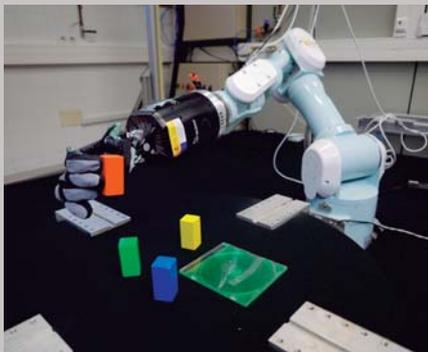
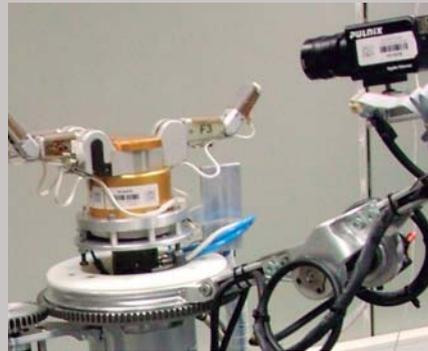


JNR2019

Jornadas Nacionales de Robótica
Spanish National Robotics Conference

LIBRO DE ACTAS

Alicante, SPAIN - June 13th-14th, 2019



JNR2019

Jornadas Nacionales de Robótica **Spanish Robotics Conference** **2019**

- Libro de Actas -

Alicante, 13-14 de junio de 2019

Organizado por:

Universidad de Alicante

Universidad Miguel Hernández de Elche

Comité Español de Automática - Grupo Temático de Robótica



Editores: Fernando Torres Medina · Óscar Reinoso García

ISBN: 978-84-09-12133-5

Índice de contenidos

Estudio de descriptores holísticos basados en métodos analíticos y técnicas de deep learning para localización con robots móviles	1
S. Cebollada, L. Payá, A. Peidró, L.M. Jiménez, O. Reinoso	
Avances en BLUE: Robot para la Localización en Entornos No Estructurados	9
Miguel Á. Muñoz-Bañón, Iván del Pino, Pablo Gil, Francisco A. Candelas, Fernando Torres	
Robot de cables para operación en superficies verticales	15
Raúl Gómez Ramos, Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo	
Desarrollo y validación de algoritmos de control de una órtesis activa de rodilla para sujetos hemiparéticos basados en la cinemática de la pierna sana	21
Julio Salvador Lora Millán, Eduardo Rocon	
Seguimiento de las esquinas de ojos como primer paso en la estimación de movimientos de cabeza para aplicaciones clínicas	29
Agostina J. Larrazabal, César E. Martínez, Cecilia E. García Cena	
Inferencia Activa para la Percepción y la Acción de Robots Humanoides	36
Guillermo Oliver, Pablo Lanillos, Gordon Cheng	
Análisis de las reacciones psicofisiológicas de los usuarios en terapias de rehabilitación para un jugador y competitivas asistidas por dispositivos robóticos	43
J.M. Catalán, A. Blanco, J.A. Díez, J.V. García, R. Puerto, N. García-Aracil	
Diseño de un exoesqueleto de brazo para la rehabilitación del hombro controlado por una interfaz cerebro-máquina (BCI)	48
J. Belmar, E. Iáñez, M. Ortiz, J.M. Azorín	
Algoritmo de Reconocimiento de Gestos Dinámico para Cirugía Endoscópica Endonasal	55
E. Bauzano, M.C. López-Casado, I. Rivas-Blanco, C.J. Pérez-del-Pulgar, V.F. Muñoz	
Controlling Robot Motion by Blinking Eyes: an Experience on Users Training	63
Fernando Gómez-Bravo, Rafael López de Ahumada, Juan A. Castro-García, Raúl Jiménez-Naharro, Alberto J. Molina-Cantero, Juan A. Gómez-Galán, Santiago Berrazueta-Alvarado, Manuel Sanchez-Raya	
Improvement of the Sensory and Autonomous Capability of Robots Through Olfaction: the IRO Project.	71
Javier Monroy, Jose-Raul Ruiz-Sarmiento, Francisco-Angel Moreno, Cipriano Galindo, Javier Gonzalez-Jimenez	
Localización Visual de un Robot Submarino de bajo coste para la inspección de Minas Inundadas	79
Olaya Álvarez-Tuñón, Alberto Jardón, Carlos Balaguer	

Desarrollo de Algoritmos de Reconstrucción Cinemática del Brazo para Terapias de Neurorehabilitación Asistidas por Robots de Efecto Final	181
Arturo Bertomeu-Motos, Nicolas Garcia-Aracil	
Towards the Automation of Visual Inspections of Cargo Holds of Large-Tonnage Vessels	189
Alberto Ortiz, Francisco Bonnin-Pascual, Emilio Garcia-Fidalgo, Joan P. Company-Corcoles, Kai Yao	
Sistema Multi-Robot para Cooperación con Equipos de Rescate de Primera Respuesta Humanos y Caninos en Escenarios de Catastrofe	197
Alfonso J García-Cerezo, Anthony Mandow, Jose Antonio Gómez Ruiz, Juan Jesús Fernández Lozano, Jesús M. Gómez de Gabriel, Antonio Jesús Reina Terol, Jorge Luis Martínez Rodríguez, Jesús Morales Rodríguez, María Alcázar Martínez Sánchez, Jesús Miranda Páez, Ricardo Vázquez Marín, Ana Cruz Martín, Javier Serón Barba, Francisco Pastor Martín, Victoria Plaza Leiva, Juan Manuel Gandarias, Manuel Toscano Moreno	
Metodología para el diseño y puesta en funcionamiento de sistemas de manipulación remota en instalaciones con radiación	206
Manuel Ferre Pérez, Sofía Coloma Chacón, Mario di Castro, Miguel A. Sánchez-Urán González	
El robot social Mini como plataforma para el desarrollo de juegos de interacción multimodales	214
Elena Velázquez-Navarro, Sergio González-Díaz, Fernando Alonso-Martín, José Carlos Castillo, Álvaro Castro-González, María Malfaz, Miguel A. Salichs	
Manipulación Diestra de Objetos Desconocidos Usando Puntos de Contacto Virtuales	221
Andrés Montaña, Raúl Suárez	
Visualización 3D de las deformaciones geométricas del cerebro en tiempo real utilizando realidad aumentada	229
Natividad Bermejo-Herrero, Karin Correa-Arana, Ernesto Ávila Navarro, José María Sabater-Navarro	
Detección y seguimiento de personas utilizando sensores LIDAR	234
Claudia Álvarez-Aparicio, Ángel Manuel Guerrero-Higueras, Francisco Javier Rodríguez-Lera, Jonatan Ginés Clavero, Francisco Martín Rico, Vicente Matellán	
Entorno de Vida Asistida Inteligente: Diseño de una arquitectura para la Persona Mayor con la Inclusión de Robots	241
David Loza M., Alexandra Verdugo C., Eduardo Zalama C., Jaime Gómez-García-Bermejo	
Predicción de la Estabilidad en Tareas de Agarre Robótico con Información Táctil	249
Brayan S. Zapata-Impata, Pablo Gil, Fernando Torres	

Robot de cables para operación en superficies verticales

Raúl Gómez Ramos^a, Eduardo Zalama^{b*}, Jaime Gómez-García-Bermejo^b

^a Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Paseo del Cauce 59, 47011 Valladolid, España..

^b Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid, C/ Paseo del Cauce 5, 47011 Valladolid, España..

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, programación y construcción de un Robot de 3 Grados de Libertad dirigido por cables capaz de generar cualquier trayectoria, tanto circular como lineal, a lo largo de una superficie vertical de trabajo. El objetivo principal del trabajo es el desarrollo de un sistema escalable capaz de operar en superficies verticales para por ejemplo su aplicación en el ámbito o industrial o en el tratamiento de fachada de edificios como limpieza o rehabilitación. El artículo presenta el desarrollo de modelo cinemático, dinámico y de control. Se ha desarrollado un prototipo de bajo coste que demuestra la funcionalidad del sistema con programación mediante G-Code lo que simplifica la generación de trayectorias al poderse utilizar herramientas convencionales de Cad-Cam y de impresión 3D como Slicer o Cura.

Palabras Clave:

Robot de cables, robot paralelo, cinemática directa, cinemática inversa, control, trayectoria.

1. Introducción

El acceso a grandes superficies verticales como son las fachadas de edificio para realizar labores de mantenimiento como acondicionado, enlucido, pintado, limpieza de ventanas etc. es una tarea recurrente que debe realizarse de forma frecuente.

Tradicionalmente el acceso a estas superficies se viene realizando instalando andamios fijos, andamios suspendidos mediante cables o utilizando grúas que permiten a los operarios acceder a las zonas de intervención. Estas soluciones presentan problemas importantes de seguridad para las personas que realizan estas actividades. Además en muchas ocasiones para realizar estas tareas es necesario restringir la circulación de vehículos y personas lo que ocasiona costos considerables. Una alternativa para el acceso a grandes espacios de trabajo es la utilización de un robot operado mediante cables.

Los robots paralelos operados mediante cables (CDPR-Cable Driven Parallel Robots) son un tipo particular de robot paralelo en los que el efector final (EF) se suspende por medio de varios cables flexibles en lugar de uniones rígidas. Este tipo de robots tienen numerosas ventajas frente a los robots rígidos como son estructura ligera, baja inercia, pueden desplazar grandes cargas en grandes zonas de trabajo, y velocidades y aceleraciones elevadas.

La utilización de robots operados mediante cables es una alternativa prometedora frente a los mecanismos rígidos en muchas aplicaciones industriales en las que es necesario el desplazamiento de carga y posicionamiento Albus et. al. (1993), Bruckmann et. al. (2013) medición de coordenadas Jeong et. al. (1998), Octaviano et. al. (2002) dispositivos hápticos Williams (1998), robots de construcción Pinto et. al.

(2017) y robots de rehabilitación Homma et. al. (2003), Tappeiner et. al. (2018).

Un CDPR típico está compuesto de tres partes; una plataforma estática, una plataforma móvil y varios cables que unen la plataforma móvil y la estática. Los cables pueden cambiar de longitud mediante un conjunto de poleas o tambores actuados por motores ubicados en la plataforma fija.

Una característica de los CDPR que los diferencia de los robots de uniones fijas es que los cables solo pueden realizar esfuerzos de tracción lo que obliga a incrementar el número de cables para restringir los grados de libertad. Un CDPR con n grados de libertad (DOF) y operado por m cables se puede clasificar en tres tipos de acuerdo a su capacidad de movimiento Quian et. al. (2018). No restringido cuando $n+1 > m$, completamente restringido cuando $n+1 = m$ y sobre restringido cuando $n+1 < m$. En el caso de robots no restringidos se suele utilizar la gravedad para posicionar el EF aunque una desventaja importante es que perturbaciones externas o del propio movimiento hace que se dificulte el posicionamiento.

En este artículo se presenta el desarrollo de un prototipo de robot operado por cables que permita el acceso a superficies verticales. El objetivo es suspender mediante cables un marco o canasta que pueda desplazarse paralela a la superficie mediante un conjunto de cables y poleas accionadas por motores. Para verificar ese desarrollo se ha utilizado un tablero vertical de 2x2 metros en el que se ha suspendido un marco mediante 8 cables dispuestos paralelos 2 a dos, que pueden cambiar su longitud mediante su enrollamiento en 4 poleas accionadas por 4 motores. Según lo visto anteriormente se trata de una configuración sobre-

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: raul.gomez@alumnos.uva.es (Primer A. Autor), ezalama@ei.i.uva.es (Segundo B. Autor), jaigomez@ei.i.uva.es (Tercer C. Autor)

restringida que confiere una mayor estabilidad a la plataforma durante el movimiento.

Este artículo está estructurado de la siguiente forma. En la sección 3 se describe el modelo cinemático y dinámico de un robot de cables planar dispuesto verticalmente. En la sección 3 se describe el cálculo de trayectorias mediante interpolación lineal y circular. En la sección 4 se describe los elementos y configuración del desarrollo realizado. La sección 5 se dedica a mostrar los resultados obtenidos y la sección 6 al análisis de las conclusiones.

2. Modelo cinemático y dinámico

Se dispone de un sólido rígido o marco suspendido por 4 cables l_1, l_2, l_3 y l_4 (ver figura 1). Las coordenadas del punto de unión del sólido con el cable a_1, a_2, a_3, a_4 en un sistema de referencia M ligado al sólido son:

$${}^M \mathbf{a}_i = [d_i \cos(\alpha_i) \quad d_i \sin(\alpha_i)]^T \quad i=1,2,3,4 \quad (1)$$

siendo d_i la distancia entre el punto M y el punto i , y α_i el ángulo respecto al sistema de referencia M .

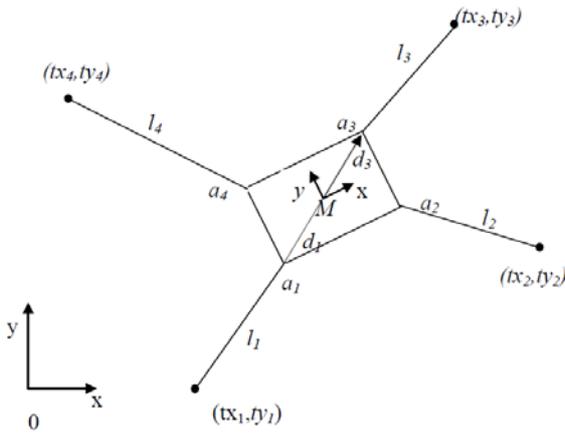


Figura 1: Marco suspendido por 4 cables.

La matriz de transformación del sistema de referencia M respecto al sistema de referencia 0 es:

$${}^0 \mathbf{T}_M = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x \\ \sin \theta & \cos \theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

por lo que la posición de a_i con respecto al sistema de referencia 0 es:

$$\begin{bmatrix} {}^0 \mathbf{a}_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 \mathbf{T}_M \begin{bmatrix} {}^M \mathbf{a}_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + d_i \cos(\theta) \cos(\alpha_i) - d_i \sin(\theta) \sin(\alpha_i) \\ y + d_i \sin(\theta) \cos(\alpha_i) + d_i \cos(\theta) \sin(\alpha_i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Los puntos de suspensión donde se ubican las poleas respecto al sistema de referencia 0 vienen dados por:

$${}^M \mathbf{t}_i = \begin{bmatrix} tx_i \\ ty_i \end{bmatrix} \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

El vector del cable i (de a_i a t_i) viene dado por:

$$l_i = \begin{bmatrix} l_{ix} \\ l_{iy} \end{bmatrix} = {}^0 \mathbf{t}_i - {}^0 \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} tx_i - x - d_i \cos(\theta) \cos(\alpha_i) + d_i \sin(\theta) \sin(\alpha_i) \\ ty_i - y - d_i \sin(\theta) \cos(\alpha_i) + d_i \cos(\theta) \sin(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Realizando un análisis del equilibrio estático del marco pueden obtenerse la tensión que tiene que soportar el cable T_i .

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 & \sum_i^4 T_i \cos \gamma_i &= 0 \\ \sum F_y &= 0 & \sum_i^4 T_i \sin \gamma_i + mg &= 0 \\ \sum M_z &= 0 & \sum_i^4 T_i r_i &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

donde

$$\cos \gamma_i = \frac{l_{ix}}{\sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2}}, \quad \sin \gamma_i = \frac{l_{iy}}{\sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2}}$$

y r_i es la distancia mínima entre el punto M centro del marco y el eje del cable i . Este valor viene definido por $r_i = d_i \sin(\theta + \alpha_i - \gamma_i)$.

En este caso el sistema es sobre-restringido solo son necesarios los 2 cables superiores para mantener el cuerpo suspendido, utilizando los otros dos para dotar de estabilidad y evitar desplazamientos oscilaciones debidos a la inercia durante aceleraciones y deceleraciones. Por ello la principal fuerza a vencer es la gravedad, y la tensión del cable depende de la posición del marco y más concretamente del $\sin \gamma_i$. Los casos más desfavorables son en los que los cables tienden a disponerse horizontalmente ($\gamma_3 = 180, \gamma_4 = 360$) en el que lleva a valores de T_3 y/o T_4 infinito.

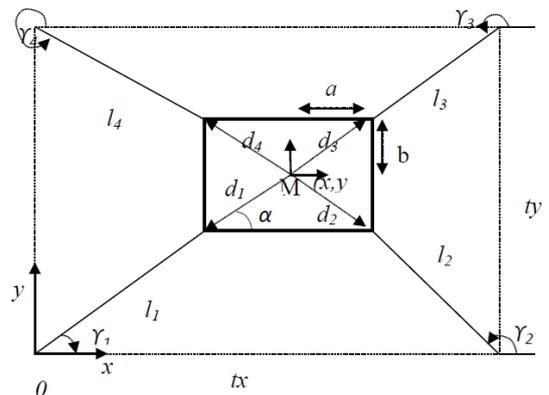


Figura 2: Configuración horizontal con cables cruzados.

En el caso particular de un marco restringido horizontalmente ($\theta=0$) de anchura $2a$ y altura $2b$ con los puntos de suspensión ubicados en las esquinas de un

rectángulo de anchura tx y altura ty tal y como se muestra en la figura 2.

Sustituyendo en la ecuación 5 para ($tx_1=0, ty_1=0, tx_2=tx, ty_2=0, tx_3=tx, ty_3=ty, tx_4=0, ty_4=ty, \theta=0, d_i \cos(\alpha_i)=a, d_i \sin(\alpha_i)=b$) se obtiene la cinemática inversa que relaciona la longitud de cada uno de los cables en función de la posición del centro del marco deseada.

$$l_{1x} = x - a \quad (6)$$

$$l_{1y} = y - b \quad (7)$$

$$l_{2x} = tx - x - a \quad (8)$$

$$l_{2y} = y - b \quad (9)$$

$$l_{3x} = tx - x - a \quad (10)$$

$$l_{3y} = ty - y - b \quad (11)$$

$$l_{4x} = x - a \quad (12)$$

$$l_{4y} = ty - y + b \quad (13)$$

y teniendo en cuenta que

$$l_i = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2} \quad (14)$$

se obtiene:

$$l_1 = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (15)$$

$$l_2 = \sqrt{(tx - x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (16)$$

$$l_3 = \sqrt{(tx - x - a)^2 + (ty - y - b)^2} \quad (17)$$

$$l_4 = \sqrt{(x - a)^2 + (ty - y - b)^2} \quad (18)$$

Que representan las ecuaciones de la cinemática inversa. Para obtener la cinemática directa se puede obtener la x de las ecuaciones (6), (8) y (14) y teniendo en cuenta que $l_{1y} = l_{2y}$.

$$x = a + \sqrt{l_1^2 - \frac{2(l_1^2 l_2^2 + l_1^2 (tx - 2a)^2 + l_2^2 (tx - 2a)^2) - l_1^4 - l_2^4 - (tx - 2a)^4}{4(tx - 2a)^2}} \quad (19)$$

Análogamente se puede obtener el valor de y de las ecuaciones (7),(13) y (14) y teniendo en cuenta que $l_{1x} = l_{4x}$.

$$y = b + \sqrt{l_1^2 - \frac{2(l_1^2 l_4^2 + l_1^2 (ty - 2b)^2 + l_4^2 (ty - 2b)^2) - l_1^4 - l_4^4 - (ty - 2b)^4}{4(ty - 2b)^2}} \quad (20)$$

3. Cálculo de trayectorias

La trayectoria se define como la configuración que deben tener las longitudes de los cables l_1, l_2, l_3 y l_4 en cada instante para permitir desplazar el efector final de una posición inicial (x_i, y_i) y hasta una posición final (x_f, y_f) siguiendo un

determinado camino. Con el fin de determinar la trayectoria se han implementado 2 interpoladores que permitan garantizar el movimiento sincronizado de los 4 ejes y que se correspondan con órdenes de movimiento genéricas en lenguaje G-Code como son la interpolación lineal e interpolación circular.

3.1. Interpolación lineal

El interpolador lineal de trayectoria determina la secuencia x_t, y_t que mediante las ecuaciones (15) –(18) permita determina la longitud de cada cable en un instante dado $l_i(t)$. Esto permitirá al efector final desplazarse de (x_i, y_i) a (x_f, y_f) siguiendo una línea recta con una velocidad v_t y aceleración a_t .

$$x_t = x_{t-1} + \frac{v dt}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (21)$$

$$y_t = y_{t-1} + m \frac{v dt}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (22)$$

$$m = \frac{(y_f - y_i)}{(x_f - x_i)} \quad (23)$$

donde $x_0=x_i, y_0=y_i$ y v es la velocidad de desplazamiento que debe seguir un perfil de desplazamiento trapezoidal de forma que durante las fases de aceleración / deceleración la v se incrementa/decrementa cada dt un valor at . dt hasta el valor máximo $v=vt$ tal y como se muestra en la figura 3.

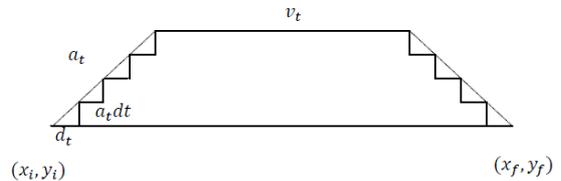


Figura 3: Perfil trapezoidal de velocidad.

3.2. Interpolación circular

Para el cálculo de la interpolación circular es necesario determinar la circunferencia que pasa por los puntos (x_i, y_i) y (x_f, y_f) para un radio R dado. Una vez calculado el centro de la circunferencia (x_c, y_c) la secuencia de puntos (x_t, y_t) vendrá dada por:

$$x_t = x_c + R \cos(\theta_t) \quad (24)$$

$$y_t = y_c + R \sin(\theta_t) \quad (25)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + wdt \quad (26)$$

donde w es la velocidad angular.

4. Desarrollo del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se ha utilizado un tablero de $tx=1.085m$ $ty=1.310m$. Como efector final se ha fabricado mediante impresión 3D un marco de $0.1x0.1m$ ($a=0.05m, b=0.05m$) con una profundidad de $50mm$. Sobre este marco se ubicado un mecanismo que permite aproximar o alejar un rotulador al tablero con el fin de visualizar las

trayectorias que realiza el efector final. La masa total del conjunto es de $m=0,213kg$.

Para determinar las características de los motores es necesario calcular las tensiones de los cables cuando éstas alcanzan valores mayores. El caso más desfavorable, es cuando el marco se encuentra en la posición más elevada, es decir cuando $y_m \rightarrow 0$ en cuyo caso la tensión de los cables superiores tiende a infinito apenas hay componente vertical de la tensión para compensar la fuerza de la gravedad. La tensión de los cables 1,2 se considera despreciable pues únicamente debe evitar el balanceo de la carga.

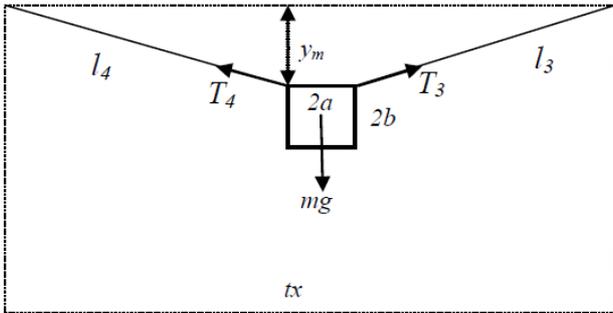


Figura 4. Configuración en la que los motores deben suministrar mayor torque.

Según la figura 4 el valor de la tensión de los cables superiores cuando $T_i=T_3=T_4$ es.

$$T_i = \frac{mg \sqrt{y_m + (tx/2 - a)^2}}{2y_m} \quad (27)$$

Para el enrollar y desenrollar los cables se han utilizado poleas de diámetro $d=0.04m$ por lo que el torque estático que debe suministrar cada motor debe ser de

$$Min_i = \frac{dT_i}{2} \quad (28)$$

Se ha elegido un valor de $y_m = 0,2m$ que no restringe sustancialmente el área de operación. En este caso para esa posición el valor de la tensión de los cables 4,5 es de $T_i=4.98N$, siendo el torque estático que debe suministrar el motor de $Min_i=0,2Nm$.

La velocidad de rotación máxima que debe girar cada motor en revoluciones por minuto debe ser

$$n_{in} = \frac{60v_l}{\pi d} \quad (29)$$

donde v_l es la velocidad de desplazamiento del cable.

Además los motores debes suministrar torque para suministrar aceleración a la carga. En este caso el torque de aceleración que tiene que suministrar cada motor es:

$$M_{in,\alpha} = \left(J_{in} + J_1 + m \frac{d^2}{4} \right) \frac{\pi}{30} \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_\alpha} \quad (30)$$

donde J_{in} es el momento de inercia del motor, J_1 es el momento de inercia de la polea y $\Delta n_{in}/\Delta t_\alpha$ es la aceleración,

o el tiempo en alcanzar la velocidad máxima. Se considera que el momento de inercia del motor despreciable comparando con momento de inercia de la polea y de la masa del EF a desplazar. Para un momento de inercia de la polea de $J_1 = 4.5 \cdot 10^{-5} kgm^2$, $v_l = 0,025m/s$, y $\Delta t_\alpha = 0,2 s$ y aplicando las ecuaciones (26) y (27) se obtiene un valor de torque de aceleración de $M_{in,\alpha} = 0.00078Nm$. Este valor se considera despreciable frente al torque estático calculado anteriormente. Para realizar las pruebas se han utilizados 4 motores paso a paso Nema 17 42SHD0001-24B capaces de suministrar un torque de $0.26 Nm$ y 200 pulsos por vuelta.

Para el control de los motores se ha utilizado un microcontrolador arduino uno con la tarjeta Cnc-shield que se muestra en la figura 5.

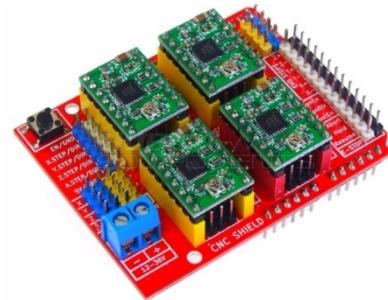


Figura 5. Cnc-shield para arduino

La tarjeta Cnc-shield permite controlar 4 motores paso a paso independientes cada uno con su propio controlador de potencia, en este caso los Pololu A4988 o los Pololu DRV8825. Además, sus conexiones permiten incorporar al controlador finales de carrera, sensores o salidas de relé.

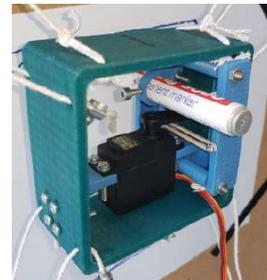


Figura 6. Mecanismo de escritura activado mediante un servomotor.

Para la generación de movimientos se ha realizado un intérprete de órdenes en lenguaje Gcode lo que permite obtener fácilmente las trayectorias utilizando programas para convertir a lenguaje Gcode desde diseños en formato vectorial o desde modelos en formato stl utilizado ampliamente para la impresión 3D como slicer o cura. Los comandos gcode implementados son: G90 movimiento en coordenadas absolutas, G91 movimiento en coordenadas relativas, G00 movimiento controlado de alta velocidad, G01 movimiento con interpolación lineal, G2, G3 movimiento con interpolación circular en sentido horario y antihorario, G28 retorno a la posición home, MAN para el movimiento controlado mediante joystick, M08 y M09 para activar o desactivar el tercer eje, en este caso para acercar o alejar el

mecanismo de escritura al tablero. En la figura 6 se muestra un detalle del sistema de escritura activado mediante un servomotor. Además se incluyen comandos específicos para cambiar la configuración de diversos parámetros de calibración del dispositivo como velocidad máxima, aceleración, tiempo de muestreo del interpolador, etc.

El estudio cinemático y dinámico se han considerado condiciones ideales tanto en los cables (inextensibles, sin deflexión por la masa, indeformables, etc), actuadores, plataforma y poleas Lorenz (2016). Una de las condiciones que más afecta es la consideración de suponer el punto de inserción del cable (tx_i, ty_i en figura 1) fijo cuando en realidad es un punto tangente a la polea que varía con la posición del EF. Para minimizar este error se han utilizado dos pequeñas poleas pasacables que permiten limitar el error de posicionamiento manteniendo el punto de tangencia del cable constante. En la figura 7 se muestra un detalle de la solución implementada.

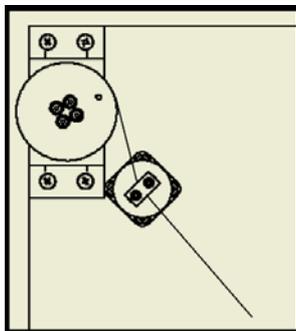


Figura 7. Detalle de poleas pasacables para limitar el punto de tangencia de polea y cable.

En la figura 8 se muestra el prototipo final en el que se muestran los cuatro conjuntos de motores y poleas sobre un tablero vertical sobre el que se ha colocado un papel para visualizar las trayectorias realizadas.

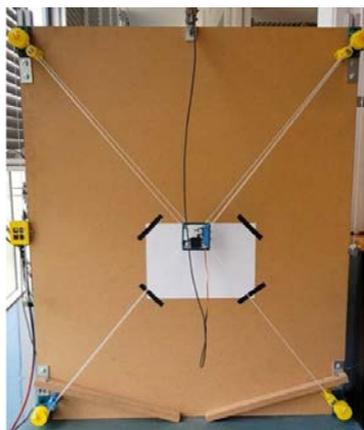


Figura 8. Prototipo final desarrollado.

5. Resultados experimentales

Con el fin de contrastar la precisión del prototipo, se ha elaborado un ensayo de repetitividad. El ensayo consiste en la realización de cuatro trayectorias en línea recta formando

un cuadrado de 200×200 mm. El prototipo dibujará desde la posición de partida del ensayo hasta la misma posición de llegada una vez completado el rectángulo. Una vez definidos los dos puntos, se realizará la circunferencia cuyo centro coincide con el punto de posición de partida y cuyo radio la distancia al punto de llegada. Este radio es la desviación que ha cometido el robot. Finalmente se traza una circunferencia inscrita en el cuadrado realizado para verificar las trayectorias mediante interpolación circular.



Figura 9. Resultado de la desviación final de la trayectoria cuadrada de 200×200 mm para 10 repeticiones.

En la figura 9 se muestra el error de posicionamiento final para 10 repeticiones. Excepto para el primer experimento se observa un error final inferior a los 6 mm, lo que supone un error medio de un 0.7% respecto a la distancia recorrida.

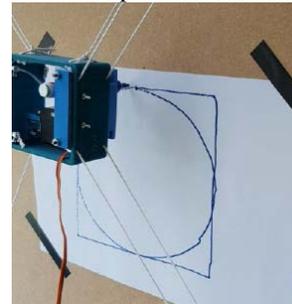


Figura 10. Trayectoria realizada en los experimentos.

En la figura 10 se muestra una imagen de la trayectoria realizada. Se observa que se producen algunos pequeños saltos en la trayectoria que son debidos al salto de pasos en el motor debido a las limitaciones de torque de los motores y las tensiones de los cables. Hay que tener en cuenta que en el análisis de selección del motor se han considerado que la tensión de los cables inferiores es nula o la mínima necesaria para evitar el desplazamiento perpendicular a la superficie del EF. Sin embargo se ha observado que es necesaria mantener una tensión apreciable para mantener el EF estable sin oscilaciones. Para mejorar las prestaciones y reducir el error se deberían utilizar servomotores con mayor torque. Además en los puntos de amarre de los cables inferiores sobre el marco se podría incluir un sistema de amortiguación que limite la tensión de los cables.

Conclusión

En este artículo se ha desarrollado un robot para operar en superficies verticales mediante cables. El artículo presenta el

modelo cinemático directo e inverso del sistema propuesto, así como el desarrollo de un interpolador lineal y circular para la generación de trayectorias. Para la implementación física del prototipo se han utilizado motores paso a paso Nema 17, un microcontrolador arduino y una tarjeta Cnc-shield con drivers Pololu A4988. Se ha desarrollado un intérprete de comandos G-code lo que facilita la utilización de programas Cam convencionales para la generación de órdenes de movimiento. Se ha mostrado la viabilidad del sistema propuesto mediante experimentación, obteniendo un error de posicionamiento inferior al 1%. No obstante se han mostrado algunas limitaciones en cuanto al torque de motores y resolución de posicionamiento de los motores. Como mejoras del sistema se propone utilizar servomotores con mayor torque y un sistema de amortiguación para cables inferiores. Como futuras líneas de desarrollos se pretende abordar el desarrollo a mayor escala y en aplicaciones concretas en el ámbito de fachadas de edificios como son el pintado y enlucido de fachadas y la limpieza de fachadas acristaladas.

English Summary

Cable driven robot for operation on vertical surfaces

Abstract

This work presents the design, programming and design of a 3DOF cable driven robot capable of generating any trajectory, circular and linear, along a vertical work surface. The main objective of the work is the development of a scalable system capable of operating on vertical surfaces for example its application in the field or industrial or in the facade treatment of buildings as cleaning or rehabilitation. The article presents the development of the kinematic, dynamic and control model. A low-cost prototype has been developed that demonstrates the functionality of the system with G-Code programming, which simplifies the generation of trajectories by using conventional Cad-Cam tools and 3D printing tools such as Slicer or Cura.

Keywords:

Cable driven robot, parallel robot, direct kinematica, inverse kinematics, control, trajectory.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación de la Junta de Castilla y León (Ref. VA233P18) cofinanciado con fondos FEDER.

Referencias

- J. Albus, R. Bostelman, N. Dagalakakis, The mist robocrane, *Journal of Robotic Systems* 10 (5) (1993) 709–724.
- T. Bruckmann, et al. (2013). 'An energy-efficient wire-based storage and retrieval system'. In *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2013 IEEE/ASME International Conference on, pp. 631–636.
- K. Homma, O. Fukuda, J. Sugawara, Y. Nagata, M. Usuba, A wire-driven leg rehabilitation system: Development of a 4-dof experimental system, in: *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Kobe, Japan, 2003, pp. 908–913.
- J.W. Jeong, S.H. Kim, Y.K. Kwak, C.C. Smith, Development of a parallel wire mechanism for measuring position and orientation of a robot end-effector, *Journal of Mechatronics* 8 (1998) 845–861.
- V. Lorenz. *Modeling Techniques and Reliable Real-Time Implementation of Kinematics for Cable-Driven Parallel Robots using Polymer Fiber Cables*. 2016. Fraunhofer Verlag. ISSN: 2195-2892.
- E. Ottaviano, M. Ceccarelli, M. Toti, C.A. Carrasco, Catrasys (casino tracking system): A wire system for experimental evaluation of robot workspace, *Journal of Robotics and Mechatronics* 14 (1) (2002) 78–87.
- A M Pinto, E Moreira, J Lima, et al. A cable-driven robot for architectural constructions: a visual-guided approach for motion control and path planning. *Autonomous Robots*, 2017, 41(7): 1487-1499.
- S. Qian et al. A Review on Cable-driven Parallel Robots. *Chin. J. Mech. Eng.* (2018) 31:66. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0267-9>
- L. Tappeiner , E. Ottaviano, M.L. Husty. (2018) A Cable-Driven Robot for Upper Limb Rehabilitation Inspired by the Mirror Therapy. In: Zeghloul S., Romdhane L., Laribi M. (eds) *Computational Kinematics. Mechanisms and Machine Science*, vol 50. Springer, Cham
- R.L. Williams II, Cable-suspended haptic interface, *Journal of Virtual Reality* 3 (3) (1998) 13–21.