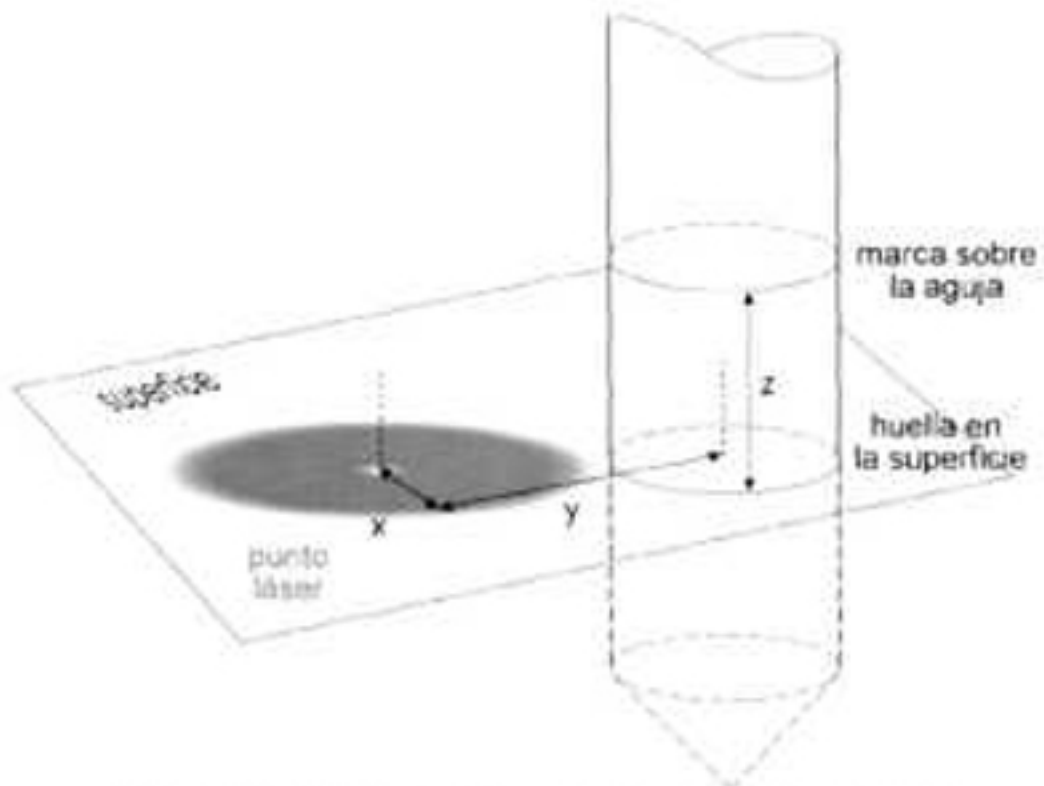


Figura 54. Medición del error de posicionamiento

Se presentan las imágenes relacionadas al algoritmo anterior:

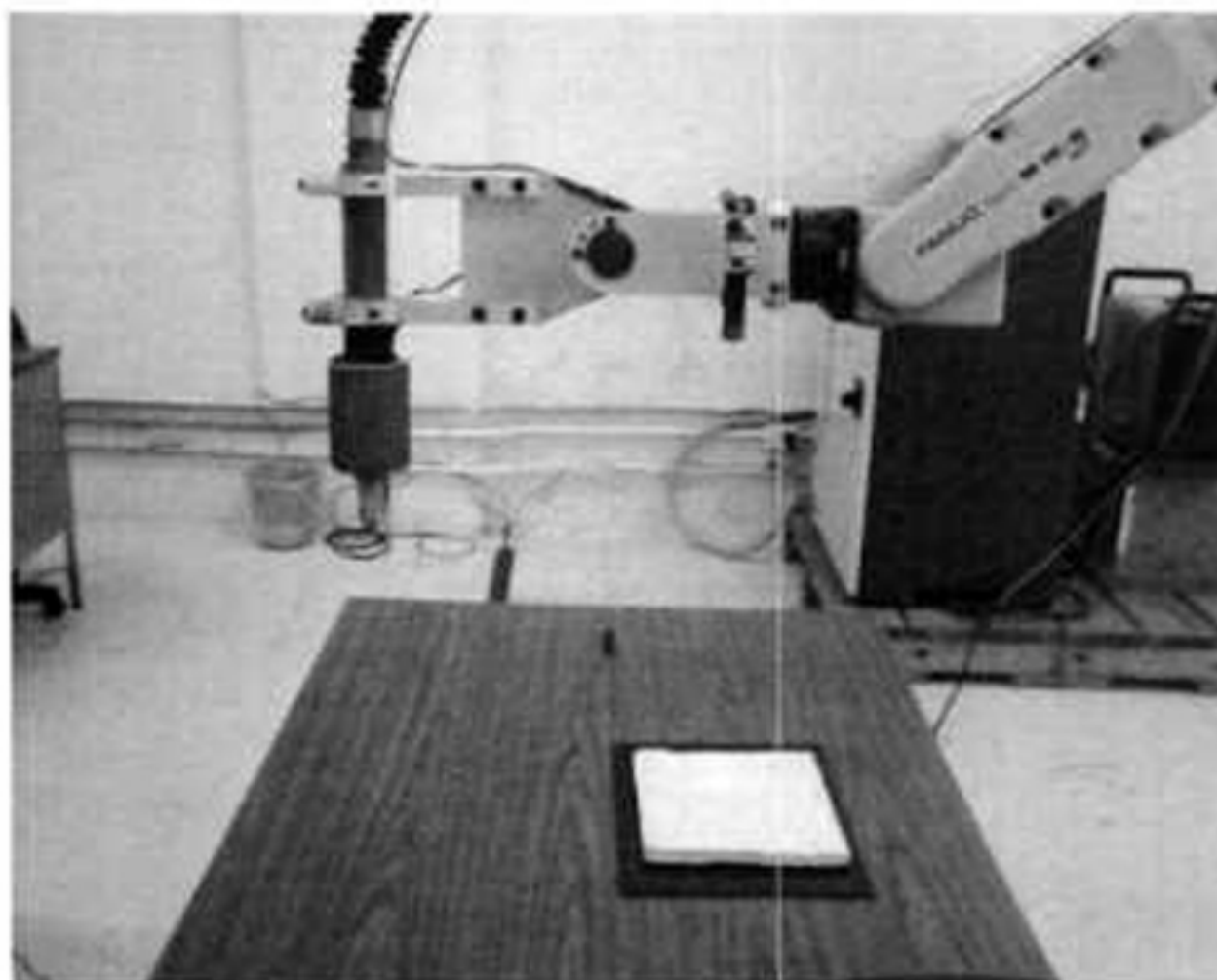


Figura 55. Robot FANUC M16i/B proyectando un punto láser sobre la superficie de trabajo



Figura 56. Proyección de un punto láser sobre la superficie de trabajo

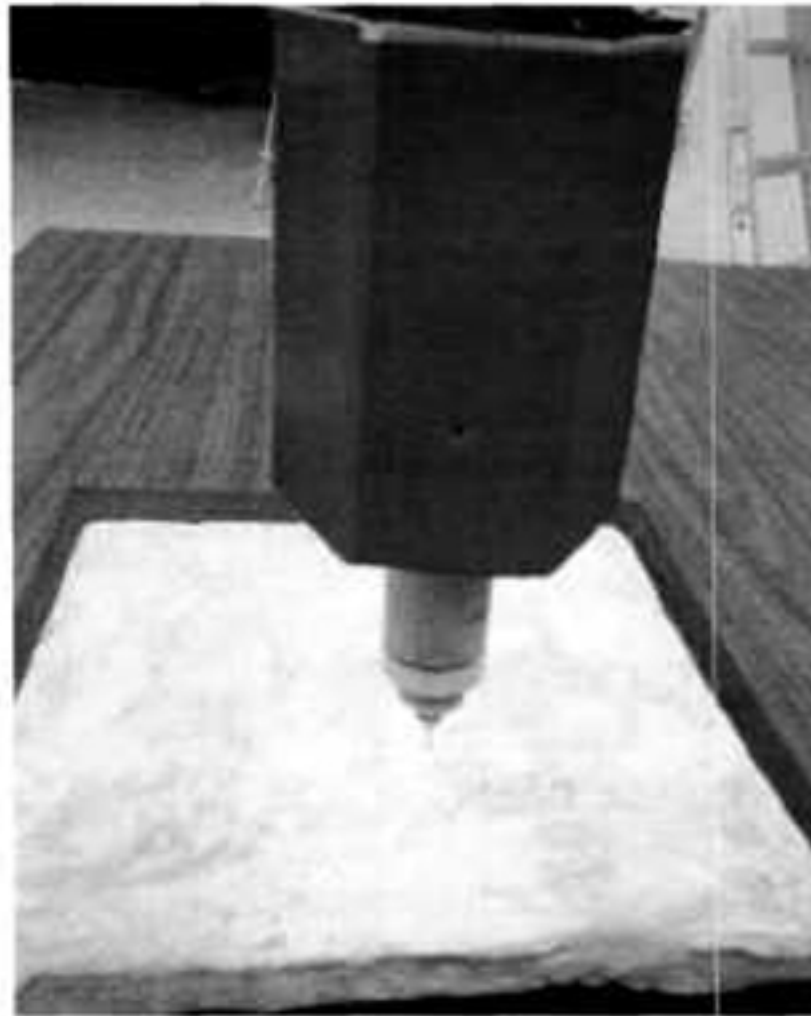


Figura 57. Robot realizando una marca sobre la superficie

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes regiones mencionadas anteriormente. En la Figura 58 se muestran los resultados de la región izquierda inferior. En cada una de las figuras relacionadas a estos experimentos, se ilustran los errores absolutos en cada eje y la magnitud del vector de error formado por todos los ejes.

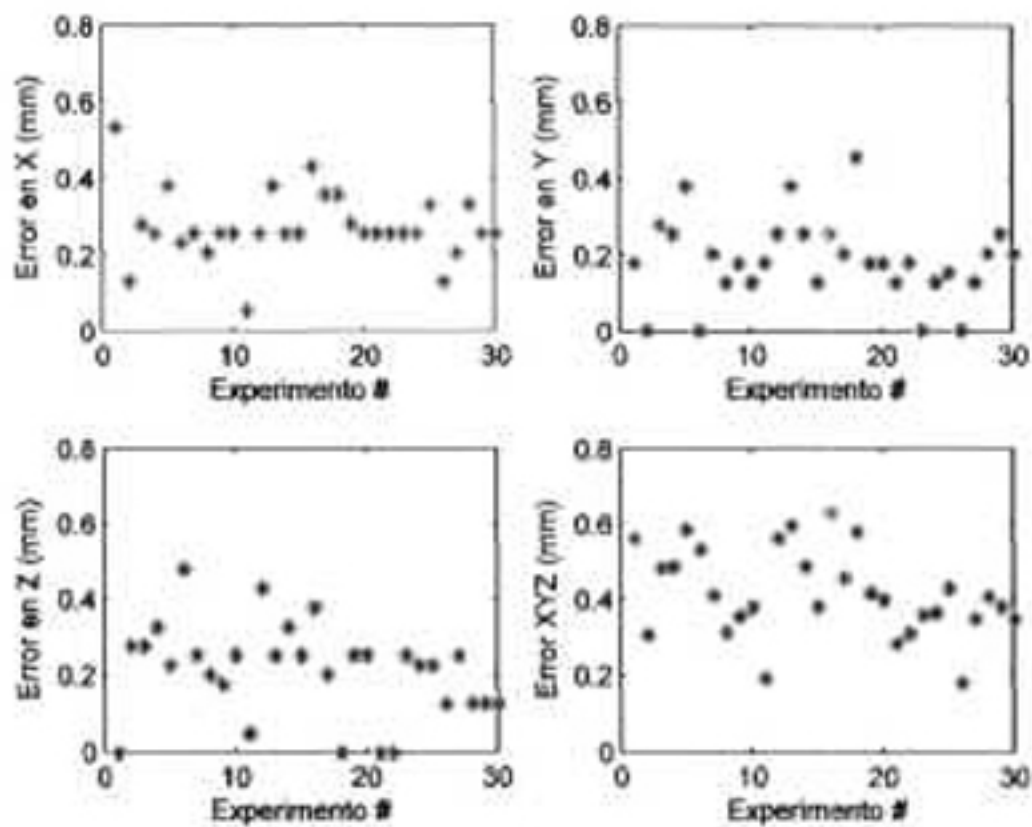


Figura 58. Errores de posicionamiento en la región izquierda inferior

En la Figura 59 se muestran los resultados de la región izquierda superior.

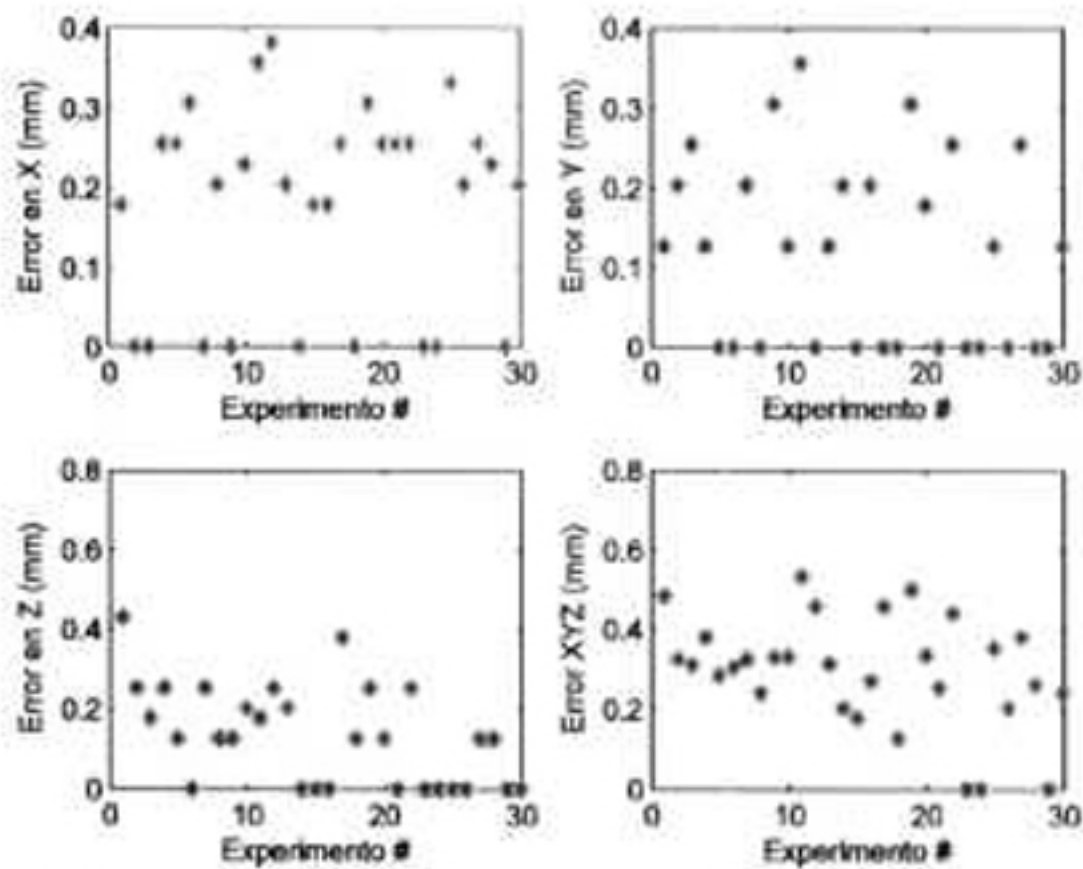


Figura 59. Errores de posicionamiento en la región izquierda superior

En la Figura 60 se muestran los resultados de la región central inferior

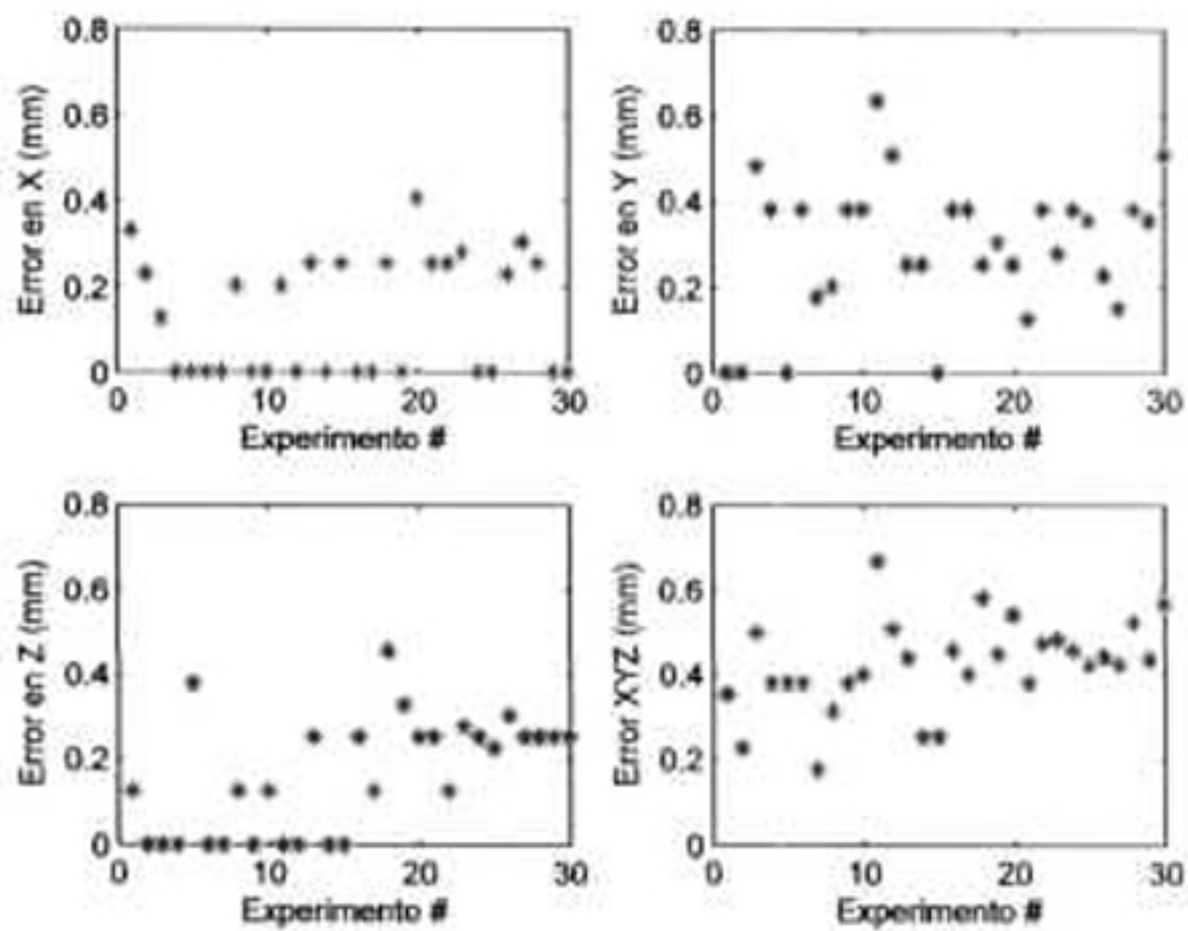


Figura 60. Errores de posicionamiento en la región central inferior

En la Figura 61 se muestran los resultados de la región central superior

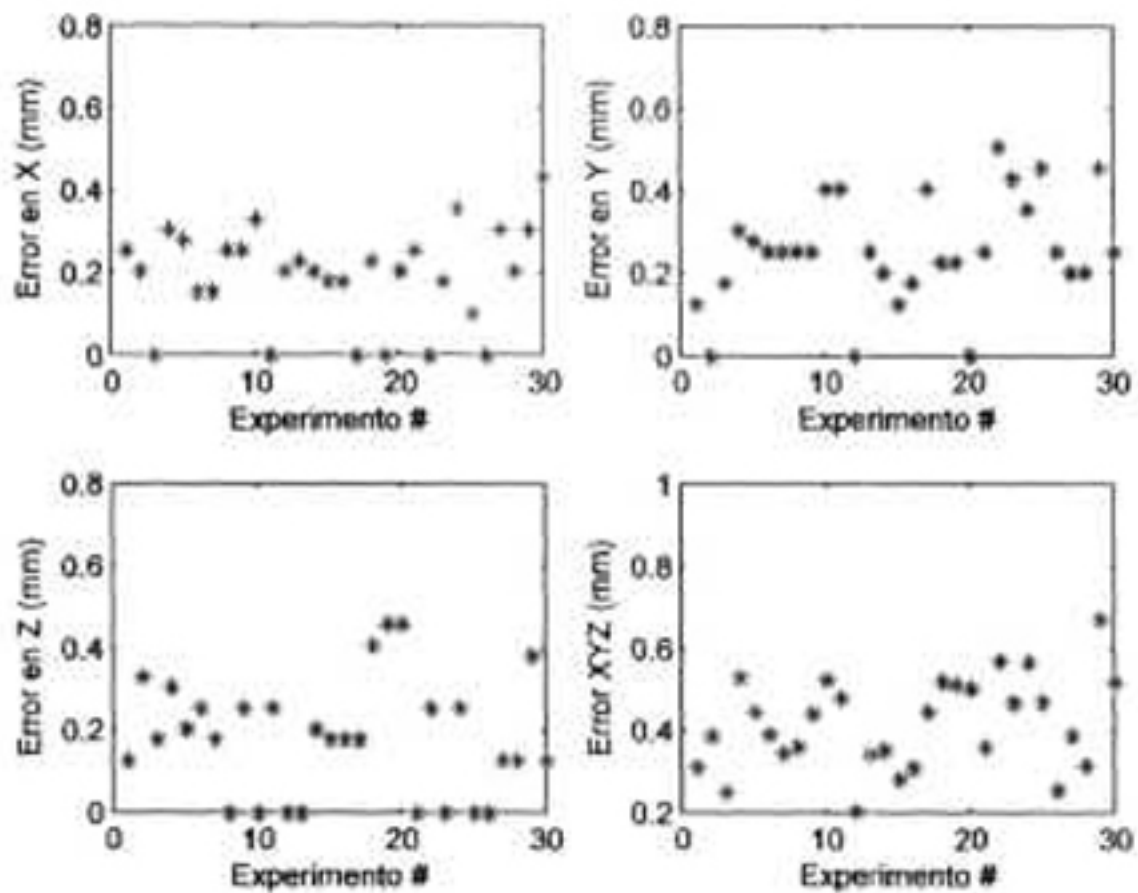


Figura 61. Errores de posicionamiento en la región central superior

En la Figura 62 se muestran los resultados de la región derecha inferior

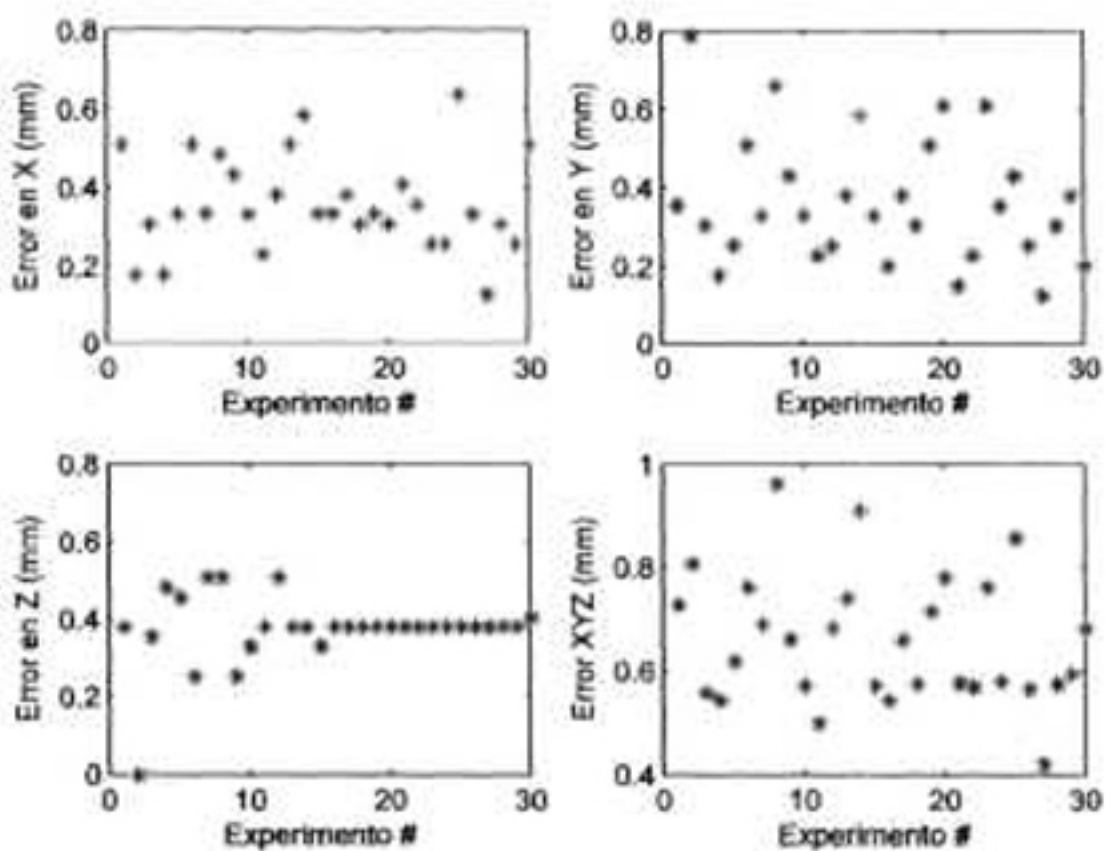


Figura 62. Errores de posicionamiento en la región derecha inferior

En la Figura 63 se muestran los resultados de la región derecha superior

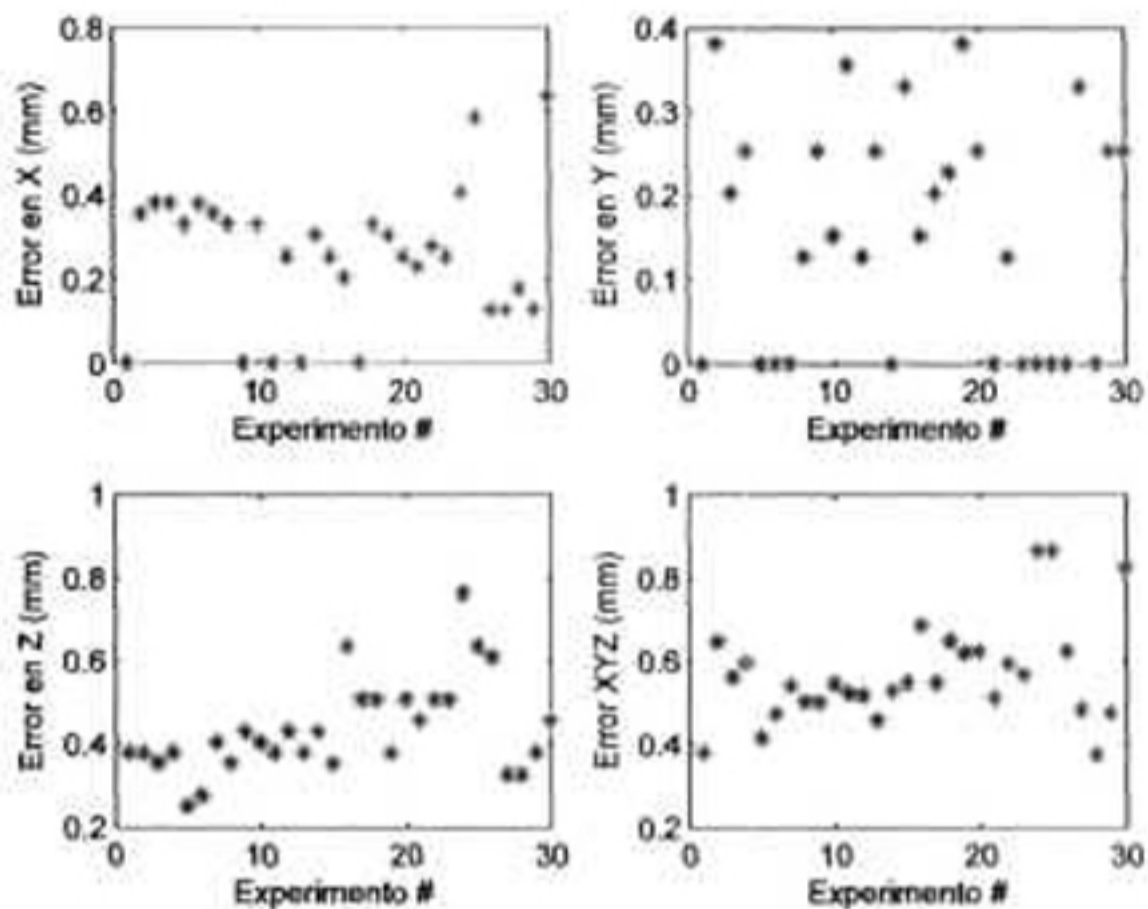


Figura 63. Errores de posicionamiento en la región derecha superior

En la Figura 64 se muestran los resultados obtenidos en la región central de un plano ubicado aproximadamente a 20 cm por encima del plano usado para las pruebas anteriores.

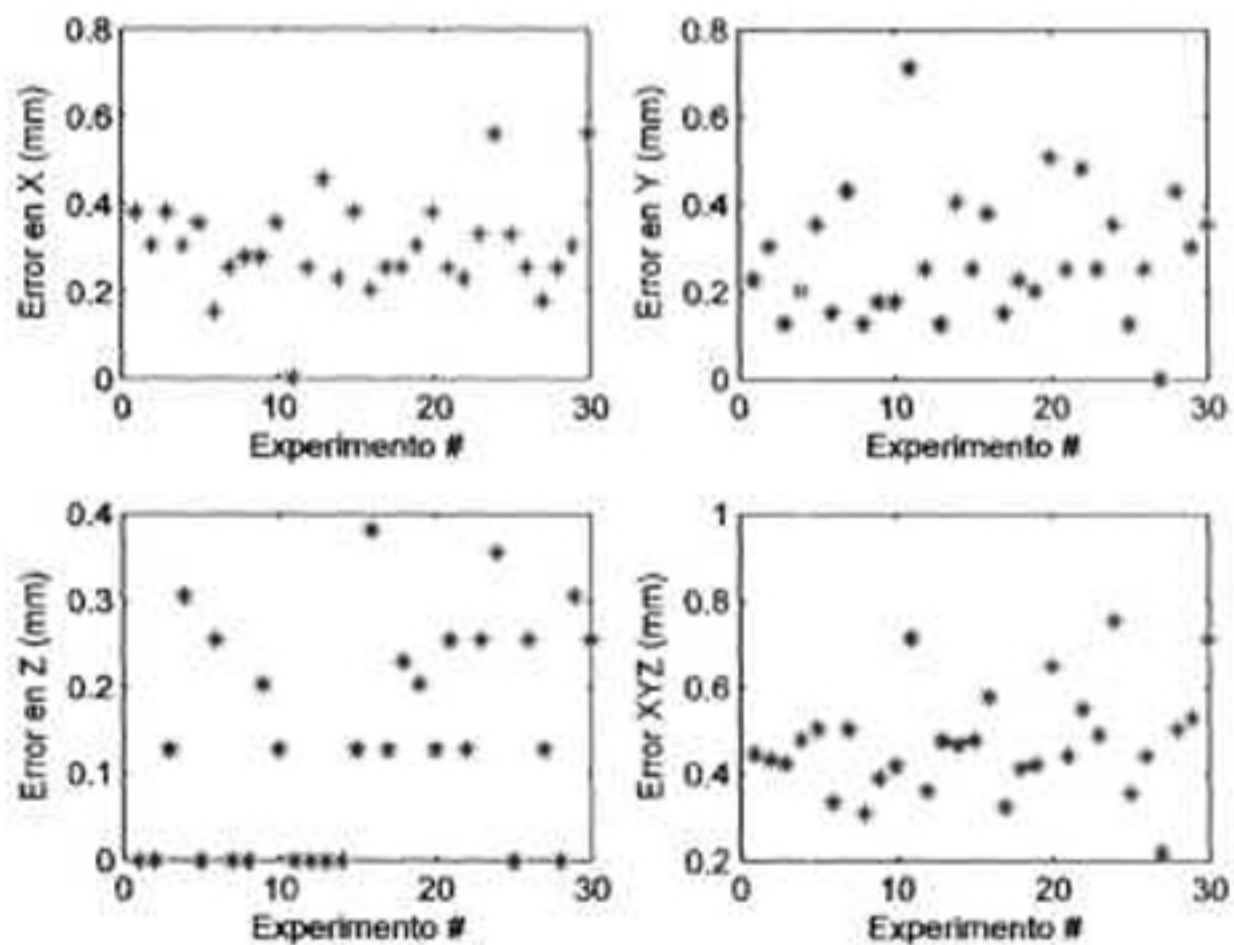


Figura 64. Errores de posicionamiento en el segundo nivel

En la Tabla 12 se muestran los resultados estadísticos más importantes de los experimentos.

Tabla 12. Resultados importantes de los experimentos de posicionamiento

Dato	Valor
Mínimo	0.0000 mm
Máximo	0.9229 mm
Promedio	0.4638 mm
Desviación Estándar	0.1616 mm

Como puede observarse de la Tabla 12, el error de posicionamiento máximo resulta ser menor a 1 mm. Considerando que el robot está diseñado para realizar tareas de corte con plasma, este resultado es adecuado a esta maniobra industrial, ya que el robot funde aproximadamente 1 mm de material al realizar el corte.

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo de tesis se creó y fundamentó una técnica libre de calibración para incrementar el campo visual y, en consecuencia, el espacio de trabajo de un manipulador industrial controlado por visión. Dicha técnica emplea cámaras montadas sobre plataformas giratorias, las cuales se mantienen fijas durante la ejecución de una maniobra. Además, cabe mencionar que la relación entre espacio físico y su correspondiente resolución de la imagen se mantiene constante en toda la amplitud del espacio de trabajo.

Se diseñó, desarrolló, implementó y probó un algoritmo para determinar los ángulos de rotación de las plataformas giratorias, el cual se basa en teoría de estimación al igual que la técnica de control del manipulador, denominada manipulación en espacio de cámara. La aportación más importante de este algoritmo es que puede prescindir de sensores de posición para medir dichos ángulos. Esta es una ventaja importante pues una plataforma que cuenta con sensores de posición resulta un tanto más costosa en comparación con una plataforma de arquitectura menos sofisticada. Además, requiere de una rutina de calibración debido a los sensores, lo que contrasta con la técnica propuesta en este trabajo.

En cuanto al modelado de la plataforma giratoria, se utilizó un modelo relativamente simple de tal forma que no se requieren las medidas exactas de la arquitectura, por lo que el método resulta robusto en este aspecto. Esto contrasta con otras técnicas de visión, donde se requiere un modelado exacto de la unidad, implicando con ello un tipo de calibración.

Como se mencionó anteriormente, resulta crítica la evaluación de los parámetros de cámara, ya que son necesarios para establecer la correspondencia entre el espacio físico observado y su proyección en espacio de imagen. La característica principal de esta técnica es que, tomando una sola muestra de una marca visual artificial, se hace el ajuste de todos los parámetros de visión en la nueva orientación de la cámara. Dicho ajuste es válido de forma local y se logra debido a que la distancia focal se mantiene constante, independientemente de la orientación de la cámara, como lo muestran los resultados de los experimentos. Se comparó la validez de los parámetros ajustados contra los que se obtienen con una trayectoria pre-planeada en la nueva orientación y se obtuvieron resultados confiables. Esto se afirma por que la máxima variación correspondió a un 1.74 % en uno de los parámetros. La ventaja de conocer los parámetros a través de una técnica de ajuste es el tiempo en que se realizan las operaciones de cómputo, pues este tiempo es muy pequeño en comparación con la ejecución de una trayectoria pre-planeada. Además, con el ajuste, es posible diseñar un programa computacional para que el manipulador realice tareas sobre una superficie amplia.

Durante la implementación del método de ajuste de parámetros de visión propuesto en este trabajo surgieron algunas consideraciones especiales. Por ejemplo, para realizar una tarea de posicionamiento, fue necesario descartar la información histórica que almacena el método CSM en unas matrices llamadas matrices de momentos, presentadas en la sección 2.4.1. Esto es debido a que la información almacenada no es compatible con la nueva orientación de cámara. Como se puede ver en el desarrollo de este trabajo, se requiere de información almacenada en las matrices de momentos para lograr la convergencia del algoritmo de estimación de parámetros de cámara. Fue por esta razón por la que se generó información artificial para completar los requisitos del algoritmo. Dentro del capítulo

correspondiente a los resultados experimentales, se mencionan las restricciones para generar dicha información artificial. Se notó la mejoría en el parecido de los parámetros de cámara utilizando dicha información, con respecto a los calculados con una trayectoria pre-planeada. En esta ocasión, la máxima diferencia correspondió al 0.84 % en uno de los parámetros. Cabe mencionar que dicho acercamiento facilitó el cálculo de la correspondencia de las marcas visuales en espacio físico y su respectiva ubicación en espacio de imagen.

Los resultados en los experimentos de posicionamiento mostraron que la técnica desarrollada en el presente trabajo tiene los errores máximos de posicionamiento en distancias menores a 1 mm independientemente de la región de trabajo. Dichos errores son permisibles en una tarea de manufactura con manipuladores industriales que realicen corte con plasma o soldadura, ya que el grueso de los listones de soldadura es mayor a esta dimensión. Asimismo, el ancho del material fundido por el corte por plasma resulta ser mayor también.

Por otro lado, para lograr la ejecución de los experimentos, se desarrolló una interfaz visual en Visual Studio 2008, a diferencia de trabajos anteriores en los que el desarrollo se hacía en versiones más antiguas. Además, se pusieron a punto las cámaras sobre plataformas rotatorias, incluyendo el desarrollo de una pequeña tarjeta de conversión de protocolos de comunicación.

Con respecto a trabajos anteriores, se implementó una técnica diferente de cálculo de centroides de las manchas en la imagen. Dicha técnica aproxima una mancha a una elipse, basándose en teoría de estimación. Esta técnica se utilizó, principalmente, para calcular las coordenadas de los centroides pertenecientes a las marcas visuales artificiales puestas sobre la antorcha de trabajo del manipulador, ya que se asemejan a un círculo. Sin embargo, no es aplicable a la detección de un centroide generado por un punto láser sobre una superficie, ya que en ocasiones difiere mucho de una elipse y arroja resultados no deseables.

Otra aportación del presente trabajo fue el cálculo de los siete parámetros de cámara correspondiente al modelo de perspectiva. En el presente trabajo se implementó con éxito el algoritmo de bisección aplicado a una pendiente, como se muestra en el capítulo correspondiente a CSM. Además, se diseñó e implementó con éxito la forma de lograr la correspondencia de las coordenadas tridimensionales de las marcas visuales artificiales de la antorcha, con su proyección en espacio de imagen. En trabajos anteriores se utilizaba el producto escalar de vectores para determinar cuáles marcas son visibles para una cámara y, en el presente trabajo, esta determinación se hace encontrando la columna de marcas visuales más cercana a la cámara.

Con todo lo mencionado anteriormente, el presente trabajo de tesis complementa con varias técnicas y algoritmos al método CSM desarrollado hasta ahora. Además, logra una contribución original a las técnicas de control de robots basadas en visión, ya que implementa con éxito el uso de cámaras giratorias no calibradas.

Trabajo Futuro

Uno de los experimentos que valdría la pena realizar, sería la caracterización de superficies amplias usando sólo 2 cámaras giratorias. Además realizar una tarea completa de corte por plasma o soldadura sobre una de esas superficies. Una tarea de este tipo implica el seguimiento preciso de trayectorias y requiere el desplazamiento del campo de visión de las cámaras a nuevas regiones del espacio de trabajo del robot.

Otro posible experimento es el de fusionar este método para incrementar el campo visual del robot con otros métodos. Esta fusión es factible de realizar debido a la disponibilidad de material y equipo en el Laboratorio de Robótica mencionado anteriormente, por ejemplo, con múltiples sensores dispuestos de tal manera que abarquen la totalidad del espacio de trabajo, y las cámaras rotatorias. Será interesante comparar la precisión alcanzada por estos dos métodos por separado y la unión de ambos.

Un posible trabajo será el de fusionar este método de visión con uno que incluya múltiples sensores, por ejemplo, sensores de fuerza para realizar el seguimiento sobre superficies arbitrarias y así, realizar tareas de manufactura en espacios de trabajo amplios.

Otro experimento que conviene realizar es utilizar cámaras montadas sobre plataformas giratorias que cuenten con sensores de posición para medir los ángulos de rotación y, así, comparar la diferencia entre los ángulos estimados con el algoritmo presentado en el presente trabajo y los ángulos de rotación medidos. Aunque, como se mencionó anteriormente, el método propuesto resulta robusto ante variaciones en estas cantidades. Además, se podría realizar la comparación del método propuesto y el modelo de cámara actual, con el método anterior de cámaras móviles con CSM y el modelo ortográfico. Uno de los parámetros de comparación, es la precisión que alcanza cada uno de estos métodos. Otro es la diferencia en tiempos de procesamiento y ejecución de una tarea de posicionamiento con cámaras móviles, desde el proceso de estimación de parámetros en una posición previa a la nueva orientación de cámara, hasta la culminación de la maniobra con las cámaras en la nueva orientación.

Finalmente, sería interesante extrapolar el método presentado a robots móviles, es decir, a sistemas no holonómicos. Debido a que el método propuesto no requiere de calibración para las cámaras móviles, resultaría útil para un sistema de navegación de robots exploradores en otros planetas, pues representaría un gran ahorro en tiempo de calibración, incrementando así las posibilidades de éxito de la maniobra.

APÉNDICE

PANTALLAS DE LA INTERFAZ VISUAL



Figura 65. Ventana de control manual del manipulador



Figura 66. Ventana de control manual de las plataformas giratorias

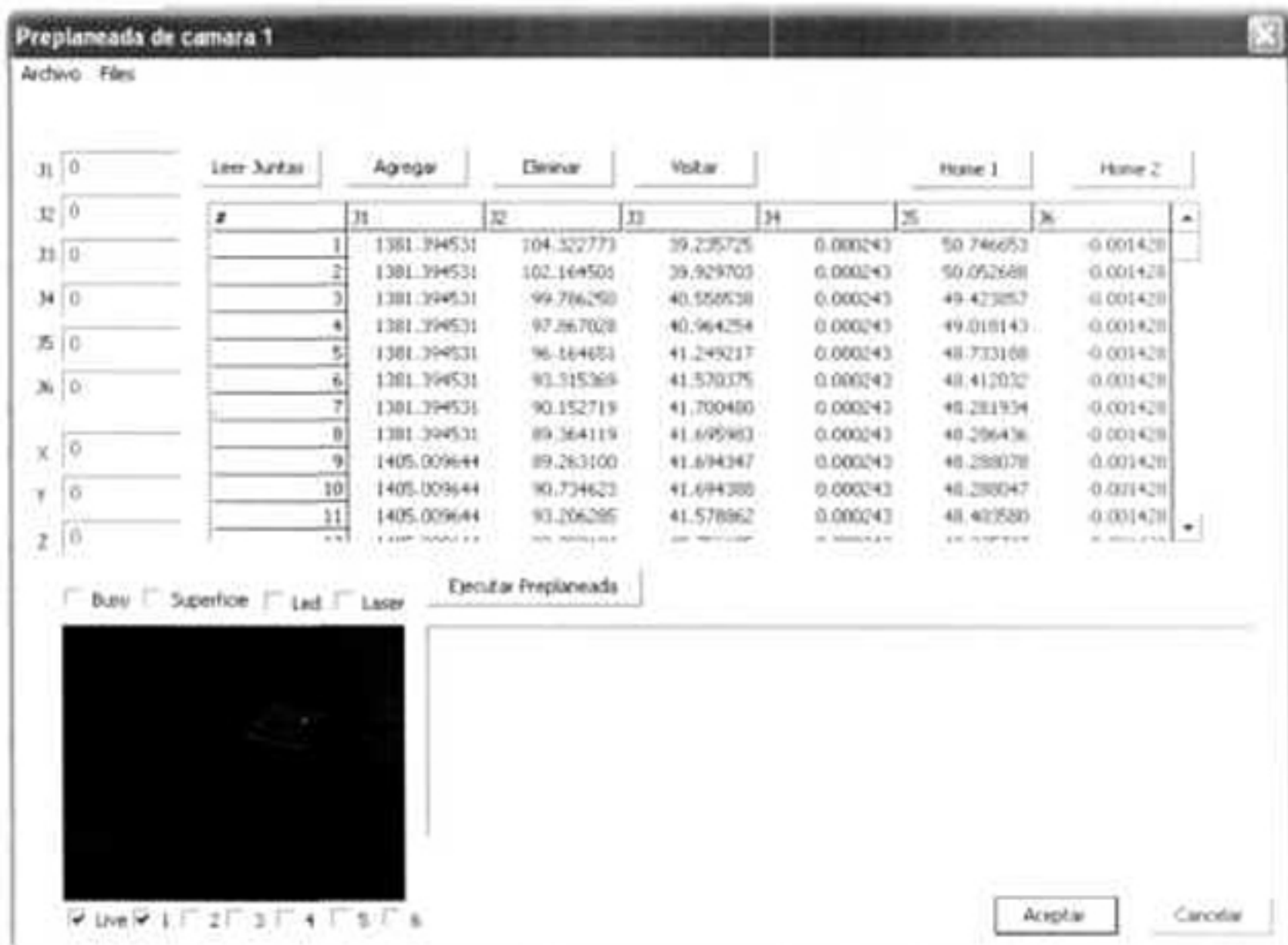


Figura 67. Ventana de configuración de trayectorias pre-planeadas



Figura 68. Ventana principal de la interfaz visual

TARJETA DE CONVERSIÓN RS-232 A RS-485

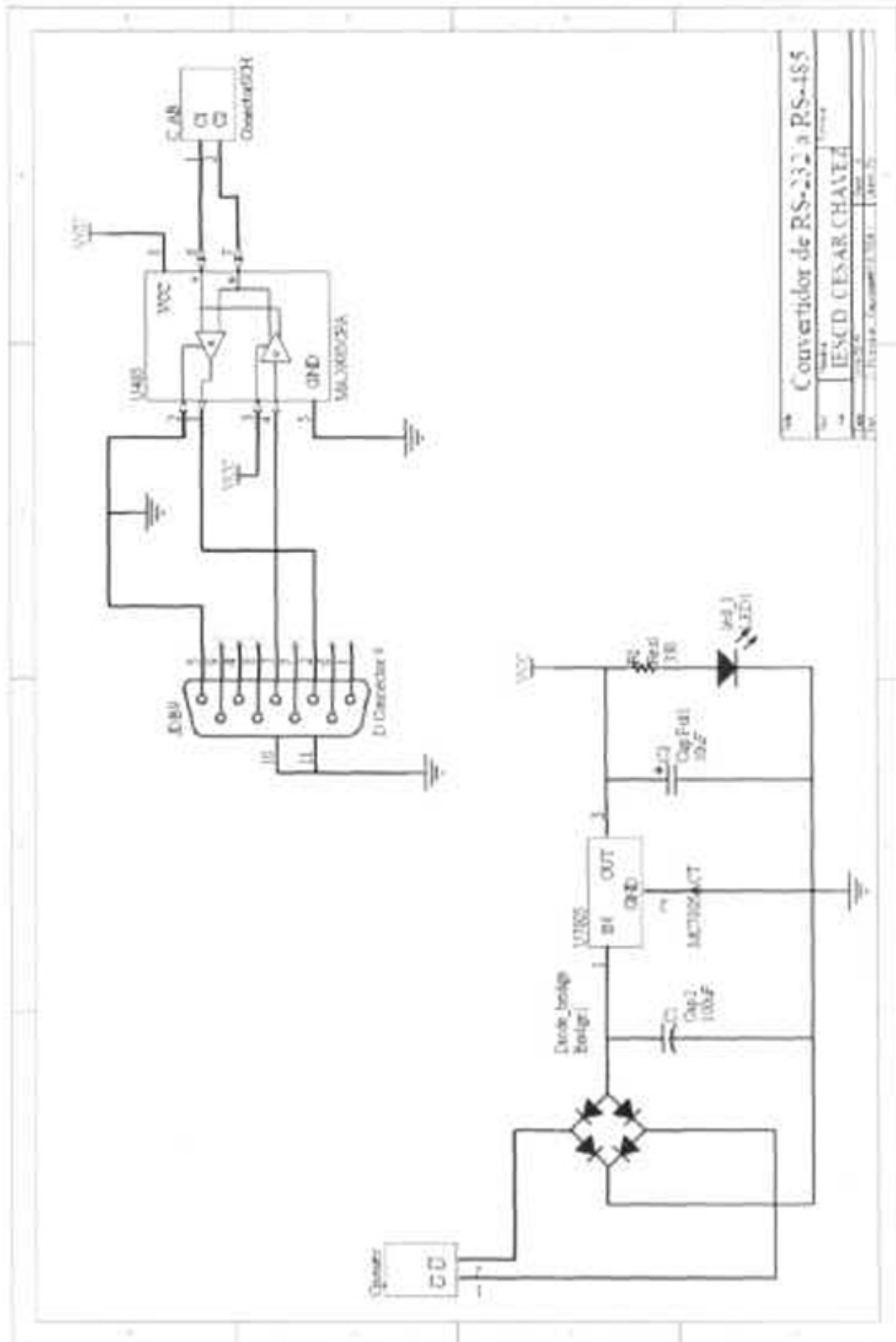


Figura 69. Esquema de conexión de la tarjeta de conversión RS-232 a RS-485

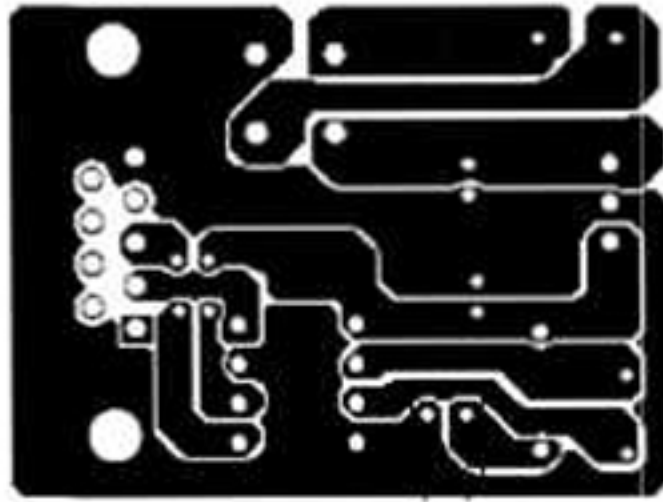


Figura 70. Impreso de la cara inferior de la tarjeta de conversión RS-232 a RS-485

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Uso de lentes para incrementar el campo visual.....	2
Figura 2. Uso de múltiples cámaras para incrementar el campo visual.....	2
Figura 3. Uso de múltiples espejos para incrementar el campo visual.....	3
Figura 4. Cámara montada en una plataforma giratoria.....	3
Figura 5. Robot FANUC M-16iB.....	4
Figura 6. Relación de coordenadas tridimensionales y bidimensionales de las marcas visuales artificiales.....	8
Figura 7. Marcas visuales artificiales colocadas alrededor de la herramienta de corte.....	8
Figura 8. Detección de bordes.....	9
Figura 9. Diagrama de flujo para reconocer los contornos de manchas en una imagen.....	10
Figura 10. Modelo cinemático del Robot FANUC M16iB.....	12
Figura 11. Emulación de la configuración paralelogramo en el robot FANUC M-16iB.....	15
Figura 12. Sistemas coordenados asociados al modelo de cámara de perspectiva.....	17
Figura 13. Trayectoria pre-planeada y su proyección en espacio de imagen.....	20
Figura 14. Convergencia típica de los 6 parámetros de visión.....	23
Figura 15. Proceso de determinación de los parámetros de cámara.....	24
Figura 16. Curva típica de f vs $J(P)$	25
Figura 17. f vs pendiente de $J(P)$	25
Figura 18. Un punto láser visto en 2 cámaras.....	26
Figura 19. Diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento.....	28
Figura 20. Convergencia típica de los valores de junta.....	29
Figura 21. Distribución de las marcas visuales colocadas sobre la herramienta del manipulador.....	30
Figura 22. Superposición de las marcas luminosas en espacio de imagen.....	32
Figura 23. Diagrama de flujo para empatar las marcas visuales en la antorcha.....	33
Figura 24. Sistemas coordenados implicados en la determinación de las marcas visibles.....	35
Figura 25. Ampliación del campo visual usando cámaras montadas sobre plataformas giratorias.....	36
Figura 26. Sistemas coordenados asociados a la unidad pan/tilt PTS-302.....	38
Figura 27. Diagrama de flujo para realizar el ajuste de parámetros de cámara realizando una búsqueda de los ángulos de rotación.....	40
Figura 28. Estimación de la distancia focal antes y después del movimiento de la plataforma pan/tilt.....	43
Figura 29. Convergencia típica en la estimación de los ángulos de rotación.....	46
Figura 30. Sincronía en los protocolos RS-232 y RS-485.....	48
Figura 31. 3OneData USB485C.....	50
Figura 32. Tarjeta de conversión RS-232 a RS-485.....	50
Figura 33. Diagrama de conexión de la computadora y las cámaras.....	50
Figura 34. Graduación de las unidades pan/tilt.....	51
Figura 35. Diagrama de flujo para realizar los experimentos de estimación de ángulos de rotación, para diferentes orientaciones de la cámara.....	52
Figura 36. Diagrama de flujo para realizar una prueba de análisis de repetibilidad del algoritmo de estimación de ángulos de rotación.....	53
Figura 37. Experimento de repetibilidad en la estimación de ángulos de rotación.....	54
Figura 38. Experimento de repetibilidad en la estimación de ángulos de rotación.....	54
Figura 39. Diagrama de flujo para realizar el experimento de comparación de parámetros de cámara antes y después de la reorientación.....	55

Figura 40. Orientaciones de la cámara para la verificación de los parámetros mediante el procedimiento propuesto.....	56
Figura 41. Diagrama de flujo de una tarea de posicionamiento con cámaras móviles.....	57
Figura 42. Información artificial: puntos ubicados aleatoriamente arriba y debajo de un plano.....	59
Figura 43. Información artificial: espirales esféricas alrededor de la herramienta.....	59
Figura 44. Información artificial: muestras correspondientes a una trayectoria pre-planeada.....	60
Figura 45. Información artificial: muestras aleatorias distribuidas dentro del espacio de trabajo.....	60
Figura 46. Información artificial: muestras aleatorias uniformemente distribuidas dentro de una esfera.....	61
Figura 47. Información Artificial: configuraciones "codo abajo" aleatorias uniformemente distribuidas en el espacio de trabajo.....	62
Figura 48. Diagrama de flujo para determinar la cantidad mínima de datos artificiales.....	64
Figura 49. Regiones de las pruebas de posicionamiento con cámaras móviles.....	65
Figura 50. Barra de plastilina usada en los experimentos de posicionamiento.....	65
Figura 51. Apuntador láser colocado en la estructura móvil del manipulador.....	66
Figura 52. Aguja colocada en la punta de la herramienta.....	66
Figura 53. Vernier usado para medir los errores de posicionamiento.....	68
Figura 54. Medición del error de posicionamiento.....	68
Figura 55. Robot FANUC M16iB proyectando un punto láser sobre la superficie de trabajo.....	69
Figura 56. Proyección de un punto láser sobre la superficie de trabajo.....	69
Figura 57. Robot realizando una marca sobre la superficie.....	70
Figura 58. Errores de posicionamiento en la región izquierda inferior.....	70
Figura 59. Errores de posicionamiento en la región izquierda superior.....	71
Figura 60. Errores de posicionamiento en la región central inferior.....	71
Figura 61. Errores de posicionamiento en la región central superior.....	72
Figura 62. Errores de posicionamiento en la región derecha inferior.....	72
Figura 63. Errores de posicionamiento en la región derecha superior.....	73
Figura 64. Errores de posicionamiento en el segundo nivel.....	73
Figura 65. Ventana de control manual del manipulador.....	78
Figura 66. Ventana de control manual de las plataformas giratorias.....	78
Figura 67. Ventana de configuración de trayectorias pre-planeadas.....	79
Figura 68. Ventana principal de la interfaz visual.....	80
Figura 69. Esquema de conexión de la tarjeta de conversión RS-232 a RS-485.....	81
Figura 70. Impreso de la cara inferior de la tarjeta de conversión RS-232 a RS-485.....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del robot FANUC M16iB.....	13
Tabla 2. Dimensiones de la herramienta.....	13
Tabla 3. Ubicación de cada centroide de LED con respecto al sistema coordinado unido a la herramienta.....	31
Tabla 4. Diferencias del proyecto presente con respecto a trabajos anteriores.....	37
Tabla 5. Protocolos de cámara de seguridad disponibles.....	49
Tabla 6. Formato de los mensajes en el protocolo PELCO-P.....	49
Tabla 7. Formato de la instrucción pan/tilt.....	50
Tabla 8. Comparación de la medición y la estimación del ángulo α	51
Tabla 9. Comparación de la medición y la estimación de β	51
Tabla 10. Comparación de parámetros: Estimados usando una trayectoria pre-planeada contra los ajustados a partir de la estimación de ángulos.....	56
Tabla 11. Comparación de parámetros: Obtenidos con pre-planeada contra los actualizados usando información artificial y una observación.....	63
Tabla 12. Resultados importantes de los experimentos de posicionamiento.....	74

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jonathan Courbon, Youcef Mezouar, Laurent Eck, Philippe Martinet. "A Generic Fisheye camera model for robotic applications". Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2007. pp 1683-1688
- [2] Shree K. Nayar, Venkata Peri. "Folded Catadioptric Cameras". Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. pp 217-223
- [3] Charles C. Kemp, Cressel D. Anderson, Hai Nguyen Alexander J. Trevor, Zhe Xu. "A Point-and-Click Interface for the Real World: Laser Designation of Objects for Mobile Manipulation". Proceedings of the HRI'08, 2008. pp 241-248
- [4] Emilio Jorge González Galván, Sergio Rolando Cruz Ramirez, Hector Martín Durán García. "Aplicación de sensores múltiples para el posicionamiento tridimensional de robots usando visión". Interciencia, noviembre, año/vol 26, número 011. pp 541-546
- [5] Emilio J. González-Galván, Sergio R. Cruz Ramirez, Michael J. Seelinger, J. Jesús Cervantes-Sánchez. "An efficient multi-camera, multi-target scheme for the three-dimensional control of robots using uncalibrated vision". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 19 (5), Agosto 2003. pp 387-400
- [6] Theodore Pachidis, John Lygouras. "A Pseudo Stereo Vision System as a Sensor for Real Time Path Control of a Robot". Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement, Technology Conference, 2002. pp 1589-1594
- [7] Sooyeong Yi, Narendra Ahuja. "An Omnidirectional Stereo Vision System Using a Single Camera". Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2006. pp 861-865
- [8] Kar-Han Tan, Hong Hua, Narendra Ahuja. "Multiview Panoramic Cameras using a mirror pyramids". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 26, No. 7, July 2004. pp 941-946
- [9] Eduardo L. L. Cabral, José C. de Souza Junior, Marcos C. Hunold. "Omnidirectional Stereo Vision with a Hiperbolic Double Lobed Mirror". Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2004. pp 1-9
- [10] Alfred M. Bruckstein, Thomas J. Richardson. "Omniview Cameras with Curved Surface Mirrors". Proceedings of the IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, 2000. pp 79-84
- [11] Theodore Pachidis, John Lygouras. "Pseudo Stereo Vision System: Modifications for Accurate Measurements in 3-D Space Using Camera Calibration". Proceedings of the Sican/02 - Sensors for Industry Conference, 2002. pp 66-70
- [12] Theodore P. Pachidis, John N. Lygouras. "Pseudostereo-Vision System: A Monocular Stereo-Vision System as a Sensor for Real-Time Robot Applications". Proceedings of the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL. 56, NO. 6, December 2007. pp 2547-2560
- [13] H. Zhong, W. F. Sze, Y. S. Hung. "Reconstruction from Plane Mirror Reflection". Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2006. pp 715-718

- [14] Ram Krishan Kumar, Adrian Ilie, Jan-Michael Frahm, Marc Pollefeys. "Simple Calibration of Non-overlapping Cameras with a Mirror". Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2008. pp 1-7
- [15] El Mustapha Mouaddib, Ryusuke Sagawa, Tomio Echigo, Yasushi Yagi. "Stereovision with a Single Camera and Multiple Mirrors". Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. pp 800-805
- [16] Yuuki Uranishi, Mika Naganawa, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. "Whole Shape Measurement System Using a Single Camera and a Cylindrical Mirror". Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2006. pp 866-869
- [17] Hyukseong Kwon, Johnny Park, Avinash C. Kak. "A New Approach for Active Stereo Camera Calibration". Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma, 2007. pp 3180-3185
- [18] Dingrui Wan, Jie Zhou, David Zhang. "A spherical rectification for dual PTZ camera system". Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2007. pp 1-777 - 1-780
- [19] Chandra Sekhar Gatra, Ron Lumia, John Wood, Greg Starr. "Calibrating Pan-Tilt Cameras in Robot Hand-Eye Systems Using a Single Point". Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007. pp 3186-3191
- [20] James Davis, Xing Chen. "Calibrating pan-tilt cameras in wide-area surveillance networks". Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2003. pp 144-150
- [21] Behrooz Kamgar-Parsi, Roger D. Eastman. "Calibration of a Stereo System with Small Relative Angles". Proceedings of the Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1988. pp 44-51
- [22] Alaa E. Abdel-Hakim, Aly A. Farag. "Robust Virtual Forces-Based Camera Positioning Using a Fusion of Image Content and Intrinsic Parameters". Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion (FUSION), 2005. pp 522-529
- [23] Benoit Louvat, Nicolas Marchand, Laurent Bonnaud and Gerard Bouvier, "Upsampling visual servoing for a pan and tilt camera". Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2007. pp 195-200
- [24] Antonio Cárdenas, Bill Goodwine, Steven Skaar, Mike Seelinger. "Vision-Based Control of a Mobile Base and On-Board Arm". The International Journal of Robotics Research Vol. 22, No. 9, September 2003. pp. 677-698
- [25] Emilio J. González-Galván, Michael J. Seelinger. "Efficient Camera-Space Target Disposition in a Matrix of Moments Structure Using Camera-Space Manipulation". The International Journal of Robotics Research. Vol. 18 No. 8. August 1999. pp 809-818
- [26] Emilio J. González Galván, Steven B. Skaar. "Efficient Camera-Space Manipulation using Moments". Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, 1996. pp 3407-3412

- [27] Michael Seelinger, John-David Yoder, Eric T. Baumgartner, Steven B. Skaar. "High-Precision Visual Control of Mobile Manipulators". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 6, December 2002. pp 957-965
- [28] Steven B. Skaar, Issac Yalda-Mooshabad, William H. Brockman. "Nonholonomic Camera-Space Manipulation". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 4, August 1992. pp 464-479.
- [29] M. Seelinger, E. González-Galván, M. Robinson, S. Skaar. "Towards a robotic plasma spraying operation using vision". IEEE Robotics & Automation Magazine, December 1998. pp 33-38
- [30] Yejun Wei, Steven B.Skaar, Bill Goodwine. "Vision-Based Stratified Robotic Manipulation". Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland, 2002. pp 1638-1644
- [31] Ambrocio Loredó Flores. "Desarrollo de un algoritmo de control de robots basado en visión para el seguimiento óptimo de trayectorias", Tesis de Maestría, UASLP CIEP-FI, Noviembre 2002
- [32] Ambrocio Loredó Flores. "Optimización de tareas de manufactura industrial asistidas con robots", Tesis de Doctorado, UASLP CIEP-FI. Agosto 2007
- [33] Emilio J. González Galván. "Application of servoable cameras in three-dimensional camera-space manipulation", Ph.D. dissertation, Department of Aerospace and Mechanical Engineering. University of Notre Dame, Indiana. July 1995
- [34] I.N. Bronshtein, K.A. Semendyayev, G. Musiol, H. Muehlig. "Handbook of Mathematics". Springer. 5th Edition. 2007. Ed. MIR
- [35] Luis A. Raygoza Pérez, Emilio J. González- Galván, Ambrocio Loredó-Flores, Jorge J. Pastor, Eric T. Baumgartner. "An enabling camera model for non-calibrated, vision-based, robot-positioning tasks". Pendiente de publicación
- [36] Junkins JL. "An introduction to Optimal Estimation of Dynamical Systems", The Netherlands: Aalphen Aan Den Rijn, Sitjhoff & Noordhoff, 1978.
- [37] Rubén Darío González Lizcano. "Control de posición de un robot industrial sobre superficies arbitrarias utilizando manipulación en espacio de cámara", Tesis de Maestría, UASLP CIEP-FI, Octubre 2000
- [38] www.commfront.com. Información del protocolo PELCO-P.

