



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
Unidad Querétaro

Posgrado en Tecnología Avanzada

Estudio de la rigidez experimental del robot paralelo Parallax LKF-2040.

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

PRESENTA

Abraham González Hernández

Director de Tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 12:00 horas del día 2 del mes de Diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Querétaro para examinar la tesis titulada:
Estudio de la rigidez experimental del robot paralelo Parallax LKF-2040

Presentada por el alumno:

<u>González</u> Apellido paterno	<u>Hernández</u> Apellido materno	<u>Abraham</u> Nombre(s)
Con registro:		
B	0	9 1 6 4 5

aspirante de:

Maestría

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Dr. Reydezel Torres Martínez

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán

Dr. Alberto Traslósheros Michel

M.C. Maximiano Francisco Ruíz Torres

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
CIENCIA APLICADA
Y TECNOLOGÍA AVANZADA
UNIDAD QUERÉTARO
DIRECCIÓN

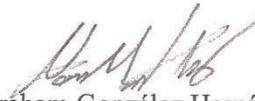


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Querétaro, Oro el día 02 del mes Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe Abraham González Hernández alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B091645, adscrito a CICATA- Unidad Querétaro, IPN, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Eduardo Castillo Castañeda y cede los derechos del trabajo intitulado Estudio de la rigidez experimental del robot paralelo Parallax LKF-2040, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección CICATA – Unidad Querétaro, IPN, Cerro Blanco #141, Colinas del Cimatarío, C.P. 76090, Querétaro, Oro, México. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Abraham González Hernández

Nombre y firma

**Estudio de la rigidez experimental del robot
paralelo Parallax LKF-2040**

Abraham González Hernández

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
Instituto Politécnico Nacional Querétaro, México.

Agradecimientos

A mis padres, mis hermanos y familia, por estar siempre a mi lado, por creer en mi capacidad para superarme cada día más y por alentarme en los momentos de flaqueza.

A mi asesor y a mis profesores, por que brindaron su tiempo para cederme parte de sus conocimientos y por ayudarme a prepararme para salir airoso de este reto.

A todos mis compañeros, que ayudaron en mi formación personal y profesional.

Al personal, por su dedicación al guiarme en todo el proceso de mi estadía.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado a lo largo de mi maestría.

Al ICYT-DF por el apoyo económico brindado para la realización de mi proyecto de tesis.

Al CONCYTEQ por el apoyo económico brindado para la exposición de mi trabajo.

Índice General

Índice General	VI
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	VIII
Resumen.....	IX
Summary.....	X
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Estructura de la tesis	2
Capítulo 2. Antecedentes	4
2.1 Estado del arte.....	4
Capítulo 3. Marco Teórico	8
3.1 Introducción.....	8
3.2 Rigidez en robots paralelos	9
3.3 Visión por computadora.....	9
3.4 Técnicas de visión aplicadas a la robótica	11
3.5 Calibración de cámaras	12
3.6 Rigidez Experimental en robots	16
Capítulo 4. Descripción de la base experimental.....	19
4.1 Robot Parallax LKF-2040	19
4.2 Sistema de visión	23
4.3 Sistema de aplicación de fuerzas en los ejes.	26
4.4 Software de cálculo de desplazamientos.	27
Capítulo 5. Metodología	29
5.1 Obtención de la matriz homogénea de la cámara con respecto al robot.....	29
5.2 Validación de la técnica de medición de desplazamientos por imágenes	34
5.3 Metodología para la obtención de los desplazamientos	42
5.4 Estimación de la rigidez en el espacio de trabajo.....	45
Capítulo 6. Resultados	49
Capítulo 7. Conclusiones	52
Referencias Bibliográficas	53
ANEXOS.....	56

Índice de Figuras

Figura 3.1 Esquemático del robot Parallax LKF-2040	8
Figura 3.2 un vehículos autónomo es capaz de navegar por rutas establecidas.....	11
Figura 3.3 Error promedio de diferentes métodos de calibración de cámaras [19].	12
Figura 3.4 Sistema de medición de desplazamientos de Ceccarelli [9].	17
Figura 3.5 Fuerzas aplicadas sobre la plataforma móvil del robot Parallax LKF-2040	18
Figura 4.1 Parallax LKF-2040	19
Figura 4.2 Articulaciones del robot Parallax LKF-2040	21
Figura 4.3 Actuadores MAXON.....	21
Figura 4.4 Interfaz del usuario ROBWIN	22
Figura 4.5 cámara para la toma de las imágenes del patrón.....	23
Figura 4.6 Software de captura de la cámara.	24
Figura 4.7 patrón en la base de los actuadores.....	25
Figura 4.8 patrón en plataforma móvil	25
Figura 4.9 plataforma para aplicación de fuerzas en los ejes X e Y, en la parte superior se observa el dibujo de la plataforma en CAD, en la parte inferior la plataforma ya construida y montada sobre el trípie.	26
Figura 4.10 captura del menú de opciones del ToolBox de MATLAB "Camera Calibration Toolbox".....	27
Figura 5.1 a) patrón fijo ubicado en la base de motor "uno", b) patrón móvil ubicado en la plataforma móvil.	29
Figura 5.2 Cambio de marco de referencia de la cámara al robot.	30
Figura 5.3 plano seleccionado del cual se obtienen los parámetros extrínsecos.	31
Figura 5.4 Esquemático de las tres bases de los motores del robot Parallax LKF-2040 tipo delta	32
Figura 5.5 Esquemático del Robot Parallax LKF-2040 base del actuador.....	33
Figura 5.5 Primera área seleccionada en la imagen del patrón.	34
Figura 5.6 Segunda área seleccionada en la imagen del patrón.....	35
Figura 5.7 Base utilizada para medición de desplazamientos.....	40
Figura 5.8 Capturas de los desplazamientos realizados.	41
Figura 5.8 Plataforma móvil en un punto específico.....	42
Figura 5.9 Nivelación de la plataforma para aplicar las fuerzas sobre ejes X e Y.....	42
Figura 5.10 patrón de la base del motor visible.	43
Figura 5.11 Patrón de la plataforma móvil visible.....	43
Figura 5.12 Fuerza aplicada sobre eje Z	44
Figura 5.13 Puntos de medición de rigidez en el espacio de trabajo.....	45
Figura 6.1 secuencia de medición de los desplazamientos en los puntos del espacio de trabajo del robot.	50

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 características del actuador.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2 configuración usada en las capturas de las imágenes.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3 Errores obtenidos con área de 2x2 cuadros.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4 Errores obtenidos con área de 3x3 cuadros.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5 Errores obtenidos con área de 4x4 cuadros.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6 Errores obtenidos.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 7 Coordenadas de los puntos donde se estimó la rigidez.</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 8 Parámetros intrínsecos de la cámara (según Toolbox MATLAB).....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 9 Determinantes de las matrices de rigidez en el espacio de trabajo.....</i>	<i>51</i>

Resumen

En este trabajo se presenta una nueva metodología mediante análisis de imágenes para la estimación de la rigidez experimental del robot paralelo Parallax LKF-2040 que es un manipulador con tres grados de libertad.

La metodología propuesta tiene la ventaja sobre otras metodologías ya desarrolladas: simple implementación y se puede aplicar a diferentes configuraciones de robot paralelos.

Esta metodología usa análisis de imágenes para medir los desplazamientos con respecto al marco de referencia del robot, provocados por fuerzas aplicadas a su plataforma móvil y con esto calcular la matriz de rigidez en una posición específica de la plataforma móvil del robot.

Finalmente se presentan los resultados experimentales de la rigidez para diferentes puntos dentro del espacio de trabajo, la contribución esencial de este trabajo es aportar una nueva metodología experimental que se suma al número reducido que existen.

Summary

This work presents a novel methodology using image analysis to estimate the experimental stiffness of the parallel robot Parallax LKF-2040, a 3 dof manipulator.

The proposed methodology has the advantage over other methodologies already developed: simple implementation and can be applied to different configurations of parallel robots.

This methodology uses image analysis to measure the displacements with respect to the robot frame, caused by forces applied to its mobile platform and calculate the stiffness in a specific position of the mobile platform of the robot.

Finally the experimental results are presented for different points within the workspace, the essential contribution of this paper is to provide a new experimental methodology that adds to the small number of methodologies exist.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Descripción del problema

El Parallax LKF-2040 figura 1.1 es un manipulador con estructura de mecanismo paralelo con tres grados de libertad [1]. Estos mecanismos poseen una plataforma fija y otra móvil. Los actuadores están montados en la plataforma fija, reduciendo el cableado y manteniéndolo fuera del espacio de trabajo. La plataforma móvil es el elemento efector y puede ser posicionada en un amplio espacio de trabajo. La estructura del manipulador es ligera, simplificando la dinámica y minimizando el peso a desplazar.

Actualmente el proyecto del robot paralelo Parallax LKF-2040 está orientado principalmente hacia la enseñanza de la robótica, y su diseño cumple cabalmente su objetivo.

La rigidez en un robot paralelo es de vital importancia ya que las fuerzas externas presentes en sus elementos no deben provocar desplazamientos significativos en su estructura. Estos desplazamientos afectan a la precisión de su posicionamiento.

La rigidez del robot Parallax LKF-2040 es desconocida ya que desde su construcción no se ha llevado a cabo un estudio para determinarla.

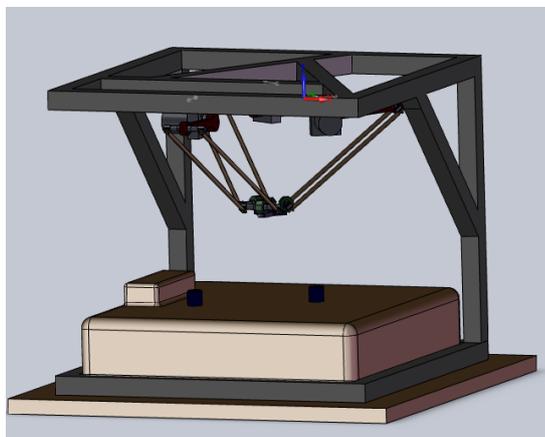


Figura 1.1 Robot paralelo Parallax LKF-2040.

1.2 Justificación

Con el estudio de rigidez del robot Parallix LKF-2040 se podrán conocer las zonas con menor rigidez, además de los desplazamientos provocados por fuerzas externas aplicadas en su plataforma móvil y con esto sería posible realizar ajustes necesarios para mejorar su precisión en el posicionamiento, está es buscada en el robot con la visión de que un prototipo mejorado de esté sea introducido en el ámbito industrial.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Estudiar analítica y experimentalmente la rigidez del robot Parallix LKF-2040 bajo diferentes niveles de carga.

Objetivos específicos

- 🔦 Calcular numéricamente la rigidez de eslabones y articulaciones por método de análisis estructural.
- 🔦 Evaluar rigidez experimental de la plataforma fija, eslabones, articulaciones y plataforma móvil en su conjunto.
- 🔦 Comparar resultados de cálculo analítico y evaluación experimental para validación de la rigidez.

1.4 Estructura de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta la descripción del problema, se definen los objetivos y se justifica el desarrollo del trabajo de tesis presentado.

En el Capítulo 2 se presentan las investigaciones que se han realizado relacionadas con el tema de tesis.

El Capítulo 3 contiene lo referente al marco teórico que ayuda a entender los conceptos teóricos de la metodología presentada.

En el capítulo 4 se describen los elementos que constituyen la base experimental utilizada en este trabajo.

En el capítulo 5 se presenta la metodología a seguir para alcanzar los resultados.

En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos al llevar a cabo la metodología.

En el capítulo 7 se habla de las conclusiones que deja el método planteado para la medición de la rigidez así como su alcance.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Estado del arte

En los manipuladores paralelos una característica importante es la alta rigidez, que está relacionada con la precisión de su posicionamiento. Gosselin en 1990 [2] llevó a cabo el primer estudio relevante de rigidez en manipuladores paralelos, quien presentó un método analítico para hallar mapas de rigidez de un manipulador planar de tres grados de libertad y un manipulador paralelo espacial de tres grados de libertad. Gosselin dice en este trabajo que la rigidez de un manipulador paralelo en un punto del espacio de trabajo puede ser caracterizada por la matriz de rigidez. También pone de manifiesto la variación de la rigidez en función de la posición en el espacio de trabajo del efector final. En ese trabajo, el desarrollo de la matriz de rigidez está basado en la matriz jacobiana de los manipuladores paralelos. Desde entonces, numerosos autores han realizado estudios con el objetivo de cuantificar la rigidez de diversos robots paralelos.

Clinton y Zhang [3] presentaron en 1997 el desarrollo de un modelo matemático describiendo la rigidez de una máquina de fresado basada en la plataforma de Gough-Stewart. Este modelo parte del análisis estructural matricial para derivar la matriz de rigidez de cada elemento dentro del modelo y después ensamblarlos para tener una matriz de rigidez de todo el sistema, él asume que los elementos del modelo sólo tienen deformación lineal. También realizan un análisis experimental basados en una prueba de rigidez de centros de maquinado utilizando la Norma ASME B5.54.

En el 2000 Rebeck y Zhang [4] presentaron un método para evaluar rigidez de los eslabones, articulaciones y plataforma fija de una máquina de fresado basada en la plataforma Gough-Stewart, la formulación de la rigidez para estos elementos está basada en el principio del trabajo virtual. En este trabajo se pone de manifiesto que, como los desplazamientos son aditivos, la rigidez se puede tomar como la suma en serie de la rigidez de la plataforma fija y los eslabones.

Huang y colaboradores [5] en 2001 presentaron una aproximación para la estimación rápida de la rigidez de una máquina cinemática paralela TRIPOD, esto lo hicieron en dos pasos, el primero donde descomponen la estructura de la máquina en dos subestructuras asociadas con el marco de la máquina y el mecanismo paralelo. El modelo de rigidez de las dos subestructuras fue formulado siguiendo el principio de trabajo virtual. El segundo paso fue la realización del modelo de rigidez de la estructura de la máquina en su conjunto, esto lo hicieron aplicando el principio de superposición lineal.

Ceccarelli y Carbone [6] presentaron en 2002 un análisis de rigidez del robot CaPaMan en términos de las características de rigidez, estos parámetros de rigidez están relacionados principalmente con la rigidez de los eslabones, articulaciones y actuadores. La matriz de rigidez es deducida como una función de los parámetros de rigidez más importantes: las características de transmisión de las fuerzas, los parámetros y comportamientos de rigidez de las piernas, el tamaño de las piernas y la configuración de la cinemática, todo esto dentro de la arquitectura del robot. Estos autores también realizaron el mismo análisis al robot CaHyMan [7].

Woo-Keun Yoon y colaboradores [8] en 2003 presentaron un método de análisis de rigidez de los eslabones y rodamientos, basado en deformaciones elásticas. En ese método se combina la rigidez de eslabones y rodamientos, obteniendo también el valor del coeficiente de elasticidad de un eje de rotación del rodamiento. La combinación de la rigidez la llevan a cabo mediante una suma en paralelo de los elementos de una cadena cinemática.

En 2005 Ceccarelli y Carbone [9] presentaron un estudio analítico y experimental de la rigidez de la plataforma de Gough-Stewart. En este trabajo, se propone una formulación de matriz de rigidez con la combinación de tres matrices características, una que representa la capacidad de la fuerza de transmisión del mecanismo paralelo, otra que agrupa los coeficientes de rigidez de los componentes deformables del manipulador paralelo y la tercera que toma en cuenta la cinemática del manipulador y considera las variaciones de las variables cinemáticas debido a las deformaciones y desplazamientos en las piernas. Asimismo, presentaron un análisis experimental en el Milli-CATRASYs donde

midieron el desplazamiento de plataforma móvil ocasionado por una masa conocida y así estimar los coeficientes de la matriz de rigidez.

Olivier Company y colaboradores [10] en 2005, trabajando en el manipulador paralelo de 4 grados de libertad H4, presentaron un método asumiendo que los elementos del manipulador paralelo son considerados resortes. En éste método se aplica un torsor virtual en el efector final, usando la teoría de pequeños desplazamientos, se calcula el desplazamiento del efector final. Como resultado tienen la relación entre el torsor y el desplazamiento del efector final que es la matriz de rigidez del manipulador paralelo. Además presentaron un método de análisis experimental donde aplicando una fuerza sobre las direcciones x , y y z se miden los desplazamientos [11] en las tres direcciones. A partir de desplazamientos y fuerzas conocidas la matriz de rigidez experimental puede ser encontrada.

Deblaise y colaboradores [12] presentaron un método analítico novedoso de aproximación para el cálculo de la matriz de rigidez de los robots paralelos basado en el análisis matricial estructural, este método es rápido, ya que la matriz de rigidez se obtiene de una forma muy exacta puede ser implementada dentro del controlador del robot, lo que permite mejorar en la exactitud del robot paralelo.

Majou y colaboradores [13] en el 2008 presentaron un análisis de rigidez paramétrico aplicándolo al manipulador Orthoglide. Este método está basado en un modelo de parámetros concentrados de un eslabón flexible, que reemplaza a los eslabones por juntas virtuales y eslabones rígidos virtuales, los eslabones rígidos son modelados, partir de un eslabón flexible. En este estudio se muestra cómo los parámetros geométricos influyen en los elementos del manipulador.

En 2008 Sales y Mendes [14] presentaron la obtención de la matriz de rigidez del manipulador 6-RSS mediante el método de análisis estructural matricial, este método se basa en descomponer un sistema complejo en partes, estas partes tiene sus propias propiedades que se pueden expresar en forma matricial. En este trabajo ellos calcularon las matrices elementales de los eslabones y articulaciones para posteriormente hacer un ensamble matricial y calcular la matriz de rigidez

global de la estructura. Asimismo hicieron una comparación de este método con un modelo hecho en FEA (Finit Element Analysis).

Pashkevich y colaboradores [15] en 2009 presentaron un método para evaluar la rigidez basado en un modelo de parámetros globales multidimensionales que reemplaza a los eslabones flexibles por resortes virtuales de 6 grados de libertad que describen tanto la traslación como la rotación y el acoplamiento entre ellos. En este trabajo se hace una comparación de diferentes modelos de los eslabones basados en el análisis estructural matricial y en FEA.

En 2009 Jasiel Nájera y colaboradores [16] realizaron un análisis de rigidez del manipulador paralelo 6-RUS basado en [9]. La rigidez de las bielas y manivelas del manipulador paralelo las calcularon mediante FEA y la rigidez del elemento manivela-reductor la hallaron mediante experimentación. En este trabajo se resalta que los valores máximos de rigidez se dan en las configuraciones estacionarias.

Cada cadena cinemática está compuesta por siete articulaciones, en cada una de las cadenas hay una articulación activa (actuador), el resto son pasivas.

3.2 Rigidez en robots paralelos

La rigidez de un elemento estructural es una matriz que vincula el vector de las fuerzas externas aplicadas con el vector de los desplazamientos resultantes al aplicar estas fuerzas. La rigidez de la máquina como conjunto es muy importante ya que los esfuerzos presentes en sus elementos no deben provocar un desplazamiento significativo. El desplazamiento total de la plataforma móvil del robot es la suma de los desplazamientos que presenta cada uno de sus elementos.

La rigidez de un mecanismo paralelo se puede descomponer en [16]:

- ☠ Rigidez del sistema de transmisión (rigidez del motor, flecha de transmisión, chumaceras)
- ☠ Rigidez de los eslabones
- ☠ Rigidez de las juntas cinemáticas pasivas
- ☠ Rigidez de la base móvil
- ☠ Rigidez de la base fija

La rigidez de los eslabones es más significativa en una máquina-herramienta de estructura paralela. Las deformaciones más significativas en estos elementos son las provocadas por los esfuerzos flexionantes y de torsión [17].

3.3 Visión por computadora

Un sistema de visión por computadora abarca las áreas de la informática, la ingeniería mecánica, la automatización industrial y el procesamiento de imágenes. La visión por computadora integra sistemas de captura de imágenes digitales, módulos de entrada/salida y ordenadores, la visión por computadora es aplicada como elemento sensor para la automatización de ciertas tareas.

Una de las tantas aplicaciones de un sistema de visión por computadora es la de realizar mediciones de distancias, volúmenes, etcétera que tiene por característica principal la ausencia de contacto entre lo que se mide y el instrumento de medición.

Un sistema de visión por computadora se compone de los siguientes elementos [18]:

- Dispositivos de captura de imágenes
Existen diferentes dispositivos para la captura de imágenes. Para adquirir la imagen se requiere un dispositivo físico sensible a una determinada banda del espectro electromagnético. Este dispositivo genera una señal eléctrica proporcional al nivel de energía percibido, para su posterior digitalización. Entre los dispositivos de captura o sensores se encuentran: cámaras fotográficas, cámaras de televisión, digitalizadores (scanners), sensores de rango, sensores de ultrasonido (sonares), etcétera, cada uno de los cuales nos entregan diferentes tipos de imágenes.
- Procesador. La memoria de video se conecta a un procesador de propósito general que permite maniobrar sobre la imagen, también opcionalmente pueden existir otro procesador dedicado para captura y procesamiento de imágenes.
- Monitor. Habitualmente se tiene un monitor que permita visualizar las imágenes adquiridas. El procesador y monitor pueden ser parte de una computadora de propósito general a la que se ha acoplado el sistema de captura de imágenes.
- Sistema de iluminación. Esta característica es utilizada para extraer información de los objetos de una escena. La iluminación se puede realizar con luz natural o artificial, normalmente es con luz artificial para evitar señales indeseadas

3.4 Técnicas de visión aplicadas a la robótica

La visión por computadora tiene varias aplicaciones dentro de la robótica de la cual podemos mencionar las siguientes:

- Robótica móvil y vehículos autónomos. Las cámaras son usadas para localizar objetos, identificar obstáculos, encontrar la ruta, etc. En la figura 3.2 se observa un ejemplo.



Figura 3.2 un vehículos autónomo es capaz de navegar por rutas establecidas. Imagen tomada de http://www.bbc.co.uk/mundo/ciencia_tecnologia/2010/02/100208_robots_guerra_conflicto_pentagono_jp.shtml

- Manufactura. Aquí la visión es aplicada para identificar y localizar objetos de la línea de producción, para el control de calidad, etc.
- Interpretación de imágenes para diferentes áreas del conocimiento. Aquí la visión se aplica para interpretar las imágenes como en reconocimiento de texto, imágenes microscópicas de química, física y biología, así también para imágenes astronómicas, etc.

Para llevar a cabo estas aplicaciones se cuentan con numerosos métodos de procesamiento de imágenes para extraer la información del entorno que rodea al

robot, entre los que podemos nombrar la detección de contornos o el filtro por colores.

3.5 Calibración de cámaras

La calibración de una cámara consiste en estimar sus parámetros intrínsecos y extrínsecos, existen múltiples métodos de calibración como los métodos de Zhang, Heikkilä, Ahmed, etcétera. En la figura 3.3 se presenta los resultados de diferentes métodos de calibración de cámaras [19].

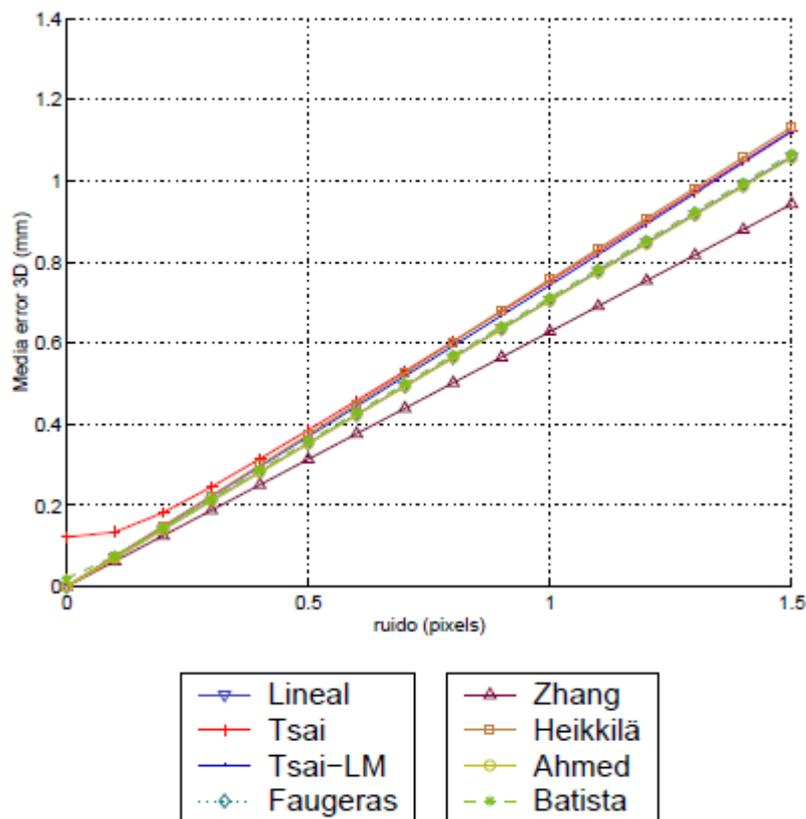


Figura 3.3 Error promedio de diferentes métodos de calibración de cámaras [19].

En la anterior figura se puede observar como el método de Zhang es el de menos error.

Zhang [20] propuso una técnica de calibración que se basa en la observación de un patrón en forma de tablero de ajedrez desde varias posiciones. Su ventaja es que permite obtener los parámetros de la cámara fácilmente porque no es necesario conocer las posiciones de los puntos de interés, ni tampoco es necesario conocer las posiciones de la cámara desde donde se han tomado las

imágenes del patrón. Esto hace que sea una técnica muy flexible al no necesitar de una preparación exhaustiva.

Para la calibración de la cámara se utiliza el modelo de la cámara el siguiente:

$$q = sA [R t]p = sA[r_1 r_2 r_3 t] p$$

Donde s es un factor de escala dado que las coordenadas de los puntos son homogéneos, [R t] representan los parámetros extrínsecos de la cámara con r_i sus correspondientes columnas y A son los parámetros intrínsecos.

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & U_0 \\ 0 & \beta & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Siendo α y β los factores de escala en el eje U y V, (U_0, V_0) las coordenadas del punto principal de la imagen y γ es el parámetro que representa la pérdida de ortogonalidad de los ejes en la imagen. Si se asume que los puntos de interés están colocados de forma que su coordenada $z=0$ el modelo se puede reducir de la siguiente forma:

$$q = sA [R t]p = sA[r_1 r_2 r_3 t]p = sA [r_1 r_2 t]p \quad (2)$$

Transformándose el modelo inicial en una homografía H que relaciona las coordenadas de los puntos de la plantilla plana del escenario con sus correspondientes en la imagen:

$$q = sA[r_1 r_2 t]p = H \cdot p \quad (3)$$

Esta homografía puede ser calculada de varias formas. Si se separan las columnas de la homografía se obtiene que:

$$[h_1 h_2 h_3] = sA[r_1 r_2 t] \quad (4)$$

Dado que R es una matriz de rotación, los vectores que la componen cumplen las restricciones de ortonormalidad, es decir, $r_1^T \cdot r_1 = r_2^T \cdot r_2$ y $r_1^T \cdot r_2 = 0$. Por lo

tanto si se extraen los vectores de rotación a partir de la última expresión se tiene que:

$$h_1^T A^{-T} A^{-1} h_1 = h_2^T A^{-T} A^{-1} h_2 \quad (5)$$

Estas son las dos restricciones básicas de los parámetros intrínsecos dada una homografía. Para resolver este problema se propone una solución analítica seguida de una optimización no lineal. La matriz $A^{-T} A^{-1}$ está compuesta por los parámetros intrínsecos de la cámara de la siguiente forma:

$$A^{-T} A^{-1} = B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1/\alpha^2 & -\gamma/\alpha^2\beta & V_0\gamma - U_0\beta/\alpha^2\beta \\ -\gamma/\alpha^2\beta & \gamma^2/\alpha^2\beta + 1/\beta^2 & -\gamma(V_0\gamma - U_0\beta)/\alpha^2\beta - U_0/\beta^2 \\ V_0\gamma - U_0\beta/\alpha^2\beta & -\gamma(V_0\gamma - U_0\beta)/\alpha^2\beta - U_0/\beta^2 & -\gamma(V_0\gamma - U_0\beta)/\alpha^2\beta + V_0/\beta^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta que se trata de una matriz simétrica se puede definir con un vector de 6 elementos de la forma:

$$b = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T$$

Por lo tanto si la columna i -ésima de la matriz H es $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$ se tiene que $h_i^T B h_i = v_i^T b$ siendo:

$$v_{ij}^T = [h_{i1}h_{j1} \ h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \ h_{i2}h_{j2} \ h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \ h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \ h_{i3}h_{j3}] \quad (7)$$

Con estas expresiones se pueden escribir las restricciones de los parámetros intrínsecos en dos ecuaciones homogéneas en función de b de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} v_{11}^T - v_{22}^T \\ v_{12}^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (8)$$

Si se calculan n homografías a partir de n imágenes obtenidas de la plantilla se obtiene un sistema de ecuaciones de la forma

$$Vb = 0 \quad (9)$$

Donde V es una matriz de dimensiones 2×6 . Si $n \geq 3$ se tiene una solución general con solución única de b definida con un factor de escala. Si $n=2$ se puede imponer la restricción $\gamma = 0$ la cual se añade a las ecuaciones anteriores. La solución es el vector propio de $V^T V = 0$ asociado al valor propio más pequeño. Cuando se ha estimado b se pueden obtener los parámetros intrínsecos de la cámara que forman la matriz A según:

$$V_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \quad (10)$$

$$\lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + V_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / B_{11}] \quad (11)$$

$$\alpha = \sqrt{\lambda / B_{11}} \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2)} \quad (13)$$

$$\gamma = -\beta_{12} \alpha^2 \beta / \lambda \quad (14)$$

$$U_0 = \gamma V_0 / \alpha - B_{13} \alpha^2 / \lambda \quad (15)$$

Cuando A ha sido estimada, los parámetros extrínsecos se pueden calcular según:

$$r_1 = s A^{-1} h_1$$

$$r_2 = s A^{-1} h_2$$

$$r_3 = r_1 \times r_2$$

$$t = s A^{-1} h_3$$

Obteniendo el factor de escala según:

$$s = 1 / \|A^{-1} h_1\| = 1 / \|A^{-1} h_2\| \quad (16)$$

3.6 Rigidez Experimental en robots

Existen diferentes métodos para la estimación de la rigidez experimental en robot paralelos, estos métodos miden el desplazamiento obtenido por las fuerzas aplicadas a dichos elementos o estructuras.

El método de estimación de Ceccarelli [9] toma un enfoque simplificado que considera sólo los desplazamientos y fuerzas lineales. En este caso la matriz de rigidez es de 3 x 3. Los coeficientes desconocidos de la matriz de rigidez son 9 y un número mínimo de tres experimentos con tres fuerzas diferentes son suficientes para estimar las incógnitas. La ecuación para la estimación de la rigidez es:

$$\begin{bmatrix}
 \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta z_1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta z_1 \\
 \Delta x_2 & \Delta y_2 & \Delta z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \Delta x_2 & \Delta y_2 & \Delta z_2 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta x_2 & \Delta y_2 & \Delta z_2 \\
 \Delta x_3 & \Delta y_3 & \Delta z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \Delta x_3 & \Delta y_3 & \Delta z_3 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta x_3 & \Delta y_3 & \Delta z_3
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 k_{11} \\
 k_{12} \\
 k_{13} \\
 k_{21} \\
 k_{22} \\
 k_{23} \\
 k_{31} \\
 k_{32} \\
 k_{33}
 \end{bmatrix}
 -
 \begin{bmatrix}
 Fx_1 \\
 Fy_1 \\
 Fz_1 \\
 Fx_2 \\
 Fy_2 \\
 Fz_2 \\
 Fx_3 \\
 Fy_3 \\
 Fz_3
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (17)$$

Al resolver la ecuación de manera simbólica se pueden obtener los coeficientes k_{ij} en función de los desplazamientos y las fuerzas que se miden en las pruebas experimentales.

Hay que señalar que también en este caso es necesario que el determinante de la matriz en la ecuación 17 no sea cero, con el fin de tener un número de ecuaciones iguales a las incógnitas, para evitar calcular una matriz de rigidez singular.

Estas pruebas experimentales se basan en el uso de un sistema que permite al mismo tiempo, la medición de las fuerzas externas aplicadas y los desplazamientos resultantes al aplicar estas fuerzas.

En [9] se propone un sistema formado por LVDT's y pesos conocidos, como se muestra en la figura 3.4.

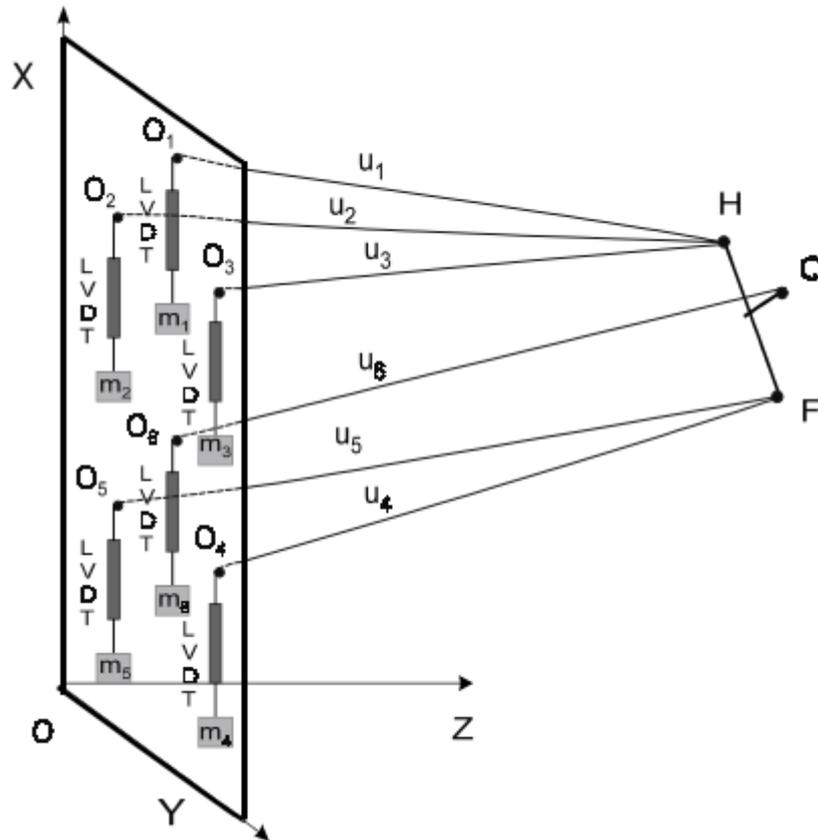


Figura 3.4 Sistema de medición de desplazamientos de Ceccarelli [9].

Refiriéndose a la figura 3.4 los desplazamientos lineales del punto H se pueden determinar partir de:

$$u_i^2 = (x_H - x_{O_i})^2 + (y_H - y_{O_i})^2 + (z_H - z_{O_i})^2 \quad (18)$$

Donde $i=1, 2, 3$ y $x_H, y_H, z_H, x_{O_i}, y_{O_i}, z_{O_i}$ son coordenadas cartesianas de los puntos H y O_i respecto al marco OXYZ respectivamente.

El método de estimación experimental de rigidez de C. Corradini [11] requiere dispositivos comunes de metrología como los son los indicadores de carátula y pesas. Una fuerza conocida se aplica al efector, respectivamente a lo largo de los ejes del marco de referencia x, y y z (véase la figura 3.5 para el esquema de medición cuando se aplica una fuerza a lo largo de z). Se le aplican las cargas suponiendo las posibles aplicaciones (selección y del lugar de piezas pequeñas).

El desplazamiento resultante del efector es entonces medido en la dirección de los tres ejes del marco de referencia por los tres indicadores de carátula. Los actuadores deben tener una posición controlada. Por supuesto, los resultados de estas ediciones son válidos sólo para la postura elegida. Cabe mencionar que la rigidez puede estudiarse en seis ejes (3 de traslación y 3 angulares). Con este experimento sólo la rigidez de traslación se estudia.

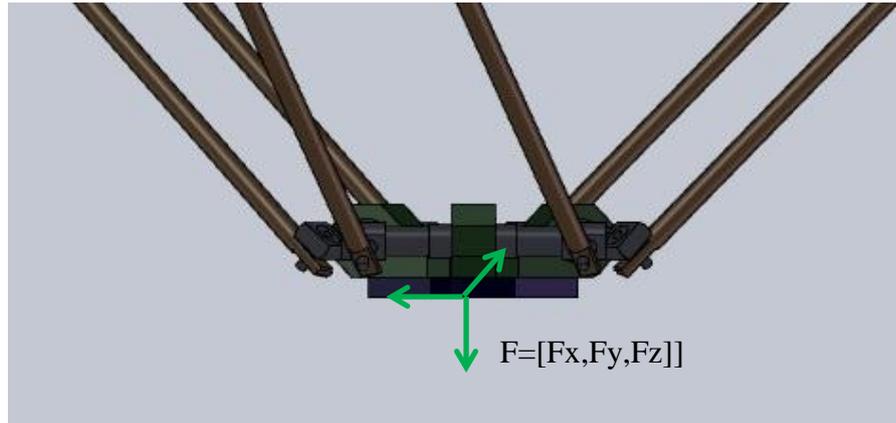


Figura 3.5 Fuerzas aplicadas sobre la plataforma móvil del robot Parallax LKF-2040

En este caso, donde los desplazamientos angulares no son medidos la matriz de rigidez K es una matriz de 3×3 , donde las entradas desconocidas son 9. La ecuación para calcular la matriz de rigidez es:

$$K = F\delta'(\delta\delta')^{-1} \quad (19)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} F_{x1} & F_{x2} & F_{x3} & F_{x4} & F_{x5} & F_{x6} & F_{x7} & F_{x8} & F_{x9} \\ F_{y1} & F_{y2} & F_{y3} & F_{y4} & F_{y5} & F_{y6} & F_{y7} & F_{y8} & F_{y9} \\ F_{z1} & F_{z2} & F_{z3} & F_{z4} & F_{z5} & F_{z6} & F_{z7} & F_{z8} & F_{z9} \end{bmatrix}$$

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{x1} & \delta_{x2} & \delta_{x3} & \delta_{x4} & \delta_{x5} & \delta_{x6} & \delta_{x7} & \delta_{x8} & \delta_{x9} \\ \delta_{y1} & \delta_{y2} & \delta_{y3} & \delta_{y4} & \delta_{y5} & \delta_{y6} & \delta_{y7} & \delta_{y8} & \delta_{y9} \\ \delta_{z1} & \delta_{z2} & \delta_{z3} & \delta_{z4} & \delta_{z5} & \delta_{z6} & \delta_{z7} & \delta_{z8} & \delta_{z9} \end{bmatrix}$$

Capítulo 4. Descripción de la base experimental

El experimento consiste en posicionar al robot en un punto de su espacio de trabajo, se toma la captura de una imagen de su plataforma móvil posteriormente su plataforma móvil se carga con diferentes pesos, en cada carga se debe hacer una captura de la plataforma móvil del robot, los desplazamientos resultantes por la carga de los pesos se calculan extrayendo de las imágenes capturadas las coordenadas de un patrón que se encuentra en la plataforma móvil.

4.1 Robot Parallax LKF-2040

El estudio de la rigidez se realizó sobre el robot Parallax LKF-2040 figura 4.1.

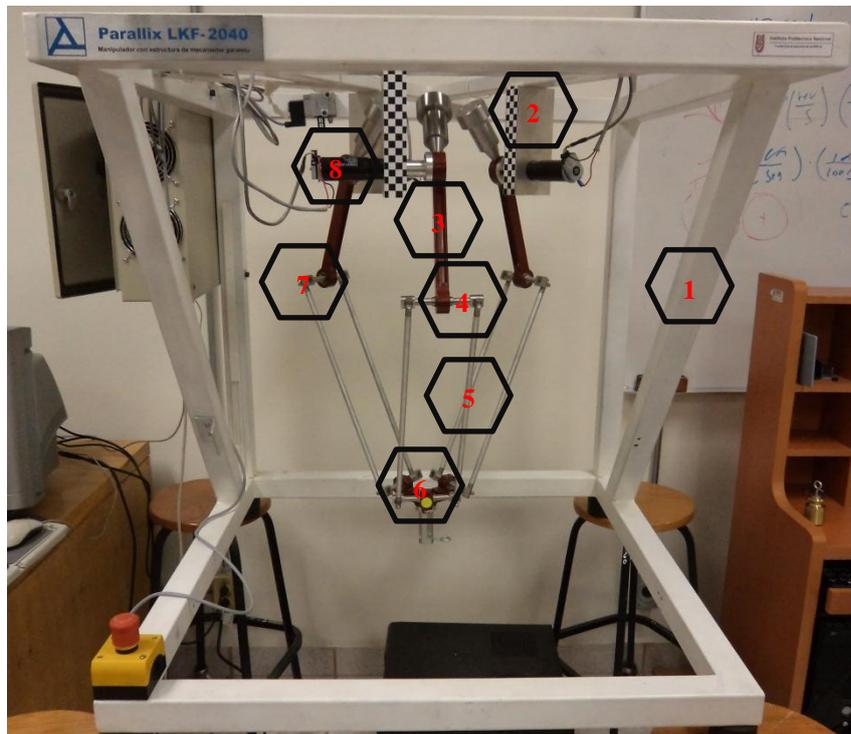


Figura 4.1 Parallax LKF-2040

En la figura anterior, se pueden apreciar los elementos del robot Parallax LKF-2040:

- 🔦 Una plataforma fija (base del robot);
- 🔦 Una plataforma móvil (donde se localiza el efector final); y
- 🔦 3 cadenas cinemáticas.

Cada cadena cinemática está compuesta por tres articulaciones. Las articulaciones son rotatorias. En cada una de las cadenas cinemáticas hay únicamente una articulación activa (actuador), el resto son pasivas.

La función realizada por una articulación es la de controlar el movimiento entre los elementos enlazados a ella. El robot tiene 3 grados de libertad, exclusivamente traslacionales.

Las características de las diferentes partes que integran al robot son descritas a continuación:

1.- Plataforma fija

En la figura 4.1 se observa la configuración de la plataforma fija del Robot Parallax LKF-2040 está construida de tubo estructural cuadrado de Acero.

2.- Base de los actuadores

La base de los actuadores es la que hacen la conjunción de la base fija con las cadenas cinemáticas, esta base está hecha en aluminio 6061-T6.

3.- Eslabón A

El eslabón A esta construido de aluminio 6061 T-6

Eslabón B (paralelogramo)

4.- Varilla larga que forma parte del paralelogramo del eslabón B está formada por una combinación de tubo de aluminio 6063 T-5 que es parte del cuerpo y barra redonda de acero T-304 en las puntas

5.- Varilla corta que forma parte del paralelogramo del eslabón B está construida de acero T-304

6.- Plataforma móvil

La plataforma móvil tiene la configuración que se muestra en la figura 4.9, está construida en Aluminio 6061 T-6.

7.- Articulaciones rotacionales



Figura 4.2 Articulaciones del robot Parallax LKF-2040

Las articulaciones con las que cuenta el robot Parallax LKF-2040 son Cam Followers de la marca IKON

8.- Actuadores



Figura 4.3 Actuadores MAXON

Los actuadores que se usan en el robot Parallax LKF-2040 son MAXON modelo RE 35. Algunas de sus características se muestran en la siguiente tabla 1:

Tabla 1 características del actuador

Encoder	Incremental CUI Inc, AMT102-V, 1000 PPR, TTL, 5 VCD.
Potencia	90 W
Alimentación	24 VCD
Reductor	Reductor planetario Maxon GP32A

Interfaz de usuario

El Parallax LKF-2040 cuenta con una interfaz de usuario llamada ROBWIN esta interfaz que se muestra en la figura 4.4 tiene los siguientes componentes:

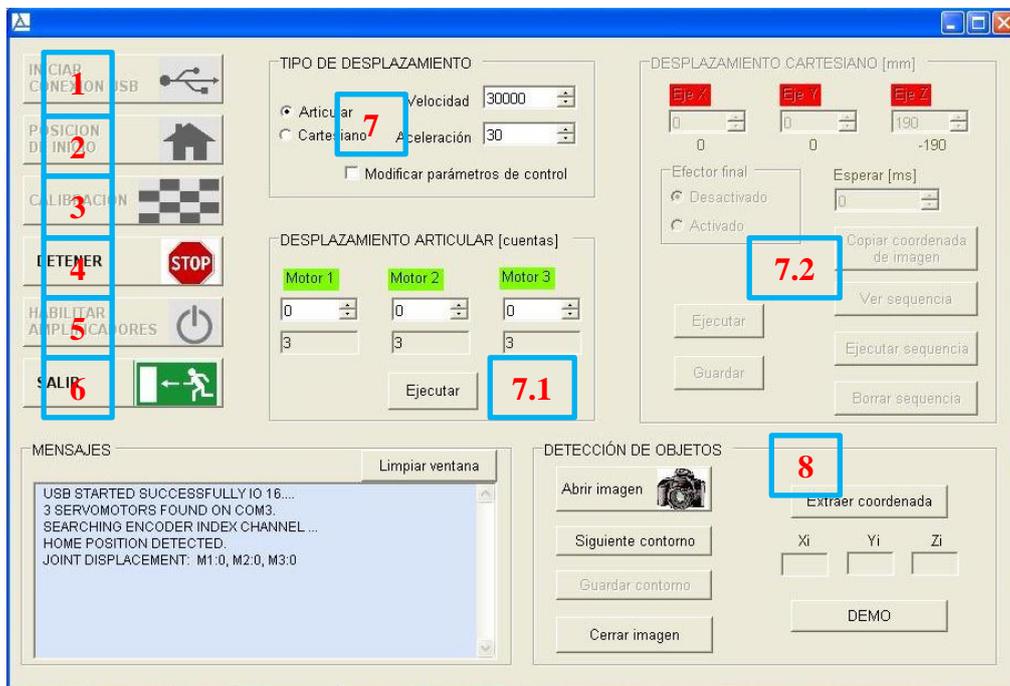


Figura 4.4 Interfaz del usuario ROBWIN

1. Botón de inicio de conexión
2. Botón de posición de inicio
3. Botón de calibración. El robot realiza una rutina de calibración
4. Botón para detener la conexión
5. Botón de habilitar amplificadores
6. Botón de salir
7. Sección de desplazamiento. Aquí se elige la manera de entrada de los datos para el movimiento del robot, así como la velocidad y aceleración

7.1 Sección de desplazamiento articular. En esta sección introducimos en cuentas de encoder el desplazamiento del motor que deseamos que se mueva independientemente

7.2 Sección de desplazamiento cartesiano. En esta sección se introduce la coordenada donde se desea llevar la plataforma móvil del robot, el movimiento de los motores es simultáneo

8. Sección de detección de objetos utilizando análisis de imágenes

4.2 Sistema de visión

En el sistema de visión tenemos dos componentes:

Cámara



Figura 4.5 cámara para la toma de las imágenes del patrón.

La cámara usada es de la marca ImagingSource modelo DFK 72AUC02 en la siguiente tabla se muestra la configuración que se usó para las capturas de las imágenes:

Tabla 2 configuración usada en las capturas de las imágenes.

Resolución	Formato	FPS	Intensidad
2592x1944	1/2.5 "	6	1.4 V/lux-sec

Esta cámara tiene su propio software de captura "IC Capture 2.2" que fue el que se utilizó, en la figura 4.11 se muestra una imagen de la pantalla del software.

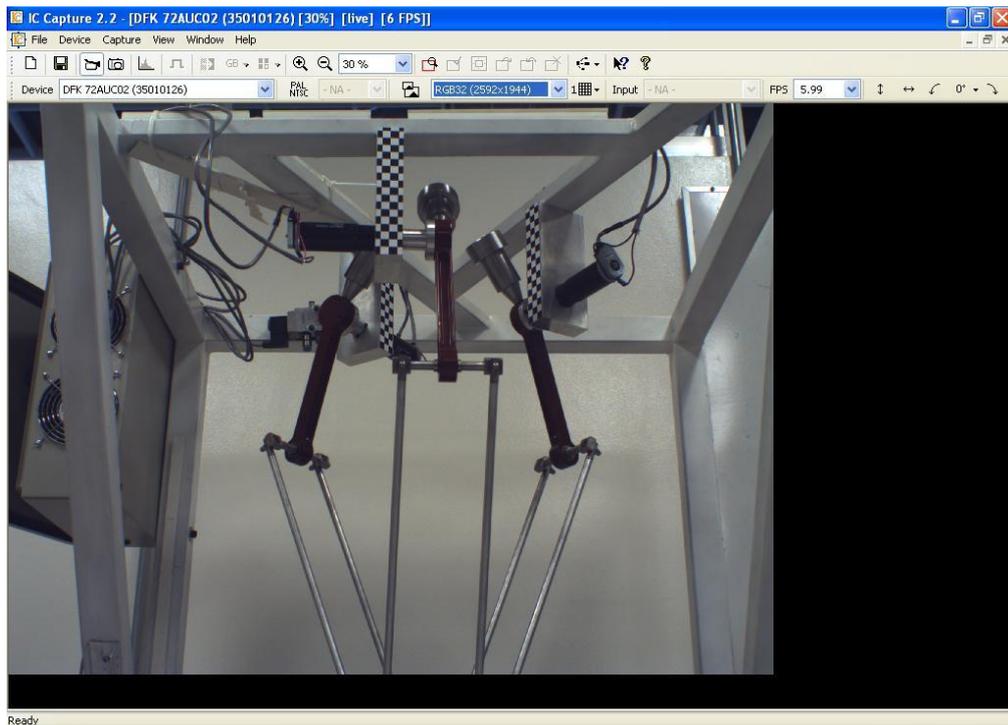


Figura 4.6 Software de captura de la cámara.

Patrones

Para el método usado se utilizaron dos patrones, el primero ubicado en la base del actuador “uno” como se muestra en la figura 4.7 sirvió para hacer un cambio en el marco de referencia de la cámara al robot, este patrón tiene cuadros de 1x1 cm. El segundo patrón se ubicó sobre la plataforma móvil para conocer los desplazamientos ocasionados por la aplicación de fuerzas, este patrón tiene también cuadros de 1x1 cm como se muestra en la figura 4.8.

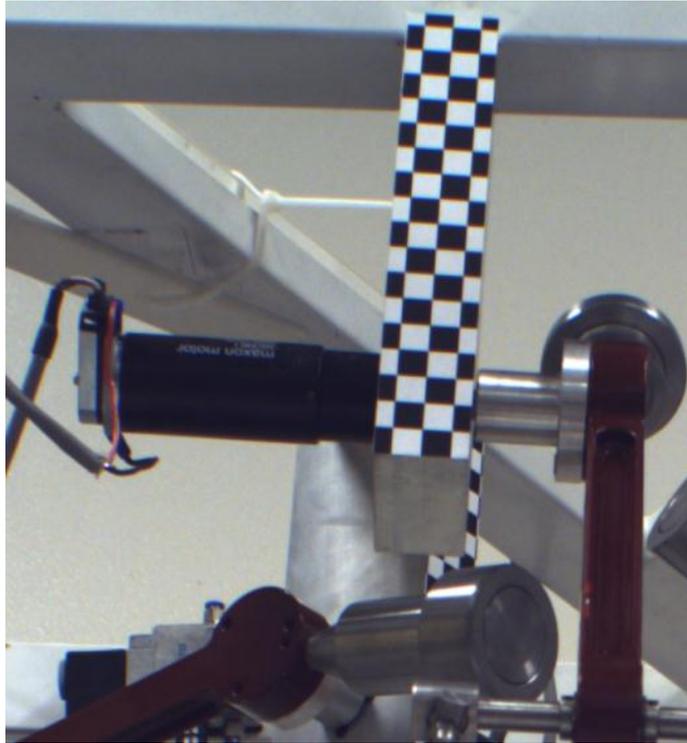


Figura 4.7 patrón en la base de los actuadores

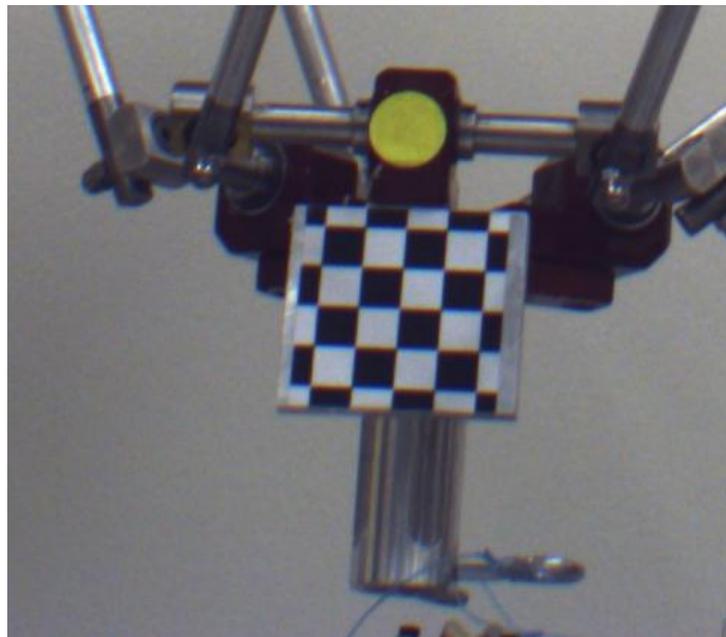


Figura 4.8 patrón en plataforma móvil

4.3 Sistema de aplicación de fuerzas en los ejes.

Para aplicar las fuerzas sobre los ejes X e Y se diseñó y fabricó una plataforma, los criterios para la elaboración de esta plataforma son reducir la fricción que se pudiera tener al aplicar las fuerzas, para esto se integraron poleas con baleros, el otro criterio es tener una referencia para asegurar que las fuerzas estarían aplicadas sobre los ejes X e Y, para esto se le integraron guías que se alinean con el efector final del robot. Teniendo las consideraciones anteriores en cuenta la figura 4.9 muestra la plataforma que se elaboró para la aplicación de las fuerzas. Para la aplicación sobre el eje Z la fuerza fue aplicada directamente sobre la plataforma móvil.



Figura 4.9 plataforma para aplicación de fuerzas en los ejes X e Y, en la parte superior se observa el dibujo de la plataforma en CAD, en la parte inferior la plataforma ya construida y montada sobre el trípode.

4.4 Software de cálculo de desplazamientos.

Tanto para la calibración de la cámara y el cálculo de los parámetros extrínsecos de los patrones utilizados se utilizó el ToolBox “Camera Calibration Toolbox” [21] que está implementado en MATLAB, en la figura 4.10 se observa el menú del Toolbox.

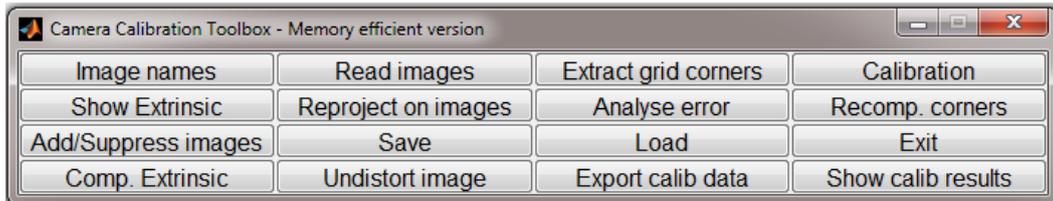


Figura 4.10 captura del menú de opciones del Toolbox de MATLAB “Camera Calibration Toolbox”

Las funciones de cada botón son descritas a continuación:

Image names: Su función es permitir que el usuario introduzca el nombre y formato de la imagen.

Extract grid corners: Despliega la imagen y permite escoger las esquinas, si la imagen no es buena pide retroalimentación de número y tamaño de cuadros.

Calibration: Calcula los parámetros intrínsecos de la cámara minimizando el error de proyección mediante gradiente descendiente.

Show Extrinsic: Muestra una gráfica con los parámetros extrínsecos de las capturas del patrón de calibración.

Reproject on images: Muestra las rejillas calculadas con el método de gradiente utilizado.

Analyse Error: Su función es mostrar los errores en el cálculo de las esquinas, también puede eliminarse puntos que causen mucho ruido.

Recomp. Corners: Hace un recalcu automático de las esquinas para reducir el error obtenido.

Add/Supress images: Su función es agregar o eliminar en la calibración para reducir el error.

Comp. Extrinsic: Su función es calcular los parámetros extrínsecos, debe de tener previamente calculado los parámetros intrínsecos.

Undistort image: Corrige la distorsión de una imagen, debe de tener previamente calculado los parámetros intrínsecos.

En la extracción de los parámetros extrínsecos de las imágenes el código de “Comp. Extrisinc” fue modificado para su mejor uso en nuestro método, esta modificación consistió en la automatización de los datos de entrada y la adición del código necesario para la estimación de los desplazamientos respecto al marco de referencia del robot (Anexo A).

Capítulo 5. Metodología

5.1 Obtención de la matriz homogénea de la cámara con respecto al robot

En forma general, el método desarrollado en esta tesis consiste en cuantificar la rigidez a través de la medición de los desplazamientos utilizando análisis de imágenes.

El primer paso de la metodología es obtener una matriz de transformación homogénea que relacione el marco de referencia de la cámara con el marco de referencia del robot, para esto se utilizan dos patrones como se muestra en la figura 5.1, uno fijo colocado en alguna de las bases para los motores y el otro móvil colocado en la plataforma móvil del robot.

En el proceso experimental realizado se colocó el patrón en la base del motor “uno” pero el patrón puede ser colocado en cualquier base, lo importante a considerar son las coordenadas de la base con respecto al marco del robot.

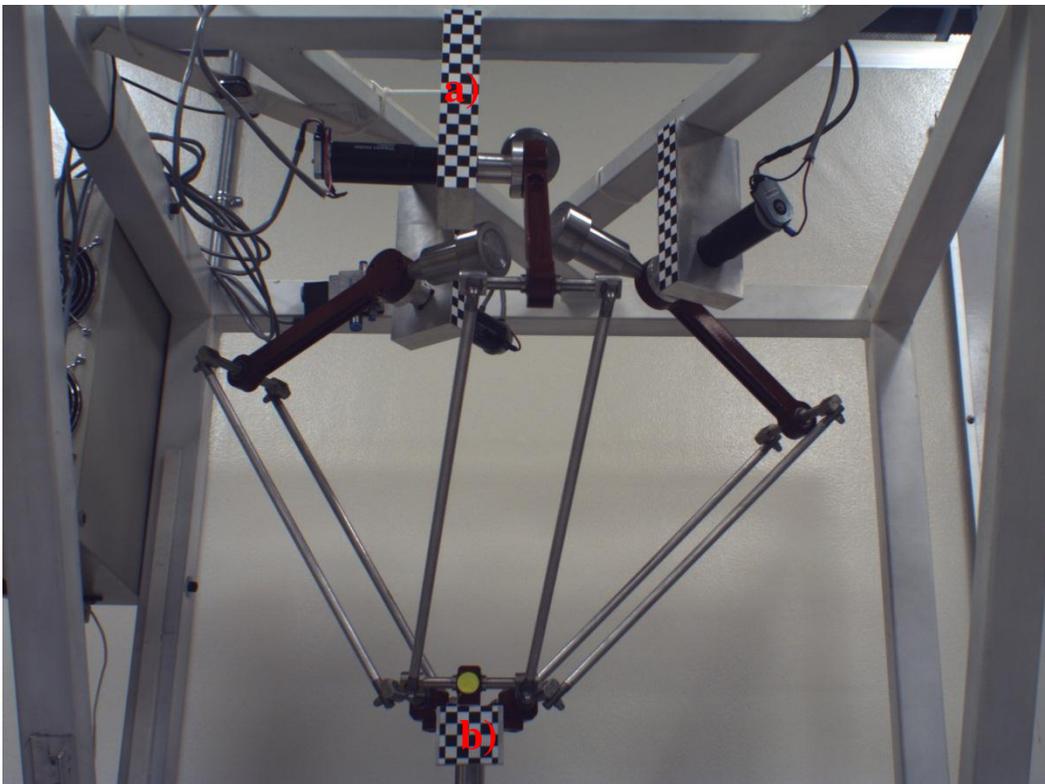


Figura 5.1 a) patrón fijo ubicado en la base de motor “uno”, b) patrón móvil ubicado en la plataforma móvil.

La matriz de transformación homogénea ${}^R\mathbf{A}_C$ que relaciona el marco de la cámara con respecto al marco del robot se obtiene con la siguiente ecuación:

$${}^R\mathbf{A}_C = {}^R\mathbf{A}_O \quad {}^O\mathbf{A}_C \quad (20)$$

Dónde:

${}^R\mathbf{A}_O$: matriz homogénea del objeto (patrón fijo) con respecto al marco del robot.

${}^O\mathbf{A}_C$: matriz homogénea de la cámara con respecto al marco del objeto (patrón fijo).

La figura 5.2 muestra cómo se relacionan los marcos de referencia del robot, el patrón fijo y la cámara.

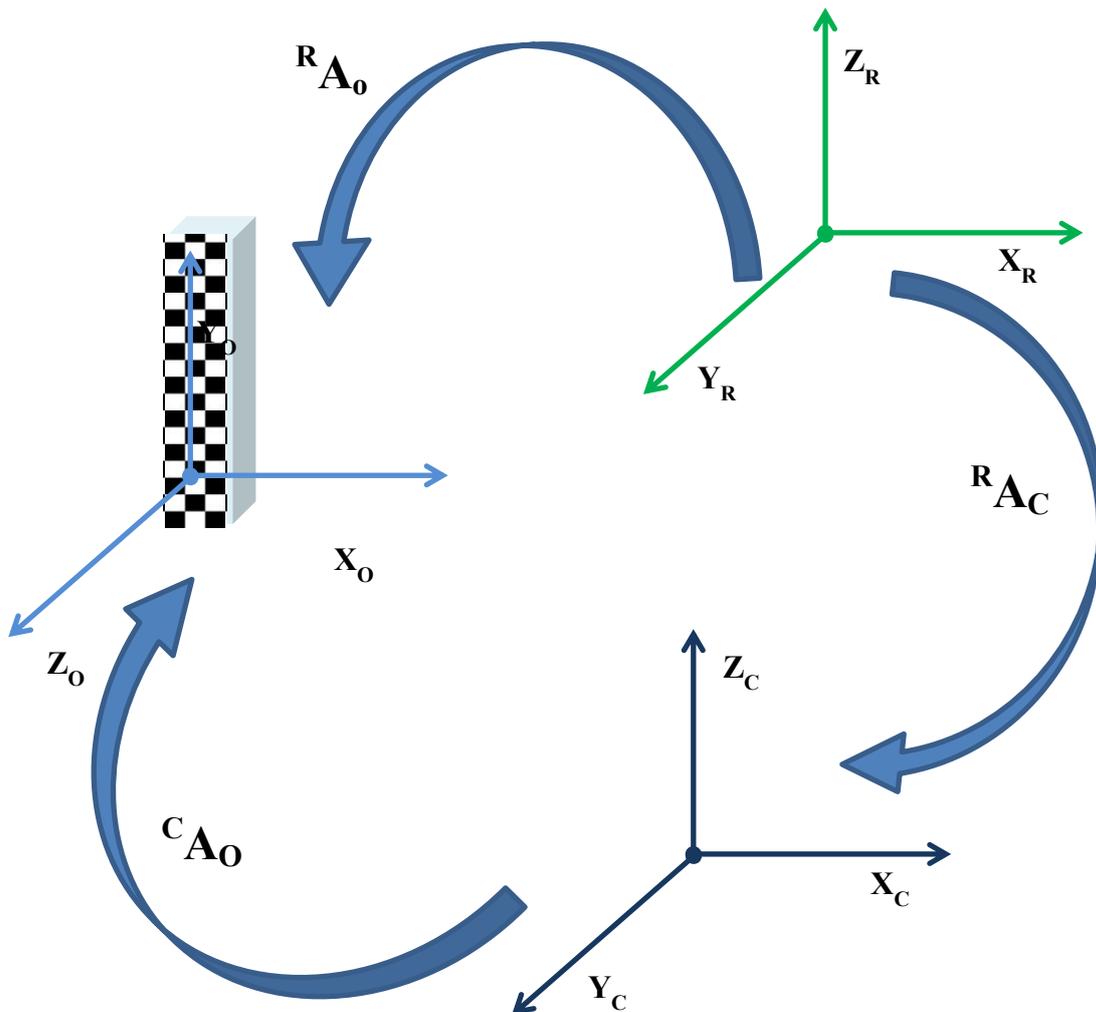


Figura 5.2 Cambio de marco de referencia de la cámara al robot.

Como siguiente paso se obtiene oA_c en nuestro caso se realizó empleando el ToolBox de MATLAB “Camera Calibration Toolbox” [21] este ToolBox permite estimar los parámetros extrínsecos (previa calibración) de un patrón con respecto a la cámara, estos parámetros extrínsecos (R_{3x3} y T_{1x3}) se utilizan para obtener la matriz homogénea cA_o dada la siguiente ecuación:

$${}^cA_o = \begin{bmatrix} {}^cR_{3x3} & {}^cT_{3x3} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

En la figura 5.2 se muestra el plano seleccionado del patrón del cual se estiman los parámetros extrínsecos, este plano es creado por el toolbox el cual solo necesita seleccionar cuatro esquinas del plano “XY” e introducir la distancia entre cuadros.

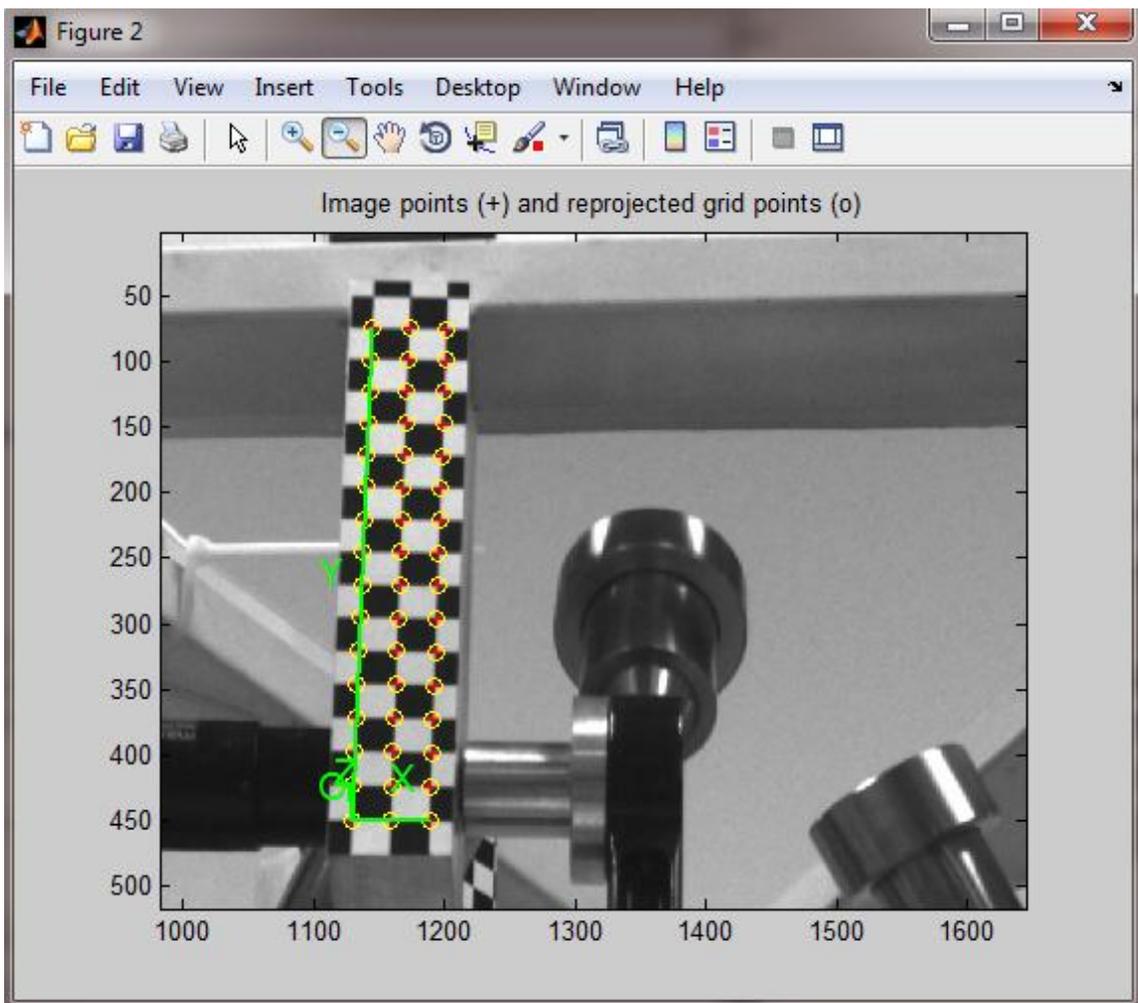


Figura 5.3 plano seleccionado del cual se obtienen los parámetros extrínsecos.

0A_c se obtiene a partir de:

$${}^0A_c = ({}^cA_o)^{-1} \quad (22)$$

Como siguiente paso se debe hallar la matriz homogénea del objeto con respecto al robot ${}^R A_o$, que se calcula a partir de la geometría del robot Parallax LKF-2040, cabe mencionar que se hace la suposición de que no hay errores en maquinado y ensamble del robot para el cálculo de ${}^R A_o$ en la figura 5.4 se observa un esquemático de la vista superior de las tres bases de los motores del robot Parallax LKF-2040 donde se puede observar la relación que tienen el marco del patrón fijo utilizado y el marco del robot..

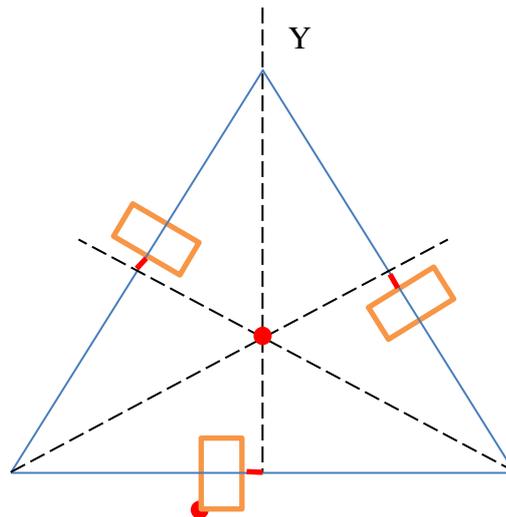


Figura 5.4 Esquemático de las tres bases de los motores del robot Parallax LKF-2040 tipo delta

En la figura 5.5 se observa la representación de la base del motor y como se tomó su sistema coordinado.

5.2 Validación de la técnica de medición de desplazamientos por imágenes

Para la validación en la medición de desplazamientos usando análisis de imágenes se realizaron dos experimentos para así poder encontrar el error que tenemos al trabajar con el método de análisis de imágenes.

El primer experimento se realizó con un patrón de calibración con cuadros de 20x20 mm, este experimento parte de que conocemos el tamaño de los cuadros por lo que podemos medir la distancia entre ellos con el Toolbox de MATLAB. Los pasos que se siguieron son los siguientes:

1.- En una captura del patrón seleccionamos un área de este y se calculan los parámetros extrínsecos a partir del Toolbox de MATLAB con lo cual obtendremos un vector de traslación y una matriz de rotación.

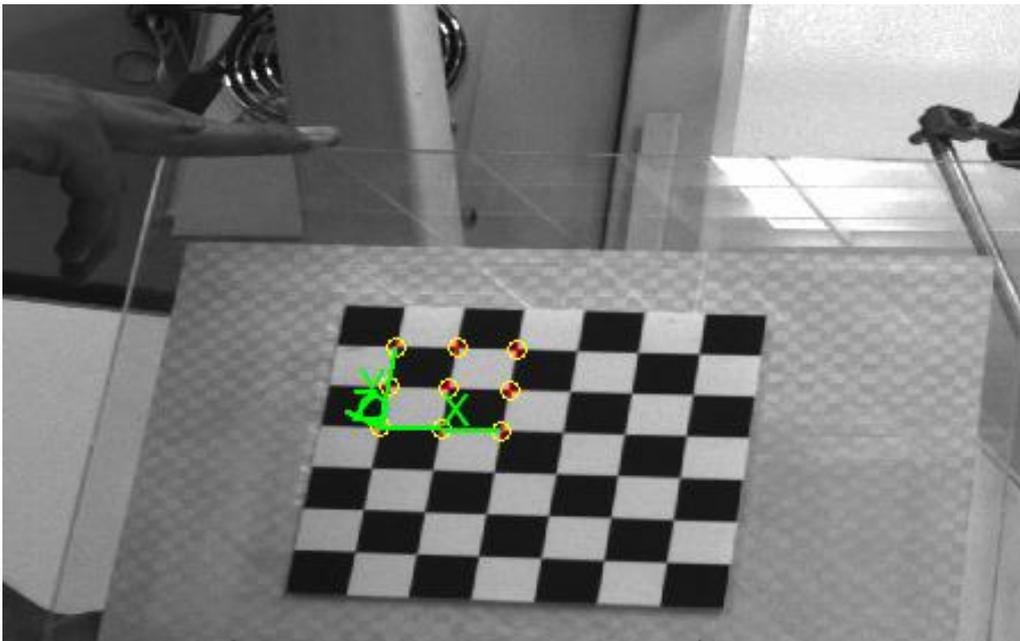


Figura 5.5 Primera área seleccionada en la imagen del patrón.

De la matriz de rotación extraemos los ángulos de giro de los ejes del marco de referencia del patrón con respecto al marco de referencia de la cámara de la siguiente manera:

$$R = \begin{bmatrix} U_x & V_x & W_x \\ U_y & V_y & W_y \\ U_z & V_z & W_z \end{bmatrix}$$

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{V_z}{W_z}\right) \quad (26)$$

$$\phi = \sin^{-1}(-U_z) \quad (27)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{U_y}{U_x}\right) \quad (28)$$

Donde

ψ : ángulo de giro sobre el eje X

ϕ : ángulo de giro sobre el eje Y

θ : ángulo de giro sobre el eje Z

Como siguiente paso se debe seleccionar otra área de la misma imagen del patrón con el ToolBox de Matlab y obtener los parámetros extrínsecos nuevos de esta selección.

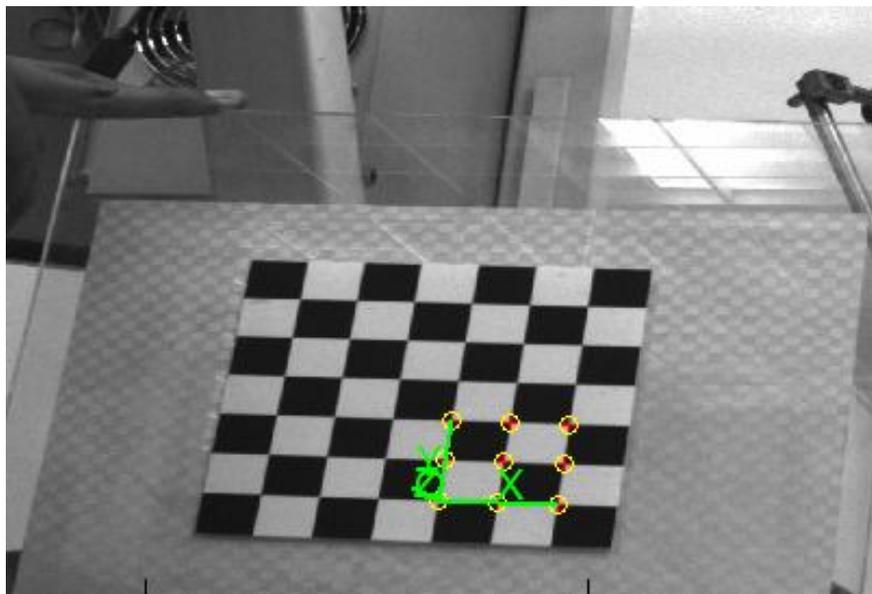


Figura 5.6 Segunda área seleccionada en la imagen del patrón.

Si conocemos la medidas de los cuadro del patrón sabemos cuánto se desplaza una de las áreas seleccionadas con respecto a la otra y como es la misma imagen no hay variación en cuanto a la rotación, por lo que las variaciones entre estos valores nos darán el error del ToolBox de calibración de cámaras de Matlab.

Las ecuaciones para calcular los errores en traslación $Error_T$ en las distancias medidas y el error en angular $Error_A$ son:

$$Error_T = D_o - D_M \quad (29)$$

Donde

D_o : es la distancia conocida

D_M : es la distancia calculada con los parámetros extrínsecos

A su vez D_M se calcula restando las coordenadas de la imagen inicial de las coordenadas de la imagen final, la ecuación es:

$$D_M = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2} \quad (30)$$

Donde los subíndices i y f indican imagen inicial e imagen final respectivamente.

$$Error_A = A_i - A_f \quad (31)$$

Donde

A_i : son los ángulos de la imagen inicial sobre cada eje.

A_f : son los ángulos de la imagen final sobre cada eje.

La desviación estándar se calculó a partir de:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum(D_o - D_M)^2}{N}} \quad (32)$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum(Error_A - \overline{Error_A})^2}{N}} \quad (33)$$

Para calcular el error se capturaron 20 imágenes en puntos aleatorios del espacio de trabajo, se calcularon tomando áreas 2, 3, y 4 cuadros los resultados se presentan en las siguientes tablas 3, 4 y 5 respectivamente:

Tabla 3 Errores obtenidos con área de 2x2 cuadros.

Imagen	$Error_T$ [mm]	$Error_{A_\psi}$ [°]	$Error_{A_\phi}$ [°]	$Error_{A_\theta}$ [°]
1	1.31	0,02	-0,22	0,14
2	0.31	0,07	0	0,05
3	0.55	0,16	-0,20	0,12
4	0.54	0,11	-0,15	0,07
5	0.23	0,29	-0,21	0,07
6	0.09	0,24	-0,10	0,07
7	0.01	0,05	-0,28	0,12
8	-0.57	-0,13	-0,26	0,09
9	0.16	0,27	-0,48	0,18
10	0.39	0,28	-0,53	0,12
11	0.70	0,12	-0,12	0,03
12	-0.40	-0,68	0,64	0,09
13	0.58	-0,01	0,07	0,07
14	-0.09	0,30	0,22	0,01
15	0.29	0,41	-0,48	0,08
16	-0.33	0,92	-0,29	0,06
17	-0.06	0,23	0,32	-0,04
18	-0.23	0,21	0,05	0
19	-0.24	0,47	-0,79	0,24
20	-1.06	-0,11	-0,39	0,11
Desviación Estándar	0.52	0,29	0,31	0,06

Tabla 4 Errores obtenidos con área de 3x3 cuadros.

Imagen	$Error_T$ [mm]	$Error_{A_\psi}$ [°]	$Error_{A_\phi}$ [°]	$Error_{A_\theta}$ [°]
1	1.15	0,12	-0,02	0,05
2	0.17	-0,03	0,06	0,01
3	0.40	0,11	-0,11	0,06
4	0.36	0	-0,03	0,02
5	0.05	-0,02	-0,09	0,04
6	0.13	0,14	-0,06	0,04
7	0.03	-0,02	-0,09	0,04
8	0.07	-0,06	-0,05	0,03
9	0.05	-0,09	0,06	0
10	0.35	0,05	-0,27	0,04
11	0.48	0	-0,12	0,02
12	-0.13	-0,53	0,07	0,09
13	0.23	0	0,02	0,03
14	0.06	0,14	0,05	0,01
15	0.21	0,20	-0,24	0,02
16	-0.07	0,18	0,05	0
17	0.031	0,15	0,12	-0,02
18	0.21	0,25	0,06	0
19	-0.11	0	-0,11	0,03
20	-0.23	-0,10	-0,15	0,04
Desviación Estándar	0.33	0,16	0,10	0,02

Tabla 5 Errores obtenidos con área de 4x4 cuadros.

Imagen	$Error_T$ [mm]	$Error_{A_\psi}$ [°]	$Error_{A_\phi}$ [°]	$Error_{A_\theta}$ [°]
1	0.48	0	-0,03	0,05
2	0.13	0,06	0,044	0
3	0.23	0,04	-0,04	0,03
4	0.14	0	-0,05	0,02
5	0.08	0,05	-0,07	0,03
6	0.06	0,02	-0,05	0,02
7	0.09	0,01	-0,06	0,03
8	0.15	-0,03	-0,05	0,02
9	0.03	-0,03	0,02	0
10	0.17	0,02	-0,10	0
11	0.21	0,01	-0,05	0,02
12	-0.04	-0,30	0	0,05
13	0.07	-0,02	0	0,03
14	0.007	0,05	0,02	0
15	0.11	0,09	-0,09	0,01
16	-0.01	0,10	-0,03	0
17	0.004	0,02	-0,02	0,01
18	0.02	0,06	0,04	0
19	-0.09	-0,02	-0,06	0,01
20	-0.07	0	-0,10	0,01
Desviación Estándar	0.15	0,08	0,04	0,01

En las tablas 3, 4 y 5 podemos observar cómo al trabajar con un área mayor (cuadros seleccionados en la imagen) la desviación estándar es más pequeña.

El segundo experimento que se realizó consistió en montar un patrón sobre una mesa que se desplaza a través de un micrómetro ver figura 5.7. En este caso los desplazamientos del patrón estimados mediante análisis de imágenes, deben de coincidir con los desplazamientos del micrómetro.

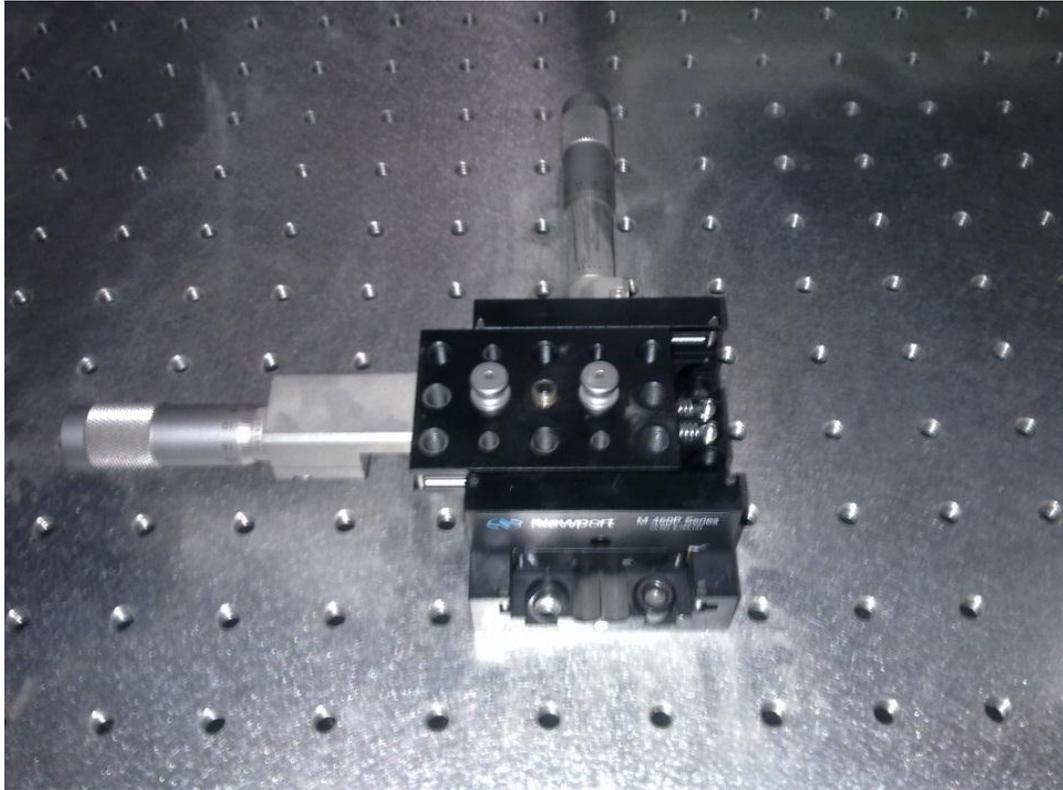


Figura 5.7 Base utilizada para medición de desplazamientos.

El experimento consistió en desplazar el patrón con el micrómetro distancias de 2, 5, 10 y 20 mm, en cada posición hacer una captura de la imagen, en la figura 5.8 se muestra una de las series de capturas de los desplazamientos. Se repitió 10 veces el experimento, al final se calcularon los desplazamientos con el ToolBox de MATLAB, en la tabla 6 se muestran los resultados de este experimento.

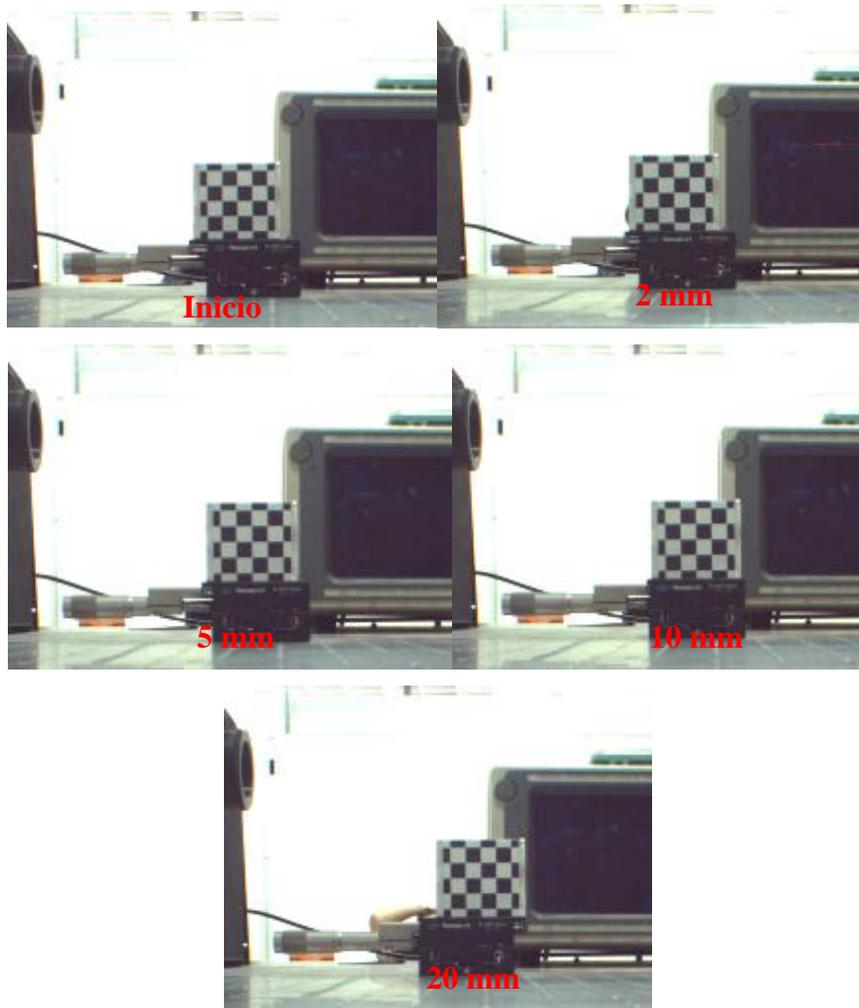


Figura 5.8 Capturas de los desplazamientos realizados.

Tabla 6 Errores obtenidos.

Medidas	Micrómetro	Cámara
1	2 mm	1.99 ± 0.28
2	5 mm	4.97 ± 0.27
3	10 mm	9.75 ± 0.24
4	20 mm	20.01 ± 0.21

5.3 Metodología para la obtención de los desplazamientos

1.- Se controla en una posición deseada la plataforma móvil, en la figura 5.8 se observa cómo la plataforma móvil está posicionada en un punto específico.

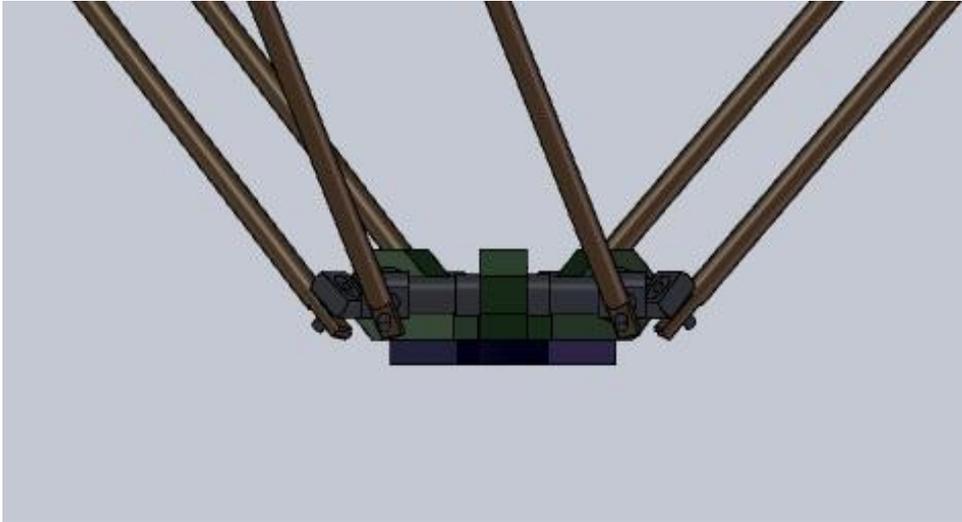


Figura 5.8 Plataforma móvil en un punto específico

2.- Se alinea la plataforma de aplicación de fuerzas con la plataforma móvil, esta alineación consiste en dos pasos, el primero es que se nivela la plataforma de aplicación de fuerzas como se muestra en la figura 5.9, el segundo consiste en alinear las guías de la plataforma de aplicación de fuerzas con la plataforma móvil.



Figura 5.9 Nivelación de la plataforma para aplicar las fuerzas sobre ejes X e Y

3.- Como siguiente paso se captura una imagen del robot donde el patrón que se encuentra sobre la base del motor “uno” sea visible como se muestra en la figura 5.10, con esta imagen se calcula ${}^R A_c$ a través de la ecuación 18.

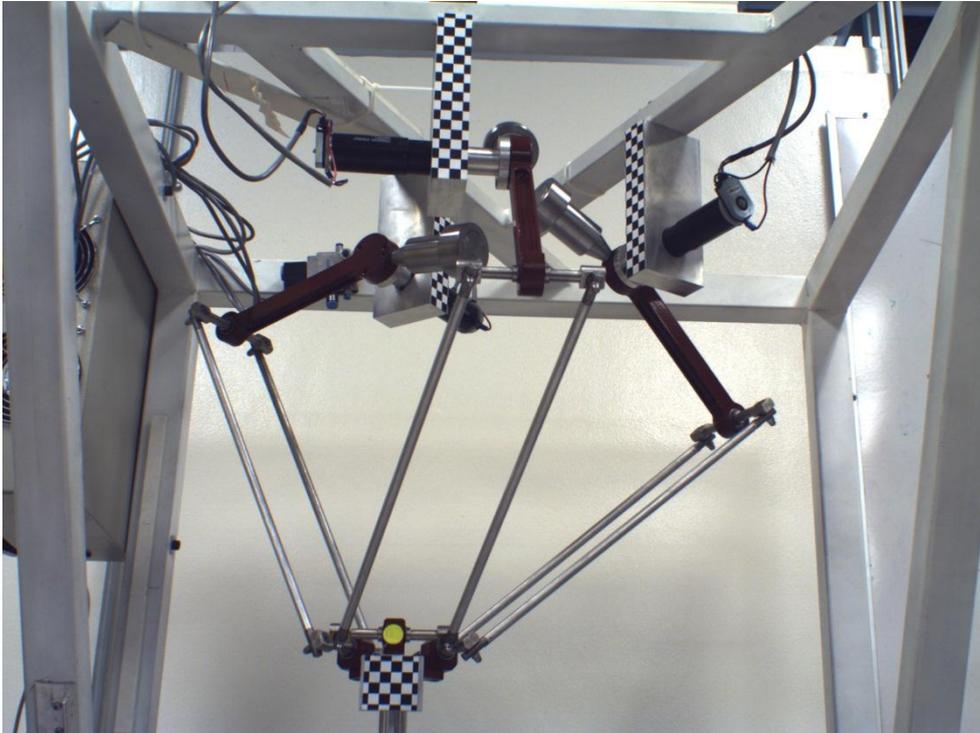


Figura 5.10 patrón de la base del motor visible.

4.- Para este paso se debe tener en cuenta que la cámara no puede ser ya desplazada de lo contrario el cálculo de ${}^R A_c$ quedaría sin efecto y se tendría que volver al paso 3, dicho esto, se procede a capturar una imagen del robot en la posición que se haya elegido en el paso uno, donde el patrón que se encuentra ubicado en la plataforma móvil sea visible, como se muestra en la figura 5.11.

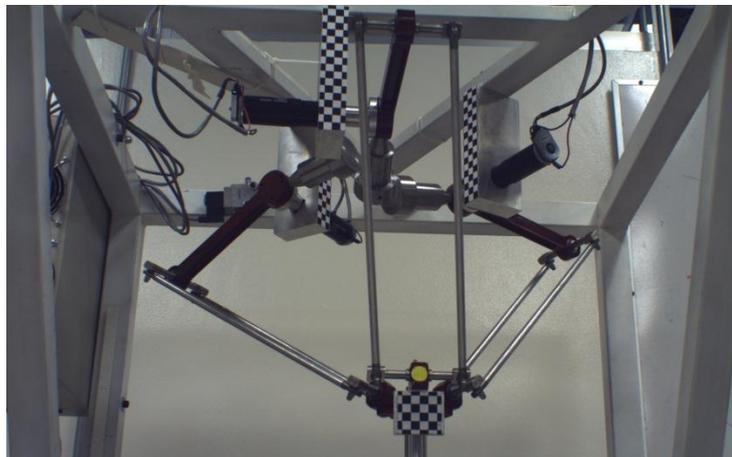


Figura 5.11 Patrón de la plataforma móvil visible.

5.- En este se aplica una fuerza en la plataforma móvil, esta fuerza desplazará a la plataforma, una vez sucedido se procede a capturar una segunda imagen, en la figura 5.12 se observa la aplicación de una fuerza sobre el eje Z.

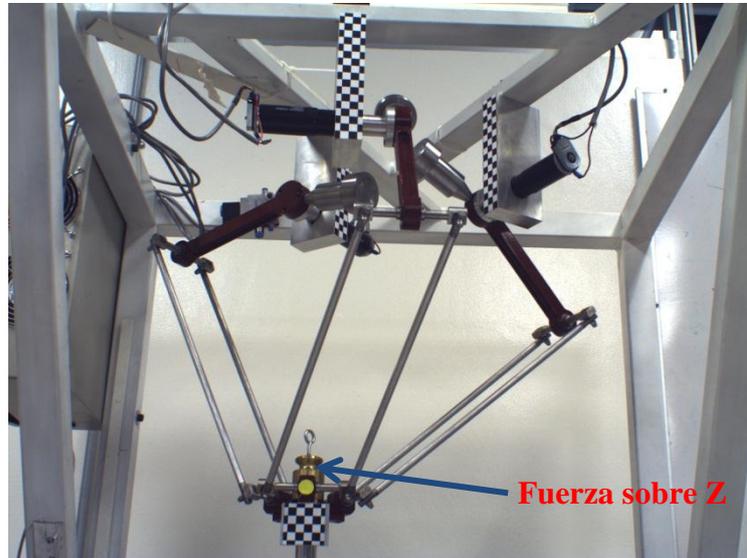


Figura 5.12 Fuerza aplicada sobre eje Z

6.- Calculo de los desplazamientos mediante análisis de imágenes.

Con las imágenes del paso 4 y 5 usando el Toolbox de MATLAB se estiman los parámetros extrínsecos del patrón de la plataforma móvil.

Si tomamos el punto del origen del plano en el patrón con el cual son calculados los parámetros extrínsecos, simplificamos el obtener las coordenadas de un punto con respecto al marco de la cámara, ya que estas coordenadas serán las mismas del vector de traslación de los parámetros extrínsecos estimados.

Teniendo estas coordenadas del punto en las imágenes se aplica la ecuación 20 para conocer las coordenadas del objeto en el marco del robot y por último realizando una resta de las coordenadas del punto del origen en las imágenes 4 y 5 se conocerán los desplazamientos de la plataforma móvil.

5.4 Estimación de la rigidez en el espacio de trabajo.

Para tener una visión más completa de la rigidez del robot Parallax LKF-2040 se tomaron 48 puntos de su espacio de trabajo, suponiendo que eran suficientes puntos para observar la variabilidad de la rigidez en el espacio de trabajo. En la figura 5.13 se observan los puntos en los cuales se hicieron las mediciones.

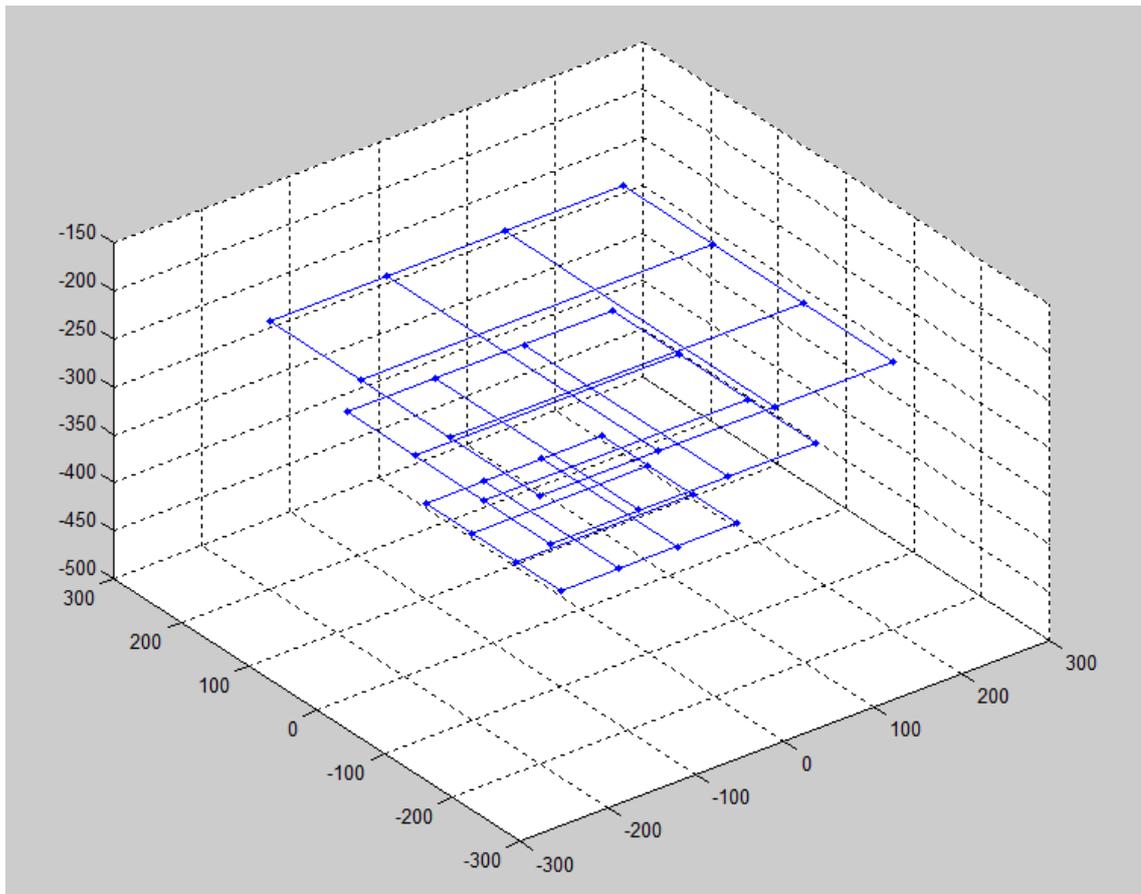


Figura 5.13 Puntos de medición de rigidez en el espacio de trabajo.

En la tabla 7 se muestran las coordenadas de los puntos en los que se hizo la medición de los desplazamientos.

Tabla 7 Coordenadas de los puntos donde se estimó la rigidez.

N	X	Y	Z	[mm]
1	-100	-100	-400	
2	-100	-34	-400	
3	-100	32	-400	
4	-100	100	-400	
5	-34	-100	-400	
6	-34	-34	-400	
7	-34	32	-400	
8	-34	100	-400	
9	32	-100	-400	
10	32	-34	-400	
11	32	32	-400	
12	32	100	-400	
13	100	-100	-400	
14	100	-34	-400	
15	100	32	-400	
16	100	100	-400	
17	-150	-150	-310	
18	-150	-50	-310	
19	-150	50	-310	
20	-150	150	-310	
21	-50	-150	-310	
22	-50	-50	-310	
23	-50	50	-310	
24	-50	150	-310	
25	50	-150	-310	
26	50	-50	-310	
27	50	50	-310	
28	50	150	-310	
29	150	-150	-310	
30	150	-50	-310	
31	150	50	-310	
32	150	150	-310	
33	-200	-200	-220	
34	-200	-67	-220	
35	-200	66	-220	
36	-200	200	-220	
37	-67	-200	-220	
38	-67	-67	-220	
39	-67	66	-220	
40	-67	200	-220	
41	66	-200	-220	
42	66	-67	-220	
43	66	66	-220	
44	66	200	-220	
45	200	-200	-220	
46	200	-67	-220	
47	200	66	-220	
48	200	200	-220	

En cada punto se capturaron las imágenes correspondientes a los desplazamientos generados al aplicar 9 diferentes fuerzas y se calcularon sus desplazamientos mediante análisis de imágenes. La velocidad con la que se operó el robot Parallax LKF-2040 en este caso fue de 30000 cuentas/s y la aceleración 30 cuentas/s².

En la figura 5.14 se muestra una secuencia de las tomas de un punto [-100,-100,-400].

Se llevaron a cabo 10 corridas de los puntos en el espacio de trabajo (llamamos una corrida a realizar las capturas de las imágenes del total de los puntos), promediando los resultados de las 10 corridas en los desplazamientos se procedió a estimar la rigidez con la ecuación 19, a continuación se muestra el resultado de la matriz de rigidez en el punto [-100, -100, -400].

$$k_1 = \begin{bmatrix} -0.2409 & 0.2612 & 0.2029 \\ 0.9153 & 0.244 & 0.6019 \\ 0.0759 & 0.3547 & -1.7682 \end{bmatrix}, \Delta(k_1) = 0.6521$$

Para poder tener una representación en el espacio de trabajo del robot Parallax LKF-2040, se calcula el determinante de la matriz , según [9] para evaluar sintéticamente la matriz de rigidez se pueden usar diferentes formas como determinante, traza e eigenvalores, en ese trabajo usan el determinante ya que da la información de que en cuanto mayor es el determinante de la matriz de rigidez mayor es la rigidez en las diferentes configuraciones del robot, que se usara como parámetro escalar para representar la rigidez en un punto dentro del espacio de trabajo del robot.



Figura 5.14 La secuencia de captura de un punto es de 18 imágenes.

Capítulo 6. Resultados

Los parámetros intrínsecos resultantes del proceso de calibración de la cámara se usaron en todo el proceso del método. Estos parámetros cambiarían si el lente de la cámara sufre algún movimiento, al cambiar el foco o al remover la lente y volver a colocarla, en la tabla 8 se muestran los parámetros intrínsecos calculados y utilizados en el cálculo de los parámetros extrínsecos, solo la distorsión radial es tomada en cuenta, justificada por el hecho de que la mayoría de las lentes que se fabrican actualmente no tienen la imperfección en el centrado [21].

Tabla 8 Parámetros intrínsecos de la cámara (según ToolBox MATLAB).

Parámetros intrínsecos	Valores
Distancia focal	$[Df_x = 3733.27 \ Df_y = 3722.85]$ $\pm [39.96 \ 36.86]$
Punto Principal	$[u_0 = 1466.77 \ v_0 = 904.81]$ $\pm [24.65 \ 40.23]$
Distorsión (coeficientes)	$[D_1 = -0.09 \ D_2 = 0.11]$ $\pm [0.01011 \ 0.04632]$

En la tabla 9 se muestran los determinantes estimados de las matrices de rigidez de los 48 puntos (Anexo B) en los que se realizó la medición de los desplazamientos.

La medición de los desplazamientos en los puntos se realizó empezando desde el plano inferior (véase la figura 5.13) en el punto $[-100,-100,-400]$, en la figura 6.1 se muestra la secuencia de medición de los puntos.

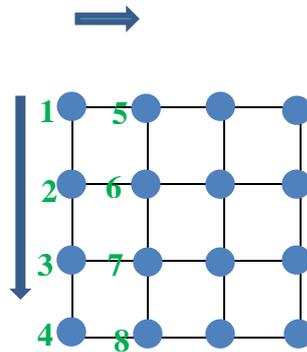


Figura 6.1 secuencia de medición de los desplazamientos en los puntos del espacio de trabajo del robot.

En la tabla 9 se puede observar como los determinantes de las matrices de rigidez son mayores en el centro del plano que en las orillas, según [9] un valor mayor supone una rigidez mayor en la posición del robot.

El determinante mayor de la matriz de rigidez estimado es 873.2673 del punto 39 de la tabla 9 este punto está en el plano superior (véase la figura 5.13) y esta sobre el centro del plano.

También se observa que los puntos 36 y 45 poseen los menores valores de los determinantes estos puntos se encuentran en las esquinas del plano superior (véase la figura 5.13), cabe mencionar que en la realización de la experimentación en ciertas ocasiones cuando se realizaban las mediciones en estas posiciones los amplificadores de los motores se sobrecargaban esto debido a que por la posición del robot el peso de los eslabones y articulaciones sobrecargaba el motor y se perdía el control del robot, al ser estas posiciones las que más cuestan alcanzar al robot se entiende el porqué de ser las menos rígidas, .

Tabla 9 Determinantes de las matrices de rigidez en el espacio de trabajo.

Nº de punto	Determinante
1	0.6521
2	10.4954
3	32.9078
4	60.5228
5	1.9625
6	10.5042
7	10.1782
8	18.2929
9	8.7342
10	22.9396
11	16.5784
12	4.6915
13	9.7609
14	8.4402
15	10.8887
16	19.496
17	7.3916
18	0.0544
19	113.6373
20	140.1269
21	14.7908
22	42.1947
23	17.6581
24	67.3247
25	28.7058
26	74.6774
27	26.2213
28	11.5242
29	5.4934
30	17.3222
31	38.4635
32	43.6104
33	57.0549
34	53.0079
35	476.9659
36	-4.4748
37	11.8307
38	72.3135
39	873.2673
40	164.9668
41	38.4627
42	7.3948
43	303.2896
44	230.6342
45	-0.8527
46	21.3454
47	78.5605
48	122.5399

Capítulo 7. Conclusiones

Durante este trabajo se desarrolló una nueva metodología para la medición de la rigidez en un manipulador paralelo utilizando análisis de imágenes, se diseñó la plataforma para la aplicación de las fuerzas en los ejes X e Y para los requerimientos que se necesitaban, también se presentó un método para la validación de las mediciones de los desplazamientos resultantes de las fuerzas aplicadas a la plataforma móvil del robot.

Este nuevo método tiene la ventaja en su practicidad para encontrar los desplazamientos en la plataforma móvil referidos al marco de referencia del robot de una manera simple y rápida, esta característica es ideal para entornos donde los manipuladores paralelos están fijos y no se pueden llevar a algún otro lugar para referirlo con otros sistemas de coordenadas. Podemos mencionar que la aplicación de las fuerzas sobre la plataforma móvil se puede mejorar para asegurar con más precisión que las fuerzas estén sobre los ejes X e Y. La resolución que ofrece este método en la medición de los desplazamientos está en la orden de milímetros.

Se determinó la rigidez representada por el determinante de la matriz de rigidez para diferentes posiciones del robot, donde se observa como la rigidez de una posición a otra cambia. Este método se podría adaptar a diferentes manipuladores donde los métodos usuales son de difícil implementación.

Como trabajo futuro se podría mejorar la resolución del método utilizando una cámara con mayor resolución que se puede aplicar a sistemas donde los desplazamientos son menores a los que se presentaron en este trabajo.

Referencias Bibliográficas

1. Dr. Eduardo Castillo Castañeda. "Estudio y fabricación de robots paralelos didácticos para fortalecer la enseñanza de la Mecatrónica y carreras afines", proyecto para la convocatoria del Fondo de Fomento al Uso de Tecnologías de Punta en la Investigación Científica y Tecnológica del Gobierno del Distrito, México, 2008.
2. C.M. Gosselin. "Stiffness mapping for parallel manipulators", IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. VI, pp. 377-382, 1990.
3. C. M. Clinton y G. Zhang, "Stiffness Modeling of a Stewart platform-based Milling Machine", Trans. of the North America Manufacturing Research Institution of SME, Vol. XXV, pp. 335-340, 1997.
4. E. Rebeck y G. Zhang, "A Method for Evaluating the Stiffness of a Hexapod Machine Tool Support Structure," International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing, Vol. VII, pp. 149-165, 1999.
5. T. Huang y colaboradores, "Stiffness estimation of a tripod-based parallel kinematic machine", IEEE Trans. Robot Automat., Vol. XVIII, pp. 50–58, 2002.
6. M. Ceccarelli y G. Carbone, "A stiffness analysis for CaPaMan (Cassino Parallel Manipulator)", Mechanism and Machine Theory, Vol. XXXVII, pp. 427-439, 2002.
7. G. Carbone, M. Ceccarelli y M. Teolis, "A Numerical Evaluation of the Stiffness of CaHyMan (Cassino Hybrid Manipulator)", Proceedings of 2nd Workshop on Computational Kinematics CK 2001, pp. 145- 154, 2001.
8. W. K. Yoon y colaboradores, "Stiffness Analysis and Design of a Compact Modified Delta Parallel Mechanism", Robotica, Vol. XXII, pp. 463–475, 2004.

9. M. Ceccarelli y G. Carbone. "Numerical and experimental analysis of the stiffness performances of parallel manipulators", 2nd Int. Colloquium "Collaborative Research Centre 562", Braunschweig, 2005.
10. O. Company, F. Pierrot, y J. C. Fauroux "A Method for Modeling Analytical Stiffness of a Lower Mobility Parallel Manipulator", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, España, 2005.
11. C. Corradini y colaboradores, "Evaluation of a 4 Degree of Freedom Parallel Manipulator Stiffness", Proceedings of the 11th World Congress. In Mechanism & Machine Science, Tianjin, China, 2004.
12. D. Deblaise, X Hernot, P. Maurine, "A systematic analytical method of PKM stiffness matrix calculation", Proceedings of the 2006 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Orlando, Estados Unidos, 2006.
13. F. Majou y colaboradores, "Parametric stiffness analysis of the Orthoglide". Mechanism and Machine Theory, Volume XLII, pp. 296-311, 2007.
14. R. S. Goncalves y J. C. Mendes Carvalho, "Stiffness Analysis of Parallel Manipulator Using Matrix Structural Analysis", proceedings of EUCOMES 08, pp. 255-262, 2008.
15. A. Pashkevich, D. Chablat, P. Wenger, "Stiffness Analysis of Overconstrained Parallel Manipulators", Mechanism and Machine Theory, Vol. XLIV, pp. 966-982, 2009.
16. J. Najera, J. Aginaga y I. Zabalza, "Análisis de Rigidez de Manipuladores Paralelos Basado en el Análisis de Sensibilidad. Aplicacion al 6-RUS" 9 Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Las Palmas de Gran Canaria, España, 2009.

17. H. Nava, "Análisis de las deformaciones en un mecanismo paralelo usado para tareas de fresado", Tesis para obtener el grado de Maestro. IPN-CICATA-QRO, Querétaro, México, 2007.
18. L. E. Sucar, G. Gómez, "Visión Computacional", pag 11-14, INAOE, 2010.
19. J. González, "Estudio experimental de métodos de calibración y auto calibración de cámaras", Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad de las palmas de gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, España, 2003.
20. Z. Zhang, "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations" Seventh International Conference on Computer Vision (ICCV'99), Vol. I, Kerkyra, Greece, 1999.
21. J. Y. Bouquet, "*Camera Calibration Toolbox for Matlab*", http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/, visitado en 2010.

ANEXOS

ANEXO A

Calculo de parámetros Extrínsecos

```
%%% INPUT THE IMAGE FILE NAME:

if ~exist('fc')|~exist('cc')|~exist('kc')|~exist('alpha_c'),
    fprintf(1,'No intrinsic camera parameters available.\n');
    return;
end;

dir;

fprintf(1,'\n');
disp('Computation of the extrinsic parameters from an image of a pattern');
disp('The intrinsic camera parameters are assumed to be known (previously
computed)');

fprintf(1,'\n');
image_name = input('Image name (full name without extension): ','s');

format_image2 = '0';
format_image2 = 'jpg';
% while format_image2 == '0',
%
%     format_image2 = input('Image format: (["r"]="ras", "b"]="bmp", "t"]="tif",
"p"]="pgm", "j"]="jpg", "m"]="ppm") ','s');
%
% if isempty(format_image2),
%     format_image2 = 'ras';
% end;
%
% if lower(format_image2(1)) == 'm',
%     format_image2 = 'ppm';
% else
```

```

%   if lower(format_image2(1)) == 'b',
%       format_image2 = 'bmp';
%   else
%       if lower(format_image2(1)) == 't',
%           format_image2 = 'tif';
%       else
%           if lower(format_image2(1)) == 'p',
%               format_image2 = 'pgm';
%           else
%               if lower(format_image2(1)) == 'j',
%                   format_image2 = 'jpg';
%               else
%                   if lower(format_image2(1)) == 'r',
%                       format_image2 = 'ras';
%                   else
%                       disp('Invalid image format');
%                       format_image2 = '0'; % Ask for format once again
%                   end;
%               end;
%           end;
%       end;
%   end;
% end;
% end;

```

```

ima_name = [image_name '.' format_image2];

```

```

%%% READ IN IMAGE:

```

```

if format_image2(1) == 'p',
    if format_image2(2) == 'p',
        I = double(loadppm(ima_name));
    else
        I = double(loadpgm(ima_name));
    end;
end;

```

```

    end;
else
    if format_image2(1) == 'r',
        I = readras(ima_name);
    else
        I = double(imread(ima_name));
    end;
end;

```

```

if size(I,3)>1,
    I = I(:,:,2);
end;

```

```

%% EXTRACT GRID CORNERS:

```

```

fprintf(1, '\nExtraction of the grid corners on the image\n');

```

```

% disp('Window size for corner finder (wintx and winty):');
% wintx = input('wintx ([] = 5) = ');
% if isempty(wintx), wintx = 5; end;
% wintx = round(wintx);
wintx=10;
% winty = input('winty ([] = 5) = ');
% if isempty(winty), winty = 5; end;
% winty = round(winty);
winty=10;

```

```

fprintf(1, 'Window size = %dx%d\n', 2*wintx+1, 2*winty+1);

```

```

[x_ext, X_ext, n_sq_x, n_sq_y, ind_orig, ind_x, ind_y] =
extract_grid(I, wintx, winty, fc, cc, kc);

```

%%% Computation of the Extrinsic Parameters attached to the grid:

```
[omc_ext,Tc_ext,Rc_ext,H_ext] =  
compute_extrinsic(x_ext,X_ext,fc,cc,kc,alpha_c);
```

%%% Reproject the points on the image:

```
[x_reproj] = project_points2(X_ext,omc_ext,Tc_ext,fc,cc,kc,alpha_c);
```

```
err_reproj = x_ext - x_reproj;
```

```
err_std2 = std(err_reproj)';
```

```
Basis = [X_ext(:,[ind_orig ind_x ind_orig ind_y ind_orig ])];
```

```
VX = Basis(:,2) - Basis(:,1);
```

```
VY = Basis(:,4) - Basis(:,1);
```

```
nX = norm(VX);
```

```
nY = norm(VY);
```

```
VZ = min(nX,nY) * cross(VX/nX,VY/nY);
```

```
Basis = [Basis VZ];
```

```
[x_basis] = project_points2(Basis,omc_ext,Tc_ext,fc,cc,kc,alpha_c);
```

```
dxpos = (x_basis(:,2) + x_basis(:,1))/2;
```

```
dypos = (x_basis(:,4) + x_basis(:,3))/2;
```

```
dzpos = (x_basis(:,6) + x_basis(:,5))/2;
```

```

figure(2);
image(I);
colormap(gray(256));
hold on;
plot(x_ext(1,:)+1,x_ext(2,:)+1,'r+');
plot(x_reproj(1,:)+1,x_reproj(2,:)+1,'yo');
h = text(x_ext(1,ind_orig)-25,x_ext(2,ind_orig)-25,'O');
set(h,'Color','g','FontSize',14);
h2 = text(dxpos(1)+1,dxpos(2)-30,'X');
set(h2,'Color','g','FontSize',14);
h3 = text(dypos(1)-30,dypos(2)+1,'Y');
set(h3,'Color','g','FontSize',14);
h4 = text(dzpos(1)-10,dzpos(2)-20,'Z');
set(h4,'Color','g','FontSize',14);
plot(x_basis(1,:)+1,x_basis(2,:)+1,'g-','linewidth',2);
title('Image points (+) and reprojected grid points (o)');
hold off;

```

```

fprintf(1,'\n\nExtrinsic parameters:\n\n');
fprintf(1,'Translation vector: Tc_ext = [ %3.6f \t %3.6f \t %3.6f ]\n',Tc_ext);
fprintf(1,'Rotation vector:  omc_ext = [ %3.6f \t %3.6f \t %3.6f ]\n',omc_ext);
fprintf(1,'Rotation matrix:  Rc_ext = [ %3.6f \t %3.6f \t %3.6f\n',Rc_ext(1,:));
fprintf(1,'                    %3.6f \t %3.6f \t %3.6f\n',Rc_ext(2,:));
fprintf(1,'                    %3.6f \t %3.6f \t %3.6f ]\n',Rc_ext(3,:));
fprintf(1,'Pixel error:      err = [ %3.5f \t %3.5f ]\n\n',err_std2);

```

```

posRo=R_T_C_1*[Tc_ext;1]

```

```

return;

```

```

% Stores the results:

kk = 1;

% Stores location of grid wrt camera:

eval(['omc_' num2str(kk) ' = omc_ext;']);
eval(['Tc_' num2str(kk) ' = Tc_ext;']);

% Stores the projected points:

eval(['y_' num2str(kk) ' = x_reproj;']);
eval(['X_' num2str(kk) ' = X_ext;']);
eval(['x_' num2str(kk) ' = x_ext;']);

% Organize the points in a grid:

eval(['n_sq_x_' num2str(kk) ' = n_sq_x;']);
eval(['n_sq_y_' num2str(kk) ' = n_sq_y;']);

```

Calculo de parametros intrínsecos

```

%go_calib_optim
%
%Main calibration function. Computes the intrinsic andextrinsic parameters.
%Runs as a script.
%
%INPUT: x_1,x_2,x_3,...: Feature locations on the images
%      X_1,X_2,X_3,...: Corresponding grid coordinates
%
%OUTPUT: fc: Camera focal length
%       cc: Principal point coordinates
%       alpha_c: Skew coefficient

```

```

%      kc: Distortion coefficients
%      KK: The camera matrix (containing fc and cc)
%      omc_1,omc_2,omc_3,...: 3D rotation vectors attached to the grid
positions in space
%      Tc_1,Tc_2,Tc_3,...: 3D translation vectors attached to the grid positions
in space
%      Rc_1,Rc_2,Rc_3,...: 3D rotation matrices corresponding to the omc
vectors
%
%Method: Minimizes the pixel reprojection error in the least squares sense
over the intrinsic
%      camera parameters, and the extrinsic parameters (3D locations of the
grids in space)
%
%Note: If the intrinsic camera parameters (fc, cc, kc) do not exist before, they
are initialized through
%      the function init_intrinsic_param.m. Otherwise, the variables in memory
are used as initial guesses.
%
%Note: The row vector active_images consists of zeros and ones. To
deactivate an image, set the
%      corresponding entry in the active_images vector to zero.
%
%VERY IMPORTANT: This function works for 2D and 3D calibration rigs,
except for init_intrinsic_param.m
%that is so far implemented to work only with 2D rigs.
%In the future, a more general function will be there.
%For now, if using a 3D calibration rig, set quick_init to 1 for an easy
initialization of the focal length

if ~exist('n_ima'),
    data_calib_no_read; % Load the images
    click_calib_no_read; % Extract the corners
end;

```

```

check_active_images;
check_extracted_images;
check_active_images;
desactivated_images = [];

recompute_extrinsic = (length(ind_active) < 100); % if there are too many
images, do not spend time recomputing the extrinsic parameters twice..

if ~exist('rosette_calibration', 'var')
    rosette_calibration = 0;
end;

if (rosette_calibration)
    %%% Special Setting for the Rosette:
    est_dist = ones(5,1);
end;

%%% MAIN OPTIMIZATION CALL!!!! (look into this function for the details of
implementation)
go_calib_optim_iter;

if ~isempty(desactivated_images),
    param_list_save = param_list;
    fprintf(1,'\nNew optimization including the images that have been deactivated
during the previous optimization.\n');
    active_images(desactivated_images) =
ones(1,length(desactivated_images));
    desactivated_images = [];
    go_calib_optim_iter;
    if ~isempty(desactivated_images),
        fprintf(1,['List of images left desactivated: ' num2str(desactivated_images)
'\n' ] );
    end;
end;

```

```
param_list = [param_list_save(:,1:end-1) param_list];  
end;
```

Calculo de matriz homogénea del cambio de marco de referencia

```
Sd=[0 0 0 1];  
C_T_O=[Rc_ext Tc_ext;  
       Sd];  
O_T_C=inv(C_T_O);
```

```
R_T_O=[1 0 0 -75.625;  
       0 0 1 188.1;  
       0 -1 0 31;  
       0 0 0 1];
```

```
R_T_C_1=R_T_O*O_T_C
```

ANEXO B

Matrices de rigidez en el espacio de trabajo.

Nº de punto	Matriz de Rigidez Experimental	Nº de punto	Matriz de Rigidez Experimental
1	$K_1 = \begin{bmatrix} -0.2409 & 0.2612 & 0.2029 \\ 0.9153 & 0.244 & 0.6019 \\ 0.0759 & 0.3547 & -1.7682 \end{bmatrix}$	17	$K_{17} = \begin{bmatrix} 0.4067 & 1.0449 & -0.3256 \\ 2.2309 & 0.625 & 3.7133 \\ -0.397 & -0.0833 & -4.25 \end{bmatrix}$
2	$K_2 = \begin{bmatrix} 0.6432 & 1.9244 & -0.7547 \\ 1.4974 & 0.9834 & 1.1074 \\ -0.3293 & 0.3176 & -5.3474 \end{bmatrix}$	18	$K_{18} = \begin{bmatrix} 0.5153 & 3.2944 & 3.4622 \\ 3.4477 & 1.2093 & 2.7386 \\ -1.427 & -2.166 & -2.7715 \end{bmatrix}$
3	$K_3 = \begin{bmatrix} 0.5846 & 2.469 & -1.867 \\ 2.1573 & 0.3004 & -1.0672 \\ 1.4057 & 0.0636 & -6.9971 \end{bmatrix}$	19	$K_{19} = \begin{bmatrix} 1.4803 & 3.415 & -1.6119 \\ 3.2813 & 0.3541 & -0.5249 \\ 1.9326 & -2.483 & -9.8109 \end{bmatrix}$
4	$K_4 = \begin{bmatrix} 0.9024 & 3.5905 & -2.1212 \\ 2.4216 & 0.1522 & -1.6353 \\ 1.8851 & -0.5653 & -8.0531 \end{bmatrix}$	20	$K_{20} = \begin{bmatrix} 0.9187 & 4.9503 & -2.1889 \\ 3.3945 & -1.109 & -1.3906 \\ 3.5416 & -1.6797 & -9.1327 \end{bmatrix}$
5	$K_5 = \begin{bmatrix} -0.7264 & 0.7549 & 0.5098 \\ 1.9367 & 0.1956 & -0.3904 \\ 3.1657 & 0.3094 & -1.8662 \end{bmatrix}$	21	$K_{21} = \begin{bmatrix} -0.1957 & 1.0813 & -1.2851 \\ 2.0303 & 0.2898 & 0.6879 \\ -2.4558 & -0.5735 & -7.1544 \end{bmatrix}$
6	$K_6 = \begin{bmatrix} 0.3742 & -1.8859 & -0.5934 \\ 1.287 & 0.8326 & -0.1482 \\ -0.7707 & 1.1244 & -5.4196 \end{bmatrix}$	22	$K_{22} = \begin{bmatrix} 0.5258 & 3.0737 & -0.9404 \\ 1.6257 & 0.3706 & -0.0102 \\ -2.3103 & -0.9921 & -8.6246 \end{bmatrix}$
7	$K_7 = \begin{bmatrix} 0.3936 & 2.3665 & -1.795 \\ 1.1376 & 0.9905 & -0.2146 \\ -0.4321 & 1.3114 & -5.7741 \end{bmatrix}$	23	$K_{23} = \begin{bmatrix} 0.6689 & 2.991 & -2.6374 \\ 1.471 & 0.8942 & 1.2444 \\ -0.6478 & 1.415 & -7.4348 \end{bmatrix}$
8	$K_8 = \begin{bmatrix} 0.3169 & 2.5592 & -3.4469 \\ 1.0529 & -1.8539 & 6.1085 \\ 0.5298 & 0.9813 & -5.7456 \end{bmatrix}$	24	$K_{24} = \begin{bmatrix} 0.0765 & 2.2633 & -1.077 \\ 2.7754 & -2.1113 & -0.7784 \\ 2.288 & 1.6581 & -12.6361 \end{bmatrix}$
9	$K_9 = \begin{bmatrix} 0.0521 & 0.8043 & 0.1723 \\ 2.565 & -0.0884 & -0.0701 \\ -0.2731 & -0.4488 & -4.3155 \end{bmatrix}$	25	$K_{25} = \begin{bmatrix} -0.055 & 1.0862 & -0.7483 \\ 4.5277 & -0.0435 & -0.049 \\ 1.5734 & -0.1454 & -5.7666 \end{bmatrix}$
10	$K_{10} = \begin{bmatrix} -0.3403 & 2.0047 & -1.2078 \\ 2.2612 & -0.7895 & 0.531 \\ -0.6297 & 0.5384 & -5.7176 \end{bmatrix}$	26	$K_{26} = \begin{bmatrix} -0.2374 & 2.9651 & -1.8942 \\ 4.2569 & -1.0114 & 0.5737 \\ 0.8729 & -1.0636 & -5.3652 \end{bmatrix}$
11	$K_{11} = \begin{bmatrix} 0.0478 & 2.0049 & -1.8961 \\ 1.3164 & -1.1786 & 1.2105 \\ -1.413 & 3.3149 & -9.3918 \end{bmatrix}$	27	$K_{27} = \begin{bmatrix} -0.4399 & 2.9822 & -3.519 \\ 2.1606 & -1.7443 & -0.7861 \\ 0.357 & 1.7217 & -7.5642 \end{bmatrix}$
12	$K_{12} = \begin{bmatrix} -0.2894 & 1.8901 & -2.7761 \\ 0.4669 & 0.5993 & -2.3203 \\ -0.3229 & 1.3367 & -6.1012 \end{bmatrix}$	28	$K_{28} = \begin{bmatrix} -0.3282 & 2.3673 & -3.0833 \\ 0.6913 & 0.671 & -0.0391 \\ -0.8579 & 2.1682 & -9.6239 \end{bmatrix}$
13	$K_{13} = \begin{bmatrix} 0.2831 & 0.6439 & 0.5727 \\ 2.7762 & -0.7057 & -0.509 \\ 0.8565 & -0.2673 & -5.1116 \end{bmatrix}$	29	$K_{29} = \begin{bmatrix} -0.368 & 1.0657 & -0.767 \\ 1.7331 & -0.2399 & -2.0854 \\ 1.4382 & -0.1063 & -4.9649 \end{bmatrix}$
14	$K_{14} = \begin{bmatrix} -0.5237 & 1.7876 & -1.1181 \\ 1.8078 & -1.5016 & -0.1964 \\ 0.1775 & 0.2186 & -3.7892 \end{bmatrix}$	30	$K_{30} = \begin{bmatrix} -1.1411 & 2.6727 & -1.8382 \\ 1.4798 & -0.5474 & 0.0704 \\ 1.5811 & -1.5757 & -4.3408 \end{bmatrix}$
15	$K_{15} = \begin{bmatrix} -0.803 & 2.4815 & -2.6902 \\ 0.9128 & -0.2745 & -0.1591 \\ 0.4428 & -1.0717 & -4.217 \end{bmatrix}$	31	$K_{31} = \begin{bmatrix} -1.7344 & 3.6163 & -2.0876 \\ 1.4329 & -0.2791 & 0.438 \\ 1.3356 & -2.4109 & -6.7579 \end{bmatrix}$
16	$K_{16} = \begin{bmatrix} -0.6811 & 3.0504 & -1.9015 \\ 0.8152 & -0.01 & 0.6028 \\ -1.4549 & -0.9358 & -8.4998 \end{bmatrix}$	32	$K_{32} = \begin{bmatrix} -1.1034 & 3.3137 & -1.5047 \\ 1.8491 & -0.2564 & 1.0873 \\ -1.4914 & -1.4825 & -7.8815 \end{bmatrix}$

Matrices de rigidez en el espacio de trabajo. (Continuación)

Nº de punto	Matriz de Rigidez Experimental
33	$K_{33} =$
	-0.2653 1.3919 -3.2036
	5.1168 0.4159 5.9546
34	$K_{234} =$
	0.3054 1.4254 -0.2228
	4.4796 0.0267 0.5717
35	$K_{35} =$
	-1.0689 -1.2644 -8.2171
	2.2063 7.2533 -0.5708
36	$K_{36} =$
	4.5938 -0.0591 -0.7237
	2.4647 -3.389 -14.5441
37	$K_{37} =$
	3.4201 0.2397 0.4399
	2.2007 0.2391 -2.4562
38	$K_{38} =$
	4.1906 0.0341 -6.4945
	-2.4763 2.05 -7.2124
39	$K_{39} =$
	2.1564 0.285 -0.7246
	-0.2616 0.3027 -3.3613
40	$K_{40} =$
	1.0783 2.0978 0.7229
	2.9083 1.5585 2.2704
41	$K_{41} =$
	-8.4556 -5.0445 -22.9197
	3.9674 9.2452 -18.9248
42	$K_{42} =$
	5.2937 -1.5082 5.2204
	2.4301 4.223 -24.3221
43	$K_{43} =$
	-0.9632 5.714 -6.9643
	1.8406 -0.3651 -1.1175
44	$K_{44} =$
	3.8086 -0.7075 -18.606
	6.0589 3.1787 -9.4492
45	$K_{45} =$
	6.7769 -0.174 3.393
	-0.289 1.0995 -5.9354
46	$K_{46} =$
	1.1563 1.2449 -4.3149
	2.0252 -0.1516 -2.1415
47	$K_{47} =$
	0.4763 -0.2783 -2.6826
	-2.1398 8.374 -21.4394
48	$K_{48} =$
	2.2297 -0.5591 -0.5833
	1.0144 -0.0886 -18.0863
49	$K_{49} =$
	-1.9135 5.56 -7.4768
	3.1755 -0.5607 2.9316
50	$K_{50} =$
	-0.7239 -1.3455 -12.9651
	0.7342 1.2172 -4.8496
51	$K_{51} =$
	1.2115 -0.0114 1.1727
	0.0378 1.207 -4.8725
52	$K_{52} =$
	-0.7477 1.4701 -0.745
	1.5348 0.0702 0.3185
53	$K_{53} =$
	0.9709 -1.3532 -8.4962
	-0.9124 2.5128 -6.7592
54	$K_{54} =$
	4.0485 -0.5585 3.4472
	-0.941 -0.3271 -7.7859
55	$K_{55} =$
	0.1949 3.1134 -0.6629
	3.5531 0.4688 2.929
56	$K_{56} =$
	-9.1023 0.7484 -19.1927