

Modelado y simulación de un robot planar paralelo activado por cables

Modelling and simulation of a cable-driven parallel planar robot

Claudia Mena Huerta, Renata Cebada Posadas, Sergio Javier Torres Méndez, José Rafael Mendoza Vázquez , Vicente Ramírez Palacios 

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Puebla
Av. Tecnológico No. 420, Colonia Maravillas. Puebla, Puebla, México. C.P. 72220

* Correo-e: claudia.mena.25@hotmail.com

PALABRAS CLAVE:

robot activado por cables, modelado, cinemática, matlab, análisis de singularidades.

RESUMEN

Los robots de tipo planar activados por cables son sistemas robóticos que poseen cadenas cinemáticas cerradas. En este documento se presenta el modelado y simulación de un sistema compuesto por un robot planar que posee cuatro cables colocados de manera paralela. La metodología desarrollada en este trabajo comienza describiendo de manera general el sistema, posteriormente se presenta la determinación de sus grados de libertad y el diagrama esquemático referente a sus articulaciones, así como también se realiza un estudio de velocidades y un análisis de singularidades. Se desarrollan las ecuaciones cinemáticas directa e inversa del sistema propuesto y, finalmente, se muestran los resultados validados de manera computacional utilizando el software Matlab Simulink.

KEYWORDS:

Cable-driven robots, modelling, kinematics, matlab, singularities analysis.

ABSTRACT

Cable-driven planar robots are robotic systems which have closed-loop kinematic chains. In this article is presented the modelling and simulation of a planar robot based system which has four cables arranged in a parallel way. The methodology developed at this paper begin by describing as a whole, later it is presented the system's degrees of freedom and the joints schematic diagram are defined. Also it is realized a velocities study and a singularities analysis. Finally the system's kinematic equations of the proposed system are developed, direct kinematics and inverse kinematics and, finally, it is showed the results validated by a computer program by Matlab Simulink.

Recibido: 10 de junio 2018 • Aceptado: 12 de octubre de 2019 • Publicado en línea: 28 de febrero de 2020

1. INTRODUCCIÓN

Un tipo particular de los robots paralelos son los robots activados por cables. Son estructuras robóticas accionadas por cables que normalmente se componen de una estructura fija y una plataforma móvil, unidas mediante un número determinado de cables. Se usan en diversas aplicaciones, como por ejemplo, en el campo de la astronomía; también están tomando gran popularidad en la industria y en simuladores de vuelo [1].

Su gran aceptación en el campo de la robótica se debe a ciertas cualidades que, por el contrario, no poseen los robots paralelos convencionales y los manipuladores seriales. Esas mejoras relevantes son: bajo peso, escalabilidad, gran agilidad y elevada precisión al manipular grandes cargas a altas aceleraciones, así como bajo costo de construcción [2].

Las singularidades son configuraciones en donde el robot se vuelve incontrolable, son peligrosas y deben ser evitadas. La importancia de la determinación de las posiciones singulares en el control de este tipo de robots se debe a que las fuerzas requeridas sobre los actuadores, en estos puntos, son infinitas y debido a este esfuerzo, se causan daños al sistema de actuación del sistema. En posiciones cercanas a una singularidad, las fuerzas requeridas sobre los actuadores deben tomar valores muy altos para mantener magnitudes razonables de cargas sobre el actuador final [3].

En este documento, se describe la cinemática directa e inversa de un robot planar paralelo de tipo industrial que posee una configuración de

cuatro cables colocados de manera paralela entre sí. Además, el estudio de velocidad permite determinar las configuraciones singulares donde los cables pierden tensión.

Estudios sobre la cinemática de robots paralelos activados por cables aparecen en [4], donde se presenta el modelo cinemático inverso de un robot paralelo con un arreglo de tres cables; también se presenta en [5], [6] y [7] métodos que involucran la obtención del modelo cinemático inverso a un robot paralelo con ocho cables.

En [8] y [9] se describe la cinemática de posición y velocidad de un robot, así como un modelado estático para un robot que posee cuatro cables; en [10] se muestran los algoritmos de cinemática inversa y directa utilizados para el robot "Marionet" que posee nueve cables y en [11] para un sistema de seis cables.

Mientras que en [12] se busca evitar las singularidades de un robot planar así como la prevención de colisiones; en [13] y en [14] se considera el problema de detectar singularidades en robots paralelos, en [15] las singularidades de robots de dos y tres cables y, en [16] de ocho cables. Sin embargo los objetos de estudio de las investigaciones mencionadas anteriormente no son parecidos al diseño del robot propuesto en este documento.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema analizado corresponde a un robot de estructura cinemática paralela con eslabones elásticos (cables) cuyo movimiento es planar; su base fija posee medidas de 1500 mm de largo x

1000 mm de alto y tiene adaptado un actuador final de tamaño 80 mm x 90 mm. Cada lado posee un tambor acoplado a la flecha del motor; en dicho tambor se irán enrollando y desenrollando cada par de cables dispuestos a cada lado. Su sistema de actuación es de tipo eléctrico y su transmisión es directa (ver Figura 1).

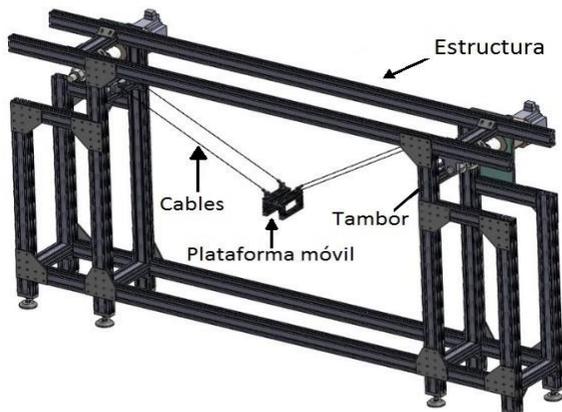


Figura 1. Robot paralelo planar activado por cables utilizado

3. MODELACIÓN ANALÍTICA

En esta sección se determinan las ecuaciones de movimiento cinemático del robot propuesto.

- a. Determinación de grados de libertad.

A partir del criterio de Grubel-Kutzbach se define la siguiente ecuación:

$$n = \lambda L - \sum_{i=1}^J (\lambda - f_i) \quad (1)$$

Donde:

n = número de grados de libertad

λ = número de grados de libertad máximos

L = número de eslabones móviles

J = número de articulaciones

f_i = número de grados de libertad de la articulación i

El robot espacial mostrado en la Figura 1 posee cuatro cables y se representa de manera simplificada como un robot planar suspendido por dos cables, debido al paralelismo que existe en cada par de cables que conectan el efector final con los tambores. Esto se puede apreciar en la Figura 2 donde se observa que el sistema propuesto es del tipo 2-RPR, ya que posee de cada lado cadenas cinemáticas compuestas por eslabones unidos a articulaciones de revolución-prismática-revolución.

Se determinó el número de grados de libertad de cada articulación a partir de la generación del diagrama esquemático que se muestra en la Figura 2. Cabe mencionar que la articulación de revolución permite solo un movimiento de rotación, mientras que la articulación prismática permite un movimiento de traslación.

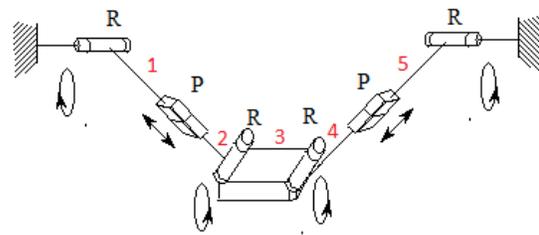


Figura 2. Diagrama esquemático del sistema

Por lo que:

$\lambda = 3$ (es decir, se encuentra en el plano)

$L = 5$ eslabones

$$n = (3)(5) - [2(3 - 1) + 2(3 - 1) + 2(3 - 1)]$$

$$n = 15 - 12 = 3 \text{ d. o. f.}$$

De acuerdo a los grados de libertad obtenidos, el efector final tiene tres movimientos: una rotación sobre el eje transversal y dos movimientos de traslación en el plano. El sistema que se posee es subactuado ya que se

requieren controlar tres coordenadas del efector final con solo dos actuadores; por lo que se asume una orientación fija del efector final para obtener una solución a las otras dos coordenadas de posición.

b. Modelado cinemático inverso

A partir de las coordenadas de la posición del efector final (P_x, P_y, P_z) y utilizando el modelo cinemático inverso, se conoce la longitud de cable que se modifica (recoge o suelta cable). En el modelado cinemático inverso pueden existir los siguientes resultados: no existe solución, existen varias soluciones, existen soluciones infinitas o existe solo una solución. La Figura 3 muestra los principales parámetros geométricos del sistema propuesto:

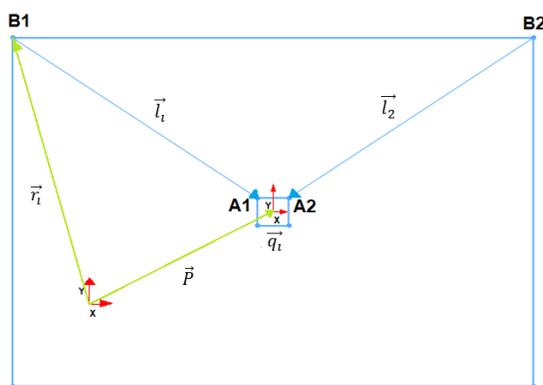


Figura 3. Parámetros geométricos del robot planar paralelo activado por cables

$$l_1 := \overline{A_1B_1} \quad (2)$$

$$l_2 := \overline{A_2B_2} \quad (3)$$

La ecuación vectorial para cada cable está representada como:

$$\vec{P} + \vec{q}_i = \vec{r}_i + \vec{l}_i \quad \forall i = 1,2 \quad (4)$$

Para la cinemática inversa:

$$\vec{l}_i = \vec{P} + \vec{q}_i - \vec{r}_i \quad (5)$$

Para el caso general donde $\theta \neq 0$; en forma matricial:

$$l_i = P + R_{(z,\theta)}q'i - r_i \quad (6)$$

Donde:

$$q'1 = \begin{bmatrix} -d/2 \\ c/2 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ y } r_1 = \begin{bmatrix} -e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$q'2 = \begin{bmatrix} d/2 \\ c/2 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ y } r_2 = \begin{bmatrix} e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Entonces la forma matricial para el cable 1 es:

$$\begin{bmatrix} l_{1x} \\ l_{1y} \\ l_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -d/2 \\ c/2 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} l_{1x} \\ l_{1y} \\ l_{1z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{d \cos \theta}{2} - \frac{c \sin \theta}{2} \\ -\frac{d \sin \theta}{2} + \frac{c \cos \theta}{2} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Por lo tanto, la ecuación de la cinemática inversa para l_1 resultó:

$$l_{1x} = P_x - \frac{1}{2}(d \cos \theta + c \sin \theta - e) \quad (8)$$

$$l_{1y} = P_y - \frac{1}{2}(d \sin \theta - c \cos \theta + f) \quad (9)$$

$$l_{1z} = 0$$

Se obtuvo la magnitud de l_1 :

$$l_1 = \|\vec{l}_1\| = \sqrt{l_{1x}^2 + l_{1y}^2} \quad (10)$$

Simplificando, se obtuvo la ecuación general para l_1 :

$$l_1 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - P_x(d \cos \theta + c \sin \theta - e) - P_y(d \sin \theta - c \cos \theta + f) \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de \cos \theta \dots}$$

$$\sqrt{\dots - 2ce \sin \theta + 2df \sin \theta - 2cf \cos \theta} \quad (11)$$

Sin embargo, si se buscan orientaciones constantes y paralelas al piso, entonces $\theta = 0$;

por lo tanto:

$$l_1 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - P_x(d - e) - P_y(-c + f) \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)} \quad (12)$$

Pasando al caso de l_2 , la forma matricial para el cable 2 es:

$$\begin{bmatrix} l_{2x} \\ l_{2y} \\ l_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d/2 \\ c/2 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} l_{2x} \\ l_{2y} \\ l_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d \cos \theta}{2} - \frac{c \sin \theta}{2} \\ \frac{d \sin \theta}{2} + \frac{c \cos \theta}{2} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e/2 \\ f/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Por lo tanto, la ecuación de la cinemática inversa para l_2 resultó:

$$l_{2x} = P_x + \frac{1}{2}(d \cos \theta - c \sin \theta - e) \quad (14)$$

$$l_{2y} = P_y + \frac{1}{2}(d \sin \theta + c \cos \theta - f) \quad (15)$$

$$l_{2z} = 0$$

Se obtuvo la magnitud de l_2 :

$$l_2 = \|\vec{l}_2\| = \sqrt{l_{2x}^2 + l_{2y}^2} \quad (16)$$

Simplificando, se obtuvo la ecuación general para l_2 :

$$l_2 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_x(d \cos \theta - c \sin \theta - e) + P_y(d \sin \theta + c \cos \theta - f) \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de \cos \theta + 2ce \sin \theta \dots}$$

$$\sqrt{\dots - 2df \sin \theta - 2cf \cos \theta} \quad (17)$$

De igual forma, si se buscan orientaciones constantes y paralelas al piso, entonces $\theta = 0$; por lo tanto:

$$l_2 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_x(d - e) + P_y(c - f) \dots}$$

$$\sqrt{\dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)} \quad (18)$$

c. Modelado cinemático directo

Al usar el modelado de cinemática directa, se determinaron las coordenadas de posición del efector final (P_x, P_y, P_z) a partir de la longitud que poseen los cables en un momento dado. En el modelo cinemático directo solo hubo una solución única.

De las ecuaciones de cinemática inversa, se obtuvieron las siguientes ecuaciones que describen la cinemática directa del sistema elevando al cuadrado y sumando (12) y (18):

Se despejó P_x^2 , obteniendo:

$$P_x^2 = l_1^2 - P_y^2 + P_x(d - e) + P_y(-c + f)$$

$$- \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)$$

Posteriormente:

$$l_2^2 = l_1^2 - P_y^2 + P_x(d - e) + P_y(-c + f)$$

$$- \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)$$

$$+ P_y^2 + P_x(d - e) - P_y(-c + f)$$

$$+ \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)$$

$$l_2^2 = l_1^2 + 2P_x(d - e)$$

Se despejó y se obtuvo que la coordenada P_x es:

$$P_x = \frac{l_2^2 - l_1^2}{2(d - e)} \quad (19)$$

Se tuvo el siguiente resultado:

$$2P_y^2 - 2P_y(f - c) + \frac{2}{4}(f^2 - 2cf + c^2)$$

$$= 2 \left[P_y - \frac{(f - c)}{2} \right]^2$$

Y se reescribió como:

$$2 \left[P_y - \frac{(f-c)}{2} \right]^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2P_x^2 - \frac{2}{4}(d^2 - 2de + e^2)$$

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{[(2P_x - d + e)v_x \dots \dots + (2P_y + c - f)v_y]}{2\sqrt{Px^2 + Py^2 - Px(d-e) - Py(-c+f) \dots \dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)}} \quad (22)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{[(2P_x + d - e)v_x \dots \dots + (2P_y + c - f)v_y]}{2\sqrt{Px^2 + Py^2 + Px(d-e) + Py(c-f) \dots \dots + \frac{1}{4}(d^2 + c^2 + e^2 + f^2 - 2de - 2cf)}} \quad (23)$$

$$P_y = -\sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 - 2 \left[\frac{l_2^2 - l_1^2}{2(d-e)} \right]^2 - \frac{1}{2}(d-e)^2}{2}} + \frac{(f-c)}{2} \quad (20)$$

Se sustituyó el valor de $P_x = \frac{l_2^2 - l_1^2}{2(d-e)}$:

$$2 \left[P_y - \frac{(f-c)}{2} \right]^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2 \left[\frac{l_2^2 - l_1^2}{2(d-e)} \right]^2 - \frac{1}{2}(d-e)^2$$

Finalmente se despejó P_y de la última ecuación y se obtuvo:

d. Modelado cinemático diferencial

La cinemática diferencial del robot paralelo activado por cables se presenta a continuación:

$$\dot{q} = J_q \dot{p} \quad (21)$$

Donde:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial P_x} & \frac{\partial l_1}{\partial P_y} \\ \frac{\partial l_2}{\partial P_x} & \frac{\partial l_2}{\partial P_y} \end{bmatrix}$$

De las ecuaciones de cinemática inversa del robot paralelo activado por cables planar, se obtuvieron las siguientes ecuaciones de cinemática diferencial inversa:

e. Análisis de singularidades

El análisis de singularidad sobre este sistema se refiere a una configuración particular donde el robot gana o pierde grados de libertad instantáneamente, y se basa en el determinante de la matriz del Jacobiano (se puede indeterminar, por lo que no habría solución).

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{p} \quad (24)$$

Donde:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \end{bmatrix} \quad \dot{p} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial P_x} & \frac{\partial l_1}{\partial P_y} \\ \frac{\partial l_2}{\partial P_x} & \frac{\partial l_2}{\partial P_y} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial l_1}{\partial P_x} = \frac{1}{2} [2P_x - (d-e)] r^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\partial l_2}{\partial P_x} = \frac{1}{2} [2P_x + (d-e)] s^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\partial l_1}{\partial P_y} = \frac{1}{2} [2P_y - (-c+f)] r^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{\partial l_2}{\partial P_y} = \frac{1}{2} [2P_y + (c-f)] s^{-\frac{1}{2}}$$

$$J^{-1} = \frac{1}{\det(J)} \begin{bmatrix} \frac{\partial l_2}{\partial P_y} & -\frac{\partial l_1}{\partial P_y} \\ -\frac{\partial l_2}{\partial P_x} & \frac{\partial l_1}{\partial P_x} \end{bmatrix}$$

Se buscó el determinante del Jacobiano:

$$\det(J)_1 = \left[\frac{1}{2} [2P_x - (d-e)] r^{-\frac{1}{2}} \right] \left[\frac{1}{2} [2P_y + (c-f)] s^{-\frac{1}{2}} \right]$$

$$\det(J)_2 = \left[\frac{1}{2} [2P_x + (d-e)] s^{-\frac{1}{2}} \right] \left[\frac{1}{2} [2P_y - (-c+f)] r^{-\frac{1}{2}} \right]$$

$$\det(J) = \det(J)_1 - \det(J)_2$$

$$\det(J) = - \left(\frac{2(2P_y + c - f) * (d - e)}{\sqrt{(4Px^2 + (-4d + 4e)P_x + 4Py^2 + (4c - 4f)P_y + c^2 - 2cf + d^2 - 2de + e^2 + f^2)}} \right)$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{(4Px^2 + (4a - 4e)P_x + 4Py^2 + (4c - 4f)P_y + c^2 - 2cf + d^2 - 2de + e^2 + f^2)}} \right)$$

$$\frac{1}{\det(J)} = \frac{\sqrt{(4Px^2 + (-4d + 4e)P_x + 4Py^2 + (4c - 4f)P_y + c^2 - 2cf + d^2 - 2de + e^2 + f^2)}}{2(2P_y + c - f) * (d - e)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{(4Px^2 + (4a - 4e)P_x + 4Py^2 + (4c - 4f)P_y + c^2 - 2cf + d^2 - 2de + e^2 + f^2)}} \cdot \frac{1}{1}$$

$$2Py + c - f = 0$$

Por lo que se obtuvo la siguiente singularidad:

$$P_y = \frac{f - c}{2} \tag{25}$$

4. VALIDACIÓN COMPUTACIONAL

Para la validación del modelo cinemático se utilizó el software Matlab Simulink donde se realizó una simulación del sistema. Para su elaboración, fue necesario tomar en cuenta el diagrama esquemático de la Figura 2. Se observa en la Figura 4 las cuatro articulaciones de revolución que posee el robot (recuadro color rojo) así como las articulaciones prismáticas (recuadro color verde).

Se simuló el enrollamiento y desenrollamiento de los cables utilizando dos bloques tipo "Body" de cada lado, por lo que l_1 está representado por "Body 1" y "Body 2" (recuadros color azul); por otra parte l_2 corresponde a "Body 4" y "Body 5" (recuadros color lila). Por último "Body 3" representa al efector final del robot paralelo planar activado por cables.

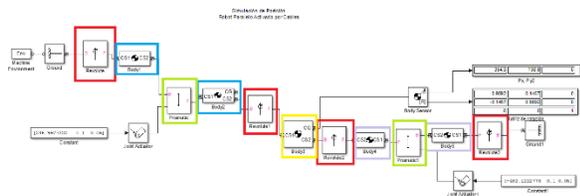


Figura 4. Modelado de simulación en Matlab Simulink

A partir de las siguientes coordenadas deseadas $P_x = 0$ mm y $P_y = 1200$ mm, se sustituyeron las medidas de la estructura fija ($e = 1500$ mm y $f = 1000$ mm) así como las dimensiones del efector final ($d = 80$ mm y $c = 90$ mm) en las ecuaciones (12) y (18) y, se obtuvo que la longitud final de los cables es:

$$l_{1f} = l_{2f} = 1029.137989 \text{ mm} = 102.9137989 \text{ cm}$$

Inicialmente, ambos cables poseen una longitud de $l_i = 843.282277$ mm, por lo tanto, la longitud que tienen que desenrollar los cables para lograr ubicarse en (0, 1200 mm) es:

$$\Delta l_1 = l_{1f} - l_i = 1029.137989 \text{ mm} - 843.282277 \text{ mm} = 185.855712 \text{ mm}$$

$$\Delta l_2 = l_{2f} - l_i = 1029.137989 \text{ mm} - 843.282277 \text{ mm} = 185.855712 \text{ mm}$$

Es decir, l_1 y l_2 aumentaron su tamaño (signo positivo). Para su comprobación, como datos de entrada se colocaron las longitudes obtenidas anteriormente, tal y como lo muestra la Figura 5.

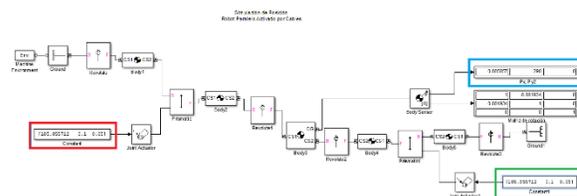


Figura 5. Simulación de una coordenada en Matlab Simulink

Note que el resultado de Δl_1 se ingresó como entrada constante en el bloque color rojo en Matlab-Simulink, de igual forma Δl_2 se ingresó en el bloque verde, y en el bloque azul se obtuvieron las coordenadas resultantes $P_x = -0.005857$, $P_y = -290$ y $P_z = 0$; además, no se presentó rotación. El valor obtenido por Simulink en la coordenada P_y correspondió a la diferencia entre la posición deseada ($P_y = 1200$ mm) y el largo total de la estructura (1500 mm).

La simulación del Robot se observa en la Figura 6 donde en efecto se demostró que l_1 y l_2 poseen el comportamiento esperado:

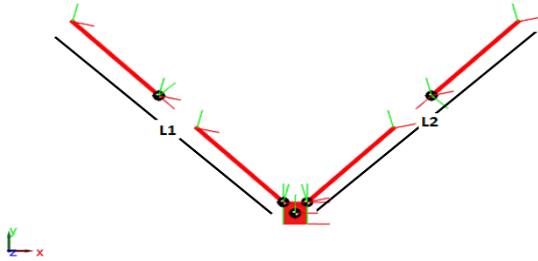


Figura 6. Simulación de cinemática del sistema

5. CONCLUSIONES

En este documento se presentaron las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento cinemático (directo e inverso) de un robot paralelo planar activado por cables. El análisis de las singularidades del sistema fue un factor importante a considerar en el diseño del robot y para su control.

Las ecuaciones fueron comprobadas computacionalmente mediante el software Matlab Simulink. Entre el resultado numérico

obtenido gracias a la simulación y las ecuaciones teóricas existe una pequeña diferencia debido a la aproximación decimal (error de 0.0019 mm medido en simulación).

Las ecuaciones obtenidas en el estudio de la cinemática del sistema, además de ayudar en un futuro a desarrollar un sistema de control óptimo para el robot, servirán para determinar la posición del efector final del robot a partir de la longitud de los cables, o de manera contraria, determinar la cantidad de cable necesario para alcanzar una posición determinada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Puebla por el apoyo proporcionado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Merlet, J. P. *Parallel Robots*. Springer. 2012.
- [2] Salgado, O. *Síntesis, análisis y diseño de manipuladores paralelos de baja movilidad*. University of the Basque Country. 2008.
- [3] Dasgupta, B. Singularity-free path planning for the Stewart platform manipulator. *Mechanism and Machine Theory*. 1998, 711-725.
- [4] Gorman, J. J. The cable array robot: Theory and experiment. *IEEE International Conference*. 2001, 2804-2810.
- [5] Dallej, T. G. Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. *IEEE/RSJ International Conference*. 2012, 1581-1586.
- [6] Roberts, R. G. On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots. *Journal of Robotic Systems*. 1998, 581-597.
- [7] Pham, C. B. Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. 2006, 53-69.
- [8] Williams li, R. L. Translational planar cable-direct-driven robots. *Journal of Intelligent and Robotic systems*. 2003, 69-96.
- [9] Trevisani, A. G. Cable-direct-driven robot (CDDR) with passive SCARA support: theory and simulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2006, 73-94.
- [10] Merlet, J. P. Kinematics of the wire-driven parallel robot MARIONET using linear actuators. *IEEE International Conference*. 2008, 3857-3862.
- [11] Riehl, N. G. Effects of non-negligible cable mass on the static behavior of large workspace cable-driven parallel mechanisms. *IEEE International Conference*. 2009, 2193-2198.
- [12] Lahouar, S. O. Collision free path-planning for cable-driven parallel robots. *Robotics and Autonomous Systems*. 2009, 1083-1093.
- [13] Angeles, J. Y. Singularity analysis of three-legged, six-DOF platform manipulators with URS legs. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*. 2003, 469-475.
- [14] Altuzarra, O. P. A practical procedure to analyze singular configurations in closed kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics*. 2004, 929-940.
- [15] Barrette, G. Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms. *Journal of mechanical design*. 2005, 242-248.
- [16] Yang, G. Y. Kinematics and singularity analysis of a planar cable-driven parallel manipulator. *Intelligent Robots and Systems*. 2004.

Acerca de los autores



Claudia Mena Huerta, recibió el título de Ingeniera en Electrónica por parte del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Puebla en 2015. Actualmente es estudiante de tiempo completo de la Maestría en Ingeniería Electrónica con línea de investigación en Sistemas mecatrónicos interactivos aplicados al control de procesos, en el Instituto Tecnológico de Puebla desde 2017 a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt); con tema de tesis Control de un robot activado por cables.



Renata Cebada Posadas, es licenciada en ciencias de la electrónica en 2015 por parte de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y actualmente es estudiante de tiempo completo de la Maestría en Ingeniería en Electrónica con línea de investigación en Sistemas mecatrónicos interactivos aplicados al control de procesos, perteneciente al PNPC del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por parte del Instituto Tecnológico de Puebla con tema de tesis aplicado al Control de un robot paralelo activado por cables mediante visión artificial.



Sergio Javier Torres Méndez, recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica en 2014 por parte de la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá; el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica en 2008 por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por parte del Instituto Tecnológico de Veracruz en 1995. Es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Puebla desde 1995. Es miembro del cuerpo académico Sistemas interactivos y realidad virtual. Sus intereses de investigación se relacionan con el diseño y desarrollo de robots de alta velocidad y de sistemas mecatrónicos interactivos para la asistencia humana.



José Rafael Mendoza Vázquez, recibió el grado de Doctor en Ciencias en Electrónica en 2010 por parte del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica en 2003 por la misma institución. Es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Puebla, en el departamento de Ingeniería eléctrica y electrónica. Es miembro del cuerpo académico Sistemas interactivos y realidad virtual. Su investigación se encuentra dentro del área de robótica y control con énfasis en

robótica, control de movimiento, modelado, procesamiento de señales y sistemas interactivos.



Vicente Ramírez Palacios, recibió el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica en 1997 por parte del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Recibió el título de Ingeniero Industrial en Electrónica en 1996 por parte del Instituto Tecnológico de Puebla. Es profesor de tiempo completo a nivel Licenciatura en el Instituto Tecnológico de Puebla. Trabajando en Automatización y Control de Procesos, utilizando algoritmos PID, Lógica Difusa y Redes Neuronales; comunicando los procesos a través de Redes Industriales como son: Red ASi, Red Profibus y Red Ethernet, teniendo Control y Adquisición de Datos de los procesos por medio de un SCADA. Es miembro del cuerpo académico Sistemas interactivos y realidad virtual.