



# DISEÑO DE UN **ROBOT** **ACTIVADO** POR CABLES PARA TAREAS DE TRASLADO EN GRANDES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Sergio Javier Torres Méndez<sup>1</sup>, José Rafael Mendoza Vázquez<sup>2</sup>, Vicente Ramírez Palacios<sup>3</sup> e Irma Delia Rojas Cuevas<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Instituto Tecnológico de Puebla  
Avenida Tecnológico, No. 420,  
Colonia Maravillas  
Puebla, Puebla, México, C.P. 72220

  
serm7007@yahoo.com.mx

Recibido: Noviembre 11, 2016.

Recibido en forma revisada: Diciembre 28, 2016.

Aceptado: Enero 1, 2017.

**Resumen:** En este trabajo se presenta el diseño de un sistema robótico para el traslado de partes en almacenes de grandes dimensiones. El sistema propuesto consiste de una serie de ocho cables que son conectados a un efector final, el cual se mueve por la acción de dos servomotores a un conjunto de tambores, quienes recolectan o liberan el cable de forma apropiada. La disposición de los ocho cables permite que el efector final alcance grandes distancias, manteniéndose paralelo a la tierra y con tensión en todos los cables. Se presentan resultados numéricos del espacio de trabajo de la propuesta de diseño para validar la viabilidad de la construcción de un prototipo

+ **Palabras clave:** Robots activados por cables, Análisis del espacio de trabajo, sistemas de almacenaje.

**Abstract:** In this paper, a novel robotic system design for moving parts inside large storage buildings is presented. The proposed system uses eight cables which are connected to a suspended end-effector. The end-effector moves to a desired position by the action of two servomotors to a set of spool mechanisms which collect or release the cables accordingly. The arrangement of the eight cables allows the end-effector reaches large workspace keeping its base parallel to the ground with positive tension among cables. Finally, the workspace of a proposed robot design is analyzed and simulated in order to validate the feasibility of its prototyping.

+ **Keywords:** Keyword: Cable robots, Workspace analysis, storage systems.

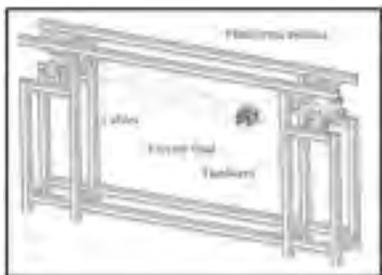
## Introducción

Entre las tareas típicas que son realizadas por los sistemas de almacenaje se pueden mencionar el movimiento de un efector-final hacia el objeto a ser trasladado, la sujeción de dicho objeto, el traslado del objeto a una posición específica y, por último, la liberación del objeto. La automatización de estas tareas ha permitido el desarrollo de sistemas robóticos que, comparados con las operaciones manuales, han logrado la optimización del espacio de trabajo, el mejoramiento del flujo de material y una reducción significativa de errores de posicionamiento. Sin embargo, la creciente demanda de los requerimientos de productividad han motivado la búsqueda de diseños que aseguren que el traslado de los objetos sea de una manera suave, rápida y precisa, con un mínimo consumo de energía. Los movimientos suaves reducen la generación de vibraciones, evitando los cambios bruscos que podrían dañar los motores, y que ocasionarían que el objeto se suelte del efector final. Los movimientos a altas velocidades reducen los tiempos de traslados y en consecuencia los costos operativos, y el posicionamiento preciso de los objetos a posiciones predefinidas facilita el agarre y el depósito de los objetos.

Entre los sistemas robóticos tradicionales utilizados en los procesos automatizados de almacenamiento, se encuentran los llamados robots de coordenadas cartesianas o robots tipo pórtico, constituidos básicamente de eslabones rígidos. Aunque estos sistemas robóticos son populares en aplicaciones industriales por su versatilidad y alta capacidad de cubrir grandes distancias, el movimiento de sus elementos rígidos requiere del uso de costosos sistemas de potencia y de actuación.

Los robots activados por cables se han convertido en una solución al problema planteado anteriormente, al sustituir los elementos rígidos por elementos flexibles. El uso de elementos flexibles (cables o cordones) permite en principio reducir el peso de los elementos móviles y en consecuencia la generación de movimientos rápidos en grandes espacios de trabajo. Entre los robots activados por medio de cables más representativos se encuentran el NIST RobotCrane (Albus, Bostelman y Dagalakis, 1993), Skycam (Cone, 1985), el IPANEMA (Miermeister y Pott, 2010), y el Deltabot (Behzadipour, Dekker, Khajepour y Chan, 2003). El NIST RobotCrane es un robot tipo grúa. El Skycam es una cámara suspendida por medio de cuatro cables. El IPANEMA es un robot espacial que utiliza ocho cables actuados. El Deltabot combina la flexibilidad de seis cables y la rigidez de un elemento neumático.

Estos robots son comúnmente clasificados en base a cómo su efector final es restringido con respecto a la plataforma estática, específicamente los llamados robots incompleta y completamente restringidos. Los robots incompletamente restringidos o tipo grúa (Figura 1), se caracterizan por la forma en que los cables son distribuidos alrededor del efector final, necesitando de la fuerza de gravedad para asegurar su posición.



**Figura 1. Componentes generales del sistema robótico propuesto.**



Por otro lado, los robots completamente restringidos dependen enteramente de la distribución de sus cables para fijar una posición del efector final. En ambas situaciones se debe tener en cuenta que los cables solo trabajan bajo tensión y, por lo tanto, es necesario la colocación de cables extras que actúen en forma antagonista incrementando su número en comparación con los eslabones rígidos. Bajo estas circunstancias, es indispensable conocer las variaciones de las tensiones de los cables para cada posición alcanzable del efector final, previniendo de la pérdida del control del efector final. Así, diferentes configuraciones han sido propuestas para encontrar un balance entre alcanzar las máximas distancias mientras se mantiene la tensión en los cables con la mínima energía. Algunos autores (Ming y Higuchi, 1994; Kawamura, Choe, Tanaka, y Pandian, 1995; Maeda, Tadokoro, Takamori, Hiller, y Verhoeven, 1999) basan sus estudios en determinar la óptima ubicación de los puntos de conexión tanto en el efector final y la plataforma estática con el máximo número de grados de libertad, mientras otros (Behzadipour y Khajepour, 2005; Lim, Yeo, Yang, y Mustafa, 2009; Castelli, Ottaviano, y González, 2010), lo buscan con el número mínimo suficiente para realizar la tarea deseada.

En este artículo, se presenta el desarrollo de la propuesta de diseño de un sistema robótico activado por cables, cuya disposición óptima permite al efector final alcanzar un máximo de posiciones controlables dentro de un área rectangular permisible con un mínimo de energía en los actuadores.

## Configuración del robot

La arquitectura del sistema robótico propuesto es mostrada en la Figura 1, donde una plataforma rectangular (efector final) se encuentra suspendida con respecto a otra plataforma estática por medio de ocho cables. Los cables son agrupados de tal manera que cuatro de ellos son localizados a cada lado del efector final, siendo recolectados o liberados por medio de dos sistemas de tambores que son controlados por dos servomotores. Los tambores son montados sobre ejes que se mueven en forma helicoidal, lo que permite que el punto de entrada se mantenga constante. De esta manera los puntos extremos de cada cable se mantienen constantes mientras son enredados o liberados en los tambores, permitiendo que la longitud de cada cable pueda ser determinada por la distancia entre los puntos de conexión del efector final y los puntos de entrada a la plataforma estática. Por ejemplo, como se puede ver en la Figura 2, la distancia para el cable 2 está determinada por los puntos  $A_2$  y  $B_2$ . En la misma figura se puede observar que existen puntos de coincidencia tanto en la plataforma estática como en el efector final. Por ejemplo, los pares de cables 1 y 5, y 3 y 7, tienen sus puntos de coincidencia en el efector final, mientras los pares de cables 2 y 6, y 4 y 8 tienen sus coincidencias en la plataforma estática.

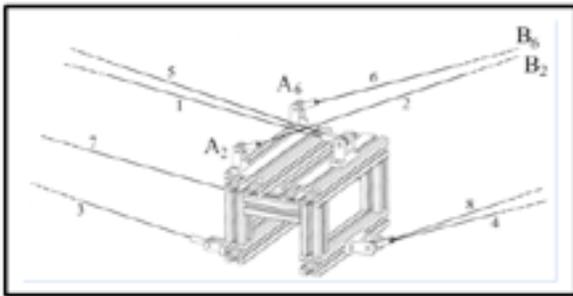


Figura 2. Detalle de la conexión de cables en el efector final.

Se identifica que cada par de cables forma un triángulo isósceles, cuyos vértices están formados por los puntos de conexión en el efector final y la plataforma estática. Esto es, el par de cables 2 y 6 está formando un triángulo isósceles cuyos vértices en el efector final están definidos por los puntos  $A_2$  y  $A_6$ , mientras el punto coincidente en la plataforma estática está definido por  $B_2=B_6$ . La forma triangular tipo isósceles hace que la longitud de cada cable que pertenece a un par sea de igual longitud:

$$l_i = l_{i+4} \quad \forall i = 1,2 \quad (1)$$

Una vista frontal del robot, mostrada en la Figura 3, permite observar la construcción de dos mecanismos tipo paralelogramo. En particular, los dos mecanismos tipo paralelogramo son construidos por los siguientes puntos proyectados sobre la vista frontal del robot: a la izquierda se forma por los puntos  $A_{p1}B_{p1}B_{p3}A_{p3}$ , mientras que a la derecha el paralelogramo esta forma por los puntos  $A_{p2}B_{p2}B_{p4}A_{p4}$ .

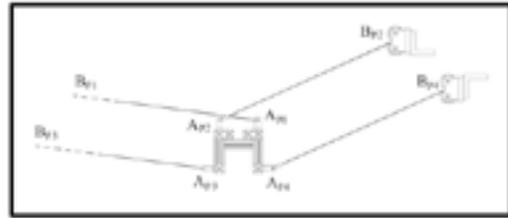


Figura 3. Componentes generales del sistema robótico propuesto

Para que los mecanismos tipo paralelogramo se mantengan en todo movimiento del efector final, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$l_{p(i+2)} \forall i = 1,2 \quad (2)$$

$$l_{p1} \parallel l_{p(i+2)} \forall i = 1,2 \quad (3)$$

Bajo las condiciones establecidas en la ecuación (2) y la ecuación (3), el efector final, se encuentra restringido a moverse solamente sobre el plano frontal siempre y cuando exista tensión en los cables ejercida por el peso del efector final; por lo que, la configuración del robot propuesta tiene dos grados de libertad que son de traslación pura.

## Análisis cinemático y estático

Tal y como es mostrado en la Figura 4, un sistema de coordenadas móvil  $xyz$  es asignado al efector final, cuyo origen  $O$  coincide con el centro de masa del efector final. El origen  $O$  del sistema coordinado de referencia  $XYZ$  coincide con el centro de la plataforma estática. La plataforma estática está determinada por los parámetros  $e, f, y g$ , los cuales definen su largo, alto y espesor, respectivamente.

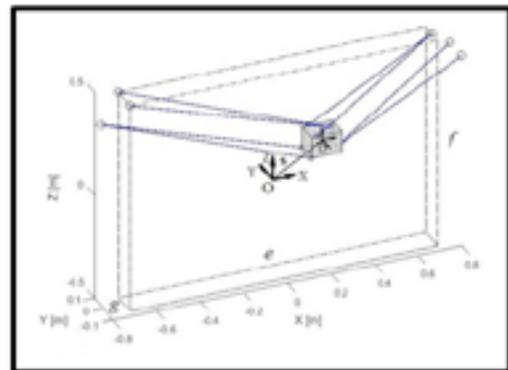


Figura 4. Parámetros cinemáticos de la plataforma estática.

Un vector  $s=[sx \ 0 \ sz \ 0 \ 0 \ 0]$  es utilizado para determinar la posición absoluta del centro de gravedad del efector final. Se asigna un vector  $p_i$  para ubicar la posición de cada punto de conexión sobre el efector final con respecto al sistema móvil  $xyz$ , y cada vector  $q_i$  define la posición de cada punto de entrada a la plataforma estática con respecto al sistema coordinado de referencia  $XYZ$ . Así, la longitud de cada cable se puede determinar por medio de la aplicación de la norma euclidiana de la forma:

$$l_i = \|s + p_i - q_i\| \quad \forall i = 1,2, \dots, 8 \quad (4)$$

Los parámetros cinemáticos del efector final son mostrados en la Figura 5. Los parámetros a, c, y d definen el largo, alto y espesor del efector final, mientras que el parámetro b define la ubicación de los puntos de conexión en la parte superior del efector final.

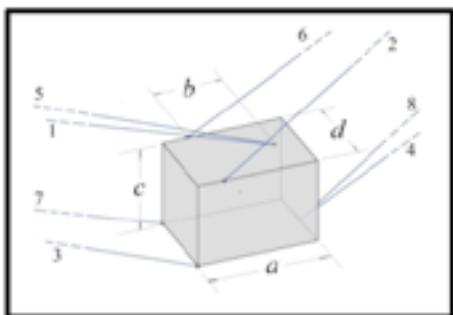


Figura 5. Parámetros cinemáticos del efector final.

La sustitución de los parámetros cinemáticos en la ecuación (5), resulta en la solución de la cinemática inversa del robot:

$$l_1 = l_3 = \sqrt{\left(s_x + \frac{b}{2} + \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(s_y - \frac{c}{2} + \frac{f}{2}\right)^2} \quad (5a)$$

$$l_2 = l_4 = \sqrt{\left(s_x - \frac{b}{2} - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(s_y - \frac{c}{2} + \frac{f}{2}\right)^2}$$

$$l_5 = l_7 = \sqrt{\left(s_x + \frac{a}{2} + \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(s_y + \frac{c}{2} - \frac{f}{2}\right)^2} \quad (5c)$$

$$l_6 = l_8 = \sqrt{\left(s_x - \frac{a}{2} - \frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 + \left(s_y + \frac{c}{2} - \frac{f}{2}\right)^2} \quad (5d)$$

La velocidad de los cables se obtiene por medio de la diferenciación de la ecuación (4), que en forma compacta es típicamente expresada como  $dl/dt = J ds/dt$  donde el Jacobino o matriz Jacobiana está definida como:

$$J = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 + \frac{d}{2} + \frac{v}{2} & \dot{s}_2 - \frac{a}{2} + \frac{f}{2} \\ -l_1 & -l_2 \\ \dot{s}_1 - \frac{b}{2} - \frac{a}{2} & \dot{s}_2 - \frac{c}{2} + \frac{f}{2} \\ -l_1 & -l_2 \\ \dot{s}_1 + \frac{a}{2} + \frac{b}{2} & \dot{s}_2 + \frac{c}{2} - \frac{f}{2} \\ l_3 & l_4 \\ \dot{s}_1 - \frac{a}{2} - \frac{b}{2} & \dot{s}_2 + \frac{c}{2} - \frac{f}{2} \\ -l_3 & -l_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Las posiciones singulares son determinadas al analizar la deficiencia en el rango de la matriz Jacobiana, lo que resulta en las siguientes condiciones de posicionamiento no singulares del efector final:

$$l_i > 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, 8; \quad s_2 < \frac{f}{2} - \frac{c}{2} \quad (7)$$

El análisis estático trata con la obtención de las tensiones de los cables que logren alcanzar un equilibrio con las fuerzas y momentos aplicados al efector final. Usando la segunda ley de Newton, se tiene que:

$$\sum_{i=1}^8 (\tau_i) + F_e + m_e G = 0 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^8 (p_i \times \tau_i) + M_e = 0 \quad (9)$$





En otras palabras, el equilibrio estático del efector final con una masa  $m_s$  y que está sujeta a un conjunto de fuerzas  $F_e$  y momentos  $M_e$ , se logra al igualarse con las fuerzas y momentos generados por las tensiones  $\tau_i$  de los cables. En una forma compacta, las ecuaciones (8) y (9) pueden representadas como:

$$W + A\tau = 0 \quad (10)$$

donde  $W$  es el vector que agrupa las fuerzas y momentos externos aplicados al efector final;  $A$  es la matriz estructural, la cual contiene las orientaciones de los cables, y  $\tau$  es el vector de las tensiones en los cables.

### Análisis del espacio de trabajo

El análisis del espacio de trabajo trata con la identificación de todas las posiciones en las cuales se puede ubicar el efector final con todos los cables bajo tensión. Por lo tanto, el análisis del espacio de trabajo requiere de la solución de la ecuación (10) para las tensiones de los cables. Lo anterior incluye encontrar la inversa de la matriz estructural  $A$ , que en el caso general es una matriz no cuadrada. El uso de la pseudo-inversa  $A_p$  como una solución al problema, implica la obtención de la solución con las tensiones mínimas en los cables y la adición de un vector arbitrario  $Nu$  para balancear las tensiones en los cables redundantes. La matriz  $N$  representa el espacio nulo de la matriz  $A$  y  $u$  es un vector a ser determinado, para asegurar que todos los cables estén en tensión. Esto es,

$$\exists u : (\tau = -A_p W + Nu) > 0 \quad (11)$$

La formulación (11) es conocida como el espacio de trabajo de cierre de fuerzas (Stump y Kumar, 2006; Gouffarde, Merlet, y Daney, 2006; Lim, Yang, Yeo, Mustafa, y Chen, 2009), que se basa principalmente en asumir que no existe limite en la cantidad de fuerza que se aplicar en cada cable que nulifique cualquier fuerza o momento externo que se aplique en el efector final. Así, es común el uso de algoritmos computacionales de búsqueda de cada posición alcanzable no singular por el efector final. Basado en el método de búsqueda anteriormente mencionado, se analiza el espacio de trabajo tensionable en base a los parámetros dados en la Tabla 1.



Símbolo	Valor (metros)
a	0.14
b	0.08
c	0.10
d	0.10
e	1.41
f	1.00
g	0.125

Tabla 1. Parámetros del robot propuesto.

Se utiliza una masa de 1 kg del efector final como fuerza externa en el robot. La Figura 6 muestra el espacio de trabajo para el robot propuesto.

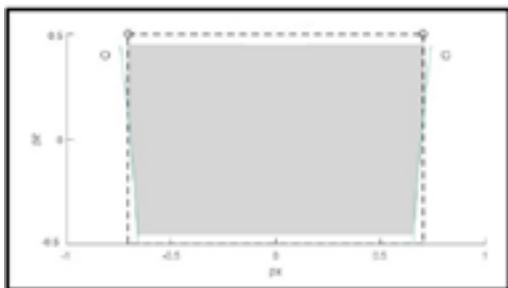


Figura 6. Espacio de trabajo controlable.

## Conclusión

El trabajo de investigación presenta la descripción de un robot activado por cables para aplicaciones de almacenamiento en estructuras de gran tamaño. La descripción incluye el análisis Cinetostático y del espacio de trabajo de la propuesta de diseño. La propuesta incluye un efector final que se encuentra suspendido con respecto a una plataforma estática a través de ocho cables. La distribución de los ocho cables restringe al efector final a realizar solamente movimientos de traslación sobre el plano frontal. El espacio de trabajo es determinado asumiendo que se pueden aplicar fuerzas de tensión ilimitadas a los cables. Resultados numéricos basados en valores asignados a los parámetros del robot propuesto, muestran una reducción del 12.9% del espacio inicial alcanzable por el robot, con una tensión máxima en los cables de 200 Newtons.

## Bibliografía

- +Albus, J., Bostelman, R., and Dagalakis, N. (1993). "The Nist Robocrane," *J. Rob. Syst.*, 10, 709–724.
- +Cone, L. L. (1985). *SKYCAM-AN AERIAL ROBOTIC CAMERA SYSTEM*. *Byte*, 10(10), 122.
- +Miermeister, P., & Pott, A. (2010). *Modelling and real-time dynamic simulation of the cable-driven parallel robot IPanema*. In *New Trends in Mechanism Science* (pp. 353-360). Springer Netherlands.
- +Behzadipour, S., Dekker, R., Khajepour, A., & Chan, E. (2003, January). *DeltaBot: A new cable-based ultra high speed robot*. In *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 533-537). American Society of Mechanical Engineers.
- +Ming, A., & Higuchi, T. (1994). *Study on multiple degree-of-freedom positioning mechanism using wires. I: Concept, design and control*. *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 28(2), 131-138.
- +Kawamura, S., Choe, W., Tanaka, S., & Pandian, S. R. (1995, May). *Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system*. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 215-220). IEEE.
- +Maeda, K., Tadokoro, S., Takamori, T., Hiller, M., & Verhoeven, R. (1999). *On design of a redundant wire-driven parallel robot WARP manipulator*. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 895-900). IEEE.
- +Behzadipour, S., & Khajepour, A. (2005). *A new cable-based parallel robot with three degrees of freedom*. *Multibody System Dynamics*, 13(4), 371-383.
- +Lim, W. B., Yeo, S. H., Yang, G., & Mustafa, S. K. (2009, July). *Kinematic analysis and design optimization of a cable-driven universal joint module*. In *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (pp. 1933-1938). IEEE.
- +Castelli, G., Ottaviano, E., & González, A. (2010). *Analysis and simulation of a new Cartesian cable-suspended robot*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224(8), 1717-1726.
- +Stump, E., & Kumar, V. (2006). *Workspaces of cable-actuated parallel manipulators*. *Journal of Mechanical Design*, 128(1), 159-167.
- +Gouttefarde, M., Merlet, J. P., & Daney, D. (2006). *Determination of the wrench-closure workspace of 6-DOF parallel cable-driven mechanisms*. In *Advances in Robot Kinematics* (pp. 315-322). Springer Netherlands.
- +Lim, W. B., Yang, G., Yeo, S. H., Mustafa, S. K., & Chen, I. M. (2009, May). *A generic tension-closure analysis method for fully-constrained cable-driven parallel manipulators*. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on* (pp. 2187-2192). IEEE.