



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA



Universidad Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL
MECÁNICA.**

MENCIÓN: PRODUCCIÓN

**Técnica de alineación de sistemas de referencia de
sensores de medida a bordo para calibración de
robots industriales. Aplicación a palpadores
autocentrantes de cinemática paralela.**

AUTOR: JESÚS ANGEL DE PEDRO SANGRÓS.

DIRECTOR: ROBERTO JIMÉNEZ PACHECO.

DIRECTOR: JORGE SANTOLARIA MAZO.

Curso Académico 2011-2012.

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

Centro Politécnico Superior

Universidad de Zaragoza

RESUMEN.

Este proyecto fin de carrera ha sido realizado con el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y debe enmarcarse como una parte de un proyecto mayor de desarrollo e implementación de una técnica de identificación de parámetros cinemáticos de un brazo robot mediante palpador autocentrante y patrón de esferas.

Para realizar esta identificación de parámetros es necesario montar sobre él brazo robot KUKA KR5 SIXX R650 un palpador autocentrante para entre ambos realizar una serie de mediciones con cierta precisión. En este proyecto se hace la corrección del Tool Center Point (TCP) necesaria para que las mediciones del conjunto robot-palpador sean precisas y seguras, ya que un mal posicionamiento del robot-palpador puede derivar en la rotura del palpador.

Los pasos a seguir para corregir la posición del TCP son los siguientes:

- Obtención de la matriz de giro del sistema de referencia del palpador al sistema de referencia global del robot.
- Expresar los puntos del SRpalpador capturados en las trayectorias circulares en SRpalp1.
- Calcular las esferas de ajuste a los puntos expresados en SRpalp1.
- Corregir la posición del TCP.
- Situación real del punto 9 en el cubo.

1. ÍNDICE.

1.	ÍNDICE.....	3
2.	INTRODUCCION.....	5
3.	MARCO.....	6
3.1.	DETERMINACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO ADECUADO PARA LA CONFIGURACIÓN DEL BRAZO ROBOT.....	7
3.2.	CAPTURA DE DATOS DE LA POSICIÓN DE TODOS LOS ELEMENTOS DEL BRAZO MEDIANTE PALPADO DE PUNTOS CONOCIDOS.....	9
3.3.	OPTIMIZACIÓN, TAMBIÉN CONOCIDA COMO IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....	16
3.4.	IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO ÓPTIMO EN POSICIONES DISTINTAS A LAS DE IDENTIFICACIÓN.....	22
3.5.	IDENTIFICACIÓN DE LAS POSIBLES CAUSAS Y FUENTES DE ERROR Y MODELADO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE CORRECCIÓN.....	22
4.	ESTADO DEL ARTE.....	23
4.1.	MÉTODOS MÁS UTILIZADOS PARA CALIBRACIÓN DE ROBOTS.....	23
4.2.	FABRICANTES DE ROBOTS INDUSTRIALES.....	32
5.	CORRECCIÓN DE LA POSICIÓN DEL TCP.....	40
5.1.	OBTENCIÓN DE LA MATRIZ DE GIRO DEL SISTEMA DE REFERENCIA DEL PALPADOR AL SISTEMA DE REFERENCIA GLOBAL DEL ROBOT.....	40
5.2.	EXPRESAR LOS PUNTOS DEL SRPALPADOR CAPTURADOS EN LAS TRAYECTORIAS CIRCULARES EN SRPALP1.....	43
5.3.	CALCULAR LA ESFERA DE AJUSTE A LOS PUNTOS EXPRESADOS EN SRPALP1.....	53
5.4.	CORREGIR LA POSICIÓN DEL TCP.....	54

5.5.	SITUACIÓN REAL DEL PUNTO 9 EN EL CUBO.....	56
6.	JUSTIFICACIÓN.....	59
7.	PRESUPUESTO.....	61
8.	ANEJO 1. EL EQUIPO UTILIZADO.....	63
9.	ANEJO 2. VIDEO ROBOT CORRIGIENDO TCP.....	69
10.	CONCLUSIONES.....	70
11.	BIBLIOGRAFIA.....	72

2. INTRODUCCIÓN.

En este proyecto se va a llevar a cabo una de las fases necesarias para calibrar un brazo robot Kuka KR5 sixx R650 perteneciente al Laboratorio de Metrología de Fabricación del Centro Politécnico Superior. Es necesario puntualizar que el término “calibración”, no se puede extrapolar directamente a un brazo robótico ya que, desde el punto de vista metrológico, no está empleado adecuadamente, así para brazos robóticos se debe usar la expresión, “identificación de parámetros geométricos”.

La identificación de parámetros geométricos consiste en el estudio y optimización de los parámetros del robot que tienen relación con el sistema matemático implementado para dicho robot, básicamente los parámetros necesarios son la longitud de los distintos brazos y el ángulo girado por las articulaciones, estos parámetros pueden obtenerse de las medidas teóricas del CAD del robot, pero estas medidas no serán exactas ya que en la fabricación y mecanización de dichas piezas habrá variaciones dentro de las tolerancias, lo que deriva en una pérdida de precisión. Para realizar la identificación de parámetros geométricos del robot se debe acoplar a este un palpador autocentrante que permita medir la posición del centro de varias esferas, en este proyecto se va a realizar la corrección del TCP(tool center point) del robot haciéndolo coincidir con el sistema de referencia del palpador, con esto se conseguirá un acoplamiento correcto del palpador autocentrante sobre el brazo robótico y un aumento en la precisión de posicionamiento de dicho conjunto robot-palpador, reduciéndose así los riesgos derivados de un posicionamiento incorrecto que podrían llegar a romper el palpador.

3. MARCO.

Este proyecto ha sido realizado con el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y debe enmarcarse como una de las fases para mejorar la precisión de un sistema de posicionamiento basado en un robot de medición. Esta mejora se llevará a cabo mediante la reducción del error en posicionamiento resultado de una optimización de los parámetros cinemáticos del propio sistema robot.

En general, los sistemas de posicionamiento basados en brazos robot industriales están dedicados a tareas repetitivas, por lo que es necesario dotar a estos sistemas de alta repetibilidad, siendo menos importante que posea una elevada precisión en el posicionamiento, dado que generalmente se programan sus posiciones destino por aprendizaje. Por ello, es habitual que los robots industriales posean mejores características de repetibilidad que de precisión de posicionamiento. En este trabajo se desarrolla una técnica para mejorar esta precisión de modo que el robot sea capaz de alcanzar la posición programada en posición y orientación dotándole de mejores características de precisión para aplicaciones de posicionamiento controlado o de medición. Generalmente hablamos de un rango de precisión en torno a 0,1 mm en el caso de sistemas de medida basados en brazos articulados mientras que típicamente para los brazos robot nos encontramos en un rango de 1 mm.

Existen numerosos métodos propuestos por diversos investigadores para abordar el problema de calibración de robots. Este problema, entendido de forma general, persigue la obtención de los parámetros del modelo cinemático del robot a partir de sus valores de diseño, de modo que el error de posicionamiento del robot sea lo menor posible. También de forma general, es posible agrupar los errores de un brazo robot en dos grandes grupos: errores geométricos y errores no geométricos. El primer grupo engloba todos los errores provocados por diferencias entre los parámetros reales y los considerados en el modelo del robot, lo que se traduce en la obtención de coordenadas imprecisas del efecto final en el sistema de referencia global. Este error supone en torno al 95% del error global del brazo, por lo que es de suma importancia obtener de manera correcta los parámetros reales del brazo.

Se conoce como identificación de parámetros a la técnica de obtención del conjunto de parámetros que minimizan el error de posicionamiento del robot, derivado del cálculo de posición y orientación del sistema de referencia controlado de su cadena cinemática. Existen en la bibliografía numerosos procedimientos basados en sistemas de medida externos.

Los pasos generales que se deben seguir para realizar la identificación de parámetros geométricos son:

3.1.- Determinación y construcción del modelo cinemático adecuado para la configuración del brazo robot, indicando las transformaciones geométricas necesarias, la posición de los sistemas de referencia y el conjunto inicial de parámetros geométricos nominales.

Mediante el modelo cinemático se busca conocer la relación entre las variables de la articulación y la posición de estudio. Para ello se define un vector que contiene los parámetros geométricos del modelo que posteriormente van a ser optimizados para obtener el mínimo error. También se puede definir el modelo matemático inverso aunque nos encontramos con un problema debido a que la solución para una posición dada no es única.

A la hora de elegir el método utilizado en la optimización si se aplica un método no lineal se podrá minimizar el error cometido por el brazo robot tomando como dato las medidas reales aunque esto conlleva un inconveniente, no es posible relacionar directamente los parámetros físicos reales y los obtenidos después de la optimización.

El proceso de calibración puede dividirse en tres niveles: el primer nivel tiene como objetivo separar las fuentes de error y mantener la relación entre los parámetros físicos y los matemáticos; el segundo nivel se ocupa de mejorar la precisión del brazo robot mediante la optimización de los parámetros del modelo; el tercer nivel de calibración busca determinar las características dinámicas del robot.

Mediante el modelo se puede detectar matemáticamente las fuentes de error, que se dividen en función de la causa que los provoca en geométricos, debidos a fallos en el montaje; y no geométricos, debidos a cambios en la temperatura, aparición de juego, excentricidad de giro, errores en transmisión, errores del sistema de medida e influencias dinámicas. Podría aparecer otra fuente de error debido a las condiciones ambientales pero como los procedimientos de calibración se llevan a cabo en una sala de temperatura controlada, se pueden aplicar modelos de corrección en función de dicha temperatura. La aparición de cualquier tipo de error acarrea un posicionamiento incorrecto.

Un modelo cinemático tiene que cumplir una serie de propiedades. En primer lugar debe tener suficientes parámetros para expresar las variaciones en la estructura cinemática del robot, lo que hace que el sistema sea completo. Tiene que ser posible relacionar directamente un sistema con otro, esta propiedad se denomina equivalencia. Además tiene que ser proporcional, lo que significa que pequeñas variaciones en la geometría darán lugar a pequeñas variaciones en los parámetros del modelo.

El modelo D-H asigna un sistema de coordenadas a cada articulación de tal forma que se puedan relacionar unos sistemas de referencia con otros mediante matrices de transformación. Dichas transformaciones se expresan mediante cuatro parámetros,

tres de los cuales son fijos y un cuarto que depende de la articulación.

Si hay dos ejes paralelos consecutivos aparece un indeterminación a la hora de fijar el sistema de referencia de esta articulación ya que existen infinitas normales comunes. Hayati y Mirmirani fueron los primeros en plantear una solución para la anterior indeterminación. Su modelo consistía en suprimir el parámetro d_i para esa articulación y hacer que el origen se encontrase en el plano XY del sistema de referencia anterior. Además introducía un nuevo parámetro de rotación β_i que relaciona ambos sistemas de referencia.

Hay otros modelos que se basan en la ecuación de Rodrigues que implican que el desplazamiento de un punto depende de un giro alrededor de un determinado eje así como de su velocidad angular. Estos modelos acarrean otro problema, ya que se introducen más parámetros de los necesarios.

Si se analiza el movimiento desde el punto de vista de sólido rígido se pueden modelar los errores mediante matrices intermedias. Esto se consigue introduciendo otra matriz que recoja los movimientos no nominales, ya que los movimientos nominales de giro o traslación simple van acompañados de pequeños giros o desplazamientos que provocan error. Zhang fue el primero en modelar el comportamiento de las guías mediante un movimiento con seis grados de libertad.

El modelo de Zhuang se basa en que si a un modelo incompleto se le añaden los suficientes parámetros lo podemos convertir en un modelo completo. De esta forma se parte del modelo D-H y se le añaden dos parámetros para modelar la posición de referencia.

Otro grupo de modelos se basan en modelar la posición física del cero de los encoders. Hay que tener en cuenta que habitualmente el cero físico coincide con la posición en la que el brazo robot se encuentra extendido. Con estos modelos se busca encontrar la relación entre el sistema de referencia en la posición inicial nominal y el cero de los encoders. Para ello se introduce un tercer parámetro que modela el error entre la posición inicial y el cero del encoder.

En los modelos anteriormente descritos se modela el error identificado mediante el aumento de parámetros, lo que conlleva un aumento de la complejidad.

Para poder realizar una comparación de resultados es necesario disponer de los datos proporcionados por el brazo robot así como del posicionamiento real de los puntos medidos. Para ello se debe introducir un sistema de medida con el que obtener las coordenadas reales de los puntos capturados. Como todos los instrumentos de medida tienen un determinado error, se debe usar un sistema que sea más preciso que el brazo robot que estamos optimizando, generalmente será suficiente usar un instrumento que sea un orden de magnitud más preciso que la precisión nominal de posicionamiento del robot. La obtención de los valores reales puede realizarse mediante un sistema de medición externo o usar patrones de medida.

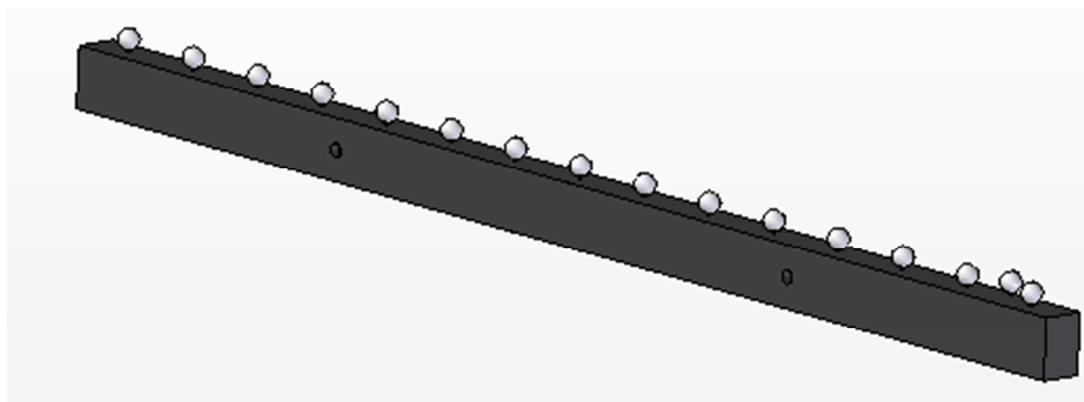
Una vez que se ha elegido el método a usar para la captura de datos se debe determinar el número de posiciones en las que vamos a capturar datos. Es muy

importante que las medidas estén bien distribuidas para cubrir todo el rango de trabajo del brazo robot.

Es habitual que se capturen más datos de los necesarios para que estos datos sobrantes permitan evaluar el conjunto de parámetros obtenidos. Lo que se pretende es minimizar la diferencia entre los valores tomados por el modelo y las nominales para una determinada posición y esto se consigue mediante un proceso iterativo en el que se va reduciendo la variable que consideremos: error en distancia, desviación estándar, recorrido, error medio, error máximo...

3.2.- Captura de datos de la posición de todos los elementos del brazo mediante palpado de puntos conocidos, generalmente materializados por un patrón u otro instrumento de medida como un interferómetro láser o un láser tracker.

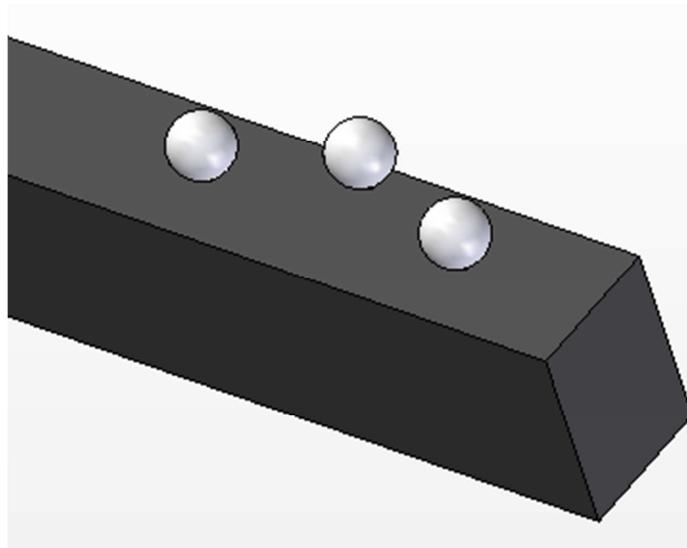
- En primer lugar se debe analizar el tipo de patrón que se va a utilizar en función de la configuración del brazo robot teniendo en cuenta también cual será el número mínimo de posiciones en las que se deben tomar medidas. Es importante que los puntos de medida sean representativos y se puedan extender los resultados a todo el volumen de trabajo.
- El patrón que se va a utilizar es un patrón unidimensional con esferas cuya distancia entre centros está calibrada. Se debe colocar el patrón en una serie de posiciones para que quede cubierto todo el rango de medida. Existen patrones bidimensionales y tridimensionales que nos permiten cubrir el volumen de trabajo con un menor número de posiciones pero estos patrones tienen menos precisión además de ser menos manejables y menos versátiles.



Barra patrón.

- El patrón consta de 15 esferas calibradas de cerámica de diámetro 22 mm. Contamos también con una esfera adicional situada fuera de la línea que une las 15 esferas. Esta esfera es necesaria para determinar un sistema de

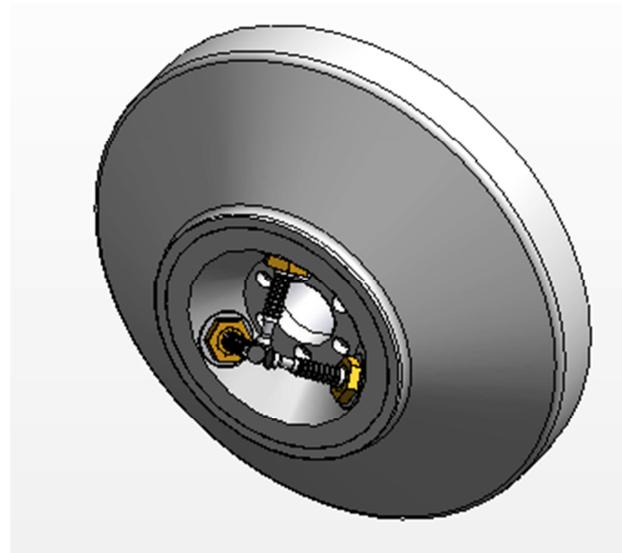
referencia. La línea que une el centro de la esfera 1 y de la esfera 10 forma el eje X, mientras que el eje Z queda definido por la normal al plano formado por los centros de las esferas 1,10 y la esfera auxiliar. Las esferas están asentadas sobre una barra de fibra de carbono que las aporta rigidez y estabilidad. Esta barra cuenta con unos orificios roscados que permitirán su sujeción en distintas posiciones.



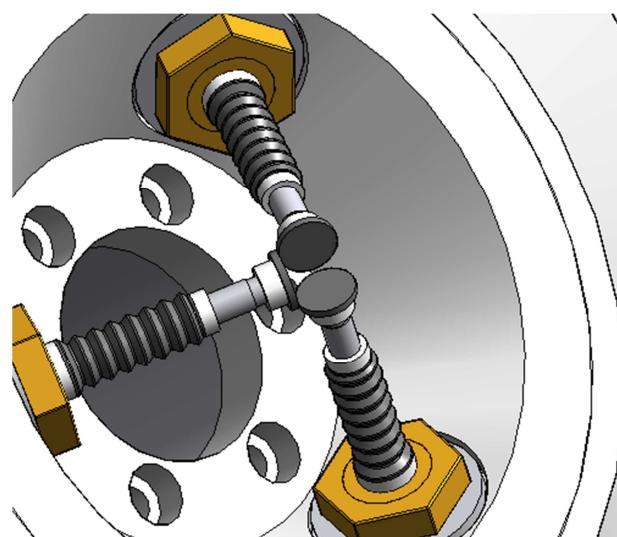
Detalle de la barra patrón.

- Las condiciones ambientales tienen que estar controladas durante el ensayo para que no afecten a los resultados. Las medidas se realizarán en un entorno controlable donde la temperatura es estable y tiene una variación de $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$. Además es recomendable comenzar con la toma de datos una vez se haya cumplido el periodo de estabilización para el brazo robot y para el patrón que se considera de 24 horas. Cuando se hayan obtenido los parámetros geométricos se podrán corregir los efectos de la temperatura a la que se han llevado a cabo los ensayos.
- Se va a utilizar un palpador autocentrante que nos permite conocer directamente el centro sin necesidad de ir palpando los puntos de la superficie de la esfera. Con este palpador se puede conocer directamente las coordenadas del centro de la esfera palpada X_{palp} , Y_{palp} y Z_{palp} , que se corresponden con los tres últimos parámetros del modelo.
Como ya se ha explicado anteriormente se usará un palpador autocentrante para la medición de los centros de las esferas del patrón. Este tipo de palpadores están compuestos por tres encoders lineales al final de los cuales se posiciona una pequeña cala patrón que materializa una superficie plana.

Los encoders lineales tienen un rango de medición de 13 mm, determinado por la contracción que es capaz de soportar. Una vez que los tres encoders lineales se encuentran en contacto con un elemento, en nuestro caso con las bolas del patrón, se puede conocer la posición del centro de la esfera palpada analizando lo contraídos que están los encoders lineales del palpador y su modelo matemático, que nos dará coordenadas del centro de la esfera en el sistema de referencia global del palpador directamente con un palpado. Esto tiene la ventaja frente al palpado de varios puntos en la superficie de la esfera dado que son necesarios más puntos y la aplicación posterior de un algoritmo de mínimos cuadrados para conocer el centro.

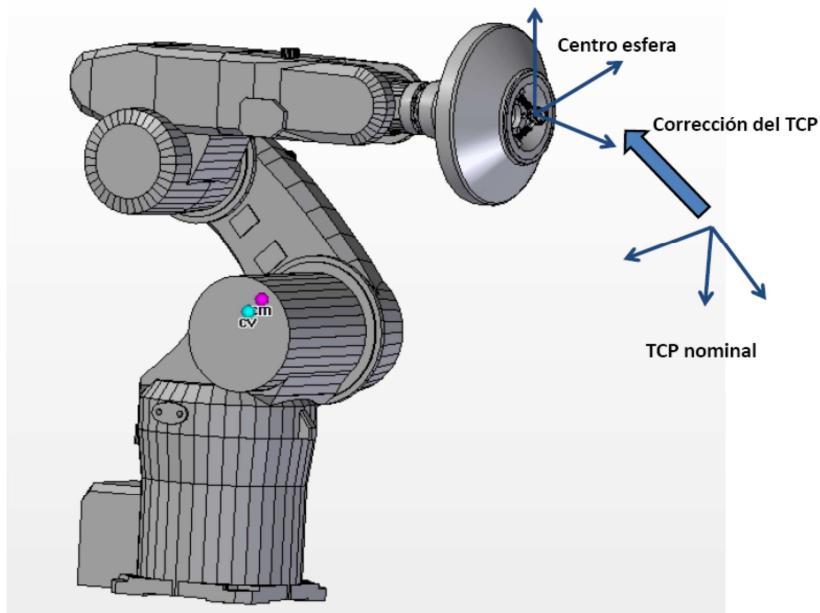


Palpador autocentrante.



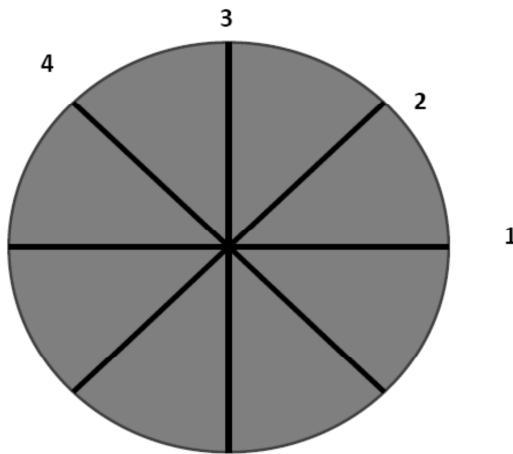
Detalle del palpador autocentrante.

- Como se puede imaginar el rango de compresión de cada encoder lineal no es muy grande por lo que si el palpador no se orienta apropiadamente y alguno de los encoders lineales sufre una compresión mayor de la permitida este podría quedar dañado. Para evitar que esto se produzca hay que asegurarse de que el palpador este calibrado correctamente porque cuando se programa un determinado movimiento en el robot esta trayectoria se define entorno al TCP (tool center point). Si este punto no está bien calculado la trayectoria resultante no será la programada por lo que el palpador se encontrará en un punto equivocado del espacio pudiendo quedar dañado al colisionar con algún objeto. Por consiguiente se debe definir la relación entre el TCP y el sistema de referencia palpador. En un principio se cuenta con las relaciones nominales aunque estas pueden no ser las reales ya que pueden haber sido alteradas por errores en el montaje. Para conocer con mayor exactitud la posición del TCP en referencia al sistema de referencia palpador tenemos que proceder a la corrección del TCP, que se explica en este proyecto fin de carrera.
- Como se ha mencionado anteriormente es muy importante para la seguridad del equipo que las coordenadas del TCP sean las correctas. Lo que se busca con la corrección del TCP es la traslación del sistema de coordenadas centrado en el TCP definido por las medidas nominales, al sistema de coordenadas centrado en el TCP real. Para ello será necesario conocer el vector de traslación de un TCP a otro y esto se consigue siguiendo el método de corrección del TCP que se basa en el seguimiento de trayectorias esféricas determinadas para poder calcular de esta forma el centro de la misma trayectoria.



Traslación del TCP.

- El proceso de palpado comienza con el acercamiento manual del palpador a la bola de la que se van a tomar lecturas. Mediante este aproximamiento se consigue que los tres encoders lineales entren en contacto con la esfera, de esta forma se hace coincidir el centro de la esfera con el centro del sistema de coordenadas. En el actual proceso se van a tomar 60 puntos por bola, repartidos en cuatro trayectorias circulares que cubren gran parte de la superficie de la esfera. El proceso de captura es un proceso automatizado de captura estática, es decir, cuando el robot llega al punto que ha de ser palpado se detiene y en ese momento el palpador comienza a capturar puntos. Cada toma de datos del palpador proporcionará las coordenadas X, Y, Z en el sistema de referencia palpador así como los ángulos de las articulaciones del robot para que el punto quede perfectamente definido. El sistema está programado para que en cada parada se tomen 100 lecturas, de esta forma se tomará como posición del punto palpado la media de las lecturas tomadas. Este procedimiento nos va a permitir ver si hay algún valor en las 100 lecturas que se desvíe en exceso de la media, determinando así si hay problemas de vibración o si el palpador está defectuoso.



Trayectorias de palpado sobre cada esfera.

- A la hora de elegir las posiciones de medida se debe que intentar cubrir el rango de giro de todas las articulaciones para que queden reflejadas en los resultados todas las influencias de las distintas articulaciones. Como el procedimiento de optimización está basado en el método de mínimos cuadrados, se obtendrá un error pequeño en posiciones próximas a las utilizadas para la optimización mientras que el error no será tan pequeño en posiciones lejanas. Por este motivo es importante que el ángulo de giro de cada articulación quede cubierto.

La repetibilidad de posicionamiento se consigue en cierta medida gracias a la repetibilidad de giro de las articulaciones aunque esto no es generalizable porque es necesario que la secuencia de giros sea la misma.

Además de las posiciones medidas hay que analizar otra posición en la que se tomen datos de todas las esferas. Esta posición no se utilizará para hallar los parámetros óptimos sino que se usará para evaluar los parámetros obtenidos. Se deben distribuir las posiciones por el volumen de trabajo para que los resultados sean generalizables.

- Como se ha elegido un patrón unidimensional bastante largo cuya longitud es 1,4m se debe tener en cuenta que conforme la longitud aumenta, disminuye la estabilidad dimensional y aumentan las deflexiones por su propio peso y por la fuerza de palpado. Para el presente caso se eligen siete posiciones por cuadrante.

El número de esferas palpadas depende en parte de la capacidad de movimiento del robot en la posición de medida, de esta forma se tomarán datos de cuatro esferas en todas las posiciones en las que sea posible y en el resto de posiciones se medirán tantas esferas como sea posible. La diferencia de valores obtenidos para el centro de una misma esfera quedará reflejada mediante la desviación y nos informará sobre la repetibilidad de medición.

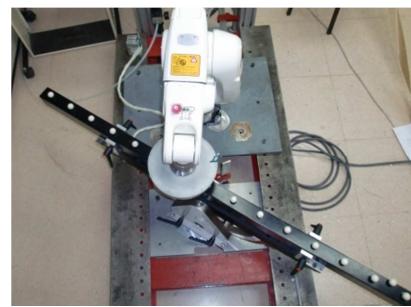
Se tomará como centro de la esfera la media de los centros medidos. El error en distancia se calculará como la diferencia entre la distancia nominal y la distancia entre centros se han medido.

- En las siguientes figuras se muestra el conjunto de posiciones, incluyendo una figura virtual en la que se muestran todas las disposiciones de la barra patrón para que se pueda apreciar cómo se cubre un gran porcentaje del volumen de trabajo.

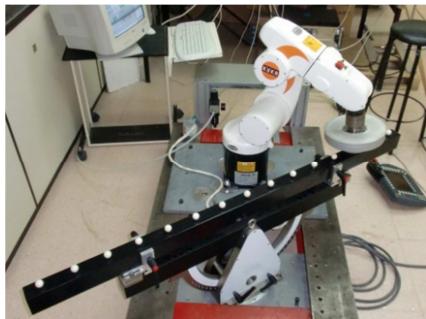
POSICIÓN 1



POSICIÓN 2



POSICIÓN 3



POSICIÓN 4 (TEST)



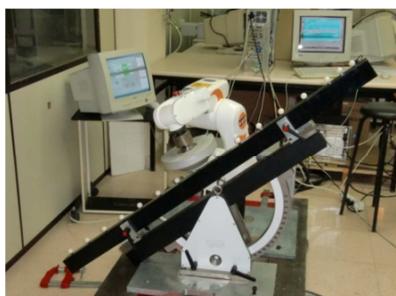
POSICIÓN 5



POSICIÓN 6



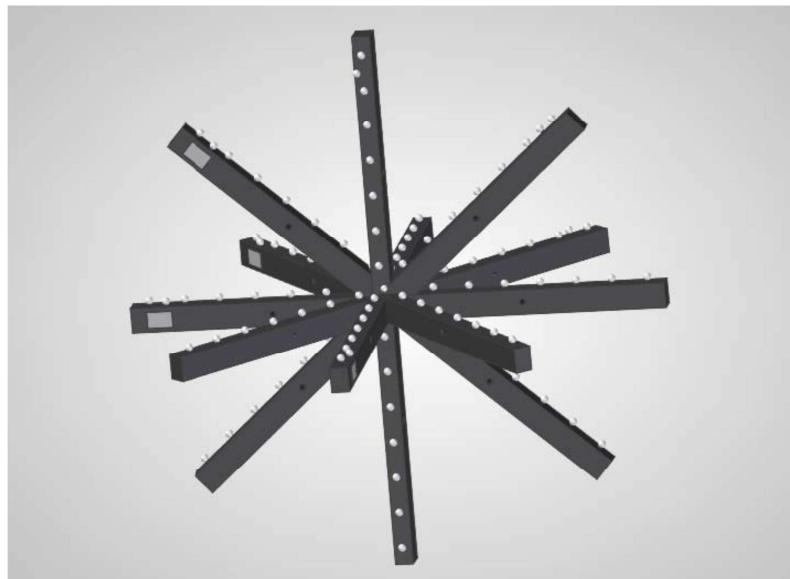
POSICIÓN 7



POSICIÓN 8



Figura 10: Representación de las posiciones de medida.



Espacio cubierto en la toma de datos.

3.3.- Optimización, también conocida como identificación de parámetros geométricos normalmente realizada mediante procedimientos de aproximación basados en distintos tipos de ajuste por mínimos cuadrados a los datos medidos.

- Cuando se realiza la optimización, en cada iteración se obtiene una variación en los parámetros cinemáticos que dependerá de la dirección de optimización. Para cada iteración, una vez que se conocen los parámetros cinemáticos de la misma, se han de calcular los parámetros de calidad correspondientes que nos indicaran entre otras cosas el error medio, el error máximo y la desviación estándar.
- Las técnicas de optimización basadas en el método del gradiente requieren que los valores iniciales estén cercanos a los óptimos ya que se trata de técnicas que buscan un óptimo local. Mediante otros métodos como los algoritmos genéticos se puede obtener buenos resultados aunque no se encuentre cerca del óptimo, pero el resultado mejorará si los valores iniciales son próximos al valor óptimo.
- Tomaremos como valores iniciales para el procedimiento de optimización los valores nominales del robot proporcionados por el fabricante. Como se ha explicado anteriormente el resultado de la optimización dependerá del método utilizado, en este caso utilizaremos el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

- En cada iteración el valor de los parámetros varía según la dirección en que disminuya el valor de la función objetivo, esta estará compuesta por la suma cuadrática de una serie de términos. A la hora de definir la función objetivo se debe tener en cuenta dos aspectos importantes: el primero de ellos es que si no se ponen restricciones en el cálculo de distancias, se tendrán en cuenta distancias nulas debidas a la distancia entre una bola y sí misma; también hay que evitar que la distancia entre dos bolas se considere por duplicado en función del origen.
- El criterio de parada del algoritmo se fijara para que prosiga hasta que se encuentre un óptimo. Como en la mayoría de los casos este punto no se encontrará se le añaden una serie de condiciones que limiten su continuidad. Además se revisarán los resultados obtenidos de forma continuada para detener el algoritmo en el momento en que los resultados se estabilicen.
- Como ya se ha comentado, los resultados obtenidos dependerán de la función objetivo que se plantee. Además debido a la incertidumbre existente en si la consideración de los parámetros del TCP como variables puede proporcionar mejores resultados se realizarán ensayos con y sin la matriz de cambio. A continuación se muestran los ensayos que se han efectuado, indicando los términos que forman parte de la función objetivo:

- Errores en distancia sin matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q (D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2$$

- Errores en distancia con matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q (D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2$$

- Errores en distancia y desviación sin matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2 + (\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2 \right]$$

- Errores en distancia y desviación con matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2 + (\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2 \right]$$

- Errores en distancia y raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones sin matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2 + \sqrt{(\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2} \right]$$

- Errores en distancia y raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones con matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2 + \sqrt{(\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2} \right]$$

- Errores en distancia y recorrido sin matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{n_{jk}})^2 + (\Delta_{Xij})^2 + (\Delta_{Yij})^2 + (\Delta_{Zij})^2 \right]$$

- Errores en distancia y recorrido con matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 + (\Delta_{Xij})^2 + (\Delta_{Yij})^2 + (\Delta_{Zij})^2 \right]$$

- Errores en distancia y raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los recorridos sin matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 + \sqrt{(\Delta_{Xij})^2 + (\Delta_{Yij})^2 + (\Delta_{Zij})^2} \right]$$

- Errores en distancia y raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los recorridos con matriz de cambio.

$$\emptyset = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 + \sqrt{(\Delta_{Xij})^2 + (\Delta_{Yij})^2 + (\Delta_{Zij})^2} \right]$$

- Introducir los parámetros que proporcionan error medio mínimo en el caso 1 como iniciales en el caso 3.

$$\phi_1 = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q (D_{ijk} - D_{njk})^2$$

$$\phi_2 = \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 + (\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2 \right]$$

- Introducir los parámetros que proporcionan desviación mínima en el caso 5 como iniciales en el caso 7.

$$\begin{aligned} \phi_1 = & \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 \right. \\ & \left. + \sqrt{(\sigma_{Xij})^2 + (\sigma_{Yij})^2 + (\sigma_{Zij})^2} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_2 = & \sum_{i=1}^p \sum_{j,k=1}^q \left[(D_{ijk} - D_{njk})^2 + (\Delta_{Xij})^2 + (\Delta_{Yij})^2 \right. \\ & \left. + (\Delta_{Zij})^2 \right] \end{aligned}$$

- Error medio sin matriz de cambio.

$$\phi = \sum_{i=1}^p (D_{ijk} - D_{njk})^2$$

- Error medio con matriz de cambio.

$$\phi = \sum_{i=1}^p \left(D_{ijk} - D_{njk} \right)^2$$

- error máximo sin matriz de cambio.

$$\phi = \sum_{i=1}^p \left[\max \left(D_{ijk} - D_{njk} \right) \right]^2$$

- error máximo con matriz de cambio.

$$\phi = \sum_{i=1}^p \left[\max \left(D_{ijk} - D_{njk} \right) \right]^2$$

- En las ecuaciones anteriores el sufijo n denota la medida nominal, i la posición a analizar y j y k hacen referencia a las bolas.
- Para cada caso analizado se buscará la iteración en la que las variables deseadas se hacen mínimas. De esta forma para los casos 1 y 2 se buscará el mínimo error y el mínimo error máximo; para el resto de caso además del mínimo error y mínimo error máximo se tendrá en cuenta la mínima desviación. Además para los casos 7, 8, 9 y 10 se tiene en cuenta la última iteración ya que los resultados obtenidos tendrán un valor del recorrido apropiado.
- Una vez que hemos ejecutado las optimizaciones anteriores se recogen los parámetros de calidad obtenidos en una tabla. También es importante disponer de los datos referentes a los parámetros óptimos de cada ensayo.

- Para saber si los resultados son generalizables habrá que introducir los parámetros óptimos como iniciales y evaluar los parámetros de calidad obtenidos teniendo en cuenta únicamente la posición de test. Para que se puedan extrapolar los resultados tiene que cumplir un criterio que se determine en función de las necesidades de nuestro sistema. En nuestro caso un criterio apropiado es considerar como generalizable aquellos casos en que el error en distancia en la posición de test sea menor al error medio obtenido en la optimización.

3.4.- Implementación y evaluación del modelo óptimo en posiciones distintas a las de identificación.

3.5.- Opcionalmente, identificación de las posibles causas y fuentes de error y modelado e implementación de modelos de corrección. Este último punto es mucho más habitual en brazos robot, dado que existen muy pocos documentos científicos relativos al uso de métodos de corrección en brazos articulados de medición por coordenadas. Existen patentes sobre brazos articulados basadas en sistemas de medida de deformaciones estructurales que son usadas para implementar correcciones dinámicas del brazo en función de su movimiento, además de correcciones térmicas

4. ESTADO DEL ARTE.

4.1. Métodos más utilizados para calibración de robots.

Los robots necesitan una calibración para funcionar con precisión en su cámara de trabajo. Con el tiempo, los robots pueden desviarse de la trayectoria nominal programada deseada. Es necesario volver a calibrarlos para garantizar que el robot está realizando su programa con precisión.

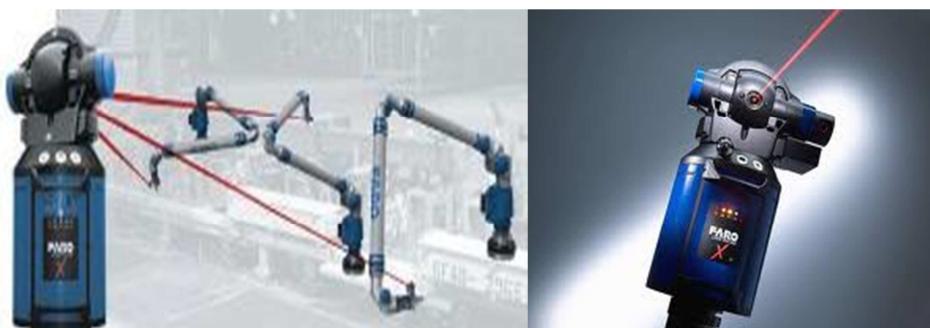
En la actualidad hay distintos sistemas para calibrar un robot, todos ellos buscan representar y corregir la diferencia entre la posición de un robot ideal virtual y el robot real, para ello se necesita saber las coordenadas exactas de distintos puntos dentro del campo de trabajo del robot a calibrar, una vez conocidas estas coordenadas se dirigirá el robot hasta ellas, estudiando la diferencia entre ambas posiciones del robot ideal y real, se podrá corregir la precisión de posicionamiento del robot.

Para conocer la posición exacta del robot se necesita un dispositivo de mayor precisión que este, de manera que podamos comparar ambas lecturas. Los dispositivos más usados para materializar puntos de una manera precisa son el laser-tracker, iGPS, estación total y patrones fabricados con gran precisión.

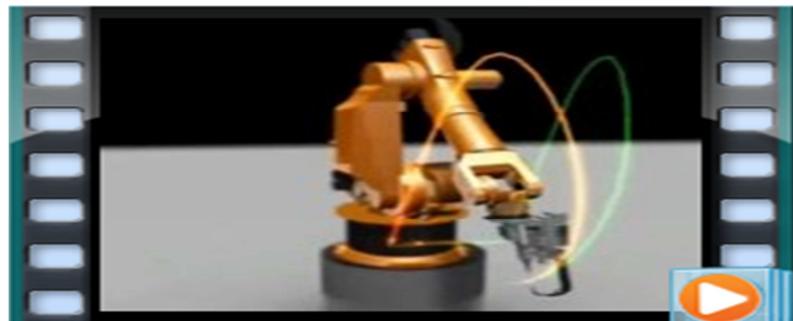
- **El laser-tracker** es un equipo de medición por coordenadas, que permite en este caso comprobar el lugar exacto en el que se encuentra el TCP del robot por medio de un dispositivo que bloquea a la energía reflejada por un láser de marcado o designado de destino y define la dirección de la meta relativa a sí mismo, para posteriormente compararlo con las lecturas extraídas del robot. Marcas comerciales como Faro o Leica producen varios modelos para el mercado, pero su elevado precio hace que solo sea económicamente viable para empresas dedicadas a la calibración.

El laser-tracker proporciona la calibración de robots más precisa y más rápida disponible en la actualidad. Este sistema funciona con todos los tipos y modelos de robots y ahorra horas de formación. Además, su gran precisión se traduce en una gran fiabilidad de la cadena de producción.

El laser-tracker permite a los usuarios aumentar la precisión de sus sistemas de robots y evitar la pérdida de tiempo que supone la formación manual o los trabajos de retoques. Este sistema proporciona una solución para la programación fuera de línea de precisión, para hacer un remastering tras una avería, para establecer o recuperar puntos centrales de la herramienta y para mover un sistema de robots del lugar de montaje al lugar de producción.



Laser-tracker.



Video "Calibrar un robot con laser-tracker" en CD-ROM.

Debido gran coste que representa la adquisición de un Laser-tracker, solo será económicamente viable para las empresas más potentes y con un considerable número de robots, como la aeronáutica o la automoción. Para otro tipo de empresas de menor tamaño y con un menor número de robots la compra de un Laser-tracker no es una opción aceptable desde el punto de vista económico, así este tipo de robots son calibrados por el servicio técnico de las empresas que comercializan los robots, como KUKA, Fanuc o ABB. También las empresas que fabrican el Laser-tracker como Faro o Leica, se dedican a la calibración de robots.

- El **iGPS** es un sistema modular, de gran capacidad que permite el seguimiento y localización en grandes volúmenes de varios puntos a estudiar del robot con una buena precisión. El iGPS es utilizado principalmente por los fabricantes aeroespaciales, pero también es adoptado por los fabricantes de automoción e industriales tanto para aplicaciones de posicionamiento y seguimiento.

Componentes del iGPS:

Transmisores IGPS láser están diseñados para su instalación permanente en los sistemas. Cada transmisor está equipado con baterías recargables, cargador de baterías y estuche. También puede ser equipado con un adaptador de corriente. Las emisiones de láser están certificadas para ser seguras para la vista y clasificadas como Clase 1.



Transmisor laser.

Varios tipos de sensores detectan las señales de luz y enviar las señales a los receptores.

Cilíndrica del sensor

Este sensor es un sensor cilíndrico omnidireccional diseñada para maximizar la visibilidad y la línea de flexibilidad a la vista. Este sensor tiene campo de 360 grados de vista en el plano horizontal y 120 grados de campo de vista (+ / - 60 grados) en el plano vertical. Cada sensor está equipado con un grado de herramientas de interfaz rosca M8.



Sensor cilíndrico omnidireccional.

V-Bar de la sonda de medición

Esta sonda de medición de mano ofrece a los usuarios la totalidad de los 5 grados de flexibilidad en la medida de libertad. Aunque ambos sensores V-Bar debe mantener la línea de visión con los transmisores con el fin de medir, la punta de proyección V-Bar se pueden ocultar desde la línea de láser transmisor de la vista. Esta capacidad es ideal para la medición de difícil acceso y puntos ocultos.

El Hub receptor que procesa las señales de luz (emitida por los transmisores láser) detectados por los sensores. Todos los hubs están equipadas con conectividad Ethernet o inalámbrica integrada .



Receptor de luz Hub.

Área de trabajo de software procesa los datos de ángulo en la posición de alta precisión y la información de orientación y hace que esta información esté disponible para todos los usuarios.



Ordenador portátil y software.

Entre las ventajas del iGPS respecto al laser-traker están, su menor coste y su mejor funcionamiento en volúmenes de trabajo superiores a 10x10x10metros. Como desventaja se puede señalar su peor precisión, sobre todo en el posicionamiento de robots de tamaño medio y pequeño donde el láser-tracker aporta una gran estabilidad.

- **La estación total**, se denomina estación total a un aparato electro-óptico utilizado en topografía, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica. Consiste en la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador a un teodolito electrónico.

Algunas de las características que incorpora, y con las cuales no cuentan los teodolitos, son una pantalla alfanumérica de cristal líquido (LCD), leds de avisos, iluminación independiente de la luz solar, calculadora, distanciómetro, trackeador (seguidor de trayectoria) y la posibilidad de guardar información en formato electrónico, lo cual permite utilizarla posteriormente en ordenadores personales. Vienen provistas de diversos programas sencillos que permiten, entre otras capacidades, el cálculo de coordenadas en campo, replanteo de puntos de manera sencilla y eficaz y cálculo de acimuts y distancias.

Vista como un teodolito; una estación total se compone de las mismas partes y funciones. El estacionamiento y verticalización son idénticos, aunque para la estación total se cuenta con niveles electrónicos que facilitan la tarea. Los tres ejes y sus errores asociados también están presentes: el de verticalidad, que

con la doble compensación ve reducida su influencia sobre las lecturas horizontales, y los de colimación e inclinación del eje secundario, con el mismo comportamiento que en un teodolito clásico, salvo que el primero puede ser corregido por software, mientras que en el segundo la corrección debe realizarse por métodos mecánicos.

El instrumento realiza la medición de ángulos a partir de marcas realizadas en discos transparentes. Las lecturas de distancia se realizan mediante una onda electromagnética portadora con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas. Algunas estaciones totales presentan la capacidad de medir "a sólido", lo que significa que no es necesario un prisma reflectante.

Este instrumento permite la obtención de coordenadas de puntos respecto a un sistema local o arbitrario, como también a sistemas definidos y materializados. Para la obtención de estas coordenadas el instrumento realiza una serie de lecturas y cálculos sobre ellas y demás datos suministrados por el operador. Las lecturas que se obtienen con este instrumento son las de ángulos verticales, horizontales y distancias. Otra particularidad de este instrumento es la posibilidad de incorporarle datos como coordenadas de puntos, códigos, correcciones de presión y temperatura, etc.

La precisión de las medidas es del orden de la diezmilésima de gonio en ángulos y de milímetros en distancias, pudiendo realizar medidas en puntos situados entre 2 y 5 kilómetros según el aparato y la cantidad de prismas usada.



Estación total.

Genéricamente se los denomina estaciones totales porque tienen la capacidad de medir ángulos, distancias y niveles, lo cual requería previamente de diversos instrumentos. Estos teodolitos electro-ópticos hace tiempo que son una realidad técnica accesible desde el punto de vista económico. Su precisión, facilidad de uso y la posibilidad de almacenar la información para descargarla después en programas de CAD ha hecho que desplacen a los teodolitos, que actualmente están en desuso.

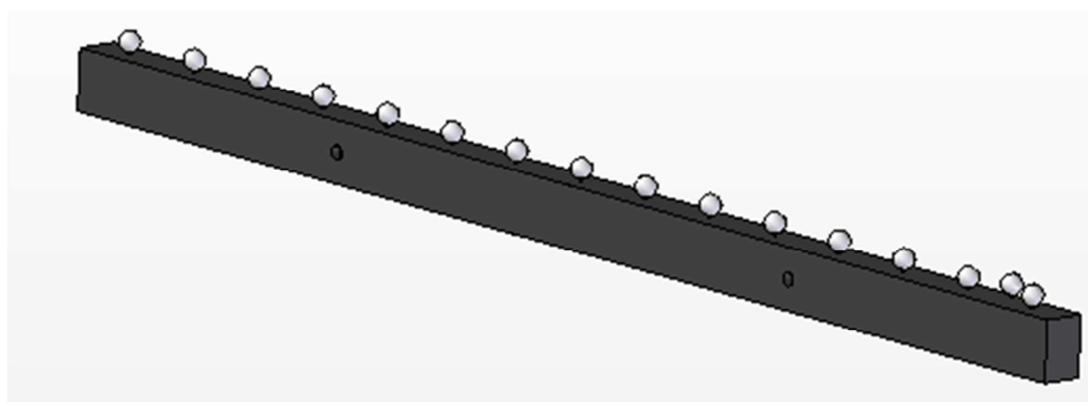
Por otra parte, desde hace ya varios años las estaciones totales se están viendo desplazadas por equipos GNSS (Sistema Satelital de Navegación Global, por sus siglas en inglés) que abarca sistemas como el GPS, antes conocido como

Navstar, de E.E.U.U., el GLONASS, de Rusia, El COMPASS de China y el GALILEO de la Unión Europea. Las ventajas del GNSS topográfico con respecto a la estación total son que, una vez fijada la base en tierra no es necesario más que una sola persona para tomar los datos, mientras que la estación requería de dos, el técnico que manejaba la estación y el operario que situaba el prisma; y aunque con la tecnología de Estación Total Robótica, esto ya no es necesario, el precio de los sistemas GNSS ha bajado tanto que han ido desplazando a aquellas en campo abierto. Por otra parte, la estación total exige que exista una línea visual entre el aparato y el prisma (o punto de control), lo que es innecesario con el GNSS, aunque por su parte el GNSS requiere al operario situarse en dicho punto, lo cual no siempre es posible. La gran ventaja que mantiene la Estación Total contra los sistemas satelitales son los trabajos bajo techo y subterráneos, además de aquellos donde el operador no puede acceder, como torres eléctricas o riscos, y que con sistemas de medición sin prisma de hasta 3000m (a la fecha) estos levantamientos se pueden hacer por una persona y desde un sólo punto, aunque en este aspecto los Escáneres Láser y la tecnología LIDAR han estado ganando terreno.

Por lo tanto, no siempre es posible el uso del GNSS, principalmente cuando no puede recibir las señales de los satélites debido a la presencia de edificaciones, bosque tupido, etc. Por lo demás, los sistemas GNSS RTK (Cinemático de Tiempo Real, por sus siglas en inglés) ya igualan e incluso superan la precisión de cualquier Estación Total, salvando los errores acumulables de éstas últimas, permitiendo además levantamientos de puntos distantes incluso a 100 km sin problema. En el futuro se percibe que la elección entre un equipo GNSS o bien una Estación Total estará más dado por la aplicación en sí, que por los límites tecnológicos que cada instrumento presente.

- **El patrón externo** es un instrumento construido con herramientas de gran precisión, ya que será el encargado de materializar distintos puntos en el espacio y darnos sus coordenadas exactas, para posteriormente dirigir el robot hasta esas coordenadas y poder comparar los datos extraídos del robot con los reales aportados por el patrón.

En este proyecto se ha optado por la utilización de una barra patrón unidimensional, él patrón consta de 15 esferas calibradas de cerámica de diámetro 22 mm. Contamos también con una esfera adicional situada fuera de la línea que une las 15 esferas.



Barra patrón.

4.2. Fabricantes de robots industriales.

En el mercado hay varias empresas dedicadas a la robótica industrial, entre ellas las más conocidas e influyentes son KUKA, ABB y Fanuc. En este apartado se va a realizar un breve resumen de cada una de estas tres empresas.

- **KUKA, la empresa.**



En 1996 sale al mercado una nueva empresa con el nombre de KUKA Roboter CmbH, esta empresa presentó grandes novedades en la feria tecnológica de Hannover, como una unidad de control basada en PC y una guía de usuario para Windows comprensible por cualquier operador. Estas novedades trajeron consigo la era de la auténtica meca-trónica, una minuciosa interacción entre software, sistema de control y mecánica.

Este salto supuso que, gracias a la robótica, los bienes de inversión y de consumo procedentes de los más diversos sectores garantizaran un alto nivel de calidad constante. Porque hoy en día los robots son capaces de casi todo: manipular, apilar, comprobar, pulir o afilar. Respaldados por las nuevas tecnologías en garras y sensores, hoy en día los robots tienen aplicaciones impensables hasta el momento.

El coherente perfeccionamiento de la técnica de robot y control ha hecho posible que la robótica se implante en los mercados más diversos. Los robots cooperantes contribuyen cada vez más a alcanzar una mayor optimización y flexibilidad en la fabricación de vehículos, y no sólo en la industria del automóvil.

En estos casos varios robots trabajan simultáneamente con el objetivo, por ejemplo, de manipular piezas conjuntamente y reducir así los tiempos de los ciclos, o bien para compartir cargas pesadas. Otro nuevo concepto tiene como meta perfeccionar la colaboración entre el hombre y el robot en zonas de trabajo solapadas con el fin de obtener un óptimo grado de automatización. Los paquetes funcionales que se han ido creando desempeñan cada vez un papel más decisivo.

En la industria general, el negocio fuera del sector del automóvil, los nuevos desarrollos van dirigidos sobre todo a nuevos mercados, en especial a la logística, el plástico, el procesamiento de metales, la fundición, la tecnología médica o el entretenimiento. Estos nuevos paquetes funcionales conquistan nuevas áreas de aplicación para la robótica de KUKA. En esta línea, la logística (paletizar, despaletizar), la gestión de equipajes en aeropuertos, las tareas de manipulación en procesos de plegado o el muñeco de pruebas "Occubot" constituyen el centro de atención.

KUKA Robot Group es una empresa de alta tecnología. Además del perfeccionamiento de las unidades de control basadas en PC y de la tecnología en accionamientos, centra también su interés en el desarrollo de nuevas aplicaciones. Con el objetivo de satisfacer la creciente importancia de las unidades de control, KUKA intensifica el desarrollo propio de estos dispositivos (KUKA Motion Control). Por otro lado, la competencia tecnológica de sus productos se ve completada por una vasta gama de prestación de servicios.

El nuevo logro técnico lo encabezan las células en las que trabajan juntos (es decir, "cooperan") robots de diferente tamaño y disposición. Estas células permiten aprovechar de forma todavía más eficaz las posibilidades de aplicación de los robots. El objetivo de esta empresa consiste en flexibilizar los procesos de producción y la configuración del flujo de materiales, así como en implementar unidades de producción modulares. De esta forma se obtiene un incremento más dinámico de la producción, con la consecuente reducción de los costos de fabricación y del tiempo invertido en diseño e ingeniería. Asimismo, otros desarrollos tecnológicos se encargan de aplicar diversos materiales con el fin de obtener unos robots todavía más ligeros y flexibles.

- ABB, la empresa.



ABB (acrónimo de Asea Brown Bo veri) es una corporación multinacional, cuya sede central queda en Zúrich, Suiza y cuyos mayores negocios son los de tecnologías en generación de energía eléctrica y en automatización industrial. ABB opera en más de cien países y emplea a más de 124.000 personas.

ABB es el resultado de la fusión empresarial, en 1988, de la empresa sueca ASEA y de Brown, Boveri & Cie (BBC), industria suiza que había adquirido previamente a Maschinenfabrik Oerlikon en 1967.



ASEA

Elektriska Aktiebolaget (sueco: Compañía Eléctrica) fue una empresa fundada por Ludwig Fredholm en Estocolmo en 1883 para la fabricación de dinamos diseñados por un joven ingeniero llamado Jonas Wenström. El éxito subsecuente impulsó a Fredholm a expandir operaciones y fusionarse con Goran Wenström, hermano de Jonas. La empresa resultante de la fusión, bautizada como Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) fue creada el 18 de noviembre de 1890 con el propósito de proveer equipos eléctricos para la industria sueca en general. Goran Wenstrom compartió responsabilidades gerenciales con Fredholm, quien también se desempeñó como presidente de la Junta. Con el advenimiento de la era de la electricidad ASEA se convirtió en la compañía pionera de este sector en Suecia; la electrificación de un tren de laminación en la ciudad de Hofors es considerada como la primera conversión

de su tipo en el mundo y en 1893, ASEA construyó el primer sistema eléctrico de transmisión trifásico en Suecia, entre Hellsjon y Grängesberg.

Después de una fuerte expansión internacional, la empresa entró en el negocio de tracción ferroviaria, suministrando las locomotoras y el equipo convertidor para los primeros ferrocarriles eléctricos de la línea de Estocolmo-Gotemburgo. En 1932 construyó el transformador trifásico con enfriamiento natural más grande del mundo. En 1933, ASEA y LM Ericsson Telephone Company firmaron un pacto comercial que establecía que ambas empresas no competirían entre sí en ciertos sectores del mercado eléctrico. Como parte de dicho acuerdo, ASEA adquirió Elektromekano, lo que le permitió hacerse con el control absoluto de gran parte del mercado de equipamiento eléctrico en Suecia. Asimismo, la empresa se expandió a nuevos nichos de mercado, a través de la adquisición de Svenska Flaktfabriken, empresa especializada en logística y transporte aéreo, así como del mayor fabricante de motores eléctricos en Polonia, con la finalidad de aumentar su capacidad de producción interna.

Durante la Segunda Guerra Mundial, las operaciones de ASEA se vieron fuertemente limitadas debido a la ocupación de gran parte de Europa por las fuerzas Nazis. En los primeros tiempos de posguerra, la demanda interna de energía se disparó, obligando a las empresas de servicios públicos a una rápida expansión, pero la empresa era incapaz de satisfacer tal demanda de equipos eléctricos, debido a la escasez de materia prima. ASEA llevó a cabo la instalación de la primera línea de transmisión a 400 kV AC en el mundo, tendida entre Harsprång y Hallsberg, en 1952.

Entre otros hitos destacables, la compañía afirma haber producido el primer diamante sintético en 1953, dos años antes de que General Electric anunciase un logro similar en los Estados Unidos. También instaló la primera línea de transmisión permanente de alta tensión en corriente continua (HVDC), uniendo al territorio continental sueco con la isla de Gotland, en 1954. A mediados de la década de 1950, la empresa presentó su modelo de locomotora eléctrica clase ligera, que le dio un notorio impulso a sus actividades de comercialización de equipo ferroviario a nivel internacional.

En 1960 se instaló una fábrica de equipamiento eléctrico en México y al año siguiente la empresa fue reestructurada, con una nueva organización divisional y una subsiguiente reubicación de algunas de sus instalaciones. Se organizó una división de electrónica, marcando el inicio de la transición de ASEA que, de un tradicional fabricante de equipos eléctricos se convirtió en una empresa de

electrónica con tecnología de alta precisión. Durante este período, ASEA ejecutó la construcción de la primera central nuclear a gran escala en Suecia. La compañía se asoció con la división nuclear de la empresa estatal Atom-Energi para formar ASEA Atom en 1968, para luego adquirir el restante 50% estatal de Atom-Energi en 1982.

En 1963 ASEA dio nuevamente un salto adelante introduciendo un tiristor con diseño optimizado, capaz de manejar más potencia que los dispositivos conocidos para la época. Como resultado, la compañía comenzó a producir locomotoras tiristorizadas para sistemas de tracción ferroviaria en Suecia y el resto de Europa y, desde mediados de la década de 1970, en las líneas de Amtrak ubicadas en la conurbación BosWash, en los Estados Unidos.

ASEA se revitalizó a principios de la década de 1980, de la mano del director ejecutivo Percy Barnevik, expandiéndose en áreas de alta tecnología, con grandes inversiones en robótica y en electrónica de última generación. Los costes de desarrollo de la robótica perjudicaron notablemente los beneficios del sector en un primer momento, pero la percepción de Barnevik era continuar invirtiendo en la robótica y en la automatización industrial, considerándolas como áreas de alto crecimiento en el largo plazo. A finales de la década de 1980, ASEA tenía ya una cuota importante del floreciente mercado de controles industriales, así como del aprovechamiento de la energía calórica residual. Con ello, además, la compañía se posicionaba para beneficiarse de un cada vez más creciente interés por controlar los niveles de contaminación industrial en el mundo desarrollado.

Brown, Boveri & Cie

Brown, Boveri & Cie fue fundada en Baden (Suiza) en 1891 por Charles Eugene Lancelot Brown y Walter Boveri, ex-empleados de Maschinenfabrik Oerlikon. Su desarrollo es interesante porque fue una de las pocas empresas multinacionales en operar filiales de un tamaño mayor que el de la casa matriz. Debido a lo reducido del mercado interno suizo, Brown Boveri estableció filiales en toda Europa en un plazo relativamente corto y a consecuencia de ello, confrontó dificultades para mantener un buen control administrativo sobre varias de sus grandes unidades operativas.

Las primeras actividades de Brown Boveri se limitaban a la fabricación de componentes eléctricos tales como motores para locomotoras y equipos generadores de energía para sistemas ferroviarios en Europa. En 1919 la empresa firmó un acuerdo de licencia con la empresa británica Vickers, que dio a esta última el derecho a fabricar y comercializar los productos Brown

Boveri en todo el Imperio británico y en algunas zonas de Europa. Dicho acuerdo significó para Brown Boveri la recepción de un significativo flujo de dinero y la posibilidad de incrementar considerablemente sus ingresos anuales, así como también ayudó a la compañía a expandirse hacia mercados extranjeros en un momento en el cual muchas políticas proteccionistas obstaculizaban las expansiones internacionales.

En la década de 1920, Brown Boveri, ya convertida en una empresa geográficamente extensa y con filiales en Italia, Alemania, Noruega, Austria y los Balcanes, sufrió sus primeras pérdidas significativas debido a las devaluaciones experimentadas por el franco francés y el marco alemán. Al mismo tiempo, en el mercado interno suizo, se incrementaron los costos de producción en tanto que las ventas se mantuvieron estáticas, causando pérdidas adicionales a la empresa. Como consecuencia, en 1924 Brown Boveri devaluó su capital en 30% para poder cubrir las pérdidas sufridas en ese periodo. En 1927, cesó el acuerdo con Vickers, el cual no fue renovado.

En esa misma época, las distintas filiales de Brown Boveri crecieron velozmente. La industrialización de Europa creó una fuerte demanda de equipos eléctricos para la industria pesada. La floreciente industria ferroviaria italiana dio un impulso particularmente fuerte a la filial de Brown Boveri en ese país y la fábrica de la compañía en Alemania desarrolló un volumen de negocios mucho mayor que el de la casa matriz suiza. En las décadas siguientes, Brown Boveri creció a un ritmo más rápido que el de los avances tecnológicos en la ingeniería eléctrica. La tendencia de cada filial era a desarrollarse de forma individual, como si fuesen empresas nacionales en cada país en los cuales existían operaciones y su extensa cobertura geográfica ayudó a aislar a la casa matriz durante épocas de crisis graves, cuando determinadas regiones experimentaban dificultades económicas.

Sin embargo, este tipo de desarrollo segmentado tenía sus inconvenientes. Después de la Segunda Guerra Mundial, la Guerra Fría presentó grandes oportunidades de negocio para contratistas de defensa relacionados con la industria eléctrica, pero las filiales de Brown Boveri eran a menudo percibidas como empresas extranjeras en muchos de los países en que operaban, haciendo a menudo difícil la adjudicación de lucrativos contratos gubernamentales relacionados con tecnología sensible y confidencial. La empresa, no obstante, destacó en el ámbito de la generación de energía eléctrica, inclusive fabricando generadores para centrales nucleares. Los esfuerzos de electrificación llevados a cabo en países del Tercer Mundo también proporcionaron a Brown Boveri ganancias sustanciales. En ese

sentido, cabe destacar la apertura de grandes fábricas de producción en Argentina (1946), México (1947), Venezuela (1955) y Perú (1963). En 1970, Brown Boveri inició una amplia reorganización. Las filiales de la empresa fueron divididas en cinco grupos: alemán, francés, suizo, "mediano tamaño" (con siete bases de producción en Europa y América Latina), y Brown Boveri Internacional (las demás filiales). Cada uno de estos grupos fue desglosado así mismo en cinco divisiones de productos: generación eléctrica, electrónica, distribución de energía, equipos de tracción y equipos industriales.

Fusión

A comienzos de la década de los 90, ABB adquiere Combustion Engineering, empresa estadounidense líder en desarrollo de suministros energéticos nucleares y convencionales en el mercado norteamericano. Posteriormente, continuando con sus planes de expansión, adquirió ELSAG Bailey en 1999, firma que agrupaba a Bailey Controls, Hartmann & Braun, and Fischer & Porter. Hasta ahora, esta ha sido la mayor adquisición en la historia de la corporación y con ella, ABB se ha convertido en el líder del mercado de automatización a nivel mundial.

En 2000, ABB firmó un contrato para suministro de equipos y servicios para dos centrales nucleares norcoreanas, bajo un acuerdo multinacional (KEDO) firmado en 1995 por los gobiernos de Estados Unidos, Japón, la República de Corea, y la Unión Europea. Ese mismo año, la corporación disolvió una empresa conjunta formada previamente con la francesa Alstom llamada ABB-Alstom Power y vendió la parte de sistemas de generación convencional y transporte ferroviario a Alstom Power. ABB vendió además su negocio de generación nuclear a la empresa Westinghouse Electric Company.

ABB sufrió un proceso de reestructuración en 2005 para poder enfocarse en sus principales negocios actuales: Generación eléctrica y Automatización industrial. Esta reestructuración llevó a la empresa a su organización actual de cinco sectores: Productos para Generación Eléctrica, Sistemas de Generación Eléctrica, Productos de Automatización, Procesos Automáticos y Robótica.

Robótica

ABB posee una de las mayores bases de robótica industrial instalada en el mundo, suministrando software, equipos periféricos y celdas de fabricación modular para tareas específicas como soldadura, ensamblaje, pintura, empaque y otros.

- Fanuc, la empresa.



FANUC Robotics America, Inc. es líder en automatización robótica en Norteamérica y Sudamérica. Ofrece más de 200 variaciones de modelos de robots que satisfacen una amplia variedad de aplicaciones. Adicionalmente produce software, controles y equipos de visión que, en conjunto, ayudan a desarrollar sistemas robóticos de última generación y tecnología avanzada. Sus soluciones y servicios de soporte ayudan a la manufactura a alcanzar mejoras significativas en volumen de producción, calidad, productividad y ofrece tasas atractivas de retorno de inversión. Junto a sus oficinas centrales localizadas en Rochester Hills, Michigan., FANUC Robotics cuenta con diez oficinas regionales en E.U.A., Canadá, México y Brazil.

La compañía ofrece estos sistemas a una variedad de industrias – desde la automotriz y metal-mecánica hasta equipos médicos y la industria del plástico. La compañía inició en 1982 en una co-asociación con General Motors Corporation, llamada GMFanuc Robotics Corporation. Un grupo de 70 personas iniciaron trabajando en el Centro Tecnológico de General Motors ubicado en Warren, Michigan.

En 1992, la compañía pasó a ser subsidiaria y totalmente propiedad FANUC Ltd. localizada en Oshinomura, Japón. FANUC Robotics Europa, S.A. su compañía hermana, con sus oficinas centrales localizada en Luxemburg, desde donde ofrece sus servicios a toda Europa. Ventas, servicios y soporte es ofrecido en todo el mundo.

La compañía es promotora del plan “Save Your Factory” (Salva Tu Fabrica), “Save Your Factory” es un consorcio de compañías dedicadas a ayudar y reforzar la manufactura en Norteamérica.

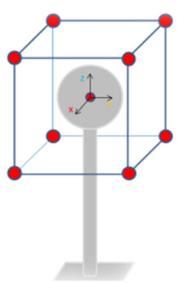
5. CORRECCIÓN DE LA POSICIÓN DEL TCP.

En este apartado se describe el método que se va a utilizar para corregir la posición del Tool Center Point (TCP) y hacerla coincidir con la posición del sistema de referencia del palpador, para después poder usar con garantías de buen funcionamiento el conjunto robot-palpador en la identificación de parámetros geométricos.

5.1. Obtención de la matriz de giro del sistema de referencia del palpador al sistema de referencia global del robot.

Se obtendrán las lecturas del palpador y los ángulos de las cuatro articulaciones del robot en cada vértice de una trayectoria cúbica que haremos con el robot palpando una esfera, más el punto que coincide con el centro del conjunto cubo-esfera, nueve puntos en total.

- A. Con los ángulos del robot durante la trayectoria cúbica se calculan las coordenadas X,Y,Z del centro del sistema de referencia 6(SR6) en sistema de referencia global del robot, usando para ello la función del modelo del robot.



Esta es la trayectoria cúbica que describirá el palpador, el SR6 describirá la misma trayectoria, solo que por encima. El palpador siempre estará en contacto con la esfera mientras describe dicha trayectoria.

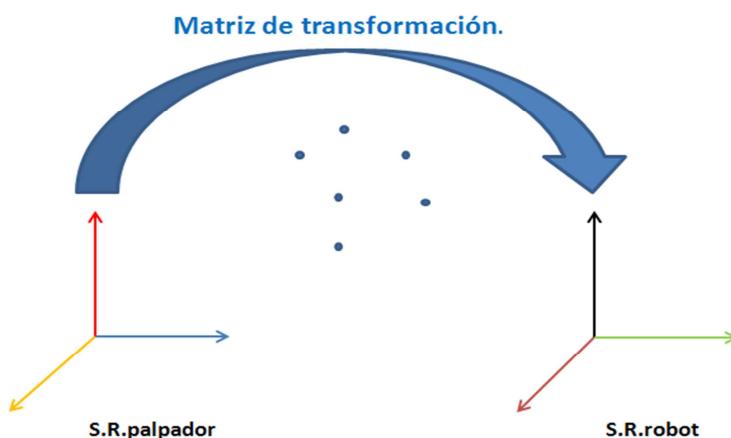
- B. Por otro lado se toman las lecturas del palpador haciendo el cubo, a través de su modelo matemático se obtienen las coordenadas X,Y,Z de los 9 puntos del cubo expresadas en sistema de referencia del palpador(SRPalpador). El SRPalpador se mueve con el palpador, por eso cambiamos el signo a las coordenadas del palpador, de modo que los puntos del cubo se expresan en SRpalpador fijo en el punto que coincide con el centro del cubo. Esto no afecta a la orientación de los ejes del palpador.

Es equivalente a mover la esfera y dejar fijo el palpador.

C. Se obtienen 3 alternativas de la matriz de giro del SRPalpador al SRrobot:

1. **(M1) Mínimos cuadrados**, planteando directamente $A \cdot x = B$ con x los términos de la matriz. Esta alternativa da lugar a una matriz que no es ortogonal, y por ello no es una matriz de giro, ya que, por no ser ortogonal, además de girar, escala.
2. **(M2)** Descomposición polar de la matriz de la alternativa 1, la descomposición polar obtiene la matriz ortogonal más cercana a la matriz dada.
3. **(M3)** Matriz obtenida por el método explicado en el artículo de Berthold K. P. Horn.

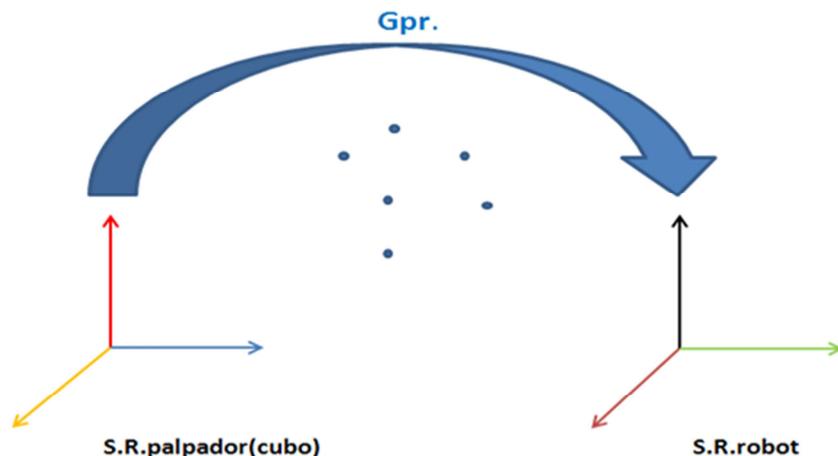
Conocidos los mismos puntos físicos expresados en dos sistemas de referencia diferentes es posible obtener la matriz de transformación entre ambos sistemas de referencia.



En este caso no son físicamente los mismos puntos, ya que en el caso del palpador son posiciones del centro de la esfera y en el caso del SRrobot son posiciones del origen del SR6, que físicamente no están en el mismo sitio. Como la orientación relativa de los sistemas de referencia (palpador y robot) no cambia, aunque no sean físicamente los mismos puntos, no tiene influencia sobre el Gpr, por lo que se puede obtener la matriz de giro por el mismo procedimiento.

Para comprobar la bondad de los métodos (M1,M2,M3), a todas las coordenadas se les resta su respectiva media, de modo que los cubos se trasladan para que el centro esté en cero. Posteriormente, las coordenadas del cubo en SRpalpador se giran con las matrices obtenidas por los tres métodos y se comparan con las coordenadas del cubo expresadas en SRrobot. Con esto se calculan errores máximos y medios (distancia euclídea entre cada punto en SRrobot y cada punto del palpador girado a robot). Las expresaremos en una gráfica.

De las tres matrices obtenidas(una por cada método), nos quedamos con M3, por ser geométricamente el método más robusto y cercano a la realidad física. Con esto ya tenemos la matriz de giro de SRpalpador a SRrobot. La matriz Gpr solo es válida en la orientación del SRpalpador con la que se ha hecho el cubo.



Con esta matriz es posible girar puntos del palpador en la orientación del SRpalpador con la que se ha hecho el cubo al SRrobot.

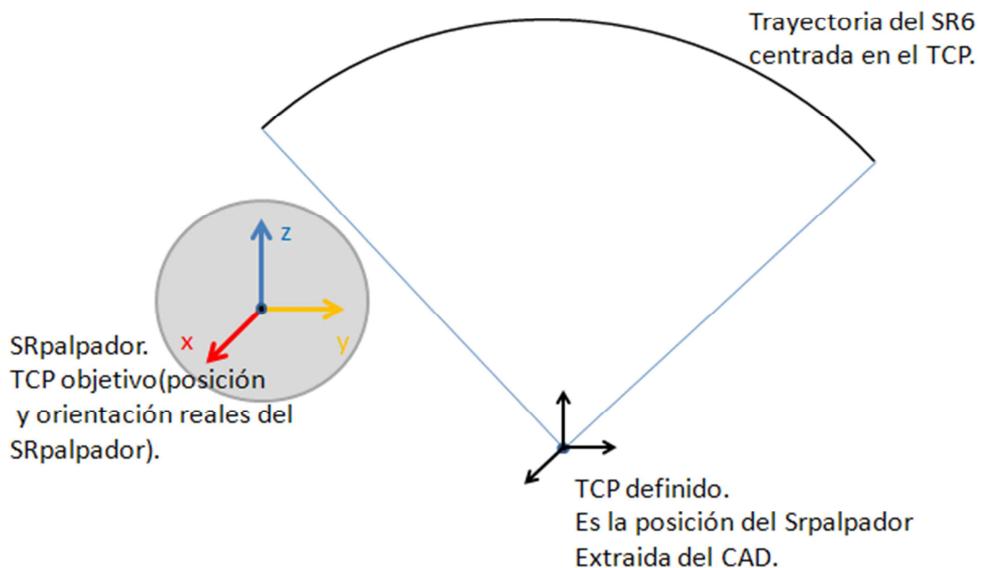
A la posición y orientación del SRpalpador en el punto central del cubo la llamaremos SRpalp1.

5.2. Expresar los puntos del SRpalpador capturados en las trayectorias circulares en SRpalp1.

Cuando el robot va girando sobre la bola y capturando puntos, cada punto se captura con una orientación distinta del SRpalpador, dado que el palpador se mueve cuando se mueve el robot y por tanto también lo hace su sistema de referencia. Cada punto que se capture permite obtener coordenadas del centro de la esfera palpada en SRpalpador en su posición actual, que es diferente en cada punto.

El objetivo de este método es obtener las coordenadas (posición y orientación) del SRpalpador en SRrobot, de modo que sea posible definir como TCP del robot el propio SRpalpador. Con esto conseguimos:

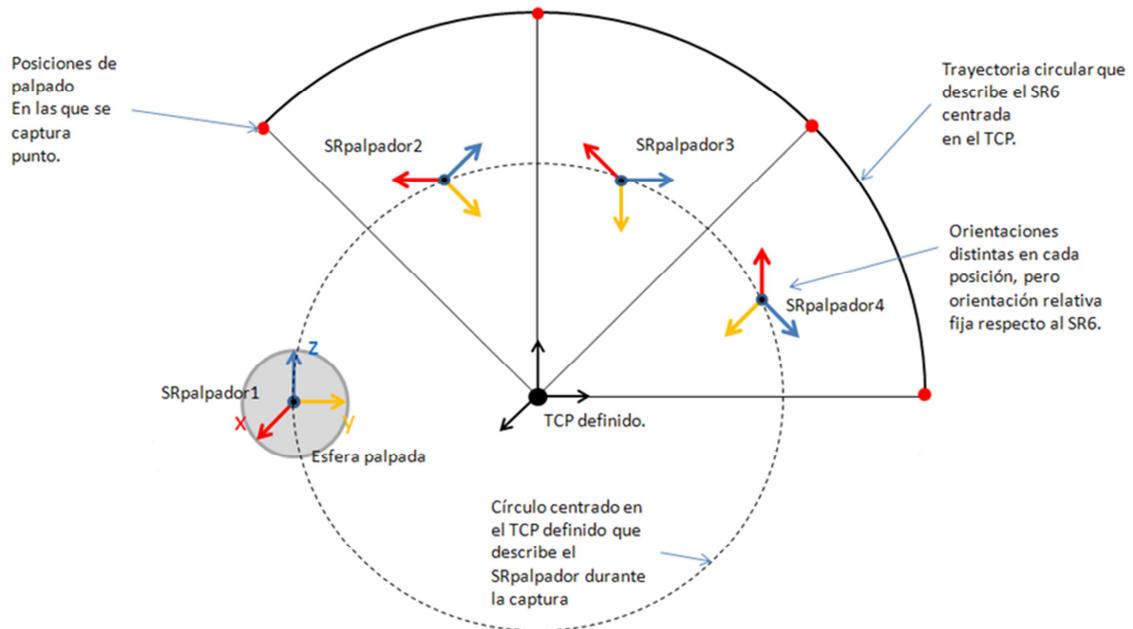
- A. Se obtiene la matriz de transformación de puntos del SRpalpador al SR6 del robot. Esta matriz es independiente de la posición del robot, dado que ambos sistemas de referencia se mueven solidariamente. Conocida esta matriz es posible expresar coordenadas del centro de la esfera palpada en SRrobot, que es lo que se persigue.
- B. Se fija el TCP del robot en el SRpalpador definiéndolo en el control del robot. Esto permite comandar automáticamente el robot a una posición de palpado minimizando el riesgo de un palpado inadecuado, evitando así que se rompan las puntas del palpador. Inicialmente las trayectorias circulares se hacen centradas en el TCP, por lo que, al estar definido en el SRpalpador, el hecho de partir en una posición en la que el SRpalpador esté posicionado en el centro de la esfera hace que la trayectoria esté centrada sobre ese punto y se minimiza el riesgo de que alguno de los Les alcance su rango máximo y rompa, situación que perfectamente puede producirse si partimos con el SRpalpador centrado y hacemos un giro respecto a un TCP definido en otro sitio.



Lo que se persigue con éste método es conocer las coordenadas del SRpalpador en SRrobot de modo que sea posible definir el TCP en el SRpalpador.

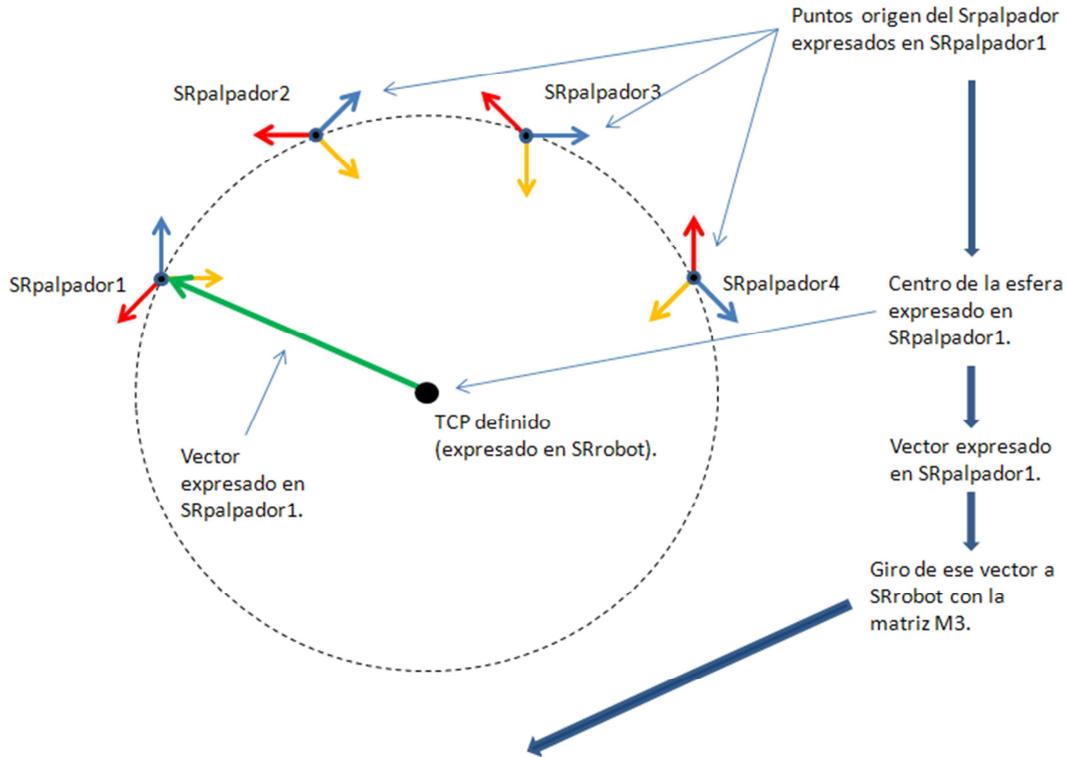
El primer TCP que se define en el robot se hace a partir de las posiciones nominales de los sistemas de referencia extraídas del CAD del montaje. Aunque serán valores aproximados, no coincidirán con las posiciones reales de los sistemas de referencia debido al montaje.

Es necesario hacer el método de captura así, ya que las trayectorias circulares se realizan respecto al TCP que haya definido en el robot. El SRpalpador describirá también una trayectoria circular centrada en el TCP definido en cada trayectoria de captura de los puntos.



Este gráfico corresponde a la primera trayectoria circular. Dado que se realizan 4 a 45º, las posiciones que ocupa el SRpalpador durante las trayectorias de captura corresponderán a la superficie de una esfera centrada en el TCP.

De este modo, se pretende calcular el centro de esa esfera, expresado en SRpalpador, para lo que será necesario expresar todos los orígenes de SRpalpador en las trayectorias de captura en una de sus posiciones. Además dado que es necesario conocer la posición del TCP en SRrobot para poder definirlo en el control, se elige como posición para el cálculo de la esfera la última posición del SRpalpador1 en el palpado del cubo. Debe recordarse que en esa posición es donde conocemos la relación de giro entre SRpalpador y SRrobot.

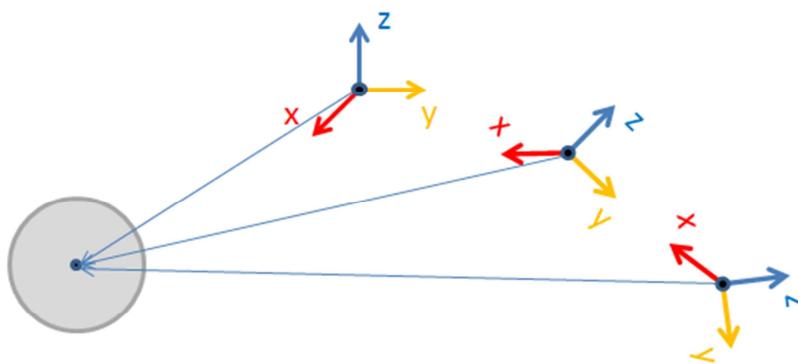


Como el TCP actual está definido en SRrobot y ya tengo ese vector expresado en SRrobot, bastará con sumar las componentes de ese vector al TCP actual para obtener la posición (x, y, z) del nuevo TCP que coincidirá con el origen.

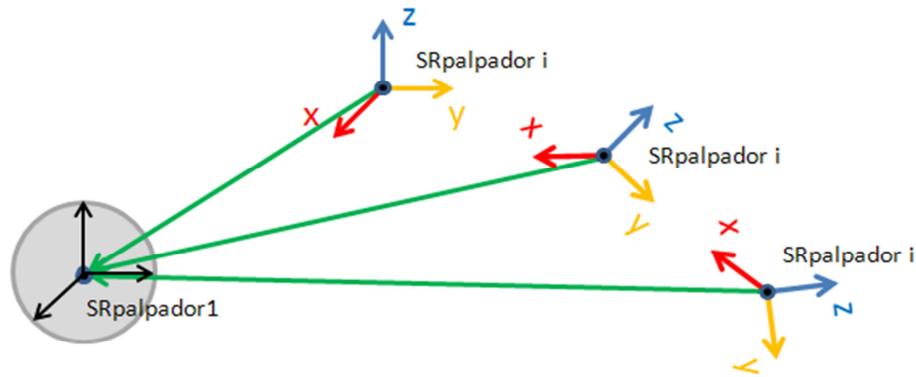
Con esto, ya tenemos la posición y falta la orientación, que veremos más adelante.

- El primer paso entonces es expresar los puntos capturados en las trayectorias circulares en SRpalpador1. En cada posición de captura se obtendrán coordenadas del centro de la esfera expresadas en SRpalpador en su posición actual.

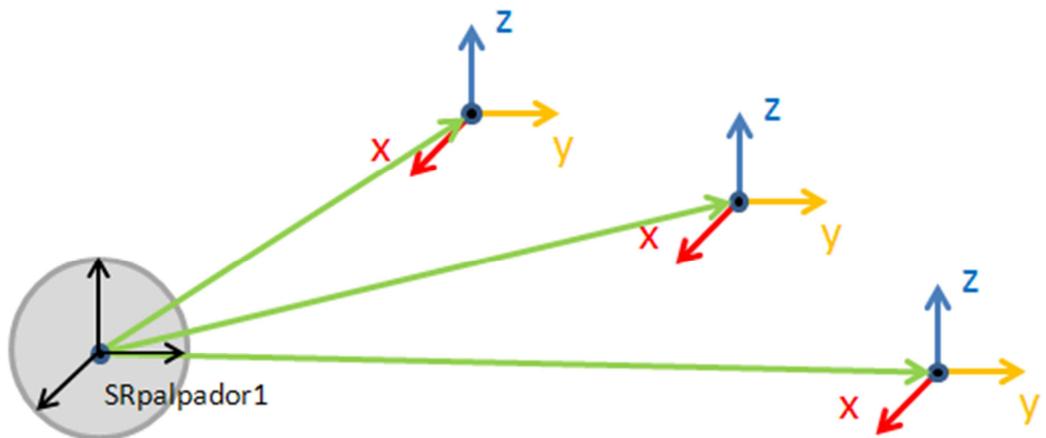
Las coordenadas del centro de la bola en cada posición serán: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$ Palpador i.
Cada una expresada en el SRpalpador en posición i.



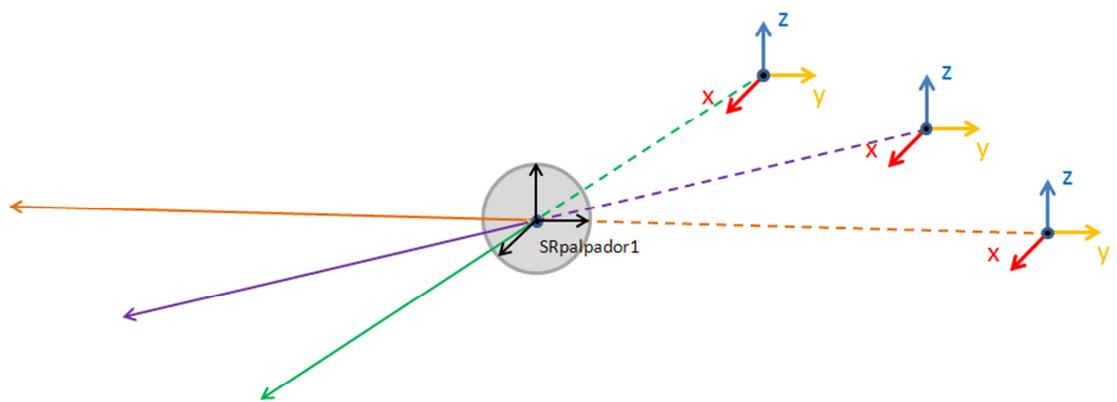
Suponiendo que el cubo ha terminado con el SRpalpador centrado en la esfera, es decir, que las coordenadas del centro de la esfera expresadas en SRpalpador1 en ese punto son (0,0,0) tendríamos:



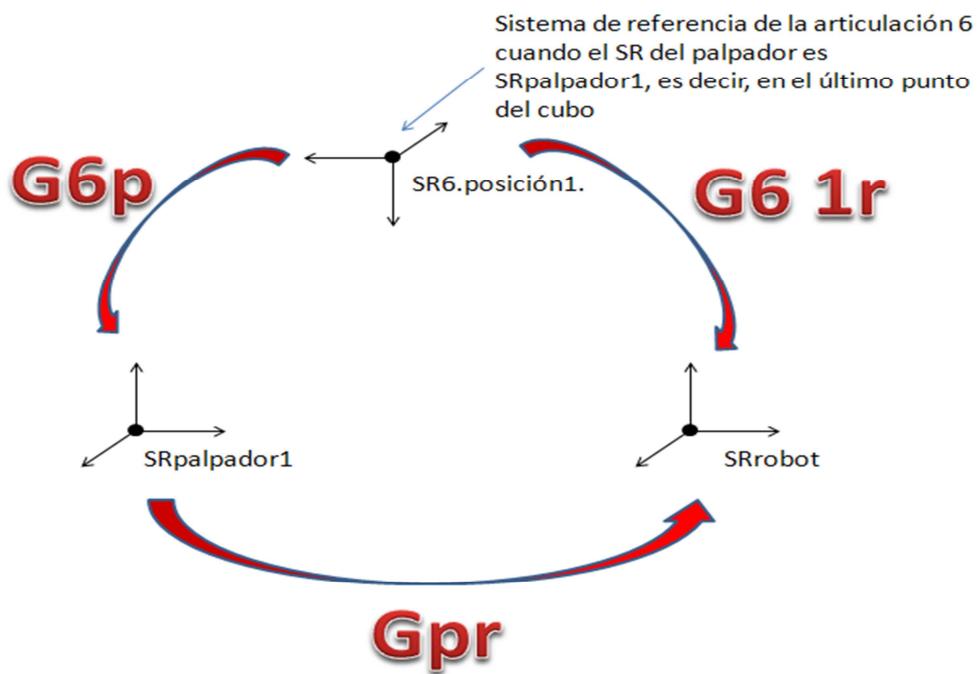
No tenemos información de la traslación, pero girando los vectores verdes de la figura anterior al SRpalpador1 y expresándolos en ese sistema tendremos:



Con lo que conseguimos obtener las coordenadas de los orígenes del SRpalpador en cada posición de captura expresados en SRpalpador1. Es necesario cambiar de signo las coordenadas x , y , z del centro de la esfera en cada posición para conseguir lo anterior. Si no se cambia de signo tendríamos:

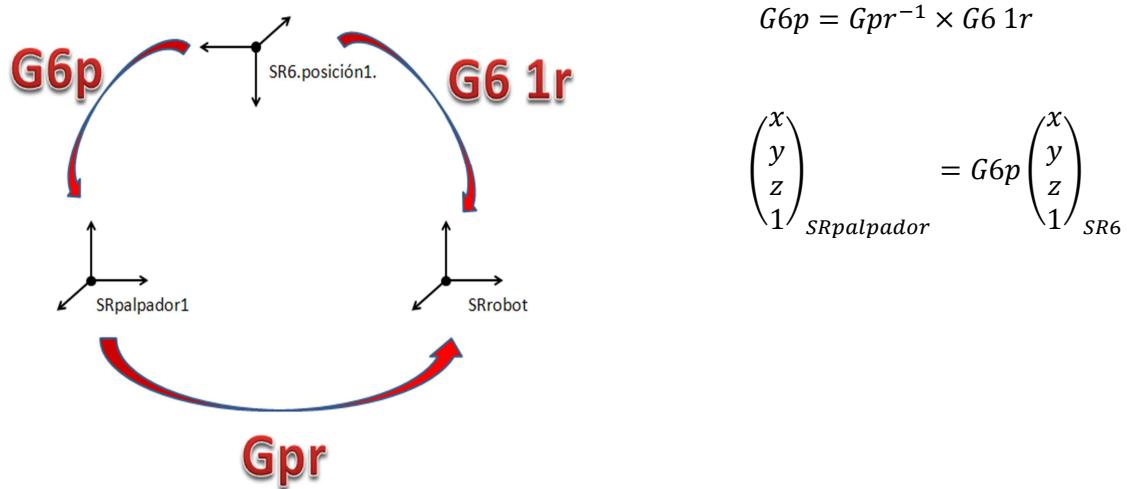


Para expresar las coordenadas del centro de la esfera obtenidas en la posición i del palpador en SRpalpador1 debemos comenzar con:

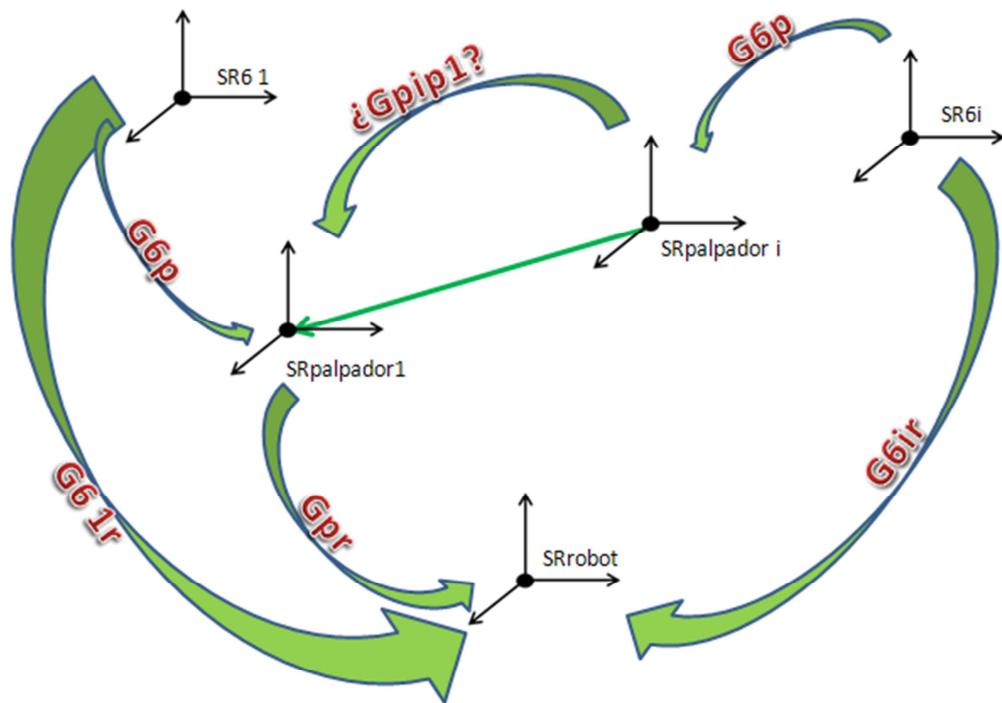


- En la figura anterior:

1. Gpr: matriz de giro del SRpalpador en posición SRpalpador1 y el SRrobot (obtenida por mínimos cuadrados con los puntos del cubo y explicada antes).
2. G6 1r: matriz de giro del SR6 (de la última articulación) y el SRrobot, en la posición del robot correspondiente a SRpalpador1 (obtenida a través del modelo del robot).
3. G6p: matriz de giro del SR6 al SRpalpador1. Las dos matrices anteriores son sólo válidas para la orientación actual del robot (SRpalpador1), esta sin embargo no dependerá de esta orientación, ya que es fija para cualquier posición y orientación de robot. Se obtiene:



- Una vez obtenida esta matriz ya podemos expresar las coordenadas del centro de la esfera obtenidas en la posición i del SRpalpador en SRpalpador1.



- De la figura, la matriz que gira coordenadas del SRpalpador i al SRpalpador1 es:

$$G_{pip1} = G_{6p} \times G_{61r}^{-1} \times G_{6ir} \times G_{6p}^{-1}$$

4 3 2 1

- 1, 4 y 3 son conocidas del paso anterior y G6ir se obtiene del modelo del robot para la posición i a partir de los parámetros nominales del robot y los ángulos de cada articulación.

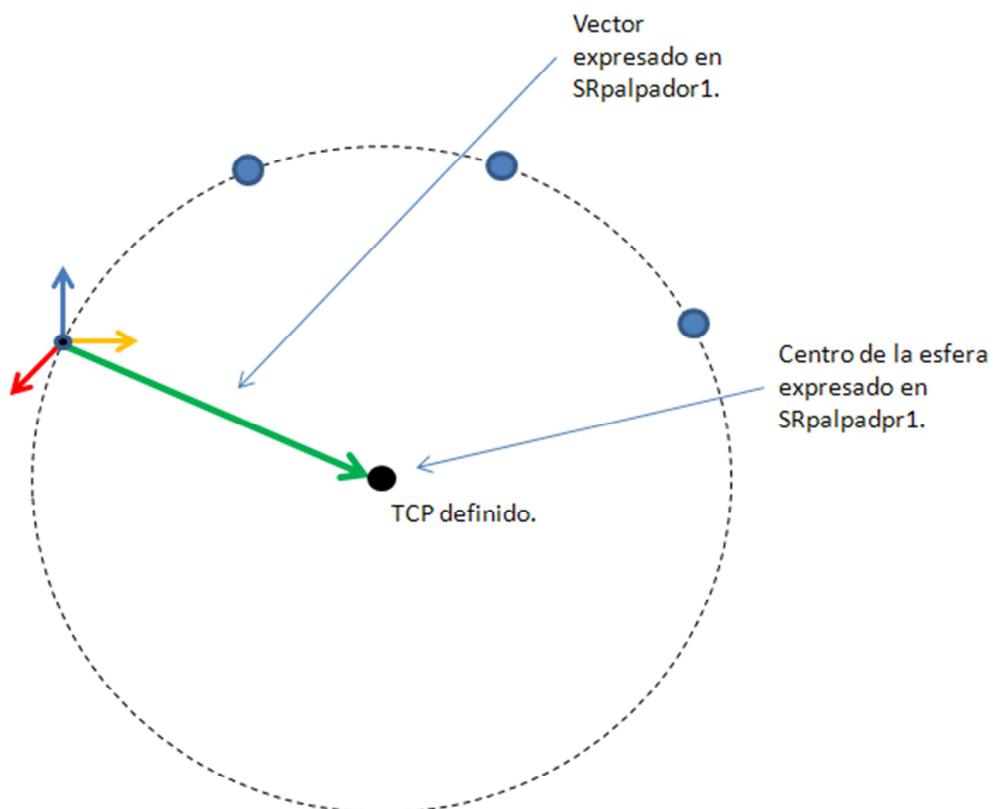
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{SRpalpador1} = G_{pip1} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{SRpalpador i}$$

- La matriz Gip1 será diferente para cada posición capturada. Recordar que ahora todo lo que hacemos son giros.
- Recordar que el TCP está expresado en SRrobot, por lo que el vector de corrección que se obtendrá habrá que expresarlo (girarlo) en SRrobot de cara a poder aplicar la corrección del TCP, por eso el último paso de este apartado es girar las coordenadas en SRpalpador1 a SRrobot.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{SRrobot} = Gpr \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{SRpalpador1}$$

5.3. Calcular la esfera de ajuste a los puntos expresados en SRpalp1.

- Se obtiene la esfera que mejor ajusta a los puntos expresados en SRpalpador1, con lo que se obtienen las coordenadas del centro de la esfera (que físicamente coincidirá con el TCP definido actualmente en el robot), expresadas en este sistema.



5.4. Corregir la posición del TCP.

Dado que el TCP está expresado en SR robot, girando el vector obtenido en el punto anterior (expresado en SRpalpador1), al SRrobot, podremos conocer coordenadas del origen de SRpalpador1 en SRrobot, y por tanto conocer la nueva posición del TCP coincidente con el SRpalpador1 y por tanto quedará definido el TCP en el SRpalpador.

1. Girar el vector obtenido al SRrobot.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\substack{\text{Centro} \\ \text{esfera en} \\ \text{SRrobot.}}} = G_{pr} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\substack{\text{Centro} \\ \text{esfera en} \\ \text{SRpalpador1.}}}$$

2. El TCP actual se define respecto al SR6 en el control, por lo que debemos conocerlo en el SRrobot para aplicar la corrección.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\substack{\text{TCP act} \\ \text{SRrobot.}}} = G6\ 1r \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\substack{\text{TCP SR6.}}}$$

Ahora incluye los términos de translación.

Solo posición del origen del TCP.

3. Corregir la posición del TCP actual.

Este es el origen del SRpalpador1 expresado en SRrobot y por tanto la nueva posición del TCP.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{nuevo TCP SRrobot.}} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{TCP act SRrobot.}} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{Centro esfera SRrobot.}}$$

4. Expresar esta posición en SR6 para poder definirlo en el control del robot como nueva posición.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{nuevo TCP.}} = G6\ 1r^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{nuevo TCP.}}$$

5. Una vez obtenida la posición del nuevo TCP en SR6 la orientación de los ejes del palpador respecto a SR6 (lo que permitirá su definición en el robot) vendrá dada directamente por los términos de la matriz $G6p$ obtenida en el primer paso. A partir de los términos de la matriz $G6p^{-1}$ (que contiene por columnas los vectores del SRpalpador1 expresados en SR6 1) se obtienen los ángulos de Euler necesarios para la definición de la orientación del nuevo TCP.

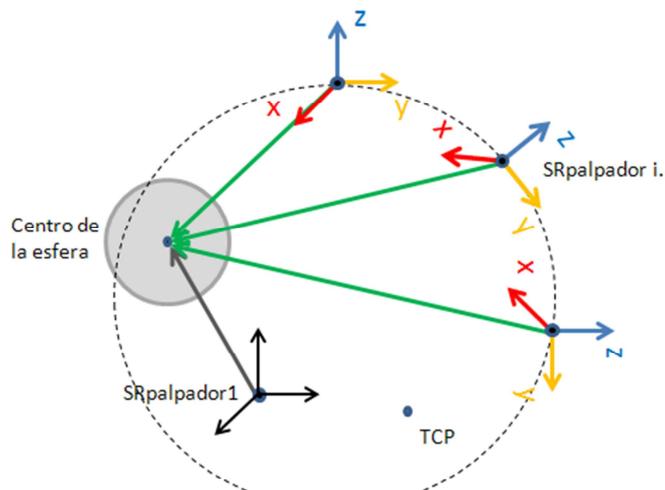
Con esto el TCP vendrá expresado como:

$$TCP_{\text{nuevo}} = [X\ Y\ Z\ \alpha\ \beta\ \gamma]$$

- Hay que tener en cuenta que en este método se asume que el robot describe trayectorias circulares perfectas (que no es cierto) y que se usa en el desarrollo información del modelo nominal para obtener alguna matriz de giro (lo cual tampoco se corresponde con la situación real).

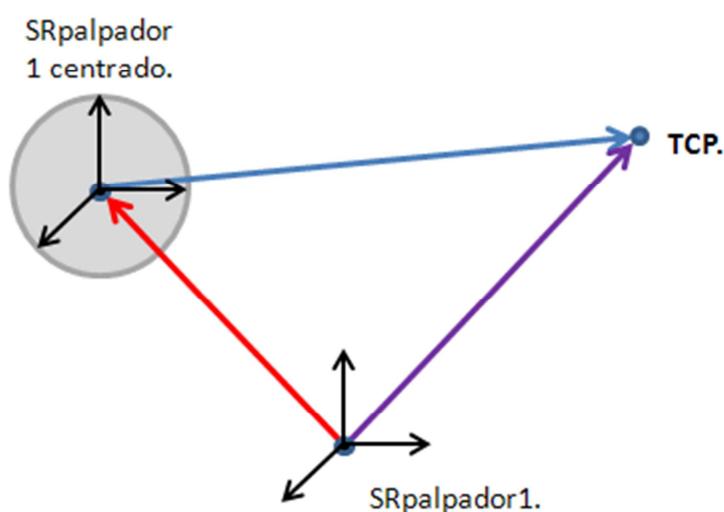
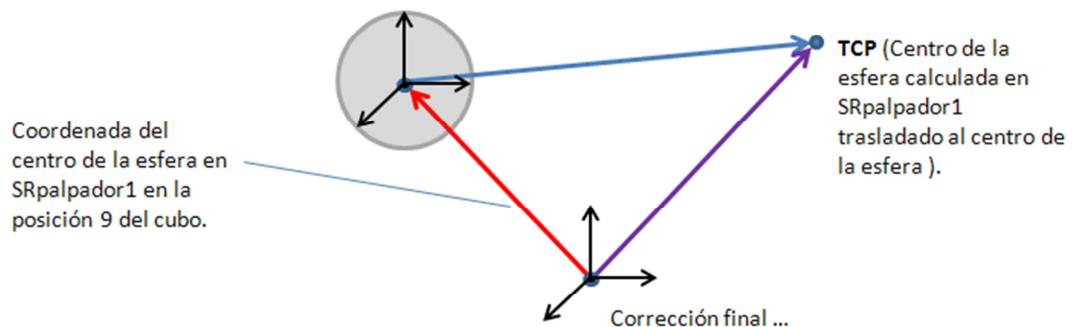
5.5. Situación real del punto 9 en el cubo.

- Manualmente es posible conseguir una posición de inicio con el SRpalpador muy ajustado al centro de la esfera (la posición ideal sería teniendo lecturas 0, 0, 0 del centro de la esfera en el palpador), aunque no se conseguirá un centrado perfecto. DE este modo, cuando se terminen de recorrer los puntos del cubo, el punto 9 tampoco estará ajustado en el centro de la esfera, por lo que la situación ideal presentada en la última figura de la pg.4 realmente será:



Se conocen las coordenadas del centro de la esfera en cada posición, por lo que si directamente expresamos los vectores verdes en SRpalpador1 estaríamos reconstruyendo una esfera que no está centrada en el TCP.

Por eso hay que trasladar (sin girar) el SRpalpador1 al centro de la esfera, calcular ahí el centro de la esfera y por tanto la corrección del TCP, después obtener la corrección en SRpalpador1.



- Traslado el centro de la esfera a SRpalpador1.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{Centro esfera en SRpalpador1.}} = T_{P1 cp1} \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{Centro esfera en SRpalpador1 CENTRADO}}$$

- $T_{P1 cp1}$: traslación del centrado al palpador1, se obtiene de las coordenadas del centro de la esfera en la posición 9 del cubo $T_{P1 cp1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.
- Cuando se giran coordenadas del centro de la esfera en posición SRpalpador i a SRpalpador1 realmente se están expresando en un SRpalpador1 centrado en la esfera (igual que en la figura de la pg. 4). Recordar que **solo se giran**. En la única situación en la que se consigue una esfera centrada en el TCP es en la que SRpapapdor1 estuviese en el centro de la esfera, por lo que hay que trasladar la corrección en función de la posición del punto 9 para obtener el TCP donde realmente está el SRpalpador.

6. JUSTIFICACIÓN.

La falta de información que proporcionan los fabricantes sobre los modelos matemáticos que implementan en cada uno de sus brazos robot, tanto del punto de vista del modelo en sí mismo, como del valor de sus parámetros, hace necesario realizar esta investigación en la que se desarrollan mecanismos completos de identificación de parámetros, se realiza una evaluación y corrección de errores para brazos robot.

Pese a existir reseñas de los métodos de corrección aplicados en los brazos robot en su documentación, los fabricantes no aportan información detallada de su aplicación real ni de los métodos utilizados para su caracterización así como tampoco de los modelos matemáticos implementados para ello, lo que supone una dificultad a la hora de afrontar un procedimiento de análisis de precisión en profundidad. Por ello, en el presente capítulo se realiza la identificación de parámetros geométricos tras la cual mejoraremos la precisión de posicionamiento y palpado del brazo robot.

En este proyecto se va a llevar a cabo una de las fases necesarias para la calibración de un brazo robot, antes de comenzar con la revisión de técnicas y procedimientos en este campo es necesario puntualizar que el término “calibración”, no se puede extrapolar directamente a un brazo robótico ya que, desde el punto de vista metrológico, no está empleado adecuadamente, así para brazos robóticos se debe usar la expresión, “identificación de parámetros geométricos”.

La identificación de parámetros geométricos consiste en el estudio y optimización de los parámetros del robot que tienen relación con el sistema matemático implementado para dicho robot, básicamente los parámetros necesarios son la longitud de los distintos brazos y el ángulo girado por las articulaciones, estos parámetros pueden obtenerse de las medidas teóricas del CAD del robot, pero estas medidas no serán exactas ya que en la fabricación y mecanización de dichas piezas habrá variaciones dentro de las tolerancias, lo que deriva en una pérdida de precisión. Para corregir este desajuste se monta un palpador autocentrante a bordo del robot y se hacen distintas medidas en diferentes posiciones a un patrón externo unidimensional construido con gran precisión, formado por 15 esferas calibradas de cerámica de diámetro 22 mm, con este patrón externo se podrá comparar las lecturas obtenidas por el conjunto robot-palpador. Variando levemente estos parámetros geométricos se obtendrán medidas más o menos cercanas alas dadas por el patrón externo, quedándonos con los parámetros que den las mediciones más ajustadas se optimiza la precisión del conjunto robot-palpador.

Los pasos generales que se deben seguir para realizar este procedimiento son:

1. Determinación y construcción del modelo cinemático adecuado para la configuración del brazo, indicando las transformaciones geométricas necesarias, la posición de los sistemas de referencia y el conjunto inicial de parámetros geométricos nominales. Cualquier aproximación al modelado cinemático de brazos robot comienza a partir del modelo propuesto por Denavit y Hartenberg.
2. Captura de datos de la posición de todos los elementos del brazo mediante palpado de puntos conocidos, generalmente materializados por un patrón externo u otro instrumento de medida como un interferómetro láser, un láser tracker, indoorGPS, estación total, barras de bolas telescopicas, acelerómetros, sistemas de ultrasonidos, o una o varias cámaras CCD que captan coordenadas absolutas de un patrón de puntos conocidos.
3. Optimización, también conocida como identificación de parámetros geométricos normalmente realizada mediante procedimientos de aproximación basados en distintos tipos de ajuste por mínimos cuadrados a los datos medidos.
4. Implementación y evaluación del modelo óptimo en posiciones distintas a las de identificación.
5. Opcionalmente, identificación de las posibles causas y fuentes de error y modelado e implementación de modelos de corrección.

En este proyecto se perfecciona el acoplamiento del palpador autocentrante con el brazo robótico, para ello se utilizará una esfera metálica de 22mm de diámetro de alta precisión empleada para materializar coordenadas. En la programación del robot se comanda el punto denominado TCP (tool center point), así pues el objetivo de este procedimiento es hacer coincidir el TCP con el sistema de referencia del palpador autocentrante (SRpalpador).

Gracias a esta investigación se podrá mejorar la precisión de los brazos robot independientemente de los fabricantes, reduciéndose así los costes impuestos por estos para realizar dicha operación. Otro beneficio directo de la mejora de la precisión, es la mayor fiabilidad de posicionamiento y palpado por parte del equipo, lo que reducirá los riesgos de romper la herramienta acoplada al brazo robot.

7. PRESUPUESTO.

El objetivo de la presente sección es analizar la rentabilidad de nuestra empresa, vista como un servicio de calibración de robots mediante la técnica descrita en el presente proyecto. Para ello se van detallar en la tabla 11 los distintos gastos correspondientes a material y mano de obra para poder llevar a cabo las acciones necesarias para una optimización de parámetros. Para poder evaluar el coste de mano de obra hay que conocer el número de horas que se invierten en la optimización, que se repartirán entre el tiempo dedicado a la evaluación de la situación y el proceso de optimización en sí, asumimos un total de 16 horas en la toma de datos correspondiente a las 8 posiciones y dos horas dedicadas al tratamiento de datos, suponiendo un coste por hora de 50€.

	Coste	Vida útil
Barra patrón	6.000€	20 años con recalibración anual de 1000€/año
Desarrollo de software	5.000€	
Palpador autocentrante y software de medida	18.000€	10 años
Mano de obra	980€	

Tabla 11: Gastos asociados al proceso de optimización de parámetros cinemáticos.

Vamos a suponer que soliciten nuestro servicio de calibración de robots un total de diez empresas en el primer año. Teniendo en cuenta los años de vida útil del material y el número de servicios que se van a contratar durante el primer año, asumimos que los gastos de calibración del robot ascenderán a 1.500€. Se van a plantear diferentes tipos de beneficio y calcular a su vez el coste del servicio ofrecido para la obtención de tales ingresos.

- 25% de beneficio: precio del servicio de 2.000€
- 35% de beneficio: precio del servicio de 2.307€
- 45% de beneficio: precio del servicio de 2.720€

Para cada uno de los precios de servicio calculado anteriormente, calculamos cual sería el periodo de recuperación de la inversión sobre las bases expuestas anteriormente.

- 25% de beneficio: periodo de recuperación de 2 años y 11 meses.

- 35% de beneficio: periodo de recuperación de 2 años y 3 meses.
- 45% de beneficio: periodo de recuperación de 1 año y 7 meses.

A continuación se va a proceder a calcular el VAN para cada uno de los escenarios económicos planteados, considerando como vida de la inversión, la vida del palpador autocentrante, que es de 10 años y considerando un tipo de descuento de 0,1.

- 25% de beneficio: VAN de 27.530€
- 35% de beneficio: VAN de 46.393€
- 45% de beneficio: VAN de 71.770€

Finalmente se va a calcular el TIR para los tres precios antes mencionados, obteniendo los siguientes resultados.

- 25% de beneficio: TIR de 0,3
- 35% de beneficio: TIR de 0,41
- 45% de beneficio: TIR de 0,56

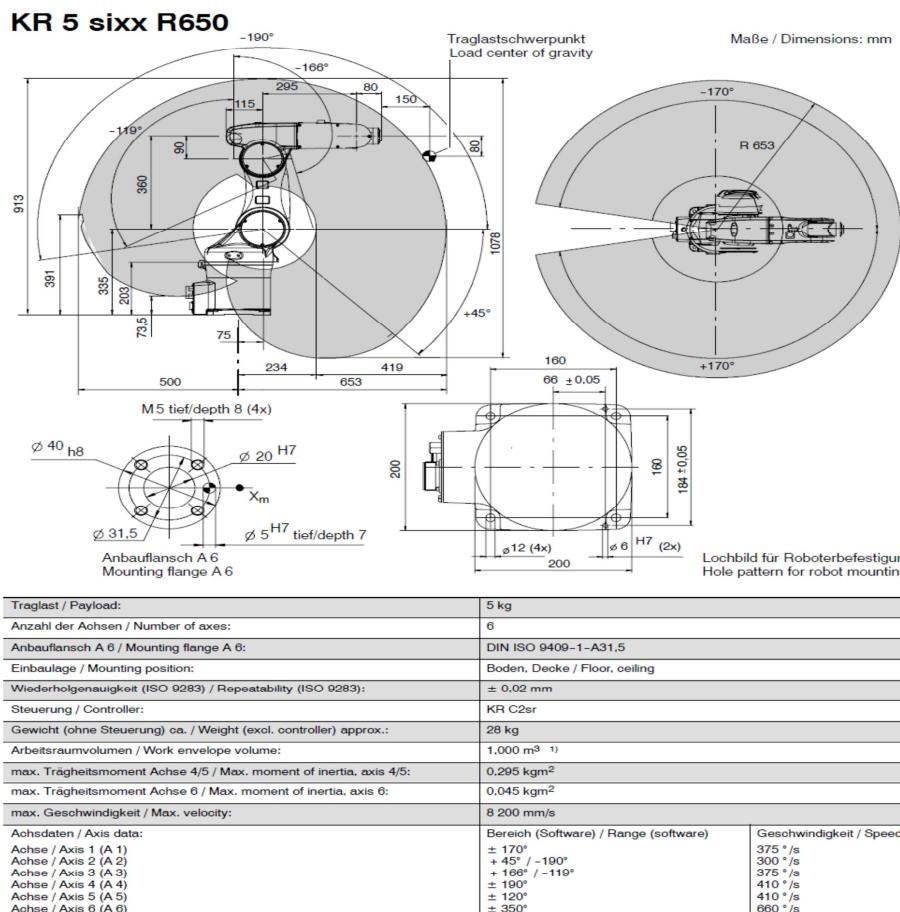
Analizando todos los resultados obtenidos en el presente apartado se puede concluir que la empresa es económicamente viable para los tres precios de servicio sugeridos al comienzo de la sección, ya que los VAN son positivos, los TIR son suficientemente elevados y el periodo de recuperación de la inversión no es alto, teniendo en cuenta el elevado coste del equipo necesario para llevar a cabo la calibración de robots. Finalmente se considera que a la vista de los resultados, lo más apropiado para nuestra empresa de calibración sería empezar con un precio comprendido entre los 2.300 y los 2.700€, recuperando la inversión en un plazo aproximado de dos años.

8. ANEJO 1. EL EQUIPO UTILIZADO.

- KUKA KR5 SIXX R650.

Pequeño robot industrial de 6 ejes, con un alcance de 650 mm. compacto y desarrollado para el ahorro de espacio. Este robot está entre los más rápidos y fiables en su clase, utiliza la probada plataforma de control KRC basada en la técnica del PC.

Características:



1) Bezogen auf Schnittpunkt Achse 4/5. / Referred to intersection of axes 4 and 5.

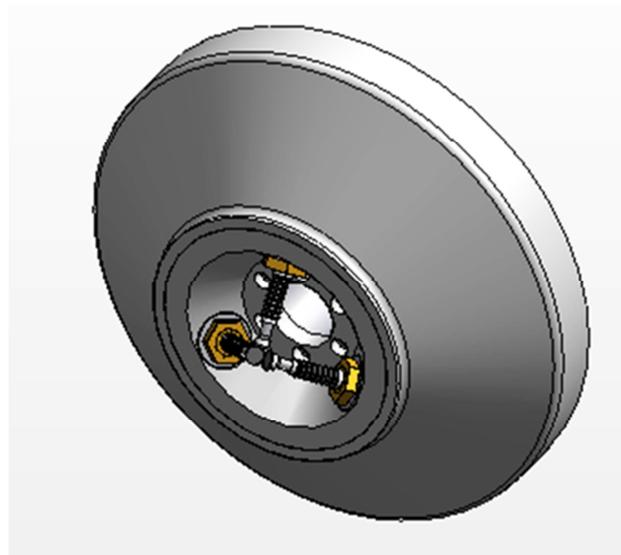
- Antriebssystem elektro-mech. mit bürstenlosen AC-Servomotoren. / Drive system electromechanical, with brushless AC servomotors.
- Wegmesssystem digital-absolut. / Position sensing system digital-absolute.
- Integrierte Signalleitungen, Luftzuführung mit 3 Solenoidventilen / Integrated signal cables, air supply with 3 solenoid valves.
- Staub- und spritzwassergeschützte Ausführung erhältlich, Mechanik IP40 / Dust and water-spray resistant version available, mechanical components IP40.

Angaben über die Beschaffenheit und Verwendbarkeit der Produkte stellen keine Zusicherungen von Eigenschaften dar, sondern dienen lediglich Informationszwecken. Maßgeblich für den Umfang unserer Lieferungen und Leistungen ist der jeweilige Vertragsgegenstand. Technische Daten und Abbildungen unverbindlich für Lieferung. Abweichen kann vorbehaltlich. Spezifikationen bezüglich der Qualität und Usability der Produkte do not constitute a warranty of properties. They are intended to serve informative purposes only. Solely the respective contract of sale shall be binding in respect of the extent of our supplies and services. No liability accepted for errors or omissions.
www.kuka.com

- **Palpador autocentrante.**

Consideraciones previas al diseño

Una de las propuestas de diseño que finalmente se desarrolla es la del “palpador lineal”. Se trata de un sistema de medida directa que determina el centro de la esfera palpada a través del contacto físico directo entre ésta y los sensores de desplazamiento lineal que incorpora, estando estos últimos dispuestos según una configuración espacial óptima que minimiza los errores en la obtención de los centros. Dado el radio de la esfera a palpar, es necesario conocer como mínimo tres de sus puntos para determinar su centro, por lo que el prototipo debe integrar al menos tres sensores. Sin embargo, se estudia también la posibilidad de que integre cuatro sensores, para comprobar si en ese caso se incrementa su precisión.



Palpador autocentrante.

Los requerimientos básicos para este palpador son los siguientes:

- Diámetro de las esferas del patrón a medir: 22mm. Teniendo la precaución de que la medición de la esfera ha de realizarse sin que exista colisión con el artefacto.
- Rango de medición: $\pm 2\text{mm}$ en los tres ejes cartesianos.
- Precisión mejor que $2\mu\text{m}$ en todo el rango y que $1\mu\text{m}$ en un rango

menor ($\pm 1\text{mm}$).

- Repetibilidad menor que $1\mu\text{m}$ y preferiblemente menor que $0,5\mu\text{m}$.
- El tamaño ha de ser lo menor posible y el diseño lo más simple posible.
- El peso ha de ser lo menor posible.
- La fuerza de palpado ha de ser lo menor posible (menor que 1N).
- El prototipo deberá poder montarse de un modo lo más estándar posible en el cabezal de una fresadora de control numérico.

Para desarrollar el prototipo cumpliendo con los requerimientos anteriores se realizan las siguientes tareas:

- Selección y ensayo de los sensores (3 o 4) a utilizar: de entre los sensores lineales existentes en el mercado se selecciona la opción que se muestra como más adecuada en función de las especificaciones del palpador, en este caso se opta por un palpador de 3 sensores. Son características críticas el rango de medida y la precisión de los sensores que determinará en gran medida la precisión total del sistema. El ensayo del comportamiento de los mismos es necesario para conocer su precisión y repetibilidad de cara a realizar posibles correcciones o a averiguar sus leyes de error, que puedan servir para calcular su posición y orientación óptimas en el prototipo.
- Modelado geométrico del palpador: mediante el cual se transforman las lecturas de los sensores en las coordenadas de la esfera medida. Para ello es necesario determinar los parámetros geométricos del palpador que influyen en dicha transformación y medirlos en el prototipo fabricado.
- Simulación del comportamiento del palpador: a partir de las leyes de error de sus componentes y de su modelo geométrico se realizan simulaciones que proporcionen la configuración más adecuada del palpador, así como sus dimensiones básicas. Estas simulaciones permiten decidir qué número de sensores es el más adecuado (3 o 4), averiguar el rango de medición de los mismos que es necesario, su orientación óptima y las dimensiones de sus puntas.
- Diseño definitivo: a partir de todo lo anterior se realiza un diseño definitivo en el que se tienen en cuenta aspectos operativos y constructivos tales como la fijación de los sensores o el modo de colocación del palpador en el cabezal de la máquina-herramienta.

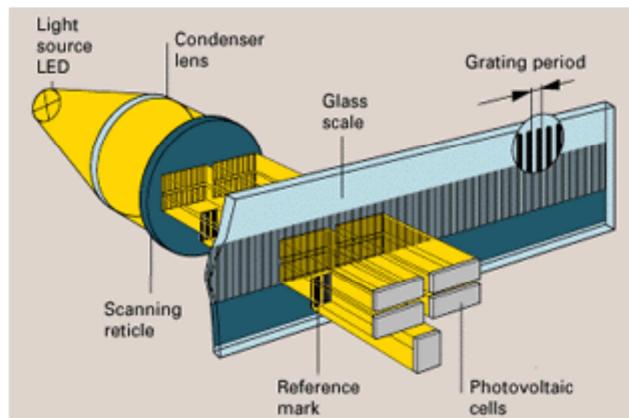
La idea inicial de diseño es la colocación de tres sensores con una configuración aproximadamente ortogonal entre ellos. Teóricamente esta construcción ofrece la mayor sensibilidad en todas las direcciones. Se plantea también la colocación de un cuarto sensor en dirección vertical para aumentar la sensibilidad en la determinación de la coordenada Z de la esfera a palpar. Sería necesario averiguar la mejor orientación de los otros tres sensores en este caso, aunque indudablemente se mantendría una separación entre ellos de 120º en su proyección sobre el plano horizontal. La teoría también indica que las direcciones de todos los sensores (3 o 4) deberían cruzarse en el centro de la esfera (en su posición nominal) para lograr que los errores debidos a posibles desalineaciones fueran despreciables. A partir de estas consideraciones teóricas iniciales es de dónde se inicia el proceso de desarrollo del palpador, que mediante las tareas descritas conduce al diseño definitivo del mismo.

Existen diversos sensores de desplazamiento lineal en el mercado. Los que se han venido utilizando más tradicionalmente para esta función son los LVDT, aunque en los últimos años han aparecido los denominados encoders lineales, que básicamente consisten en una regla óptica montada en un sistema que permite el palpado. En la primera parte de este apartado se explican brevemente los principios de medición de estos sensores, así como sus principales características de cara a justificar la elección realizada.

Como se ha apuntado anteriormente estos encoders lineales son sensores basados en la utilización de reglas ópticas como sistema de medida. Los sistemas que utilizan métodos ópticos son una elección válida cuando se han de cumplir requerimientos de resolución y precisión submicrométrica, como es el caso buscado para los sensores a integrar en el palpador lineal. En general, los métodos ópticos de medición con escala graduada se basan en la utilización de reglas ópticas de vidrio o de acero con trazos, que son detectados ópticamente mediante luz transmitida o reflejada, dando origen a dos principios de funcionamiento diferentes.

En el caso de los encoders lineales el principio utilizado es el de la luz transmitida a través de una regla de vidrio. En este caso, se dispone de una unidad de lectura que se mueve de forma relativa a lo largo de la regla. A un lado de la unidad de lectura existe una fuente de luz (fotodiodo emisor de luz o LED) que genera un haz luminoso. El haz luminoso atraviesa una lente condensadora y se proyecta a través de las rejillas de una retícula de lectura y a través de la regla graduada. De esta forma, existe un movimiento relativo entre la escala graduada y la luz que atraviesa la retícula de lectura. Ambas retículas tienen idéntico paso, de tal forma que las líneas y huecos se alinean alternativamente. La modulación luz - oscuridad producida de esta manera es

detectada por las células fotovoltaicas colocadas al otro lado de la unidad de lectura y que se mueven con ella. Un detalle constructivo importante de la retícula de lectura es que dispone de cuatro “ventanas” desfasadas entre ellas en un cuarto del paso. Así, las células fotovoltaicas dispuestas para el seguimiento incremental, producen en realidad cuatro señales de corriente senoidal, desfasadas 90º entre sí. Las cuatro señales senoidales no permanecen en un principio simétricamente sobre la línea de cero. Por este motivo las células fotovoltaicas están conectadas entre sí, obteniéndose finalmente dos señales de salida desfasadas 90º en simetría con respecto a la línea de cero.



Principio de funcionamiento por el método de la luz transmitida.

- **Esfera patrón.**

En la corrección del TCP se va a utilizar una esfera patrón metálica de 22mm. de diámetro, esta esfera va unida a un vástago a modo de apoyo para que no pierda la posición.



Esfera patrón.

9. ANEJO 2. VIDEO ROBOT CORRIGIENDO TCP.



Video “Robot corrigiendo TCP” en CD-ROM.

En este video se puede ver el brazo robótico KUKA KR5 SIXX R650 propiedad de la Universidad de Zaragoza realizando la corrección de la posición del TCP.

10. CONCLUSIONES.

En este proyecto se ha realizado la corrección del TCP (Tool Center Point) como paso previo y necesario a la identificación de parámetros geométricos del robot KUKA KR5 SIXX R650, una vez montado el palpador autocentrante y hecha ésta corrección, ha sido posible realizar con total seguridad los movimientos por parte del robot necesarios para acceder a todas las posiciones materializadas por las esferas montadas sobre la barra patrón y así realizar la identificación de parámetros sin riesgo de colisión y rotura de los vástagos del palpador autocentrante, lo que derivaría en un aumento de costes en material y en la imposibilidad de manejar el palpador a bordo del robot.

Una vez realizada la corrección, el conjunto robot-palpador es capaz de realizar las trayectorias entorno a cualquier esfera de 22mm. de diámetro, con la seguridad de no sobrepasar los límites mecánicos que tiene cada uno de los tres vástagos del palpador.

En procedimientos de identificación de parámetros posteriores, la matriz de giro del palpador al último sistema de referencia del robot puede mantenerse fija o ser considerada como parámetros a modificar, en cuyo caso, la mejoría derivada de la variación de parámetros de esta matriz desaparecerá al desmontar el palpador en funcionamiento normal del robot para montar cualquier otro tipo de herramienta, por lo que debe verificarse su precisión.

Como próximos trabajos en la línea de este proyecto cabe esperar, la realización del proceso completo de identificación de parámetros geométricos, comparación de sus resultados y la realización de un estudio económico para ver su viabilidad en comparación con los procesos más utilizados actualmente para la calibración de robots.

A modo personal he adquirido parte de los conocimientos básicos de robótica y funcionamiento de brazos robot, entendiendo la necesidad de comprender el sistema cinemático y matemático que rige en cada robot y la relación que estos tienen con determinados parámetros como la longitud de los brazos o el ángulo girado por cada articulación, también el estudio de la relación entre distintos sistemas de referencia implementados a lo largo del brazo robot hasta llegar al TCP y como esta relación influirá en el buen funcionamiento de las herramientas montadas a bordo del robot, como en este caso el palpador autocentrante.

Quiero agradecer, al Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, al Centro Politécnico Superior y a la Universidad de Zaragoza, permitirme realizar este proyecto fin de carrera, y en especial a Jorge Santolaria Mazo y Roberto Jimenez Pacheco por dedicarme su tiempo y dotarme de las herramientas y conocimientos necesarios para la realización de dicho proyecto.

11. BIBLIOGRAFIA.

Denavit, J., Hartenberg, R. S., "A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices," Journal of Applied Mechanics, Vol. 22, Transactions of ASME, Vol. 77, pp. 215-221, 1955.

John M. Hollerbach and Charles W. Wampler, "The Calibration Index and Taxonomy for Robot Kinematic Calibration Methods", *The International Journal of Robotics Research* 1996; 15; 573

Cristina Navazo Molinero, "Desarrollo e implementación de una técnica de identificación de parámetros cinemáticos de un brazo robot mediante palpador autocentrante y patrón de esferas." Proyecto fin de carrera, 2010.

J. Santolaria, "Diseño y calibración de brazos articulados de medición por coordenadas e integración de sensor láser por triangulación para medición sin contacto". Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 2007.

J. Santolaria et al., "A self-centering active probing technique for cinematic parameter identification and verification of articulated arm coordinate measuring machines", Meas. Sci. Technol. 21 055101, 2010.

Faro, www.faro.com

Leica, www.leica.com

KUKA, www.kuka-robotics.com

ABB, www.abb.es

Fanuc, www.fanucrobotics.es

Wikipedia, www.wikipedia.org