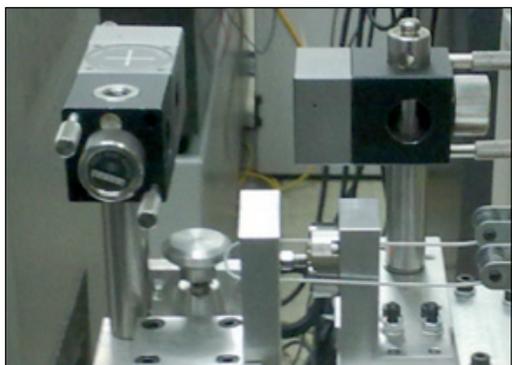


Análisis del juego, repetibilidad de posicionamiento y precarga de un mecanismo paralelo



Ana Cristina Majarena-Bello
Jorge Santolaria-Mazo
David Samper-Carnicer
Juan José Aguilar-Martín

Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Centro Politécnico Superior. C/María de Luna, 3 – 50018 Zaragoza.
Tfno: +34 976 761000. majarena@unizar.es

Recibido: 02/02/2011 • Aceptado: 09/05/2011

Backlash, positioning repeatability and preload analysis of a parallel mechanism

ABSTRACT

- Given to the complexity of mathematical models in parallel mechanisms, a previous analysis of system characteristic errors is necessary. This paper determines backlash and positioning repeatability of a two rotary degrees of freedom parallel mechanism and analyses the needed preload to increase system accuracy. Firstly, the specialized bibliography in the design and characterization of mechanisms based on parallel kinematic is reviewed. In the majority of the analysed studies, errors such as backlash are absorbed by the kinematic model without characterizing components or analysing which is the most determining system errors. Subsequently, the methodology used for the characterization of the positioning system components is presented. To do this, procedures and devices used for each measuring system are described, and the different measurement systems such as optical lineal sensors, laser interferometer and inductive probes, are presented. Results obtained show that actuator backlash errors are around 45 μm having an error deviation of 3 μm . The application of a contraction preload on the spherical ball joint allows us to obtain a backlash lesser than 3 μm and, therefore, to increase the positioning system accuracy. Finally, the two degrees of freedom parallel mechanism intended to be used in metrology applications and machining tool processes, has been characterized by means of a coordinate measuring machine. The mechanism characterization developed will allow us to determine geometric parameters in the mechanism calibration phase, as well as to develop, subsequently, correction procedures according to the needed preload to increase system accuracy.
- Keywords:** Parallel mechanism, backlash, repeatability, actuator, spherical ball joint, preload, measuring system.

RESUMEN

Debido a la complejidad existente en el desarrollo de los modelos matemáticos de los mecanismos paralelos, es necesario realizar un análisis previo de los errores característicos del sistema. En este trabajo se determina el juego y la repetibilidad de posicionamiento de un mecanismo paralelo de dos grados de libertad giratorios, y se analiza la precarga necesaria para aumentar la precisión del sistema. Inicialmente se revisa la bibliografía especializada en el diseño y caracterización de mecanismos basados en cinemática paralela. En la mayoría de los estudios analizados, los errores como el juego son absorbidos por el modelo matemático sin caracterizar los componentes ni analizar cuáles de los errores del sistema son los

más determinantes. Posteriormente se presenta la metodología utilizada para la caracterización de los componentes del sistema de posicionamiento. Para ello, se describen los procedimientos y los utillajes utilizados para cada equipo de medida y se comparan los diferentes sistemas de medición utilizados como sensores ópticos lineales, interferómetro láser y palpadores inductivos. Los resultados obtenidos muestran errores de juego del actuador en torno a los 45 μm con una desviación del error de 3 μm . La aplicación de una precarga a contracción sobre la rótula esférica permite obtener un juego menor de 3 μm y, de esta manera, mejorar la precisión del sistema de posicionamiento. Finalmente se ha caracterizado el mecanismo paralelo de dos grados de libertad, diseñado para aplicaciones de

metrología y procesos de máquina-herramienta, utilizando una máquina de medir por coordenadas. La caracterización desarrollada del mecanismo permitirá determinar los parámetros geométricos en la fase de calibración del mismo, así como desarrollar, posteriormente, procedimientos de corrección en función de la precarga necesaria para aumentar la precisión del sistema.

Palabras clave: Mecanismo paralelo, juego, repetibilidad, actuador, rótula esférica, precarga, sistema de medición.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos en el diseño de robots es obtener elevada precisión en el posicionamiento del efector final del mecanismo. Tradicionalmente se han desarrollado numerosos robots para muy diversas aplicaciones en la industria naval, aeronáutica o automovilística [1]. Debido a los grandes avances en el hardware y software utilizado en el sistema sensorial y de control, los investigadores han desarrollado nuevos mecanismos para sectores como el de medicina [2] o construcción y procesos de máquina-herramienta [3].

Los mecanismos paralelos son mecanismos de cadena cerrada que se caracterizan porque la plataforma móvil está unida a la placa fija o base mediante dos ó más cadenas cinemáticas independientes.

En los últimos años numerosos investigadores se han centrado en el diseño y desarrollo del modelo cinemático de los mecanismos paralelos debido a las ventajas que ofrecen como alta rigidez [4] y capacidad de soportar velocidades y cargas elevadas [5,6]. Por el contrario, el modelo cinemático directo es difícil de obtener en los mecanismos basados en cinemática paralela y, en general, este problema tiene más de una solución. Otro de los aspectos a tener en cuenta es el análisis de las singularidades del sistema, el cual debe resolverse específicamente para cada topología [7-9]. La zona de trabajo es limitada y su cálculo no es sencillo, ya que la posición y orientación están fuertemente acopladas [4,10]. En [11] puede encontrarse una amplia revisión de los mecanismos de cinemática paralela.

La determinación y el modelado de los errores no geométricos, como el juego, no es una tarea fácil. Por ello, en algunos trabajos se incluyen únicamente los parámetros geométricos, como en el trabajo desarrollado por Gong [12], donde se desarrolla un método de calibración mediante cinemática inversa que separa la influencia de los errores debidos a los parámetros geométricos, de los debidos a los no geométricos, con objeto de optimizar los parámetros geométricos mediante una calibración estática tradicional y modelar y corregir dinámicamente los no geométricos. Sin embargo, este método no es sistematizable. Algunos autores [13] desarrollan modelos no geométricos para predecir y compensar estos errores, pero suelen ser modelos

independientes de los modelos geométricos, difíciles de implementar y que no permiten conocer la influencia de cada componente no geométrica por separado, por lo que es mucho más frecuente añadir parámetros para compensar estos errores en el modelo geométrico [14]. Estos últimos métodos son muy laboriosos debido principalmente a la complejidad del modelo y no siempre consiguen mejorar la precisión del mecanismo. Además, en ocasiones, pueden incorporar errores en la resolución del mismo, como por ejemplo, en el caso en el que el modelo incorpora funciones discontinuas para la representación de errores como el juego.

Existen escasos trabajos en los que se caractericen este tipo de errores y se determine la repetibilidad de posicionamiento. Müller [15] desarrolló un manipulador paralelo plano redundante y controló la precarga para evitar el juego durante el movimiento del mecanismo. Para ello, consideró la generación de precarga interna en el esquema de control del mecanismo y optimizó la función objetivo, de manera que, el nivel de precarga necesario esté asegurado y se minimicen las fuerzas del actuador totales. En [16] se presentó el modelo inverso para manipuladores paralelos redundantes y se utilizó el pretensado para evitar el juego, controlando las fuerzas del mecanismo. Ropponen [17] introdujo en el modelo cinemático los errores de posición de las articulaciones, los errores de los actuadores y el juego, y analizó la relación existente entre los errores de desplazamiento de las articulaciones, los errores del actuador (debidos a error de las lecturas y juego) y la precisión del efector final de una plataforma de Stewart.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la caracterización del juego y repetibilidad de un mecanismo de cinemática paralela que complemente a los procedimientos de optimización de diseño e identificación de parámetros cinemáticos para aumentar la precisión del mismo. La metodología desarrollada permite analizar, compensar y corregir el juego del mecanismo antes de realizar la identificación de los parámetros geométricos del proceso de calibración. Este procedimiento simplifica considerablemente el modelado del sistema, ya que no es necesario incorporar funciones matemáticas complejas para modelar el juego del mecanismo.

En primer lugar, se caracterizan los componentes del sistema, comparando sistemas de medición como sensores ópticos lineales, interferómetro láser y palpadores inductivos. La caracterización de las rótulas esféricas permite determinar la precarga necesaria para disminuir el juego de dichos componentes. En segundo lugar, se analiza el comportamiento del mecanismo completo aplicando la precarga calculada para reducir el juego de las rótulas y se utilizan sensores ópticos lineales para corregir el juego de los actuadores. Finalmente, el conocimiento de la influencia de los errores permitirá su consideración en el proceso de calibración del mecanismo, así como el desarrollo de modelos de corrección que permitan incrementar la precisión del sistema completo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El sistema de posicionamiento desarrollado consta de dos grados de libertad (GDL) (azimut y elevación), basado en cinemática paralela, para un sistema de medición sin contacto. Dicho sistema está formado por dos unidades de posicionamiento con dos cámaras de visión cada una. Una de las cámaras posee alta resolución para la captura de la imagen y la otra es de menor resolución para realizar el seguimiento del objeto a medir. El sistema de posicionamiento consta de una base fija, una plataforma móvil y dos actuadores que se hallan unidos a la base y a la plataforma mediante rótulas esféricas de alta precisión. Se han incorporado dos sensores ópticos lineales de alta precisión para mejorar la precisión del sistema. Los utillajes diseñados para la colocación de la regla del sensor lineal reducen el error de *Abbe* del sistema de medición. La Fig. 1 muestra una unidad de posicionamiento del sistema de medición. La optimización de este diseño y el desarrollo del modelo cinemático se puede consultar en [18]. En este trabajo se obtuvieron los parámetros geométricos de diseño óptimos correspondientes a los anclajes de las rótulas para alcanzar los giros de azimut y elevación deseados ($\pm 45^\circ$ y $\pm 30^\circ$ respectivamente), minimizar las dimensiones del mecanismo y obtener la máxima resolución posible para unos componentes determinados.

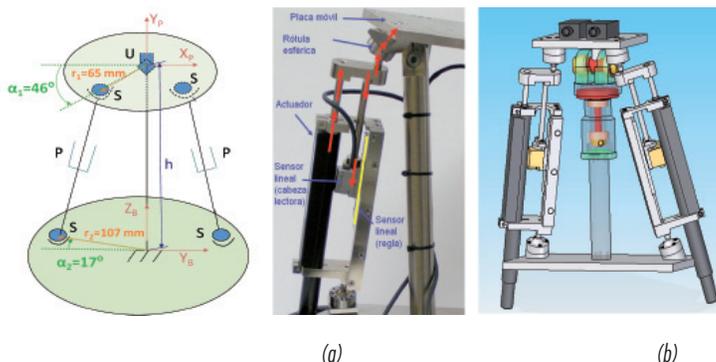


Fig. 1: Unidad de posicionamiento del sistema de medición: (a) Parámetros de diseño (b) Diseño del mecanismo

En la Fig. 1(a) se muestra la geometría óptima de este mecanismo donde r_1 y r_2 corresponden a los radios desde el centro de la plataforma superior (móvil) y la base (fija), respectivamente, a las rótulas esféricas, α_1 es el ángulo que forman el eje $-X_p$ y la línea que une el centro de la rótula esférica con el origen del sistema de referencia P y α_2 es el ángulo que forman el eje $-Y_B$ y la línea que conecta la rótula esférica con el origen del sistema de referencia B . Las articulaciones esféricas, universales y prismáticas se han denotado por S , U y P respectivamente. El mecanismo diseñado posee una altura, h , de 307 mm y una masa total de 5.68 kg sin considerar la masa de las cámaras de visión. El conjunto placa superior y cámaras de visión posee una masa de 2.7 kg.

Uno de los requisitos necesarios para obtener precisión en el posicionamiento del sistema es la caracterización

del mecanismo para poder conocer su comportamiento. A continuación se describe la caracterización de los componentes de la plataforma (actuadores y rótulas) y se muestra el ensayo realizado para caracterizar el mecanismo completo.

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLATAFORMA

Los GDL pasivos de un mecanismo introducen juego en el posicionamiento del sistema. La aplicación de una precarga disminuye el juego, pero aumenta la fricción de las articulaciones. En [19], Cash analiza el comportamiento frente a fricción, juego y rigidez de diferentes tipos de articulaciones. En las articulaciones de contacto deslizante, la aplicación de cargas para eliminar el juego implica un aumento en la fricción de la articulación. Sin embargo, las articulaciones de contacto de giro pueden ser precargadas para minimizar el juego sin aumentar drásticamente la fricción, al mismo tiempo que incrementan la rigidez en los GDL restringidos.

En el mecanismo diseñado la carga final del sistema de posicionamiento no es elevada (en torno a 3 kg), por lo que se han escogido rótulas esféricas y actuadores lineales. A continuación se describe el procedimiento de caracterización utilizado para cada uno de estos componentes. Los ensayos se han realizado en un ambiente controlado a 20°C y humedad relativa del 50%.

2.1.1. Determinación del juego y repetibilidad del actuador

En el sistema desarrollado se han utilizado dos actuadores lineales con un rango de trabajo de 0 a 75 mm y precisión de $\pm 8 \mu\text{m}$. Para realizar la caracterización del actuador se han realizado dos ensayos. En el primero de ellos, se ha utilizado un sensor óptico lineal para la captura de datos. La regla del sensor lineal posee un coeficiente de dilatación térmico de $0.1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ y ofrece una precisión de $\pm 1 \mu\text{m}$. En el segundo ensayo, las mediciones se han realizado mediante un interferómetro láser de $0.02 \mu\text{m}$ de resolución y $\pm 1.5 \mu\text{m}$ de precisión para la medición de distancia lineal.

a) Utilización del sensor lineal

En el ensayo realizado para determinar el juego del actuador se ha fijado la regla del sensor a la carcasa del actuador y se ha colocado la cabeza lectora del sensor solidaria al vástago móvil del actuador, como se muestra en la Fig. 1(b). Inicialmente se ha realizado una inicialización del mismo y un desplazamiento de 50 mm para asegurar el paso por la marca de referencia del sensor lineal, punto en el cual se realiza reset en el sensor. Seguidamente, se describen dos trayectorias para abarcar toda la zona de trabajo del actuador desplazándose en ambos sentidos.

b) Utilización del interferómetro láser

Para la determinación del juego y repetibilidad del actuador mediante el interferómetro láser se diseñaron unos

utillajes adicionales como se muestra en la Fig. 2. Estos utillajes se colocaron en una guía fija en la que se aloja un carro. El carro puede deslizarse sobre la guía en una única dirección. Uno de los espejos del interferómetro se colocó solidario a la guía fija y el segundo espejo se fijó al carro móvil para poder observar el desplazamiento relativo entre ellos. A su vez, uno de los extremos del actuador se colocó solidario a la guía fija y el otro extremo se fijó al carro móvil.

El procedimiento utilizado para realizar el ensayo consistió en una inicialización previa del actuador a su posición de calibración. Las posiciones programadas distaban 10 mm entre sí. El rango de estudio fue de 10 a 70 mm y se realizaron cinco ciclos completos de ida y vuelta.

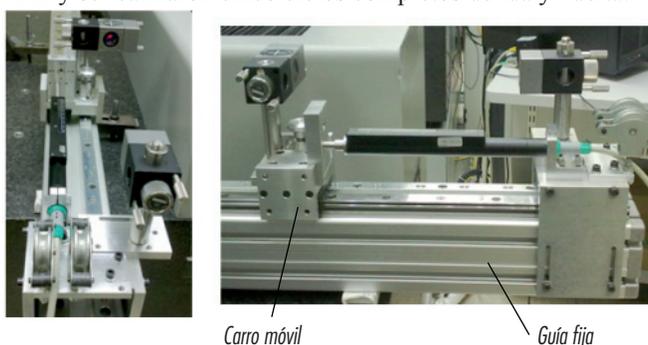


Fig. 2: Utillajes fabricados para la determinación del juego y repetibilidad del actuador mediante el interferómetro láser

2.1.2. Determinación del juego de la rótula esférica

Las rótulas esféricas de alta precisión elegidas permiten unir las cadenas cinemáticas que contienen a los actuadores a la base y a la plataforma. Estas rótulas poseen un ángulo de oscilación de $\pm 30^\circ$. El análisis del juego de la rótula esférica se realizó para distintas precargas a contracción. La Fig. 3 muestra los utillajes utilizados para la realización del mismo. En este ensayo se ha caracterizado el comportamiento de la rótula esférica midiendo con el interferómetro láser y con dos palpadores inductivos de repetibilidad $0.1 \mu\text{m}$. Uno de los palpadores inductivos está en contacto con la guía fija y el segundo palpador está en contacto con el carro móvil. La colocación de los espejos del interferómetro es la misma que la detallada en el ensayo anterior.

Para la realización del ensayo se coloca un extremo de la rótula esférica solidario a la guía fija y el otro extremo solidario al carro móvil. Inicialmente se efectúa una fuerza de contracción sobre la rótula y se mide la distancia entre los dos extremos de la misma. Se efectúa una fuerza de tracción y se mide la nueva distancia. La diferencia entre las dos mediciones nos proporcionará el juego de la rótula. Finalmente se colocan diferentes precargas a compresión en el carro móvil y se repite el proceso descrito para cada una de ellas.

2.1.3. Determinación del juego y repetibilidad del conjunto rótula esférica y actuador

El paso siguiente fue el análisis del juego y repetibilidad

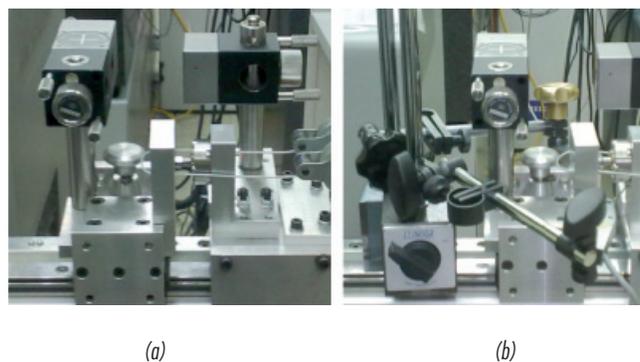


Fig. 3: Utillajes fabricados para la determinación del juego de la rótula esférica: (a) Medición con el interferómetro láser (b) Medición con palpadores inductivos

del conjunto rótula y actuador unidos. En la Fig. 4 se pueden observar los utillajes desarrollados para su realización.

Inicialmente se realizó un ensayo sin precarga que consistía en la inicialización del actuador a su posición de elongación cero. Se eliminó el juego en el sentido de contracción del mismo y se realizó el reset en el interferómetro láser, realizando desplazamientos con incrementos de 10 mm. Posteriormente se repitió el ensayo aplicando una precarga inicial al sistema rótula esférica y actuador para eliminar el juego de los componentes.

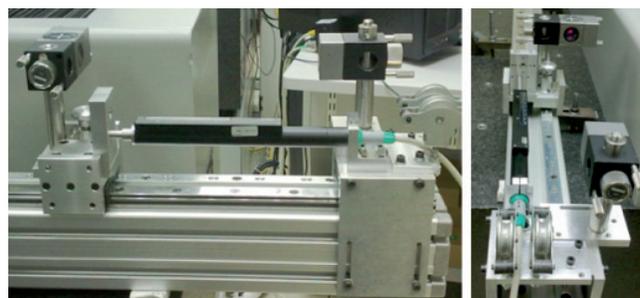


Fig. 4: Utillajes fabricados para la determinación del juego del sistema rótula esférica y actuador mediante el interferómetro láser

Una vez caracterizados los componentes del sistema se realizó el montaje de la plataforma y se caracterizó el sistema completo como se detalla a continuación.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PLATAFORMA

La caracterización de la plataforma se ha realizado mediante el ensayo de determinación del juego y repetibilidad utilizando una máquina de medir por coordenadas (MMC) con precisión en torno a los $2 \mu\text{m}$.

Previamente se han fijado tres esferas patrón sobre la superficie de la plataforma, como se muestra en la Fig. 5(a).

Para cada posición de análisis se ejecuta el orden de mover los actuadores mediante el programa de control y se transmite a los actuadores el orden de movimiento para posicionar a la plataforma en la posición deseada. En ese momento se obtiene la lectura de los sensores lineales, $L_{1_encoder}$ y $L_{2_encoder}$, y se realiza la medición de las esferas

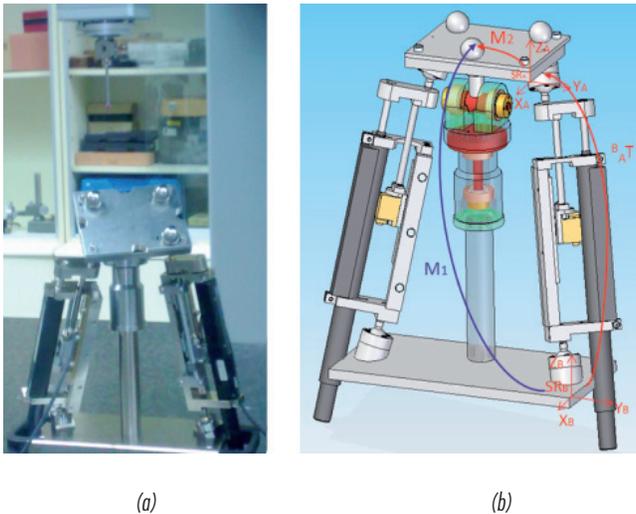


Fig. 5. Determinación del juego y repetibilidad de la plataforma: (a) Medición de las tres esferas. (b) Matriz de transformación que expresa los centros de las esferas en el SR_B.

patrón mediante la MMC. Esta medición permitirá hallar los centros de las esferas patrón respecto del sistema de referencia global B, situado en la base [ver Fig. 5(b)], obteniendo la posición y orientación de la plataforma respecto del sistema de referencia B. Las coordenadas medidas respecto del SR_B, $D_{medidas} = [x, y, z, a, b, g]$, se pueden calcular fácilmente utilizando la matriz de transformación, como se detalla en la Ecuación 1:

$${}^B T_A = M_1 \cdot M_2^{-1} \quad {}^B T_A \quad (1)$$

donde M_2 es la matriz de transformación que permite expresar el sistema de referencia de las esferas, SR_E, respecto del SR_A (sistema de referencia solidario a la placa móvil) y M_1 es la matriz de transformación que permite expresar el sistema de referencia de las esferas, SR_E, respecto del SR_B.

Se han realizado mediciones de la posición de las tres esferas situadas en la placa móvil de la plataforma para 25 posiciones distribuidas en la zona de trabajo.

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLATAFORMA

3.1.1 Determinación del juego y repetibilidad del actuador

El ensayo descrito en el apartado 2.1.1 se ha realizado cinco veces para analizar la repetibilidad del actuador. La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos.

Como se puede observar, el error aumenta a medida que se incrementa la elongación del actuador. Sin embargo, la desviación para cualquier valor de elongación medida por el sensor lineal está por debajo de 1 μm -en el caso de incremento de la elongación (ida)- y por debajo de 2 μm -en el caso de decremento de la elongación (vuelta)-, por lo que el error cometido debido al actuador podrá ser fácilmente corregido.

Los resultados obtenidos con ambos ensayos son muy similares. El juego promedio al medir con el interferómetro láser es de 45 μm (únicamente 1.7 μm superior al obtenido por el sensor lineal). Esta diferencia puede deberse al propio error de los sistemas de medición o al pequeño error de *Abbe* cometido en la medida del interferómetro. Los sistemas de medición utilizados, sensor lineal e interferómetro láser, permiten determinar el error del actuador. Aunque estos errores medios y máximos son elevados, la caracterización realizada y la incorporación de los sensores ópticos lineales al mecanismo permitirán corregirlos.

La desviación obtenida en el ensayo realizado con el sensor lineal es ligeramente menor que la obtenida mediante el interferómetro láser. Esta diferencia es menor de 1 μm (ver Tabla 1).

	ida sensor	ida interf.	vuelta sensor	vuelta interf.
media (mm)	-0.0731	-0.0688	-0.0290	-0.0230
desviacion (mm)	0.0007	0.0025	0.0012	0.0016
máx Error (mm)	0.1578	0.1311	0.1114	0.0931

Tabla 1: Comparación de la desviación obtenida en el actuador mediante el interferómetro láser y el sensor lineal

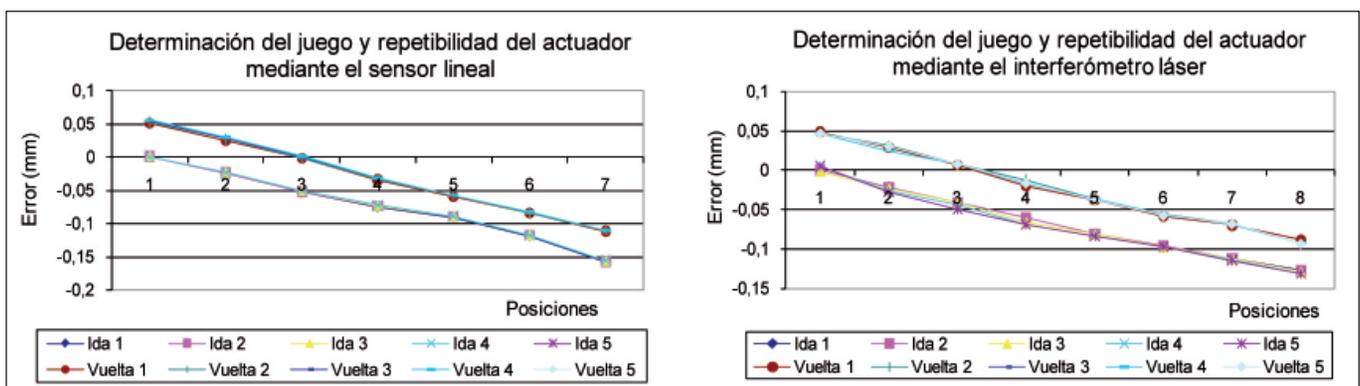


Fig. 6. Determinación del juego y repetibilidad del actuador

3.1.2. Determinación del juego de la rótula esférica

La Fig. 7 muestra los resultados obtenidos en el ensayo realizado para determinar el juego de la rótula esférica para distintas precargas, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 2.1.2. El juego obtenido antes de aplicar la precarga es de 10.3 μm en la medición realizada con el interferómetro láser y de 6.6 μm al medir con los palpadores inductivos. En las posiciones en las que la precarga es pequeña o nula, la repetibilidad obtenida es muy baja y el juego es máximo. Sin embargo, a medida que se aplica precarga el juego disminuye. Se puede observar que para precargas superiores a 2.4 Kg., el juego se mantiene constante con un valor entre 2 y 3 μm , para la medición realizada con los palpadores inductivos, y entre 5 y 6 μm para la medición realizada con el interferómetro láser. Esta diferencia puede ser debida a pequeños errores de Abbe en la medición realizada mediante el interferómetro láser.

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que aplicando una precarga inicial de 2.4 Kg. en la plataforma se eliminaría considerablemente el juego de las rótulas.

3.1.3. Determinación del juego y repetibilidad del conjunto rótula esférica y actuador

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el ensayo para determinar el juego y la repetibilidad del conjunto rótula esférica y actuador, descrito en el apartado 2.1.3. Para ello, se ha utilizado el interferómetro láser y el sensor lineal. Ambos sistemas de medición ofrecen resultados muy similares, como se muestra en la Fig. 8.

Si se analiza la desviación en el error cometido por el sistema rótula y actuador (ver Tabla 2), se puede observar que la desviación máxima tiene lugar en el sentido de incremento de la elongación del actuador, con valores aproximados de 7.1 y 6.3 μm en la medición realizada por el sensor lineal y el interferómetro láser, respectivamente. En la trayectoria en la que se decreta la elongación del actuador, los dos sistemas de medición difieren en sus medidas, pero siguen obteniéndose valores en el mismo orden de magnitud (1.4 y 3.1 μm para la medición realizada por el sensor lineal y el interferómetro láser, respectivamente).

El paso siguiente consistió en la precarga inicial del sistema rótula esférica y actuador para eliminar el juego de los componentes. Se aplicó una precarga de valor 2.4 Kg., ya que ésta es la precarga a partir de la cual se elimina el juego del sistema, como se analizó en el apartado 3.1.2.

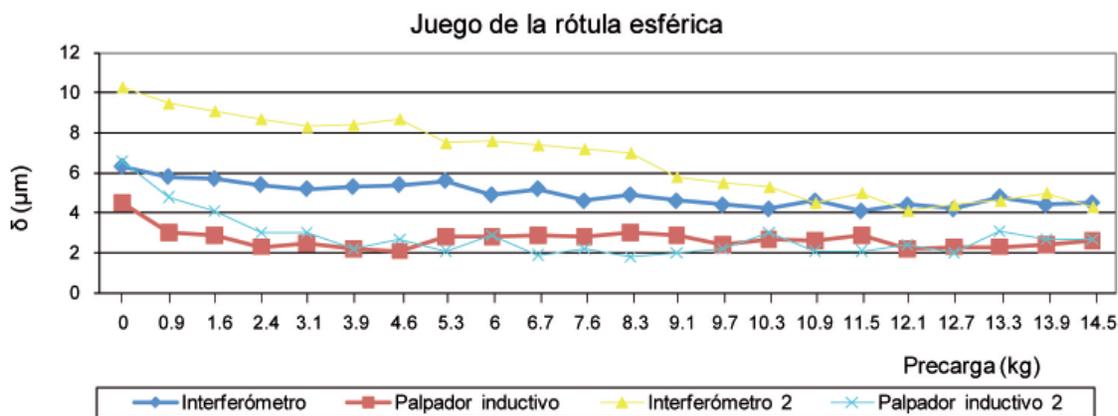


Fig. 7: Determinación del juego de la rótula esférica

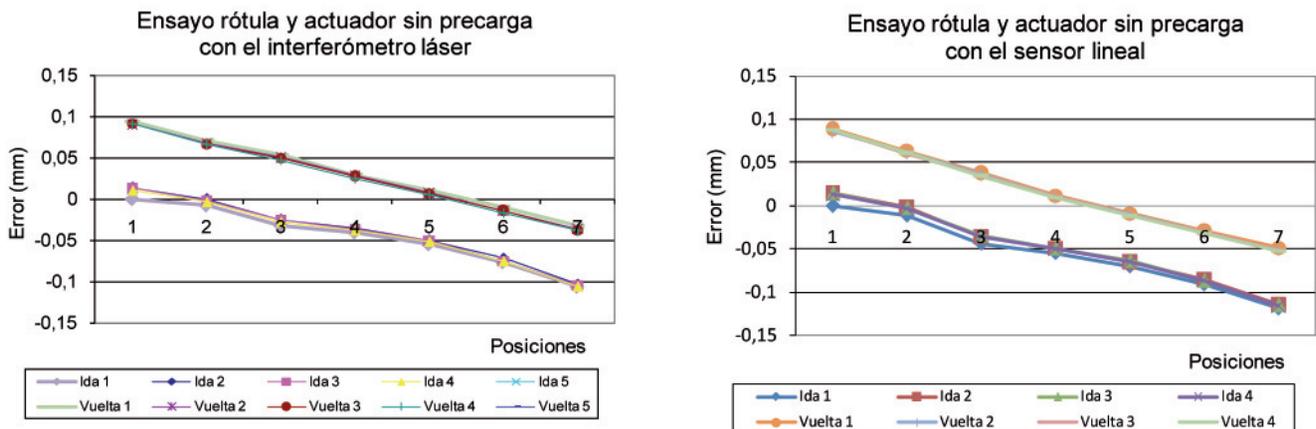


Fig. 8: Determinación del juego y repetibilidad del sistema rótula esférica y actuador mediante el interferómetro láser y el sensor lineal sin precarga

		Posiciones							
		1	2	3	4	5	6	7	
Sensor	ida	Media (mm)	0.0105	-0.0048	-0.0357	-0.0509	-0.0658	-0.0873	-0.1160
		Desviación (mm)	0.0071	0.0044	0.0068	0.0026	0.0030	0.0026	0.0021
		Máx. Error (mm)	0.0147	0.0112	0.0439	0.0547	0.0703	0.0911	0.1191
vuelta		Media (mm)	0.0876	0.0614	0.0360	0.0107	-0.0107	-0.0303	-0.0508
		Desviación (mm)	0.0011	0.0014	0.0014	0.0011	0.0012	0.0014	0.0013
		Máx. Error (mm)	0.0888	0.0635	0.0379	0.0115	0.0120	0.0318	0.0522
Interf.	ida	Media (mm)	0.0091	-0.0034	-0.0277	-0.0376	-0.0518	-0.0749	-0.1052
		Desviación (mm)	0.0063	0.0031	0.0030	0.0022	0.0022	0.0020	0.0014
		Máx. Error (mm)	0.0138	0.0075	0.0319	0.0404	0.0549	0.0768	0.1067
vuelta		Media (mm)	0.0915	0.0675	0.0499	0.0276	0.0071	-0.0139	-0.0364
		Desviación (mm)	0.0017	0.0023	0.0026	0.0020	0.0024	0.0031	0.0025
		Máx. Error (mm)	0.0940	0.0708	0.0534	0.0291	0.0104	0.0173	0.0388

Tabla 2: Comparación de la desviación obtenida por el sensor lineal y el interferómetro láser en el sistema rótula esférica y actuador para cada posición medida



Fig. 9. Determinación del juego y repetibilidad del sistema rótula esférica con y sin precarga mediante el sensor lineal

La Fig. 9 compara los resultados obtenidos antes y después de la aplicación de la precarga en la medición realizada con el sensor lineal. En las primeras posiciones, correspondientes a pequeñas elongaciones del actuador, el juego disminuye como cabía esperar. Sin embargo, a medida que nos acercamos a la zona donde el actuador se encuentra en posiciones más alejadas, el juego aumenta. Este comportamiento puede deberse a movimientos de flexión del actuador. Sin embargo, la repetibilidad mejora considerablemente, lo que permitirá desarrollar modelos de corrección en la caracterización de la plataforma. La Tabla 3 muestra los valores máximo, mínimo y promedio del juego obtenido para los dos sistemas de medición empleados. Se puede observar que al colocar la precarga en el sistema rótula y actuador, el juego aumenta. Sin embargo, comparando las Tablas 2 y 4 (desviaciones sin aplicar precarga y con precarga, respectivamente), se puede observar que la desviación máxima mejora considerablemente, obteniendo valores máximos de desviación de 3.3 μm con precarga, frente a 7.1 μm sin precarga en el caso del sensor lineal y 4.6 μm frente a 6.3 μm en el caso del interferómetro.

	Sin precarga		Con precarga	
	Interf. Láser	Sensor lineal	Interf. Láser	Sensor lineal
Juego máx (mm)	0.0824	0.0771	0.1663	0.1519
Juego mín (mm)	0.0589	0.0552	0.0732	0.0624
Juego promedio (mm)	0.0693	0.0649	0.1305	0.1173

Tabla 3: Comparación del juego obtenido en el sistema rótula esférica y actuador mediante el interferómetro láser y el sensor lineal con y sin precarga

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PLATAFORMA

Una vez caracterizados los componentes del sistema, se realiza el montaje de la plataforma y se caracteriza el sistema completo. La Fig. 10 muestra la desviación obtenida en el ensayo de juego y repetibilidad de la plataforma (descrito en el apartado 2.2) para diferentes trayectorias definidas por los ángulos φ_1 (azimut) y φ_2 (elevación). Cada posición viene representada por el valor $[\varphi_1, \varphi_2]$.

En las trayectorias representadas en las Fig. 10(a), 10(b) y 10(e) el ángulo de elevación permanece constante para cada posición de la plataforma y el ángulo de azimut varía en el intervalo $[-40, 40]$ con incrementos de 20° de una posición a la siguiente, describiendo de esta forma movimientos horizontales. En las trayectorias representadas en las Fig. 10(c) y 10(d) el ángulo que permanece constante es el ángulo

		Posiciones						
		1	2	3	4	5	6	7
ida sensor	media (mm)	0.0022	-0.0500	-0.0886	-0.1190	-0.1428	-0.1800	-0.2070
	desviación (mm)	0.0018	0.0014	0.0033	0.0014	0.0012	0.0011	0.0021
	máx Error (mm)	0.0048	-0.0484	-0.0857	-0.1164	-0.1398	-0.1793	-0.2052
vuelta sensor	media (mm)	0.0671	0.0360	0.0089	-0.0158	-0.0506	-0.0740	-0.1243
	desviación (mm)	0.0018	0.0014	0.0033	0.0014	0.0012	0.0011	0.0021
	máx Error (mm)	0.0691	0.0374	0.0114	-0.0143	-0.0498	-0.0731	-0.1227
ida interf.	media (mm)	0.0023	-0.0521	-0.0859	-0.1129	-0.1365	-0.1779	-0.2063
	desviación (mm)	0.0025	0.0019	0.0046	0.0030	0.0031	0.0006	0.0019
	máx Error (mm)	0.0045	-0.0500	-0.0823	-0.1103	-0.1334	-0.1772	-0.2039
vuelta interf.	media (mm)	0.0727	0.0436	0.0230	0.0021	-0.0344	-0.0610	-0.1177
	desviación (mm)	0.0012	0.0014	0.0039	0.0020	0.0016	0.0009	0.0021
	máx Error (mm)	0.0744	0.0452	0.0261	0.0043	-0.0331	-0.0600	-0.1152

Tabla 4: Comparación de la desviación obtenida en el sistema rótula esférica y actuador, mediante el interferómetro láser y el sensor lineal con precarga

de elevación, por lo que la plataforma realiza movimientos verticales.

A partir de los resultados obtenidos se puede deducir que las posiciones cercanas a la posición inicial ($\varphi_1=0, \varphi_2=0$) son las que presentan menor juego y las posiciones alejadas de ella son las que muestran mayor juego.

La Tabla 5 muestra las desviaciones obtenidas en algunas de las trayectorias verticales ($\varphi_1=cte$) y horizontales ($\varphi_2=cte$), respectivamente, del ensayo de caracterización de la plataforma. La desviación máxima es muy similar en ambos casos, con valores de 2.3 y 2.9 μm . Estos resultados corroboran los análisis previos realizados para el sistema rótula esférica y actuador con precarga a compresión, donde se pudo predecir una desviación en torno a los 3 μm .

El paso siguiente es el análisis del error cometido en el posicionamiento de la plataforma. La Fig. 11 muestra los

máximo de la plataforma es de 0.88 mm y el error medio es de 0.42 mm.

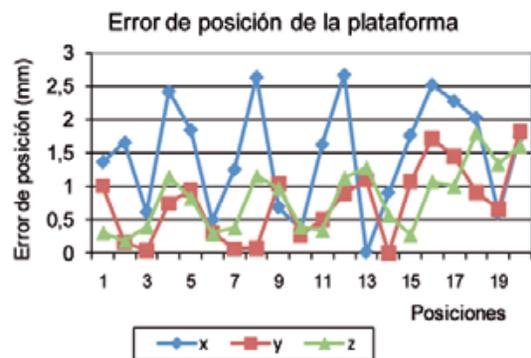


Fig. 11: Representación del error cometido en el posicionamiento de la plataforma: Componentes del error de posición

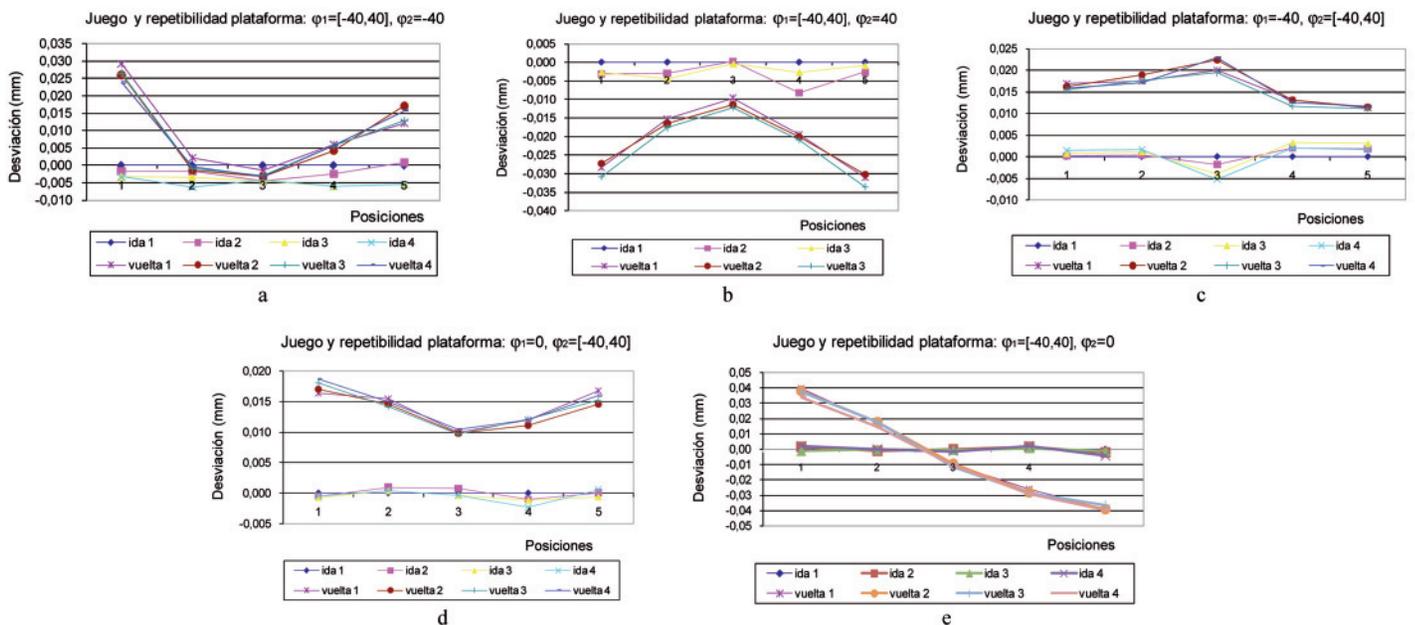


Fig. 10: Determinación del juego de la plataforma mediante la MMC: (a) Trayectoria $\varphi_1=[-40^\circ, 40^\circ]$, $\varphi_2=40^\circ$ (b) Trayectoria $\varphi_1=[-40^\circ, 40^\circ]$, $\varphi_2=40^\circ$ (c) Trayectoria $\varphi_1=40^\circ$, $\varphi_2=[-40^\circ, 40^\circ]$ (d) Trayectoria $\varphi_1=0^\circ$, $\varphi_2=[-40^\circ, 40^\circ]$ (e) Trayectoria $\varphi_1=[-40^\circ, 40^\circ]$, $\varphi_2=0^\circ$

Trayectoria vertical	Posiciones (j = -40°)	ida	Media (mm)	0.0006	0.0008	-0.0027	0.0018	0.0017
			Desviación (mm)	0.0007	0.0007	0.0023	0.0014	0.0013
Máx. Error (mm)	0.0015	0.0017	0.0052	0.0033	0.0031			
Posiciones (j = 0°)	ida	Media (mm)	0.0161	0.0178	0.0212	0.0126	0.0114	
		Desviación (mm)	0.0006	0.0008	0.0017	0.0007	0.0002	
Máx. Error (mm)	0.0169	0.0189	0.0229	0.0131	0.0116			
Posiciones (j = 0°)	vuelta	Media (mm)	-0.0004	0.0004	0.0000	-0.0011	0.0000	
		Desviación (mm)	0.0003	0.0004	0.0006	0.0009	0.0005	
Máx. Error (mm)	0.0007	0.0010	0.0008	0.0023	0.0006			
Posiciones (j = -40°)	ida	Media (mm)	0.0176	0.0148	0.0100	0.0118	0.0157	
		Desviación (mm)	0.0010	0.0006	0.0003	0.0005	0.0010	
Máx. Error (mm)	0.0187	0.0155	0.0105	0.0121	0.0168			
Posiciones (j = -40°)	vuelta	Media (mm)	-0.0021	-0.0028	-0.0033	-0.0036	-0.0025	
		Desviación (mm)	0.0016	0.0026	0.0022	0.0029	0.0034	
Máx. Error (mm)	0.0033	0.0062	0.0045	0.0060	0.0055			
Posiciones (j = 0°)	ida	Media (mm)	0.0264	-0.0001	-0.0028	0.0055	0.0145	
		Desviación (mm)	0.0022	0.0016	0.0009	0.0009	0.0024	
Máx. Error (mm)	0.0293	0.0022	0.0032	0.0060	0.0171			
Posiciones (j = 0°)	vuelta	Media (mm)	0.0006	-0.0002	-0.0004	0.0012	-0.0018	
		Desviación (mm)	0.0015	0.0005	0.0007	0.0010	0.0017	
Máx. Error (mm)	0.0020	0.0009	0.0013	0.0021	0.0041			
Posiciones (j = -40°)	ida	Media (mm)	0.0374	0.0168	-0.0101	-0.0280	-0.0384	
		Desviación (mm)	0.0024	0.0016	0.0008	0.0014	0.0013	
Máx. Error (mm)	0.0397	0.0179	0.0112	0.0294	0.0394			
Posiciones (j = -40°)	vuelta	Media (mm)	-0.0019	-0.0024	0.0000	-0.0036	-0.0012	
		Desviación (mm)	0.0017	0.0022	0.0004	0.0042	0.0013	
Máx. Error (mm)	0.0031	0.0044	0.0004	0.0082	0.0026			
Posiciones (j = 0°)	ida	Media (mm)	-0.0288	-0.0164	-0.0111	-0.0202	-0.0316	
		Desviación (mm)	0.0018	0.0012	0.0013	0.0007	0.0017	
Máx. Error (mm)	0.0308	0.0176	0.0123	0.0209	0.0335			

Tabla 5: Desviación en las trayectorias verticales ($\varphi_j = cte$) del ensayo de caracterización de la plataforma

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la metodología utilizada para la caracterización de una plataforma de 2-GDL giratorios que permite aumentar la precisión del mecanismo simplificando considerablemente el modelado cinemático del mismo.

Se ha determinado el juego de los componentes -actuador y rótula esférica- mediante diferentes sistemas de medición como un sensor óptico lineal, interferómetro láser y palpadores inductivos. Se ha calculado la precarga a contracción que permite disminuir el juego de la rótula esférica en torno al 40%. Además, la aplicación de dicha precarga mejora considerablemente la repetibilidad y la desviación del error, lo que permitirá mejorar la precisión en la etapa de calibración.

En el mecanismo desarrollado por Ropponen [17] se obtuvo un error en las componentes x e y en torno a 2 mm y el error obtenido en la componente z era inferior. Sin embargo, en el análisis de nuestro mecanismo, el error se produce principalmente en el eje z . Esta diferencia puede ser debida a la modelización realizada del mecanismo.

Para caracterizar la plataforma se ha aplicado la precarga calculada y se han utilizado las lecturas de los sensores lineales para corregir el juego de los actuadores, mejorando considerablemente la precisión del mecanismo. El error de posición medio de la plataforma, después de realizar la calibración del sistema, es de 0.42 mm.

La metodología desarrollada permite alcanzar elevada precisión de posicionamiento; si bien el costo inicial es más elevado en comparación con otros métodos, debido a la necesidad de utilizar sistemas de medición de precisión,

este procedimiento permite compensar y corregir errores no geométricos como el juego. Mediante la caracterización desarrollada, las posteriores fases de modelado y calibración disminuyen su complejidad considerablemente, evitando posibles fuentes de error en la resolución de estos modelos, como por ejemplo, la incorporación de funciones discontinuas para la consideración del juego de los componentes del mecanismo.

Otro de los aspectos a considerar es el tiempo necesario para la aplicación de esta metodología frente a los métodos tradicionales. Inicialmente se deben diseñar y fabricar los utillajes, y posteriormente se deben realizar los ensayos para la caracterización de los componentes. Aunque el tiempo de desarrollo es alto, una vez sistematizada la metodología dicho tiempo se reduce considerablemente. En los métodos tradicionales no se realiza esta etapa de caracterización. Sin embargo, el tiempo necesario para el modelado del mecanismo suele ser mayor que el requerido para la aplicación de la metodología desarrollada, ya que o bien se deben incorporar este tipo de errores en el modelo cinemático -lo que da lugar a un complejo problema de alto coste computacional que suele introducir errores en su resolución- o bien deben desarrollarse independientemente modelos no geométricos que consideren estos errores, cuya resolución se realiza habitualmente mediante métodos de calibración dinámica.

La caracterización del sistema de posicionamiento para aplicaciones de metrología y procesos de máquina-herramienta, es fácilmente generalizable a otros mecanismos paralelos de precisión que contengan actuadores y rótulas esféricas. La metodología desarrollada permite caracterizar los distintos componentes del mecanismo. De esta manera, se puede introducir la corrección en cada cadena cinemática en función del tipo de rótulas de dicha cadena. Debido a las características del modelado de los mecanismos de cinemática paralela, en los que el modelo se obtiene mediante lazos de unión independientes -de la placa móvil a la placa fija- a través de las distintas cadenas del mecanismo, la caracterización de cualquier mecanismo paralelo se realizaría considerando el mecanismo como un sistema modular de n cadenas cinemáticas e introduciendo la corrección de cada cadena.

Como conclusión de este trabajo, la metodología desarrollada permite caracterizar el error para conocer y trazar su influencia en la precisión final del mecanismo, lo que permite implementar la corrección en el modelo cinemático en cuanto a repetibilidad de posicionamiento y juego. Los parámetros no geométricos, como el juego, provocan errores no repetibles, que introducen incertidumbre en el posicionamiento del mecanismo, por lo que deben ser caracterizados y corregidos antes de ser introducidos en el modelo. De lo contrario, la identificación de dichos parámetros dependerá del valor inicial de todos los parámetros del modelo. El conocimiento previo de estos errores permite corregirlos o utilizar estos valores como valores iniciales en el procedimiento de identificación de parámetros. De

esta manera, se obtienen modelos de calibración mucho más sencillos donde no es necesario introducir complejas funciones para el modelado de estos errores, minimizando los errores de cálculo numérico y disminuyendo la incertidumbre en la precisión del mecanismo y el coste computacional en la resolución del modelado y calibración del sistema.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pérez-Turiel J, Fraile-Marinero JC, Perán-González JR. "Aplicaciones de la robótica: últimas tendencias y nuevas perspectivas". *DYNA Ingeniería e Industria*. Abril 2002. Vol.77-3 p. 61-68.
- [2] Amat J. "Posibilidades y perspectivas de la robótica en la medicina". *DYNA Ingeniería e Industria*. Septiembre 1996. Vol.71-6 p. 59-61.
- [3] Hernández-Martínez E, López-Cajún C, Jáuregui-Correa J. "Calibration of Parallel Manipulators and their Application to Machine Tools. A State of the Art Survey". *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Junio 2010. Vol.11-2 p. 141-154.
- [4] Yang GL, Chen IM, Chen WH et al. "Kinematic design of a six-DOF parallel-kinematics machine with decoupled-motion architecture". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Octubre 2004. Vol.20-5 p. 876-884.
- [5] Aracil R, Saltaren RJ, Sabater JM et al. "Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro". *Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI)*. Enero 2006. Vol.3-1 p. 16.
- [6] Aracil R, Saltarén R, Sabater JM et al. "Robots trepadores de estructura paralela. Aplicación al mantenimiento de palmeras". *DYNA Ingeniería e Industria*. Febrero 2000. Vol.75-1 p. 55-59.
- [7] Merlet JP. "Determination of the Orientation Workspace of Parallel Manipulators". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. Junio 1995. Vol.13-2 p. 143-160.
- [8] Gosselin C, Angeles J. "Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains". *IEEE Robotics and Automation*. Junio 1990. Vol.6-3 p. 281-290.
- [9] Gosselin C. "Determination of the Workspace of 6-Dof Parallel Manipulators". *Journal of Mechanical Design*. Septiembre 1990. Vol.112-3 p. 331-336.
- [10] Stan SD, Maties V, Balan R. *Workspace optimal design of a 2 DOF micro parallel robot using genetic algorithms and simulated annealing optimization methods*. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation: 5-8 Agosto 2007. p. 1108.
- [11] Majarena AC, Santolaria J, Samper D et al. "An Overview of Kinematic and Calibration Models Using Internal/External Sensors or Constraints to Improve the Behavior of Spatial Parallel Mechanisms". *Sensors*. Noviembre 2010. Vol.10-11 p. 10256-10297.
- [12] Gong C, Yuan J, Ni J. "Non geometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Marzo 2000. Vol.40 p. 2119-2137.
- [13] Ahmad S. "Analysis of robot drive train errors, their static effects and their compensations". *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Abril 1988. Vol.4(2) p. 117-128.
- [14] Caenen A. *Internal preload control of redundantly actuated parallel manipulators-backlash avoiding control*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation: 18-22 Abril 2005. p. 948.
- [15] Müller A. *Internal preload control of redundantly actuated parallel manipulators-backlash avoiding control*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation: 18-22 Abril 2005. p. 948.
- [16] Müller A, Maissner P. "Generation and application of prestress in redundantly full-actuated parallel manipulators". *Multibody System Dynamics*. Julio 2007. Vol.18-2 p. 259-275.
- [17] Ropponen T, Arai T. *Accuracy analysis of a modified Stewart platform manipulator*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation: 21-27 Mayo 1995. p. 521.
- [18] Majarena AC, Santolaria J, Samper D et al. "Spatial resolution-based kinematic design of a parallel positioning platform". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Julio 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2878-x.
- [19] Cash M, Bruch D, Jahn B et al. *Practical considerations of joint friction and backlash in large ground-based telescope secondary optic positioning systems*. Proceedings of SPIE: Julio 2008. p. 70181T.