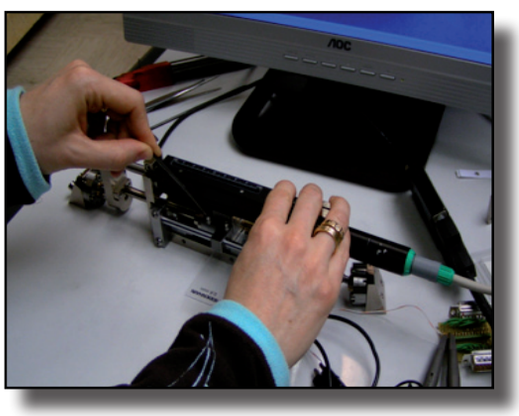
Análisis y mejoras en el diseño de un mecanismo cinemático de alta precisión



Ana Cristina Majarena-Bello — Dra. Ingeniero Industrial
Jorge Santolaria-Mazo — Dr. Ingeniero Industrial
David Samper-Carnicer — Ingeniero Industrial
Juan José Aguilar-Martín — Dr. Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Calle María de Luna, 3 – 50018 Zaragoza.
Tfno: +34 976 761000. majarena@unizar.es

Recibido: 13/02/2013 • Aceptado: 10/06/2013
DOI: http://dx.doi.org/10.6036/5753

ANALYSIS AND DESIGN IMPROVEMENTS OF A HIGH PRECISION KINEMATIC MECHANISM

ABSTRACT

• A new design for reducing the kinematic mechanism error is presented in this paper. Firstly, a prototype having a universal joint is presented and the kinematic model in the Simmechanics environment of Matlab is described, studying the system behaviour by means of simulation. Then, the manufacturing and assembly of the platform is performed and the mechanism performance is evaluated. To do this, different tests are carried out in which the mechanism backlash and the influence of the elevation angle and the misalignment in every axis due to backlash are analyzed. Finally, the mechanism design is improved by replacing the universal joint with a new element that consists on bearings and precision locknuts. This element allows us to obtain the two desired degrees of freedom. The replacement of the commercial universal joint by the developed element implies a considerably increment of the mechanism accuracy. The developed platform has many applications in the industry, such as, machining tool processes, high range metrology, holder base for measurement tools such as topography instruments, mirror orientation in telescopes, etc.
• Keywords: kinematic mechanism, high precision universal joint, backlash, accuracy.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un novedoso diseño para reducir el error de un mecanismo cinemático.

En primer lugar se presenta un prototipo inicial compuesto por una rótula universal y se describe el modelado del mecanismo en el entorno Simmechanics de Matlab, estudiando el comportamiento del sistema mediante simulación. Posteriormente se realiza la fabricación y montaje de la plataforma y se evalúa el comportamiento del mecanismo. Para ello, se realizan diferentes ensayos en los cuales se analizan los errores del mecanismo y la influencia del ángulo de elevación y del desalineamiento en cada eje debido al juego del sistema. Finalmente, se mejora el diseño del mecanismo, sustituyendo la rótula universal por un nuevo elemento, compuesto por dos ejes con rodamientos y tuercas de apriete de precisión. Este elemento permite los dos grados de libertad deseados. La sustitución de la rótula universal comercial por el elemento desarrollado conlleva un aumento considerable de la precisión del mecanismo. La plataforma desarrollada tiene numerosas aplicaciones en la industria, como por ejemplo, procesos de máquina-herramienta, metrología de alto rango, soportes de apoyo para instrumentos de medición como aparatos topográficos, orientación de espejos en telescopios, etc.

Palabras clave: mecanismo cinemático, diseño, juego, precisión.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el diseño y modelado de mecanismos cinemáticos paralelos de alta precisión en el posicionamiento ha despertado gran interés, debido

principalmente a sus numerosas aplicaciones en la industria, como por ejemplo, nanomanipulación [1], máquina-herramienta [2], o sectores como la medicina [3] o la astronomía [4].

Los mecanismos cinemáticos están formados por cadenas cinemáticas con articulaciones. En los mecanismos espaciales las articulaciones más utilizadas son de revolución, esféricas, universales y prismáticas. Así por ejemplo, en [5] y en [6] se desarrollaron mecanismos de dos y cinco grados de libertad (GDL), respectivamente, formados por cadenas cinemáticas con los cuatro tipos de articulaciones mencionados; y en [7] se desarrolló un mecanismo de tres GDL que utiliza rótulas universales y prismáticas.

Aunque se encuentran numerosos trabajos en la literatura especializada que estudian cómo mejorar el diseño de los mecanismos, optimizando la zona de trabajo del mismo [8,9], existen escasos trabajos en los que se caracterice el juego de los componentes del sistema, ya que este error no es fácil de modelar.

En [10], se presentó el análisis y los ensayos realizados para la caracterización del juego del actuador y de una rótula esférica. Para ello, se utilizaron sensores ópticos lineales y un interferómetro láser. En dicho estudio se obtuvo en el actuador un juego de 45 µm y de 10.3 µm en la rótula esférica. Como resultado de la caracterización de los componentes se calculó la precarga necesaria para compensar el juego producido por estos elementos.

El presente trabajo se desarrolla como continuación a dicho estudio, pero en este caso se analiza el juego de la rótula universal. La caracterización de la rótula universal muestra que el error de dicha rótula es muy elevado. Los métodos que se aplicaron para la corrección de las rótulas esféricas son válidos para pequeños juegos. Por lo que en el caso de la rótula universal no son aplicables. Por ello, en este trabajo se presenta una mejora en el diseño del sistema sustituyendo la rótula universal por un nuevo elemento de alta precisión de dos GDL.

Inicialmente se presenta el modelado de un mecanismo en el entorno *Simmechanics* de *Matlab* y las simulaciones realizadas en *Matlab*, *Simmechanics* y *Solid Edge* para analizar la zona de trabajo, el movimiento del mecanismo y su comportamiento frente a posibles colisiones entre los componentes del sistema. Posteriormente se realiza la fabricación y montaje de la plataforma y se evalúa el comportamiento del mecanismo. Además, se realizan diferentes ensayos para estudiar el juego de la rótula universal, la influencia del ángulo de elevación y el desalineamiento de los ejes. Finalmente, se diseña un nuevo elemento de alta precisión, compuesto por rodamientos y tuercas de apriete de precisión, y se sustituye la rótula universal por el elemento desarrollado, mejorando la precisión del mecanismo en más de un orden de magnitud.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se presenta el mecanismo cinemático que se desea mejorar y el análisis realizado para determinar los errores del sistema.

El objetivo inicial en el diseño del mecanismo era obtener un sistema de medición sin contacto de alta precisión y bajo coste para el posicionamiento de dos cámaras de visión. El sistema de medición consta de dos unidades de posicionamiento y en cada una de ellas se colocan dos cámaras de visión sobre la plataforma móvil. Posteriormente será necesario realizar un procedimiento de calibración de las cámaras para determinar la matriz de transformación que permite obtener la posición y orientación de la cámara relativa a un sistema de referencia global, por lo que no es necesario que estén acopladas. La primera de las cámaras posee alta precisión para la captura de la imagen y la segunda cámara es de menor resolución, ya que únicamente realiza el seguimiento del objeto a medir. Mediante la captura del objeto a medir por las dos unidades de posicionamiento se puede obtener el objeto a medir por estereometría. El peso de cada cámara es de 160 g. En el proceso se debe diseñar, fabricar y caracterizar la plataforma. Posteriormente será necesaria una etapa

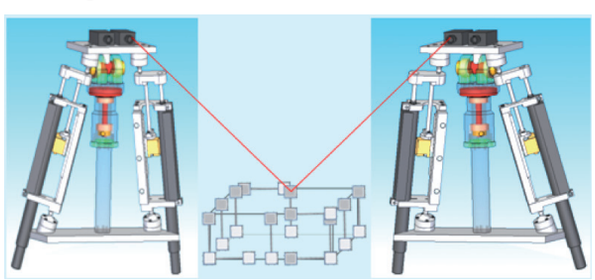


Fig. 1: Prototipo 1. Unidad de posicionamiento del sistema de medición

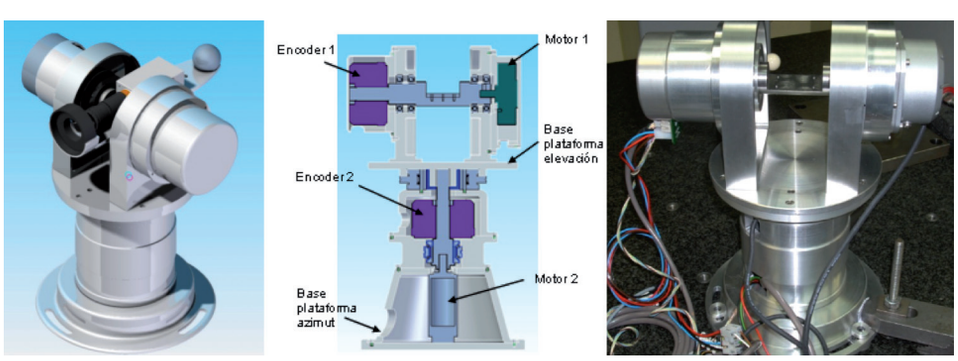


Fig. 2: Prototipo 1. Unidad de posicionamiento del sistema de medición

de calibración del mecanismo en el rango de los dos ejes de giro de la plataforma, por lo que las posibles pequeñas deformaciones que puedan aparecer en la misma se considerarán mediante la identificación de los parámetros cinemáticos. Las especificaciones de partida eran desarrollar un sistema que permitiera alcanzar ± 45º en el giro de azimut y ± 30º en el

ENTORNOS DE MODELADO PARA SIMULACION DE MECANISMOS

Simulink es una plataforma de simulación con un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Esta plataforma permite simular modelos o sistemas y se utiliza ampliamente en Ingeniería de control y Robótica. Dentro de este entorno se encuentra la herramienta Simmechanics. Simmechanics es un entorno de modelado, basado en diagramas de bloques, para el diseño en ingeniería y simulación de máquinas de cuerpos rígidos. Este módulo utiliza la dinámica estándar Newtoniana de fuerzas y pares. Con esta herramienta se pueden modelar y simular sistemas mecánicos para especificar cuerpos y sus propiedades, sus movimientos, limitaciones cinemáticas y sistemas de coordenadas. La visualización de las herramientas del software de Simmechanics muestra y anima renders simplificados de máquinas en 3D utilizando el sistema gráfico de Matlab. Además, esta herramienta permite diseñar controladores para su utilización en tiempo real.

giro de elevación con una precisión de 0.3 mm y repetibilidad de 0.03 mm.

Inicialmente se desarrolló un mecanismo de dos grados de libertad (GDL) (azimut y elevación), de cadena abierta, como el que se muestra en la Fig. 2. Esta primera opción ofrecía un control sencillo del sistema. El error medio en el posicionamiento del mecanismo era de 0.486 mm (obtenido mediante la medición de la posición de una esfera patrón solidaria a la plataforma) y una repetibilidad de 0.042 mm.

En base a los resultados obtenidos se decidió diseñar un nuevo prototipo con el fin de mejorar en lo posible la precisión del mismo. Para ello, se diseñó un mecanismo basado en *cinemática paralela*. Si bien los mecanismos de cinemática paralela ofrecen importantes ventajas de rigidez y precisión frente a los mecanismos de cadena abierta principalmente cuando el número de grados de libertad del sistema es elevado, el control de los mismos es complejo. Sin embargo, la utilización de estos sistemas con pocos grados de libertad, como en nuestro caso, simplifica el control y el coste de estos mecanismos. Por ello, como línea de investigación se decidió analizar el comportamiento de estos sistemas para mejorar el primer prototipo desarrollado.

En primer lugar se analizaron diferentes configuraciones para la obtención de un mecanismo de cinemática paralela de dos GDL con dos actuadores lineales y se analizó la movilidad de cada configuración mediante la *Fórmula de Grübler*.

La *fórmula de Grübler* viene dada por la Eq. 1 y permite obtener la movilidad, M, del mecanismo [11]. En ella, d, n, g y f_j representan el orden de movimiento en el espacio del sistema, el número de eslabones, el número de articulaciones y el número de GDL de cada articulación, respectivamente.

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{j=1}^{g} f_j \qquad (1)$$

Para limitar el número de GDL del sistema a dos, en algunas de las configuraciones es necesario añadir una tercera cadena. Esta cadena consta de una barra rígida solidaria a una de las placas y unida a la otra placa mediante una rótula.

En nuestro diseño, las dos cadenas que contienen los actuadores son idénticas, por lo que el coste de fabricación y mantenimiento no se ve incrementado. Cada cadena consta de dos rótulas esféricas de alta precisión con un ángulo de oscilación de ± 30º y un actuador lineal con un recorrido de 75 mm, repetibilidad unidireccional de 0.3 mm, repetibilidad bidireccional de ± 1 mm, resolución máxima de 0.1 mm y fuerza máxima de 125 N. La velocidad es de 1 mm/sg y las aceleraciones son despreciables.

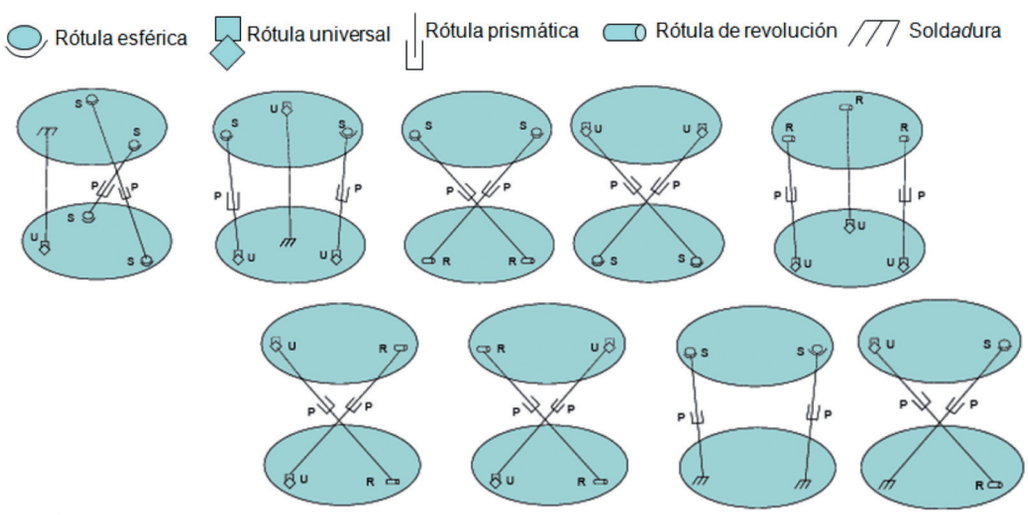


Fig. 3: Configuraciones de plataforma de cinemática paralela de dos GDL

La cadena adicional permite limitar el número de GDL a los dos deseados.

En la Fig. 3 se pueden observar posibles configuraciones de mecanismos de cinemática paralela de dos GDL.

De las configuraciones obtenidas de dos GDL se ha seleccionado la primera opción, ya que permite realizar los dos giros deseados.

El *Principio de los Trabajos Virtuales* establece que cuando una estructura que está en equilibrio sufre una deformación virtual debido a la acción de una carga adicional, el trabajo virtual externo de la carga es igual al trabajo virtual interno desarrollado por las tensiones causadas por la carga. Aplicando dicho principio en las posiciones extremas del mecanismo se obtiene un momento de 2644 N•mm para el ángulo máximo de azimut y de 8500 N•mm para el ángulo máximo de elevación.

Aunque los actuadores lineales poseen escalas graduadas para medir el movimiento, en este prototipo se han incluido dos sensores óptico lineales de mayor precisión (± 0.5 mm) para la posterior calibración del mecanismo. Estos sensores adicionales no serán necesarios una vez identificado el sistema.

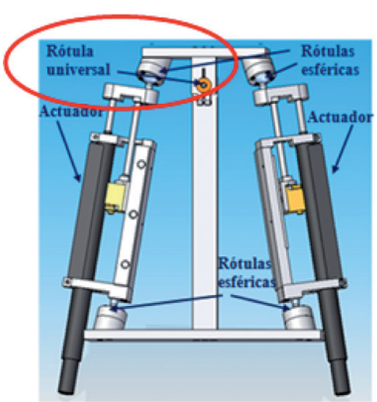


Fig. 4: Prototipo 2. Unidad de posicionamiento del sistema de medición

En un primer análisis se desarrolló el modelado del mecanismo en el módulo *Simmechanics* de *Matlab*.

El paso inicial es modelar cada cadena del mecanismo para, posteriormente, obtener el modelado del sistema completo. Para representar un sistema mecánico es necesario representar cada sólido del sistema como un cuerpo. Cada cuerpo se determina por su peso (indicando su centro de gravedad "*CG*") y su matriz de inercias. Los puntos de conexión entre dos cuerpos se representan mediante un bloque "*CS*". La situación de estos puntos se debe referenciar al sistema de coordenadas global o a un punto de conexión del cuerpo. Los cuerpos se conectan entre sí mediante rótulas. De esta manera, se realiza la unión de la plataforma fija (base) con la plataforma móvil (plataforma).

A continuación se detalla el modelado de cada una de las cadenas pertenecientes al mecanismo.

La cadena que contiene a la rótula universal se puede modelar como se muestra en la Fig. 5a. La Fig. 5b muestra el modelado de una cadena que contiene al actuador y dos rótulas esféricas.

El bloque actuador está formado a su vez por dos cuerpos unidos por una rótula prismática, como se muestra en la Fig. 6. El bloque "*Joint Actuator*" permite simular el movimiento relativo entre los dos cuerpos que forman el actuador. El bloque "*C*" es una constante que indica la elongación del actuador. Mediante el bloque "*Slider Gain*" se controla el movimiento transmitido a los actuadores en tiempo real.

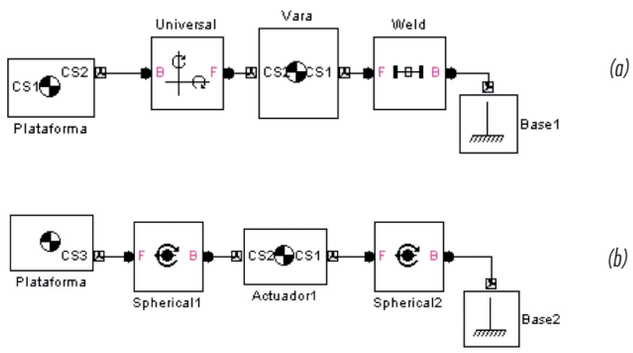


Fig. 5: Modelado de las cadenas cinemáticas: a) Cadena que contiene a la rótula universal b) Cadena que contiene un actuador y dos rótulas esféricas

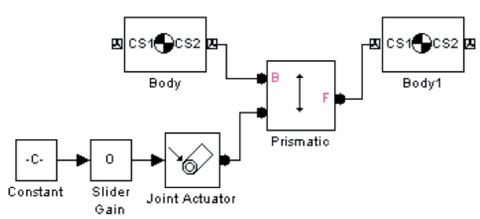


Fig. 6: Modelado del actuador

El sistema completo está formado por las cadenas descritas: una cadena que contiene a la rótula universal y dos cadenas que contienen a las rótulas esféricas, como se muestra en la Fig. 7.

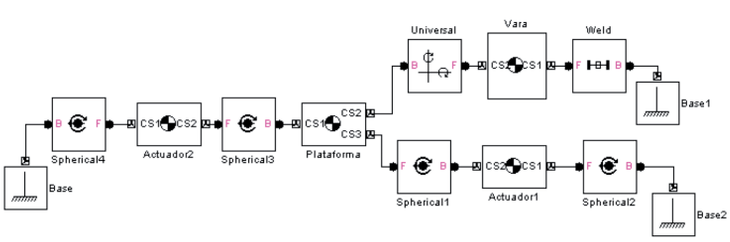


Fig. 7: Modelado del mecanismo en el módulo Simmechanics

Una vez modelado el sistema se realizaron simulaciones en Matlab y Simulink para analizar el rango de movimiento del mecanismo en función del rango de desplazamiento de los actuadores (ver Fig. 8) y la zona de trabajo del meca-

nismo (ver Fig. 9). L_1 y L_2 corresponden a las elongaciones de los actuadores. De esta manera, se pudo observar que el mecanismo era capaz de describir giros de azimut de ±45º y giros de elevación de ±30º. Además, se comprobó que no existen colisiones entre los componentes del sistema dentro de la zona de trabajo.

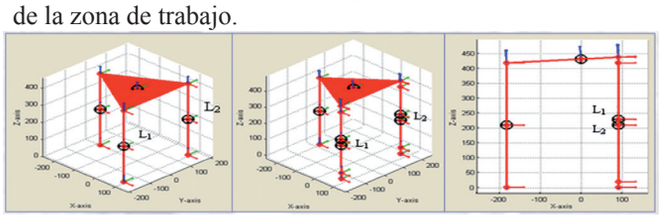


Fig. 8: Simulaciones del movimiento de la plataforma móvil mediante el modelado de Simulink

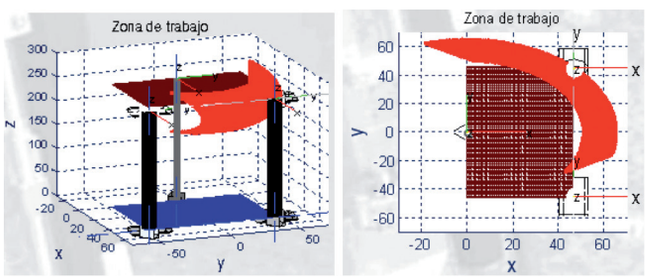


Fig. 9: Simulaciones de la zona de trabajo mediante el modelado

Las posiciones extremas que la plataforma móvil puede alcanzar vienen dadas por las especificaciones de diseño. En la Tabla 1 se ha determinado la elongación necesaria para cada uno de los actuadores (ΔL_1 e ΔL_2), para las ocho posiciones extremas definidas por los ángulos ϕ_1 y ϕ_2. El rango de cada actuador es de 75 mm. De este modo, considerando la configuración nominal como aquella posición del mecanismo en la que $[\phi_1, \phi_2, \Delta L_1, \Delta L_2]=[0,0,0,0]$, la elongación de los actuadores podrá aumentar o disminuir un valor de 37.5 mm (la mitad del recorrido del actuador). Como se puede observar en la Tabla 1, todas las elongaciones necesarias para alcanzar las posiciones extremas están dentro de este rango.

ϕ_1 [º]	ϕ_2 [º]	$\lvert\Delta L_1\rvert$ [mm]	$\lvert\Delta L_2\rvert$ [mm]
45	0	20.71	15.03
-45	0	15.03	20.71
0	30	17.62	17.62
0	-30	21.09	21.09
45	30	35.89	5.53
45	-30	0.01	35.33
-45	30	5.53	35.89
-45	-30	35.33	0.01

Tabla 1: Elongaciones necesarias para las ocho posiciones extremas

Una vez definida la configuración final de la plataforma, se realizaron simulaciones gráficas, con el programa *Solid Edge* V20, y se corroboró que en las posiciones extremas de los giros de azimut y elevación, la elongación de los actuadores estaba dentro del rango permitido, como se muestra en la Fig. 10.

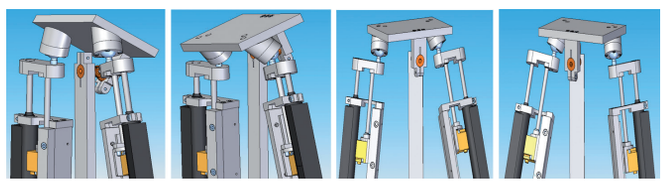


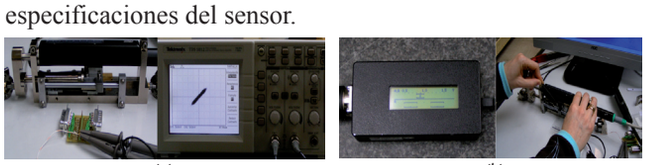
Fig. 10: Análisis en Solid Edge de las configuraciones extremas de la plataforma

Obtenido el diseño definitivo y los parámetros geométricos y de diseño, se desarrolló el modelo cinemático del mecanismo y se fabricaron los componentes para su montaje. Este desarrollo puede consultarse en [12].

Un requisito fundamental para la correcta fabricación de un mecanismo es el aseguramiento de las tolerancias necesarias para el correcto funcionamiento del mismo. Los elementos críticos en el diseño y fabricación del sistema mecánico han sido todas aquellas piezas implicadas en la transmisión del movimiento cinemático a partir del movimiento de los actuadores. El movimiento de los actuadores se transmite a la cabeza lectora del sensor lineal, lo que permite la lectura precisa del movimiento del vástago del actuador, y a la rótula esférica, lo que implica el posicionamiento de la plataforma a la posición deseada.

Por ello, las tolerancias en cuanto a paralelismo y perpendicularidad deben definirse cuidadosamente, y en el proceso de fabricación y montaje se debe asegurar su cumplimiento para la correcta transmisión del movimiento, la correcta lectura del mismo y el preciso posicionamiento de la plataforma.

Fases como el montaje del *encoder* lineal requieren un cuidadoso ajuste que garantice las tolerancias exigidas en las especificaciones de dichos componentes. En el proceso de montaje del sensor lineal fue necesaria la utilización de un osciloscopio para visualizar la señal de onda y un controlador para asegurar que la distancia de la cabeza óptica a la regla de vidrio es de 0.6 mm y el ángulo de guiñada es menor de 0.2 mrad. El controlador es un instrumento de medida que permite visualizar tanto la amplitud de las señales como la calidad de la marca de referencia y, de este modo, ajustar la señal para que se encuentre dentro del rango que indican las especificaciones del sensor.



(a) (b)

Fig. 11: Ajuste del sensor lineal: (a) Lectura de la señal del sensor y visualización de la señal por el osciloscopio (b) Control: lectura de la marca de referencia y ajuste del sensor lineal

Una vez realizado el montaje del mecanismo se realizaron diferentes ensayos para la caracterización del comportamiento del sistema.

Las características de un mecanismo dependen de la capacidad de control cinemático que se tiene sobre el mismo. Para ello, se debe enlazar el propio mecanismo con el control de los actuadores que comandan a la plataforma a una posición dada y con la interfaz necesaria que permita introducir la posición deseada.

Las articulaciones activas poseen realimentación del sistema permitiendo alcanzar, de este modo, mayor precisión en el posicionamiento de la plataforma.

Antes de desarrollar el programa de control se deben analizar las siguientes características:

- memoria disponible
- capacidades del lenguaje de programación que implementa (como la facilidad para realizar y editar programas)
- capacidades de comunicación con periféricos (nº entradas y salidas, comunicaciones)
- nº ejes que es capaz de controlar
- método de programación
- adaptabilidad del hardware y software a las aplicaciones especificas
- características de la interfaz de comunicación mecanismo-usuario.

Matlab es un lenguaje de alto nivel con un entorno interactivo que permite realizar tareas de cálculo como la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. Además, dispone de módulos adicionales que permiten realizar simulaciones de mecanismos u optimizaciones. Este lenguaje de programación es sencillo y ofrece una gran potencia en cuanto a herramientas de programación. Por ello, todos los algoritmos desarrollados para el control de la plataforma se han realizado en Matlab.

En la Fig. 12 se muestra la interfaz desarrollada para el control de la plataforma. El usuario puede definir el desplazamiento que deben realizar los actuadores para alcanzar una posición determinada, posicionar la plataforma en la configuración nominal o recoger los actuadores hasta su posición cero para realizar una inicialización de los mismos. La interfaz muestra el desplazamiento de los actuadores y del sensor lineal en tiempo real.

El *software* desarrollado permite situar a la plataforma en la posición deseada transmitiendo a los actuadores los valores correspondientes a las elongaciones que deben efectuar. Dichos valores se han obtenido mediante el modelo cinemático a partir de unos valores de azimut y elevación iniciales.

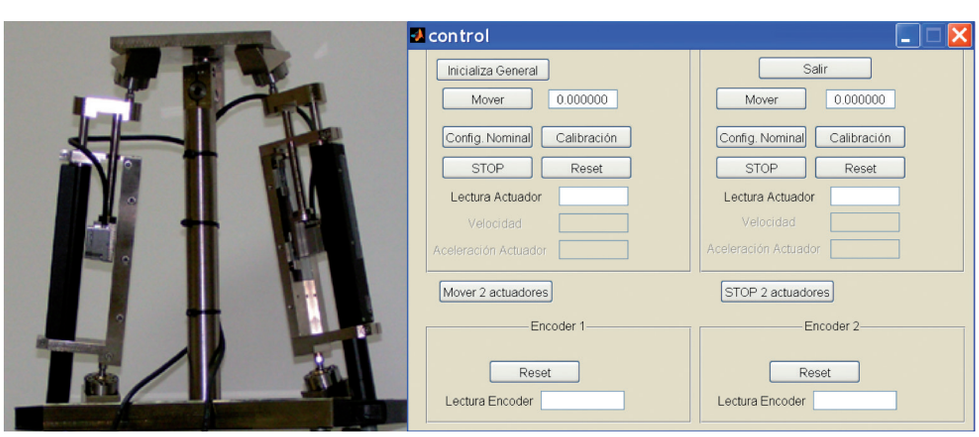


Fig. 12: Control de la plataforma

3. RESULTADOS

En la caracterización del mecanismo se realizaron ensayos situando a la plataforma en diferentes posiciones distribuidas a lo largo de la zona de trabajo. De esta manera, se pudo observar:

- para unos valores determinados de azimut y elevación, podía existir más de una posición final de la plataforma.
- para unos valores dados de elongaciones de los actuadores, para cada posible solución de posición y orientación de la plataforma, existían múltiples posiciones a las que la plataforma podía acceder.

La primera característica obtenida correspondía a la posibilidad de múltiples posibles soluciones existentes en la resolución del problema de cinemática directa de los mecanismos de cinemática paralela. Este comportamiento se puede controlar mediante el desarrollo de un algoritmo de control que indique la trayectoria a seguir.

Sin embargo, el segundo de los comportamientos observados se debía al juego de los elementos, y este comportamiento no es controlable ni deseable, por lo que se debe eliminar en la medida de lo posible para el correcto funcionamiento de la plataforma.

El juego existente en la plataforma, debido a sus componentes, era causado por el juego de la rótula universal, el juego de la rótula esférica y el juego del actuador. El paso siguiente fue la caracterización de dicho juego para mejorar la precisión del mecanismo.

En [10] se presentó el análisis y los ensayos realizados para la caracterización del juego del actuador y de la rótula esférica utilizando sensores ópticos lineales y un interferómetro láser. En dicho estudio se obtuvo en el actuador un juego de 45 µm y de 10.3 µm en la rótula esférica. En el ensayo de la cadena completa compuesta por un actuador y dos rótulas esféricas se obtuvo un juego de 64.9 µm.

En este trabajo se ha analizado el juego existente en la rótula universal. Se observó que el juego de dicha rótula se producía principalmente en el eje *Y* de la misma, provocando un error de posicio-

namiento de la plataforma móvil en el eje *Z* principalmente. Con la ayuda de un goniómetro y una máquina de medir por coordenadas se midió un juego en la rótula universal de 2º y un error máximo en el posicionamiento de la plataforma debido al juego de la rótula universal de 10.3 mm y errores medios de 6 mm.

En una primera simulación gráfica con *Solid Edge* se pudo corroborar, introduciendo desalineamientos del eje *Y* de la rótula universal de 2º, que el error de posicionamiento de la plataforma se producía mayoritariamente en el eje *Z*, obteniendo errores de hasta 8º, tal y como se había observado experimentalmente en el laboratorio. Este error provocaba errores en torno a 8 mm en el posicionamiento de la plataforma móvil.

En base a los resultados obtenidos se analizó el comportamiento de la rótula universal, para comprobar si el gran juego observado en la plataforma era debido a la rótula universal utilizada. Para ello, se realizaron simulaciones numéricas en Matlab para obtener los errores en cada eje, así como combinaciones de errores, como se detalla a continuación.

3.1. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE ELEVACIÓN

Inicialmente se analizó la influencia del ángulo de elevación, φ_2, en el juego de la rótula universal. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:

a) Obtención de la elongación necesaria de cada actuador, ΔL_1 e ΔL_2, para unos valores determinados del ángulo de elevación φ_2, mediante el modelo cinemático.
b) Introducción de un desalineamiento de 1º en el eje *Y* de la rótula universal, para diferentes valores del ángulo de elevación, φ_2
c) Calculo de los nuevos valores del ángulo azimut, φ'_1, utilizando las elongaciones de los actuadores, ΔL_1 e ΔL_2, obtenidas en el punto a), para analizar el efecto del desalineamiento

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Como se puede observar, la influencia del ángulo de elevación es pequeña, en torno a 0.40º, para recorridos de 60º del ángulo φ_2.

φ_1 [°]	φ_2 [°]	$\lvert\Delta L_1\rvert$ [mm]	$\lvert\Delta L_2\rvert$ [mm]	φ_2 [°]	φ'_1 [°]
0	-30	23,49	23,49	-30	3.95
0	-15	11,67	11,67	-15	3.90
0	0	0,00	0,00	0	3.95
0	15	10,79	10,79	15	4.25
0	30	20,12	20,12	30	4.30

Tabla 2:Influencia del ángulo de elevación φ_2

3.2. ANÁLISIS DEL DESALINEAMIENTO EN CADA EJE DE LA RÓTULA UNIVERSAL Y DE LA COMBINACIÓN ENTRE ELLOS

Una vez analizada la influencia del ángulo de elevación y obtenido un comportamiento similar para cualquier valor de este ángulo, se realizaron simulaciones para estudiar el comportamiento del juego en cada uno de los ejes. Para ello, se introdujeron desalineamientos en la rótula universal de 1º y 2º en los ejes, para un ángulo de elevación de -15º y, posteriormente, se calculó el valor de φ1 aplicando el mismo procedimiento utilizado en la sección 3.1. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Giro introducido	φ'_2 [°]	φ'_1 [°]
1º eje Y	-15	4
1º eje Z	-15	-1
1º eje X	-15	-1
1º eje Y + 1º eje X	-15	4
1º eje X + 1º eje Y	-15	4
2º eje Y	-15	7.7
2º eje Z	-15	-2
2º eje X	-15	-2

Tabla 3: Análisis del juego en la rótula universal al introducir desalineamientos en los ejes

Se puede observar que para desalineamientos de 2º de la rótula universal en el eje Y, el juego en la plataforma es de 7.7º, como cabía esperar.

Mediante las simulaciones realizadas en *Matlab*, se corroboró que al introducir un desalineamiento en el eje Y, se produce un error mayor en el juego de la plataforma, con valores máximos de 7.7º. Además, la superposición del juego de varios ejes no parece afectar considerablemente al juego de la plataforma.

El juego de la rótula universal utilizada (rótula comercial de precisión) era muy elevado para poder diseñar modelos de corrección apropiados. Por lo que fue necesario diseñar un nuevo elemento de alta precisión que permitiera realizar los dos giros deseados (azimut y elevación), como se describe en la sección siguiente.

3.3. DISEÑO DE UN ELEMENTO DE ALTA PRECISIÓN DE DOS GDL

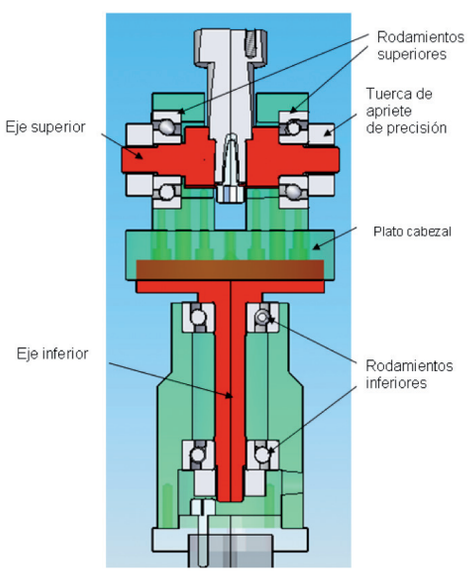
En el desarrollo de un equipo de medida de precisión deben considerarse varios aspectos importantes. Por un lado, un correcto diseño mecánico que facilite la estabilidad dimensional del conjunto en el tiempo y sus tolerancias de giro o desplazamiento. Por otro lado, la fabricación precisa de cada una de sus piezas y un cuidadoso montaje. Estas consideraciones toman especial importancia en sistemas de medida en los que la obtención de las coordenadas de los puntos medidos en un sistema de referencia global requiere un modelo matemático no lineal basado en parámetros geométricos del sistema.

Además, la necesidad de una alta precisión en el posicionamiento de las cámaras de visión requiere tener especial cuidado en el diseño mecánico para reducir o corregir los posibles juegos de la plataforma y los errores matemáticos. A continuación se describe el diseño realizado de la rótula universal de alta precisión y los aspectos claves en el diseño

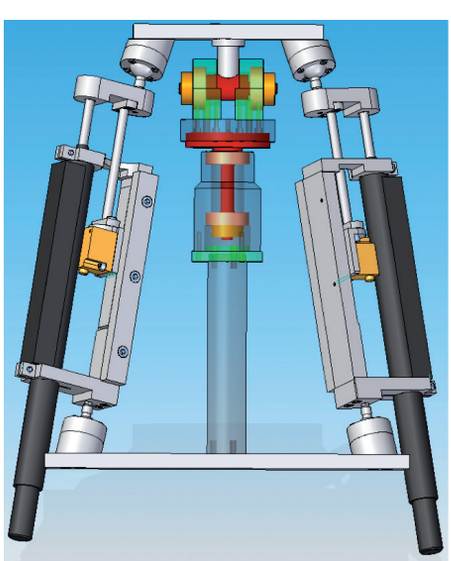
mecánico del sistema que han permitido conseguir los valores deseados de precisión y repetibilidad.

El diseño del elemento de alta precisión de dos GDL consiste en dos ejes perpendiculares entre sí, de manera que, el centro óptico del sistema de visión formado por las cámaras del sistema de posicionamiento se ha localizado en la intersección de los dos ejes de movimiento, simplificando, de esta manera, el modelo de medición.

El principal objetivo es reducir lo máximo posible el juego, por lo que los rodamientos y tuercas de apriete seleccionados pertenecen a la serie de alta precisión. Además, en el diseño se ha realizado una empaquetadura de rodamientos para que la precarga anule el posible juego de dichos componentes. Para ello, se utilizan tuercas de apriete de precisión (ver Fig. 13).



(a)



(b)

Fig. 13: Diseño del elemento de alta precisión de dos GDL: (a) Elemento de alta precisión de dos GDL (b) Mecanismo de dos GDL con elemento de alta precisión

En el diseño del elemento se ha tenido en cuenta la excentricidad del centro de masas. Se ha diseñado el cabezal con excentricidad del centro de masas nula o muy pequeña, con el fin de que el reparto de las cargas del conjunto fuera lo más simétrico posible.

Otro de los factores a tener en cuenta es el tamaño de los componentes. La rótula universal debe ser lo suficientemente pequeña para poder colocarla en el mecanismo sin que existan interferencias entre los distintos elementos de la misma. Para asegurar esta condición se han realizado simulaciones en *Solid Edge*, verificando que todo el campo de trabajo deseado puede ser alcanzado por el mecanismo.

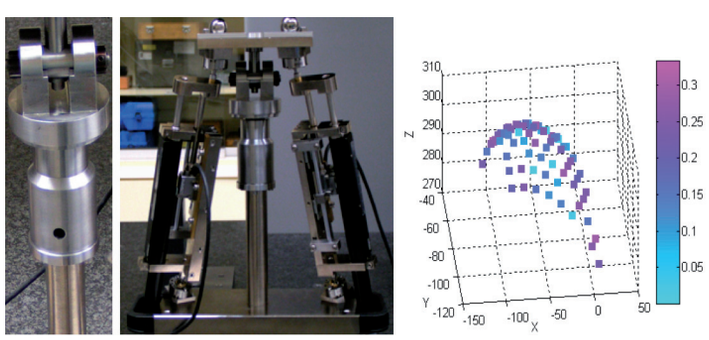
En la fabricación de los componentes, debe asegurarse el cumplimiento de las tolerancias necesarias para el correcto funcionamiento del sistema. Algunas de las especificaciones más importantes que se han considerado son las siguientes:

- En el eje superior debe garantizarse una tolerancia de coaxialidad y cilindricidad, para evitar el alabeo en el giro del elemento
- Rectificado N5 de las superficies de contacto de los ejes con las pistas interiores de los rodamientos
- Coaxialidad de 10 µm en los agujeros donde se alojan los rodamientos. Para facilitar la fabricación, la carcasa donde se aloja el eje superior se ha mecanizado en una sola pieza.

La Fig. 14a. muestra el elemento de alta precisión fabricado, así como su incorporación en la plataforma (Fig. 14b).

En la medición del juego del elemento desarrollado en el laboratorio mediante un goniómetro se obtuvo un valor medio de 0.11º y un error máximo de 0.14º, por lo que se consiguió mejorar considerablemente el juego de la rótula universal.

Finalmente, se ha caracterizado la plataforma para poder conocer su comportamiento. Para ello, se ha colocado la plataforma en 72 posiciones programadas, se ha medido la posición de la plataforma con una máquina de medir por coordenadas y se ha comparado este valor con el valor programado, obtenido mediante el modelo cinemático del mecanismo. Como se puede observar en la fig. 14c, el error máximo es 0.32 mm y el error medio es 0.19 mm en el posicionamiento de la plataforma móvil.



(a) (b) (c)

Fig. 14: Fabricación del mecanismo de dos GDL: (a) Rótula universal (b) Mecanismo completo (c) Evaluación del error en el mecanismo

4. DISCUSIÓN

En este trabajo se ha presentado una importante mejora en el diseño de un mecanismo para corregir los errores del mismo. La utilización de una rótula universal comercial ocasionaba errores muy elevados para la aplicación de posicionamiento de alta precisión (errores en torno a 8 mm). Por ello, fue necesario el desarrollo del elemento presentado en este trabajo, disminuyendo el error del sistema en más de un orden de magnitud. De esta manera, se obtienen errores máximos del sistema menores de 0.3 mm.

Inicialmente se desarrolló el modelado del mecanismo en el entorno Simmechanics de Matlab. Una vez obtenido el modelo se realizaron simulaciones en Simmechanics y Matlab para analizar el rango de movimiento del mecanismo en función del rango de desplazamiento de los actuadores y se comprobó que se podía alcanzar toda la zona de trabajo deseada y que no se producían colisiones entre los componentes del sistema.

Posteriormente se realizó la fabricación y montaje de la plataforma y se evaluó el comportamiento del mecanismo. De esta manera, se observó que para unos valores dados de elongaciones de los actuadores, para cada posible solución de posición y orientación de la plataforma, existían múltiples posiciones a las que la plataforma podía acceder, debido al juego del mecanismo. El estudio del comportamiento de cada componente permitió comprobar que el juego era debido, casi en su totalidad, al juego de la rótula universal comercial utilizada. Mediante diferentes ensayos se determinó que la influencia del ángulo de elevación era mínima y que el desalineamiento en el eje Y, ocasionado por el juego de la rótula universal, era el que mayor error producía en el sistema.

Finalmente, se diseñó un nuevo elemento de alta precisión de dos GDL, compuesta por rodamientos y tuercas de apriete de precisión. El objetivo principal era diseñar una rótula con un juego mínimo, para mejorar la precisión del sistema. Para ello se llevaron a cabo las siguientes consideraciones: se realizó una empaquetadura de rodamientos con el fin de que la precarga anulase el posible juego de dichos componentes, se utilizaron tuercas de apriete de precisión, se diseñó el cabezal con excentricidad del centro de masas nula o muy pequeña, con el fin de que el reparto de las cargas del conjunto fuera lo más simétrico posible, se minimizó el tamaño de los componentes y se fabricó la rótula con estrechas tolerancias de coaxialidad en aquellas zonas críticas como el alojamiento de los rodamientos. De esta manera, se disminuyó el juego de la rótula universal en más de un orden de magnitud, obteniendo un aumento de precisión en el mecanismo completo. El diseño realizado puede aplicarse a cualquier mecanismo cinemático que utilice rótulas universales en sus cadenas cinemáticas. El elemento desarrollado sería de gran utilidad en el sector industrial para aplicaciones de alta precisión que requieran dos grados de libertad rotatorios, como por ejemplo en soportes de apoyo para instrumentos de medición como aparatos topográficos, alineamiento preciso de los espejos activos en telescopios, metrología de alto rango, o en procesos industriales como procesos de máquina-herramienta. Algunas de las aplicaciones futuras son en el campo de la metrología, inspección óptica sin contacto, o control de posicionamiento de objetos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Li Y, Xu Q . "Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation". *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics.* 2012. Vol.17-6 p. 1120-1132. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2011.2160074

[2] 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 Calibración de manipuladores paralelos y su aplicación a las máquinas herramienta. Un Estudio del estado del arte". *Ingeniería.Investigación y Tecnología.* Junio 2010. Vol.11-2 p. 141-154.

[3] Pisla D, Szilaghyi A, Vaida C, Plitea N . "Kinematics and workspace modeling of a new hybrid robot used in minimally invasive surgery". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2013. Vol.29-2 p. 463-474. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2012.09.016

[4] Meunier G, Boulet B, Nahon M . "Control of an Overactuated Cable-Driven Parallel Mechanism for a Radio Telescope Application". *IEEE Transactions on Control Systems Technology.* 2009. Vol.17-5 p. 1043-1054. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TCST.2008.2004812

[5] Zeng DX, Huang Z, Lu WJ. *A family of novel 2 DOF rotational decoupled parallel mechanisms. Proceedings of Ieee International Conference on Mechatronics and Automation:* 5-8 August 2007. p. 2478.

[6] Hu Y, Li B . "Robust design and analysis of 4PUS-1RPU parallel mechanism for a five-degree-of-freedom hybrid kinematic machine". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture.* 2011. Vol.225-B5 p. 685-698.

[7] Peng Binbin, Li Zengming, Wu Kai, Sun Yu . "Kinematic Characteristics of 3-UPU Parallel Manipulator in Singularity and Its Application". *International Journal of Advanced Robotic Systems.* 2011. Vol.8-4 p. 54-64.

[8] Plitea N, Lese D, Pisla D, Vaida C . "Structural design and kinematics of a new parallel reconfigurable robot". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 2013. Vol.29-1 p. 219-235. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.001

[9] Lee D, Kim J, Seo T . "Optimal design of 6-DOF eclipse mechanism based on task-oriented workspace". *Robotica.* 2012. Vol.30 p. 1041-1048. DOI: http://dx.doi.org/10.1017/S0263574711000774

[10] Majarena AC, Santolaria J, Samper D, Aguilar JJ . "Análisis de juego, repetibilidad de posicionamiento y precarga de un mecanismo paralelo". *DYNA Ingeniería e Industria.* 2011. Vol.86-6 p. 676-685. DOI: http://dx.doi.org/10.6036/4082

[11] Merlet, J.P. 2006, *Parallel robots,* 2nd edn, Kluwer Academic Publishers.

[12] Majarena AC, Santolaria J, Samper D, Aguilar JJ . "Spatial resolution-based kinematic design of a parallel positioning platform". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2011. Vol.53 p. 1149-1165. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2878-x