

# Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

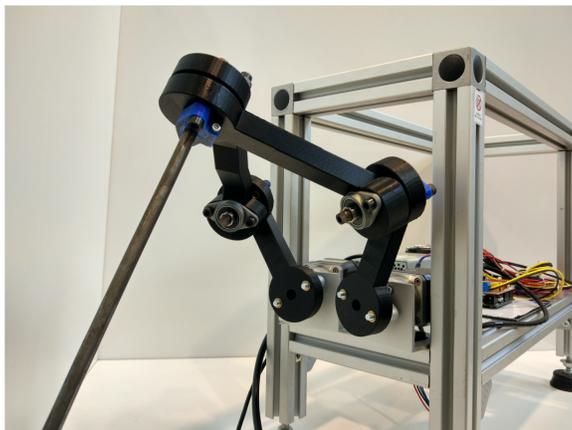


Francisco Pastor, Juan M. Gandarias y  
Jesús M. Gómez-de-Gabriel

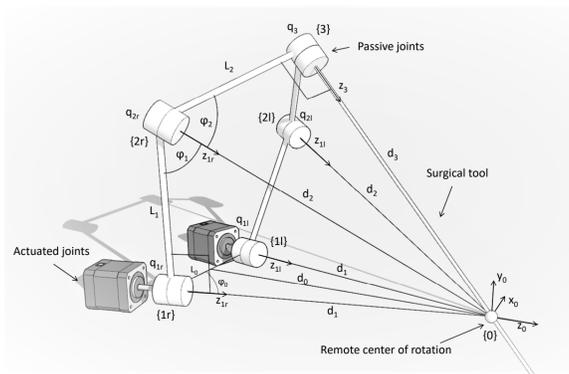
Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Universidad de Málaga  
jmgandarias@uma.es

## Introducción

En este artículo se presenta el modelo cinemático de un robot paralelo y la construcción de un prototipo de dos grados de libertad, cuyo objeto es servir como posicionador de instrumentos de cirugía laparoscópica. El robot tiene una configuración en paralelo, con estructura de mecanismo de cinco barras con ejes no paralelos, con dos articulaciones activas. La particularidad de este mecanismo reside en su forma no planar, es decir, los ejes de las articulaciones del robot no se encuentran en un mismo plano, sino que sus extensiones se cortan en un punto remoto, sobre el cual pivota el elemento terminal del manipulador. El espacio de trabajo de este prototipo es un casquete esférico con centro en el puerto de entrada en el paciente. Al no tratarse de un manipulador de cadena abierta, su cinemática es más compleja. En este trabajo se presenta el modelo cinemático inverso para control en coordenadas esféricas, y su validación mediante la construcción de un prototipo.



## Modelo del Manipulador



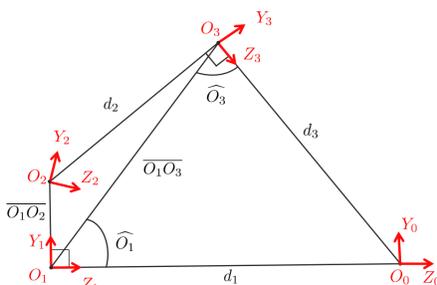
Se trata de un mecanismo de 5 barras, en el que cada uno de los eslabones describe su movimiento en un plano del espacio que es distinto en cada caso. Se definen los sistemas de referencia asociados a los ejes activos  $\{1r\}$  y  $\{1l\}$ , los ejes pasivos  $\{2r\}$  y  $\{2l\}$  y el eje pasivo central  $\{3\}$  que soporta el efector final. Los ejes  $Z$  de todos estos sistemas de referencia se cortan en un punto, definido por el origen del sistema  $\{0\}$ . Dada la simetría del modelo, únicamente se va a describir la cadena cinemática del brazo derecho, siendo la

del brazo izquierdo análoga. El vector de coordenadas de la tarea  $X$  está compuesto por los ángulos de elevación y giro,  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente, del sistema de referencia del efector final  $\{3\}$ , con respecto al sistema de origen  $\{0\}$ .

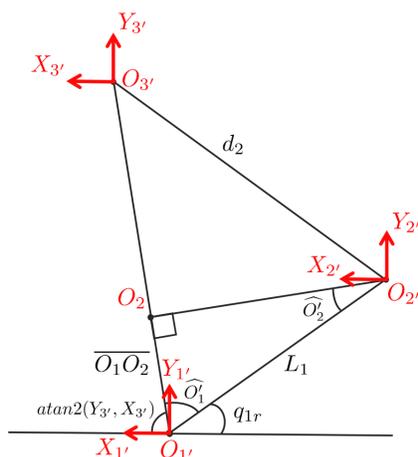
$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{T}_3 &= \mathbf{R}_x(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{D}_z(-d_3) \\ {}^0\mathbf{T}_{1r} &= \mathbf{D}_x(-L_0/2) \mathbf{D}_z(-d_0) \mathbf{R}_y(90 - \varphi_0) = \\ {}^{1r}\mathbf{T}_{2r} &= \mathbf{R}_z(q_{1r} + 90) \mathbf{D}_x(L_1) \mathbf{R}_y(-(90 - \varphi_1)) \\ {}^{2r}\mathbf{T}_3 &= \mathbf{R}_z(q_{2r}) \mathbf{D}_x(L_2) \mathbf{R}_y(-(90 - \varphi_2)) \end{aligned}$$

## Modelo Cinemático Inverso

A partir de las transformaciones homogéneas calculadas anteriormente se puede obtener el modelo cinemático inverso mediante igualación de matrices, imponiendo las restricciones físicas del mecanismo. Sin embargo, este cálculo analítico presenta un alto grado de dificultad, por lo que el modelo cinemático se ha obtenido de forma geométrica, y se describe a continuación. Las ecuaciones y cálculos que aparecen a continuación hacen referencia a la cadena cinemática del brazo derecho, pudiendo obtenerse las del brazo izquierdo de forma análoga.



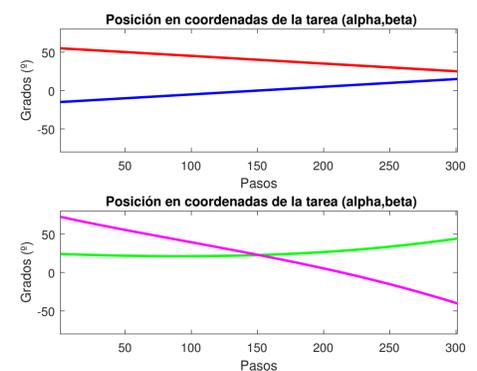
$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \arccos\left(\frac{L_0}{2d_1}\right); \quad \varphi_1 = \arctan\left(\frac{d_1}{L_1}\right); \\ \varphi_2 &= \arctan\left(\frac{d_3}{L_2}\right); \quad d_0 = \sqrt{d_1^2 - \left(\frac{L_0}{2}\right)^2}; \\ d_3 &= \sqrt{L_1^2 + d_1^2 - L_2^2} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} {}^{1r}\mathbf{T}_3 &= {}^0\mathbf{T}_{1r}^{-1} {}^0\mathbf{T}_3; \quad \overline{O_1O_3} = \|{}^{1r}\mathbf{P}_3 - {}^0\mathbf{P}_3\| \\ \widehat{O}_{1r} &= 90 - \arcsin\left(\frac{\overline{O_1O_2}}{L_1}\right); \end{aligned}$$

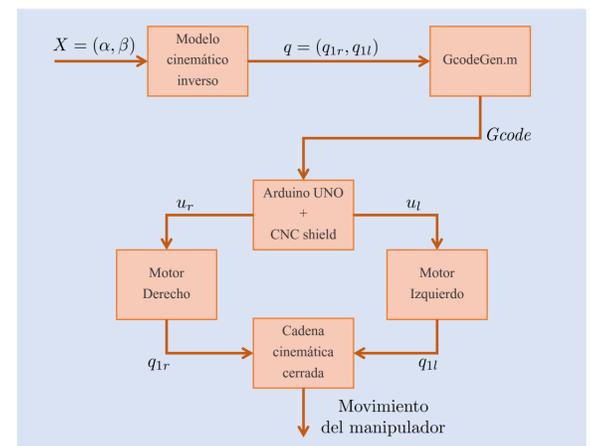
$$q_{1r} = 180 - \arctan\left(\frac{Y_{3r}}{X_{3r}}\right) - \widehat{O}_{1r}$$

En la gráfica se representan las trayectorias de  $q_{1r}$  y  $q_{1l}$  (gráfica inferior) según distintos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  (gráfica superior) con variaciones lineales de  $\alpha$  y  $\beta$ .



## Experimentos

El sistema de actuación está compuesto por dos motores paso a paso bipolares Nema 17 con reductora planetaria de relación 5.18:1. Como electrónica de control, se ha elegido un Arduino UNO con un CNC shield. El esquema representa el flujo de trabajo del sistema: tomando como entrada el vector de coordenadas de la tarea  $X = (\alpha, \beta)^T$ , se calcula el vector de variables articulares  $q = (q_{1r}, q_{1l})$  y se genera un código G que se envía a la electrónica de control.



## Resultados y Conclusiones

En la imagen se muestra la configuración del sistema con los valores  $\alpha = 37,67^\circ$  y  $\beta = 9,73^\circ$ . Se puede ver cómo los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  son aproximadamente los deseados. Hay que tener en cuenta que no se han desarrollado métodos de medición de los valores reales, habiéndose obtenido únicamente por observación.

