

Robot de cables para la limpieza de fachadas

Sergio Santamaria^{a,*}, Eduardo Zalama^{a,b,*}, Raúl Gómez^{a,b}, Pablo Muñoz^b, Jaime Gómez-García-Bermejo^{a,b}

^a Universidad de Valladolid, ITAP, Paseo Prado de la Magdalena 3-5, 47011 Valladolid

^b Fundación Cartif. Parque Tecnológico de Boecillo parcela 205. 47151 Boecillo, Valladolid

To cite this article: Santamaria, S., Zalama, E., Gómez, R., Muñoz, P., Gómez-García-Bermejo, J. 2023. Cable driven robot for cleaning facades. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. 20, 187-198. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.18695>

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un robot de cables para la limpieza de fachadas de edificios. El sistema está compuesto por una cesta con rodillo escamoteable, sistema pulverizador de agua y escurridor. La cesta está suspendida mediante dos grúas motorizadas que permiten posicionar la cesta en cualquier ubicación de una fachada. El sistema está programado sobre tres controladores Esp32 que se comunican de forma inalámbrica mediante protocolo ESPNOW. El manejo se realiza mediante un mando a distancia que permite el movimiento y accionamiento de la cesta de forma manual y programar trayectorias mediante comandos Gcode

Palabras clave: Robot limpieza fachadas, robot de cables, esp32, cinemáticas de robots para control, mecatrónica, planificación y seguimiento de trayectorias.

Cable driven robot for cleaning facades

Abstract

This paper presents the development of a cable driven robot for cleaning facades. The system is made up of a basket with a retractable roller, a water spray system and a drainer. The basket is suspended by means of two motorized cranes that allow the basket to be positioned in any location on a façade. The system is programmed on three Esp32 controllers that communicate wirelessly using the ESPNOW protocol. The handling is done by means of a remote control that allows the movement and actuation of the basket manually and program trajectories by means of Gcode commands.

Keywords: Facades cleaning robot, cable driven robot, esp32, robot kinematics for control, mechatronic, trajectory planning and tracking.

1. Introducción

El acceso a grandes superficies verticales como son las fachadas de edificios para realizar labores de limpieza de fachadas y ventanas 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, como posibles desprendimientos de

herramientas de trabajo, riesgo de caídas en altura, riesgo de golpes, riesgo de cortes y riesgos derivados del uso de productos químicos. 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 robots para la limpieza de fachadas.

Actualmente se pueden encontrar diferentes modelos de robots. Se pueden clasificar en robots domésticos y robots profesionales para la limpieza de fachadas. Los robots suelen disponer de mecanismos de adherencia basados en succión (Mir-Nasiri et al. 2018), en imanes (Akin_ev et al. 2009), o incluso robots aéreos (Vega-Heredia et al. 2019). Estos

*Autor para correspondencia: sergio.santamam@gmail.com

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

sistemas tienen grandes inconvenientes a la hora de llevar a cabo el trabajo y es que, si se presenta una pérdida de adherencia, o corte de suministro existe peligro de que se precipiten al vacío y generen grandes destrozos. A toda la problemática anterior se suma la dificultad para adaptarse a la geometría de edificios tradicionales con entrantes, alféizares, etc.

Una solución para limpiar superficies acristaladas es utilizar robots limpiadores suspendidos y accionados mediante cables (Akinfiyev et al. 2009) (Zhang et al. 2007).

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 (Aracil et al. 2006). Este tipo de robots tienen numerosas ventajas frente a los robots rígidos como son una estructura ligera, baja inercia, pueden desplazar grandes cargas en amplias zonas de trabajo, con velocidades y aceleraciones elevadas.

En este artículo se presenta el desarrollo de un robot operado mediante cables para la limpieza de fachadas. El objetivo es conseguir un sistema de bajo coste, sencillo de desplegar, con comunicación inalámbrica y sistema de control distribuido mediante microcontroladores.

El artículo está estructurado de la siguiente forma. En la sección 2 se describen trabajos relacionados en el ámbito de los robots de cables y, particularmente, de limpieza de cristales o fachadas. En la sección 3 se realiza un estudio cinemático del robot. En la sección 4 se desarrolla el cálculo de trayectorias. En la sección 5 se muestra la estructura del robot. En la sección 6 se expone el sistema computacional del robot. En la sección 7 se desarrolla la cesta suspendida. En la sección 8 se exponen los resultados experimentales y la sección 9 se dedica a las conclusiones.

2. Trabajos relacionados

La utilización de robots operados mediante cables es una alternativa prometedora frente a los mecanismos rígidos en muchas aplicaciones industriales de 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 et al. 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 cual 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 las perturbaciones externas o del propio movimiento hacen que se dificulte el posicionamiento.

Una de las aplicaciones realizadas mediante robots de cables es el desarrollo de simuladores accionados por cables como el CableRobot (Cable-driven parallel robots, 2015). El simulador está compuesto por ocho cables y soporta una cabina sobre la que se puede situar una persona, teniendo una potencia de accionamiento total de 348 kW y una aceleración de $1,5g$ dentro de un espacio de $5 \times 8 \times 5 \text{ m}^3$. Además, su gran espacio de trabajo y capacidades dinámicas hacen que el simulador sea adecuado para un amplio espectro de aplicaciones de realidad virtual. Por lo tanto, CableRobot también puede usarse para simulación de vuelo, así como para la investigación de procesos básicos de percepción en humanos.

Otro ejemplo de robot operado por cables es el sistema CU-Brick (Yulong et al. 2018), capaz de construir de forma autónoma estructuras de ladrillos geométricamente complejas. El sistema consta de un efector final de pinza y los actuadores de cable se pueden montar en estructuras de marcos metálicos en las paredes y techos de edificios, en una variedad de entornos diferentes. El diseño se realiza a través de un software inteligente donde se proporcionan parámetros específicos para que el efector final genere de forma automática la estructura a construir, permaneciendo dentro de la región operativa del robot y determinando parámetros como el número y la ubicación de los ladrillos, de forma que se asegure que la estructura resultante es suficientemente estable.

El robot Hephaestus (Tecnalia, 2021) desarrollado por un grupo de empresas y universidades europeas es capaz de desplazarse a lo largo de fachadas de edificios para realizar labores de montaje y mantenimiento. Los primeros simulacros ya han verificado su aplicación en fachadas de muro cortina. Además, se ha comprobado su precisión milimétrica, mayor que la de una grúa convencional con la que gran parte del trabajo se debe realizar de forma manual. El robot tiene capacidad para mover pesadas piezas, perforar los huecos en los forjados, colocar el anclaje en su posición final y atornillarlo. Estas operaciones las realiza gracias a un robot colaborativo ubicado en la cesta sustentada por los cables.

Dentro del ámbito de los robots limpiadores de fachadas operados por cables cabe destacar el robot Gekko (Hightec gekko facade, 2023) (Figura 1), diseñado por Serbot Swiss Innovations (Serbot swiss innovations, 2023). Se trata de un robot suspendido por un cable de acero, que se desplaza por la fachada mediante carriles anclados a la azotea del edificio sobre los que se desplaza una sola grúa. Es posible su instalación en las unidades de mantenimiento de edificios existentes. Dispone de una capacidad máxima de limpieza de $400 \text{ m}^2/\text{h}$.

Con una menor eficiencia de limpieza, podemos encontrar el robot SkyBoy (Wang et al. 2010). Este robot dispone de un robot vertical, encargado de hacer ascender o descender un

robot horizontal que, mediante movimientos horizontales, llevara a cabo la limpieza de la superficie.



Figura 1: Robot Hightec Gekko

El robot Kite desarrollado por (Kite robotics, 2023) permite la limpieza de fachadas acristaladas. Usando 4 cables conectados a las 4 esquinas de la fachada, el robot se mueve tanto vertical como horizontalmente y limpia la fachada de una sola vez. Este robot usa un cepillo giratorio junto con agua tratada con osmosis inversa para eliminar la suciedad. El uso de agua tratada de esta forma permite que no queden marcas cuando el robot finaliza su limpieza y el agua se evapora. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de este robot limpiando una fachada de cristal.



Figura 2: Robot Kite limpiando superficie acristalada vertical

No obstante, tiene el inconveniente que no puede ser utilizado en edificios convencionales con ventanas con alféizar. En el presente artículo se presenta un desarrollo que trata de evitar este inconveniente utilizando una cesta suspendida mediante cables, con rodillo escamoteable que permite acercarse a las ventanas.

Estas y otras alternativas para la limpieza de cristaleras y fachadas se recogen en la Tabla 1, donde se puede comparar su eficiencia de limpieza, así como las posibles limitaciones.

3. Modelo cinemático

Para el desarrollo del robot de limpieza de ventanas se pretende desplazar una cesta con rodillo limpiador sobre la fachada del edificio. En este caso el problema se restringe al movimiento de la cesta en un plano. A continuación, se realiza el análisis cinemático y dinámico de la cesta suspendida.

Se dispone de un sólido rígido o marco suspendido por 4 cables, l_1, l_2, l_3 y l_4 (ver Figura 3). Las coordenadas del punto de unión del sólido con el cable, a_1, a_2, a_3 y a_4 en un sistema de referencia M ligado al sólido, son:

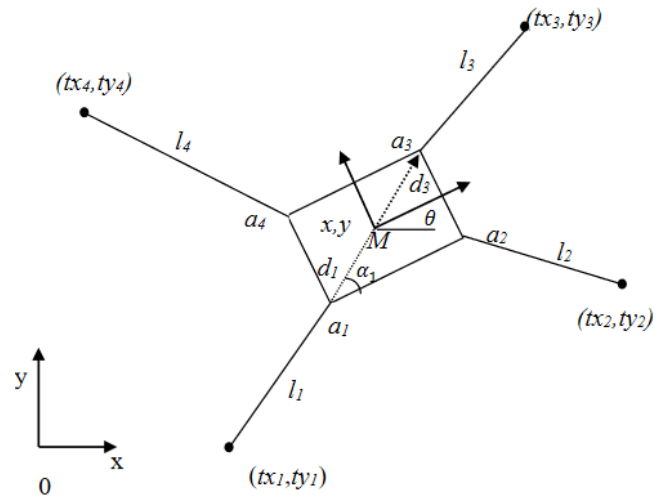


Figura 3. Marco suspendido por 4 cables

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

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

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

Tabla1: Robot de limpieza de cristaleras.

Robot	Eficiencia de limpieza (m^2/h)	Mecanismo de movimiento	Limitaciones
TITO 500 (Akinfiyev et al. 2009)	1500	Cables suspendidos	Obstáculos en fachada
BMFR (Moon et al. 2015)	403,2	Cables suspendidos y railes	No apto para todas superficies
Hightec Gekko	400	Cables suspendidos	Obstáculos en fachada
Kite	300	Cables suspendidos	Obstáculos en fachada máximo 200mm
SkyBoy	95	Cinchas suspendidas	Obstáculos en fachada
Windoro (Choi et al. 2011)	62	Ruedas	Obstáculos en fachada

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

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

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

$${}^0\mathbf{t}_i = \begin{bmatrix} tx_i \\ ty_i \end{bmatrix} \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

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

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

El análisis del equilibrio estático del marco permite obtener la tensión que tiene que soportar el cable T_i .

$$\sum F_x = 0 \quad \sum_i T_i \cos \gamma_i = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_y = 0 \quad \sum_i T_i \sin \gamma_i + mg = 0 \quad (7)$$

$$\sum M_z = 0 \quad \sum_i T_i r_i = 0 \quad (8)$$

donde

$$\cos \gamma_i = \frac{l_{ix}}{\sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2}}, \quad \sin \gamma_i = \frac{l_{iy}}{\sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2}} \quad (9)$$

siendo γ_i el ángulo formado por la horizontal y l_i y r_i 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 precisa 2 cables superiores para mantener el cuerpo suspendido, mientras que los otros dos se utilizan para dotar de estabilidad, mantener la horizontalidad de la cesta y evitar desplazamientos y oscilaciones debidos a la inercia durante las aceleraciones y deceleraciones. Por ello, la principal fuerza a vencer es la gravedad y la tensión del cable depende de la posición del marco, más concretamente del $\sin \gamma_i$. Los casos más desfavorables son aquéllos en los que los cables tienden a disponerse horizontalmente ($\gamma_3 = 180, \gamma_4 = 360$), lo que lleva T_3 y/o T_4 a valores infinitos.

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 t_x y altura t_y tal y como se muestra en la Figura 4.

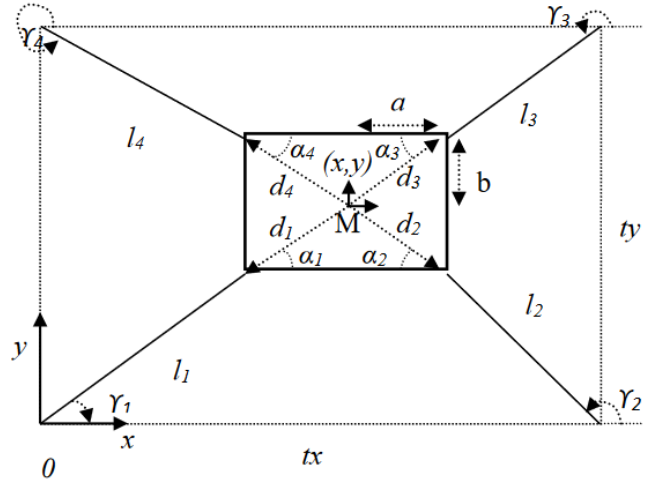


Figura 4: Configuración horizontal con cables cruzados.

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

$$l_{1x} = x - a \quad (10)$$

$$l_{1y} = y - b \quad (11)$$

$$l_{2x} = tx - x - a \quad (12)$$

$$l_{2y} = y - b \quad (13)$$

$$l_{3x} = tx - x - a \quad (14)$$

$$l_{3y} = ty - y - b \quad (15)$$

$$l_{4x} = x - a \quad (16)$$

$$l_{4y} = ty - y + b \quad (17)$$

Teniendo en cuenta que

$$l_i = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2} \quad (18)$$

se obtiene

$$l_1 = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (19)$$

$$l_2 = \sqrt{(tx - x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (20)$$

$$l_3 = \sqrt{(tx - x - a)^2 + (ty - y - b)^2} \quad (21)$$

$$l_4 = \sqrt{(x - a)^2 + (ty - y - b)^2} \quad (22)$$

que representan las ecuaciones de la cinemática inversa.

Para obtener la cinemática directa se puede calcular x eliminando $(y - b)^2$ en las ecuaciones (19) y (20).

$$x = a + \sqrt{l_1^2 - \frac{2(l_1^2 l_2^2 + l_1^2 (tx - 2a)^2 + l_2^2 (tx - 2a)^2) - l_1^4 - l_2^4 - (tx - 2a)^4}{4(tx - 2a)^2}} \quad (23)$$

El valor de y se puede obtener a partir la ecuación (22) sustituyendo el valor de x obtenido en (23).

$$y = b + \sqrt{\frac{2(l_1^2 l_4^2 + l_1^2 (ty - 2b)^2 + l_4^2 (ty - 2b)^2) - l_1^4 - l_4^4 - (ty - 2b)^4}{4(ty - 2b)^2}} \quad (24)$$

$$x_t = x_c + R \cos(\theta_t) \quad (28)$$

$$y_t = y_c + R \sin(\theta_t) \quad (29)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + w d_t \quad (30)$$

4. Cálculo de trayectorias

La trayectoria se define como la configuración que deben adoptar las longitudes de los cables l_1, l_2, l_3 y l_4 en cada instante para permitir el desplazamiento del efector final desde una posición inicial (x_i, y_i) hasta una posición final (x_f, y_f) a lo largo de un determinado camino. Con el fin de determinar la trayectoria, se han implementado 2 interpoladores que permiten garantizar el movimiento sincronizado de los ejes y se correspondan con órdenes de movimiento genéricas en lenguaje Gcode como son la interpolación lineal y la interpolación circular.

4.1 Interpolación lineal

El interpolador lineal de trayectoria determina la secuencia x_t, y_t que, mediante las ecuaciones (19) – (22), permita determinar la longitud de cada cable en un instante dado $l_i(t)$. Esto permitirá desplazar el efector final de (x_i, y_i) a (x_f, y_f) a lo largo de una línea recta con velocidad v y aceleración a_t .

$$x_t = x_{t-1} + \frac{v d_t}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (25)$$

$$y_t = y_{t-1} + m \frac{v d_t}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (26)$$

$$m = \frac{(y_f - y_i)}{(x_f - x_i)} \quad (27)$$

Aquí, $x_0 = x_i, y_0 = y_i$ y v es la velocidad de desplazamiento que debe seguir un perfil de desplazamiento trapezoidal. Durante las fases de aceleración/deceleración, la velocidad v se incrementa/decrementa cada d_t un valor $a_t d_t$ hasta el valor máximo $v = v_t$, tal y como se muestra en la Figura 5.

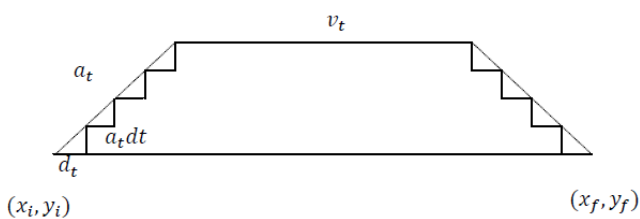


Figura 5: Perfil trapezoidal de velocidad.

4.2 Interpolación circular

Para el cálculo de la interpolación circular es preciso 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:

donde w es la velocidad angular.

5. Estructura del robot

En (Gómez et al. 2019), desarrollamos un robot de tres 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 robot desarrollado operaba sobre un tablero de $1x1,3m$ y era capaz de dibujar trayectorias Gcode sobre la superficie. En el presente trabajo hemos extendido el desarrollo para su aplicación a edificios reales en operaciones de limpieza de fachadas. Así, el CDPR propuesto está compuesto por una plataforma o cesta móvil en la que se incluyen los elementos necesarios para la limpieza. La cesta está suspendida mediante 2 cables que, al modificar su longitud mediante el enrollamiento en dos tambores accionados por motores, permiten posicionar la cesta en cualquier ubicación de la fachada. En este caso no se incluyen las motorizaciones de los cables inferiores por lo que el equilibrado de la cesta, cuando ha sido necesario, se ha realizado mediante el tensado manual de los cables.

5.1 Cesta suspendida por cables con rodillo retráctil

La cesta es la encargada de llevar a cabo la limpieza de las fachadas. Sobre ésta se encuentran todos los elementos necesarios para llevar a cabo la operación. Consta de un rodillo de nylon giratorio encargado de eliminar los residuos más incrustados, unos difusores con los que se pulveriza el fluido de limpieza, un limpia escurridor para eliminar los restos de fluido de la superficie a limpiar y una guía móvil capaz de acercar o alejar todo el sistema de limpieza por completo.

Rodillo, guía y escurridor son accionados mediante motores de corriente continua. El difusor de agua es accionado mediante una mini bomba de limpiaparabrisas de camión. Los accionamientos se controlan mediante relés activados por un microcontrolador ESP32 (Espressif, 2018). En la Figura 6 se muestra un detalle de la cesta y en la sección 7 se proporciona una descripción detallada de sus distintos elementos.

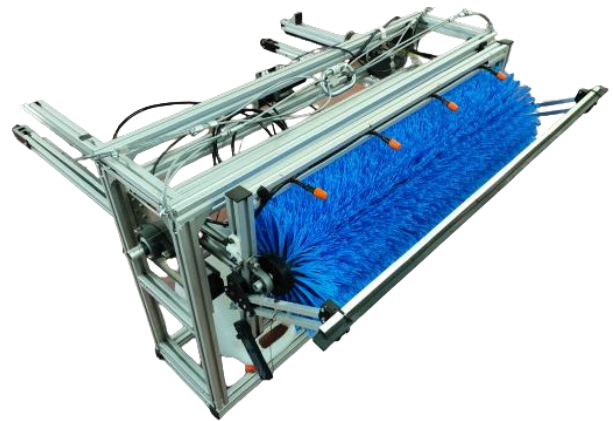


Figura 6: Cesta de limpieza

La cesta en su conjunto, con todos los elementos, depósito de agua incluido, tiene una masa total de 40Kg.

Para determinar las características de los motores es necesario calcular las tensiones de los cables cuando éstas alcanzan valores mayores. El caso más desfavorable, surge 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 dado que apenas hay componente vertical de la tensión para compensar la fuerza de la gravedad. La tensión de los cables inferiores 1 y 2 se considera despreciable pues únicamente debe evitar el balanceo de la carga.

Según la Figura 7 el valor de la tensión de los cables superiores cuando $T_i = T_3 = T_4$ es:

$$T_i = \frac{mg \sqrt{y_m + (tx/2 - a)^2}}{2y_m} \quad (31)$$

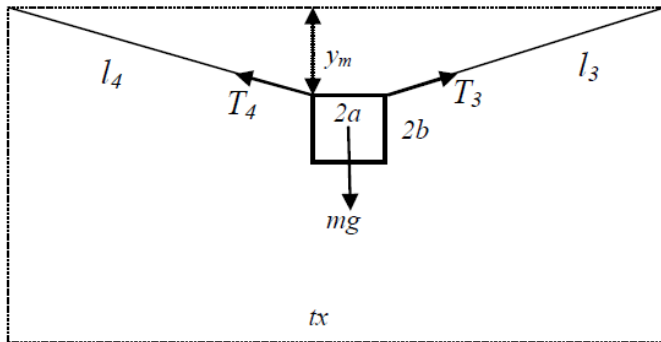


Figura 7. Configuración en la que los motores deben suministrar mayor torque.

Para 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 es:

$$Min_i = \frac{dT_i}{2} \quad (32)$$

Se ha elegido un valor de $y_m = 2m$ que no restringe sustancialmente el área de operación teniendo en cuenta la altura de las grúas (1,5m) y el propio forjado del edificio. Para esa posición, el valor de la tensión de los cables 3 y 4 es de $T_i = 1,189N$ y el torque estático que debe suministrar el motor de $Min_i = 23,8Nm$ (valores $a=0,5m$, $b=0,375m$, $T_x=20m$).

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

$$n_{in} = \frac{60v_l}{\pi d} \quad (33)$$

donde v_l es la velocidad de desplazamiento del cable.

Además, los motores tienen que proporcionar torque para suministrar aceleración a la carga. En concreto, el torque de aceleración que debe proporcionar cada motor es:

$$M_{in,\alpha} = \left(J_{in} + J_1 + m \frac{d^2}{4} \right) \frac{\pi}{30} \frac{\Delta n_{in}}{\Delta t_a} \quad (34)$$

donde J_{in} es el momento de inercia del motor, J_1 es el momento de inercia de la polea y $\Delta n_{in}/\Delta t_a$ es la aceleración, o el tiempo en alcanzar la velocidad máxima. Se considera que los momentos de inercia del motor J_{in} y de la polea del efector final a desplazar J_1 son despreciables frente a la masa de la cesta. Para una velocidad del cable de $v_l = 0,1m/s$, y $\Delta t_a = 0,5s$ y aplicando las ecuaciones (33) y (34) se obtiene un valor de torque de aceleración de $M_{in,\alpha} = 0,2Nm$. Este valor se considera poco significativo frente al torque estático calculado anteriormente.

5.2. Estructura mecánica. Grúas.

La cesta está suspendida mediante dos grúas estáticas. Estas se ubican en la azotea del edificio, en los dos extremos de la fachada, pudiendo orientarse para ajustar la distancia a la fachada de forma que cuando el rodillo se acerque a la misma, pueda hacer contacto. El movimiento de la guía conjuntamente con el de la cesta permite sortear obstáculos como son los alféizares de las ventanas. A cada grúa se ha incorporado un motor Propullator 3500-E de 12V DC, 25A, 300W, con reductora de engranajes epicicloidales 153:1 y cable de acero de 5,5mm, que permite una fuerza de tracción máxima de 15.582N y una velocidad de tracción de 0,133m/s. Como se observa, cumple con las especificaciones de torque y velocidad obtenidas en la situación más desfavorable ($V_l = 0,1 m/s$ y $T_i = 1,189N$).

Además, para el control de posicionamiento se ha incluido un codificador incremental OMRON E6B2-CWZ6C con el fin de determinar la longitud del cable extendido, este se encuentra haciendo contacto con el cable de acero gracias a un eje de 8mm de diámetro. Los componentes eléctricos necesarios para el control de los motores y codificador incremental se encuentran en dos armarios eléctricos independientes, donde se alojan ambas fuentes de alimentación de 12V DC, los drivers de potencia que generaran la señal PWM capaz de accionar los motores y un microcontrolador ESP32 dotado de tres convertidores de nivel para adecuar las señales de entrada y salida.

El posicionamiento se lleva a cabo gracias a los comandos Gcode que se reciben de un mando de control remoto. Estos son interpretados de acuerdo a la cinemática y enviados a los drivers correspondientes, que generan la señal PWM que modula la velocidad y el sentido de giro de los motores. Un único microcontrolador ESP32 se encarga de recibir e interpretar los comandos Gcode, calcular las trayectorias de acuerdo a la cinemática y controlar en velocidad y posición los motores para lograr posicionar la grúa.

En la Figura 8 se muestra un detalle de una de las grúas con el motor.



Figura 8: Grúa motorizada.

6. Sistema computacional

Uno de los objetivos de este sistema es lograr un control remoto eficiente y conseguir que los diferentes subsistemas se comuniquen sin cables. Por ello se ha elegido como microcontrolador el modelo ESP32 DEVKIT V1. Este microcontrolador ofrece frente a otros la gran ventaja de que permite establecer conexión Wifi y Bluetooth.

El sistema computacional está compuesto por tres microcontroladores ESP32. Un microcontrolador maestro ubicado en un mando de control se encargará de enviar comandos Gcode a otros dos microcontroladores esclavos. Uno de ellos está ubicado en el armario de control de grúas y controla el posicionamiento de la cesta mediante los motores. El otro se ubica en la cesta para el control de la operación de limpieza.

La comunicación entre los tres microcontroladores se realiza mediante el protocolo ESP-Now (Espressif, 2019), diseñado por Espressif específicamente para sus microcontroladores, que trabaja en la banda de 2.4GHz y es capaz de enviar hasta 250bytes a distancias de entre 100 y 500 metros. El envío de un mensaje precisa únicamente 4ms debido principalmente a la baja sobrecarga. Además, es particularmente rápido en el establecimiento de la conexión, la cual solo se produce en una única ocasión, posteriormente emite sin más. De hecho, es tan rápido que en inicializarse, conectar, emitir y recibir, transcurren únicamente 90ms. Es ideal para proyectos con baterías de ion litio como es el caso del mando.

Disponemos de 3 nodos: uno maestro formado por el mando y dos esclavos formados por la grúa y la cesta. La comunicación entre mando y cesta se hace de forma

unidireccional, enviándose comandos del mando a la cesta. Sin embargo, la comunicación entre el mando y las grúas es bidireccional ya que, además de enviar comandos hacia las grúas, estas deben responder cuando se les solicita información sobre la posición de la cesta. En la Figura 9 se muestra un detalle del esquema de comunicación.

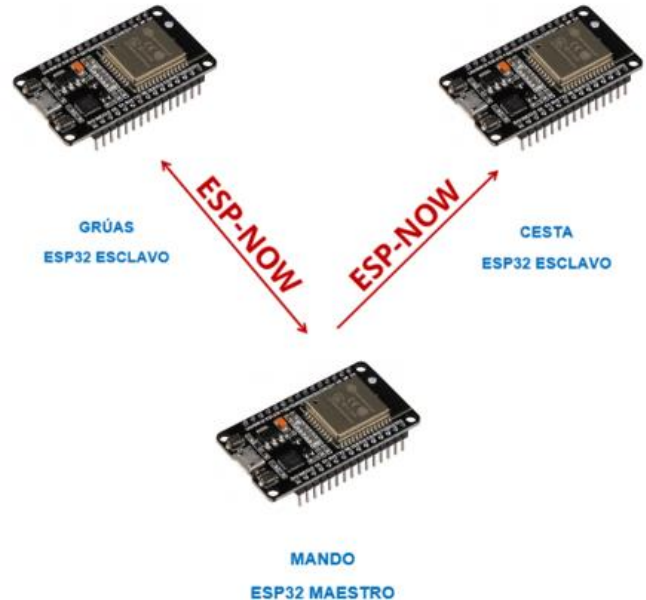


Figura 9: Esquema de comunicación.

Cuando el sistema se inicializa, se establecen las conexiones de los nodos y sus respectivas direcciones MAC (Media Access Control) gracias al protocolo ESP-Now. Una vez establecida la conexión e inicializadas entradas y salidas de los diferentes ESP32, es necesario disponer de la última posición conocida (x,y) de la cesta, que es recuperada de la memoria EEPROM del ESP32 del mando y enviada al ESP32 de las grúas. En caso de que la posición no sea la deseada, es posible calibrar la longitud de los cables para establecer una nueva posición HOME $(0,0)$.

Una vez el sistema se ha inicializado correctamente, podremos seleccionar el modo de funcionamiento desde el control remoto para enviar comandos Gcode a las grúas con el fin de generar la trayectoria deseada, así como a la cesta para accionar los elementos que llevarán a cabo la operación de limpieza. Tras finalizar el archivo o comando Gcode, el ESP32 de las grúas enviará la última posición conocida del TCP (Tool Center Point) al ESP32 del mando para que este pueda almacenar dicha posición en su memoria EEPROM. En la Figura 10 se muestra un esquema de ejecución de los tres microcontroladores ESP32.

La ejecución de cualquier comando Gcode se puede monitorizar a través del interfaz RS232 del ESP32 de las grúas a efectos de depuración o mediante el mando en cuyo display se muestra el comando Gcode en ejecución y la posición del TCP. El mando permite el movimiento manual de la cesta mediante un potenciómetro digital o mediante un programa Gcode.

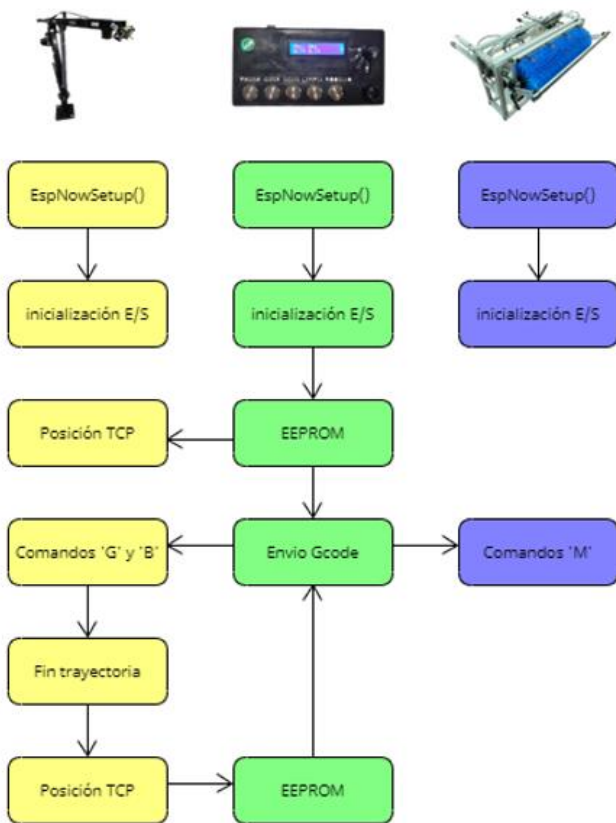


Figura 10: Esquema de comunicación.

6.1. Funcionalidad obtenida. Mando.

El mando por control remoto está formado por una carcasa impresa en PLA y alimentado por baterías de ion litio, de 3400mAh de capacidad, ofrece la posibilidad de manejar el sistema desde cualquier ubicación que tenga acceso visual a la cesta y en un radio inferior a 100 metros.

Entre sus componentes se encuentra un potenciómetro digital, en la esquina inferior derecha, permite enviar referencias de posicionamiento en coordenadas cartesianas de la cesta, en unidades de centímetros, decímetros o metros, lo cual permite su posicionamiento en cualquier ubicación de la fachada con una precisión. Además, permite activar de forma independiente los diferentes accionamientos de la cesta mediante 4 botones situados en la parte inferior del control remoto. De esta forma es posible iniciar de forma manual la secuencia de movimientos y operaciones para realizar la limpieza de la fachada. El mando incorpora una tarjeta microSD que permite ejecutar comandos Gcode almacenados en un fichero o bien grabar los comandos Gcode de las operaciones según se van realizando, para así repetirlos posteriormente. Otra posibilidad es tomar una ortofoto calibrada de la fachada y definir los comandos a realizar con un editor de textos en un ordenador. Además, se incluye un botón de pausa y stop que permite detener la trayectoria de la cesta, así como todos los elementos que se encuentren activados en ese momento. En la Figura 11 se muestra un detalle del mando.



Figura 11: Mando control remoto.

Tabla 2. Comandos Gcode implementados.

Comando Gcode	Descripción
G90	Movimiento en coordenadas absolutas
G91	Movimiento en coordenadas relativas
G00	Movimiento controlado de alta velocidad
G01	Movimiento con interpolación lineal
G04	Pausa la ejecución durante el periodo de tiempo establecido
B15	Retorno a la posición home
B04	Test de encoder
B08	Calibración de cables
B09	Movimiento independiente de los cables
M0	Pausa
M1	Reanudación del movimiento
M2	Fin de programa
M6	Activar difusor agua
M7	Desactivar difusor de agua
M8	Activar limpiacristales
M9	Desactivar Limpiacristales
M10	Activar el rodillo
M11	Desactivar el rodillo

Los comandos Gcode implementados se muestran en la Tabla 2. Además, se incluyen comandos específicos para cambiar la configuración de diversos parámetros de calibración del dispositivo tales como velocidad máxima, dimensiones fachadas, valores PID, etc.

7. Cesta suspendida

La cesta, de dimensiones $1000\text{mm} \times 1100\text{mm} \times 750\text{mm}$, es la encargada de llevar a cabo la limpieza de fachadas. Está constituida por una estructura de perfil de aluminio T-slot de construcción rápida con ranuras tipo B y dimensiones $32\text{mm} \times 32\text{mm}$.

Sobre esta estructura se encuentra el rodillo de nylon giratorio retráctil que se aproxima a la superficie mediante una

guía móvil. Gracias a la función retráctil es capaz de sortear los obstáculos de la fachada, aproximándose o alejándose de ésta hasta 500mm a una velocidad de $0,125\text{ m/s}$.

Para evitar el balanceo de la cesta por el cambio del centro de gravedad al extender el rodillo, se incluye un sistema de contrapeso, formado por un depósito de 5l de capacidad, que mantiene estable el centro de gravedad. La cesta también incluye difusores encargados de proyectar hasta 15l/h de agua u otras sustancias limpiadoras sobre la superficie.

Para el secado de la superficie se incluye un limpia escurridor que permite eliminar el agua de la superficie. El escurridor realiza la eliminación de agua mediante el movimiento combinado de abatimiento sobre la superficie y desplazamiento de la cesta de arriba hacia abajo.

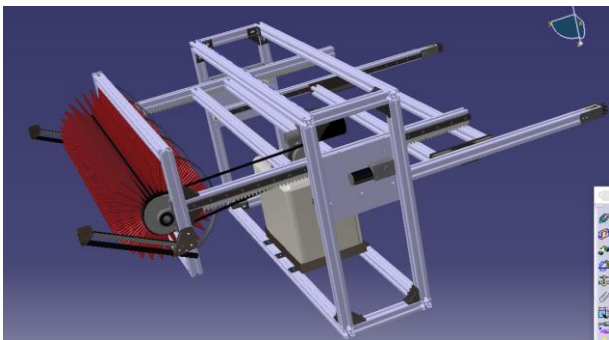


Figura 12: Modelo Cad de a cesta.

En la Figura 12 se muestra un diseño Cad de la cesta. Para evitar el despliegue de cables de alimentación, la cesta se alimenta mediante una batería de ión de litio de 12V y 30Ah . Incluye los siguientes elementos que son controlados desde el mando de control remoto a través de comandos Gcode o bien mediante el accionamiento de los botones:

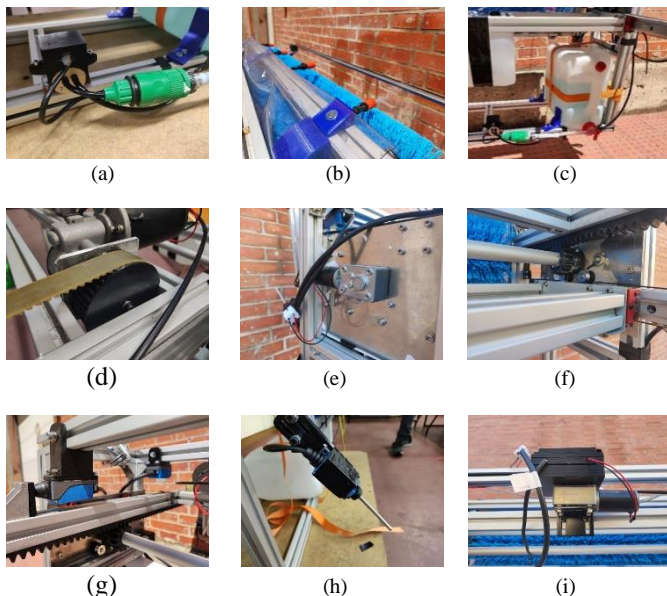


Figura 13. Elementos de la cesta. (a) Bomba de agua. (b) Difusores. (c) Depósito de agua. (d) Transmisión rodillo. (e) Motor rodillo. (f) Cremallera de guía lineal. (g) Finales de carrera guía. (h) Final de carrera detección fachada. (i) Motor de limpia.

- Bomba de agua de 12V controlada por relé marcha/paro (Figura 13.a) para la proyección de agua sobre superficies acristaladas mediante difusores (Figura 13.b) capaces de modificar la orientación del fluido.
- Depósito (Figura 13.c) capaz de contener agua o líquido limpiacristales. Este depósito está anclado en la parte inferior de la cesta mediante escuadras y cinchas para su fácil extracción y llenado. Dispone de 10l de capacidad ampliable según los requisitos de la superficie a limpiar.
- Rodillo de nylon encargado de eliminar la suciedad de la superficie. El movimiento se realiza mediante motor de 12V accionado por relé y transmisión mediante correa dentada (Figura 13.d).
- Guía que permite acercar o alejar hasta 500mm el rodillo, los difusores y el limpia escurridor a la superficie a limpiar. Se controla mediante doble relé (activo, desactivo y dirección) y motor de 12V (Figura 13.e) con transmisión mediante cremallera (Figura 13.f) y rodamientos lineales. Además, este sistema incluye sensores de posición máxima y mínima (Figura 13.g) y sensores de proximidad (Figura 13.h).
- Sistema limpia encargado de escurrir los restos de fluido que ha ocasionado la operación de limpieza con rodillo. Está formado por un perfil U de Inox de $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ y 970mm de largo, sobre el cual se aloja una goma plana que escurre los restos. El conjunto del limpia pivota sobre dos piezas impresas en PLA que sujetan cuatro muelles encargados de ejercer la fuerza necesaria para acercar el limpia a la fachada. Para recoger el conjunto del limpia se emplea un motor de 12V (Figura 13.i) accionado por relé, que se encarga de recoger o extender un cable de acero unido al este conjunto. En la Figura 14 se muestra el limpia sobre el rodillo en posición no extendida.



Figura 14. Detalle del limpia sobre el rodillo

- Armario con sistema de control para el movimiento de los elementos de la cesta. Incluye batería ion litio de 12V DC y 30Ah de capacidad, microcontrolador ESP32, dos módulos de 4 relés cada uno, 2 módulos reguladores de

tensión 12V-5V y convertidores de nivel 3,3V- 5V puesto que los relés se accionan mediante señales de 5V y el microcontrolador ESP32 trabaja con lógica de 3,3V. En la Figura 15 se muestra un detalle de este armario.



Figura 15. Armario de control de la cesta.



Figura 17: Cesta suspendida.

8. Resultados experimentales

Las pruebas mostradas a continuación corresponden a una primera fase de validación en la que se ha efectuado la puesta en marcha del sistema, calibración y se ha comprobado su correcto funcionamiento global. En una segunda fase se abordará el despliegue en una fachada completa de mayores dimensiones y se incorporará la motorización de los cables inferiores l_1 y l_2 destinados a proporcionar estabilidad a la cesta.

Se ha realizado un test de posicionamiento y otro de limpieza, instalando las grúas y la cesta en una localización provisional como se muestra en las Figuras 16 y 17. Ambas grúas han sido aseguradas mediante contrapesos y cinchas.



Figura 16: Instalación grúas.

8.1 Test de posicionamiento

El test de posicionamiento se ha efectuado realizando 10 repeticiones de una misma trayectoria, con el fin de comprobar que la repetibilidad y la precisión son correctas. Cabe destacar que únicamente se dispone de los dos cables superiores por lo cual, en esta primera fase de experimentación, se han llevado a cabo traslaciones puras en el eje Y. El test ha consistido en ejecutar una misma trayectoria de forma repetida y medir la distancia euclídea entre la posición objetivo y la posición alcanzada, usando como posición objetivo marcas realizadas en la fachada.

En la Figura 18 se muestra el error absoluto de posicionamiento final para 10 repeticiones. Se ha obtenido una media de 12,8mm y una desviación típica respecto a la media de 1,41mm.



Figura 18. Error absoluto de posición.

Por otro lado, es posible analizar cómo afecta el incremento o disminución de la velocidad a la precisión y repetibilidad del posicionamiento. Para ello se ha repetido el ensayo anterior para una velocidad de 0,05m/s, obteniendo una media de 13,9mm y una desviación típica respecto a la media de 1,2mm,

y con $0,005m/s$, obteniendo una media de $12,3mm$ y una desviación típica de $0,95mm$. Por tanto, la diferencia en el error de posición a velocidad elevada y reducida resulta poco significativa. Esto se debe en gran medida al uso de motores con gran reducción, poco sensibles a cambios de velocidad, y al uso de un control PID en posición.

8.2 Test de limpieza

Para validar la operación de limpieza, se ha dispuesto la cesta sobre una superficie acristalada de $2,5 m^2$ y se ha ejecutado el archivo Gcode que contiene los comandos de la Tabla 3.

Tabla 3. Comandos Gcode test de limpieza

Comando Gcode	Descripción
B08	Calibración de cables
M4	Guía adelante
M10	Activar el rodillo
M6	Activar difusor agua
G01	Movimiento con interpolación lineal Y=500mm
M7	Desactivar difusor de agua
M11	Desactivar el rodillo
M8	Activar limpiacristales
B15	Movimiento con interpolación lineal Y=0 X=0
M9	Desactivar limpiacristales
M5	Guía atrás

Una vez ejecutado el conjunto de comandos, podemos comprobar en la Figura 19 cómo los diferentes elementos que conforman el sistema de limpieza funcionan correctamente y proporcionan buenos resultados. En el siguiente enlace se muestra un video del movimiento y el proceso de limpieza: <https://www2.eii.uva.es/GIRTAP/Videos/RobotLimpiaFachadas.mp4>.



Figura 19: Operación de limpieza.

8.3 Rendimiento

Para evaluar el rendimiento de la operación de limpieza por completo, es necesario definir una secuencia de comandos Gcode que se repetirán a lo largo de la cristalería. Como secuencia base, se han tomado los comandos de la Tabla 3, modificando la altura de la fachada y añadiendo el movimiento horizontal para desplazarse a lo ancho de la cristalería. La operación se ha realizado sobre una superficie de trabajo de $6 m^2$. El rendimiento obtenido ha sido de $80 m^2/h$. Este valor no alcanza el de los robots de cables indicados en la Tabla 1, pero podría incrementarse introduciendo en las grúas motores con menor reducción. No obstante, hay que tener en cuenta que los robots existentes no son capaces de sortear obstáculos ni de hacer operaciones de aproximación a la fachada.

Respecto al rendimiento eléctrico, el consumo eléctrico de los accionamientos correspondientes tanto a la alimentación de corriente de los motores de las grúas como el de los elementos de la cesta es de $705 W$.

Por último, cabe destacar que el consumo de fluido de limpieza, de $15l/h$ tal como se expuso en el apartado 7. Esto conduce a una autonomía de $40min$, que corresponde a una superficie de limpieza de $54m^2$. Por lo tanto, el depósito de fluido de limpieza aparece como limitador de rendimiento. Sin embargo, es posible ampliar este depósito hasta la capacidad que requiera cada aplicación en particular, dado que la cesta dispone de capacidad suficiente para incluir un depósito de mayor tamaño.

9. Conclusiones

En este artículo se presenta el desarrollo de un robot de limpieza operado mediante cables. La principal ventaja del sistema propuesto es que está diseñado para trabajar en fachadas de edificios convencionales con azotea en los que sea posible ubicar las dos grúas que permitan descolgar la cesta limpiadora. Un sistema de guía retráctil permite acercar rodillo, pulverizador y escurridor a la superficie a tratar y sortear obstáculos tales como alféizares de ventanas. El sistema propuesto es de bajo costo pues utiliza grúas convencionales de camión y motores de cabestrante de vehículos todo terreno. El sistema computacional, basado en microcontroladores ESP32 y comunicación inalámbrica gracias al protocolo ESPNOW, permite un rápido despliegue en diferentes edificios y su control a largas distancias. El movimiento manual mediante mando permite un desplazamiento de gran precisión y la posibilidad de ejecutar y programar comandos Gcode *in situ* facilita la utilización del sistema en modo automático sin necesidad de emplear los controles del mando. Como futuras líneas se propone realizar algunas mejoras puntuales en el sistema tales como el cambio de los motores para la mejorar la precisión de trayectorias, la utilización de cables más largos para acceder a fachadas de mayores dimensiones y disminuir el tamaño de la cesta para acceder a superficies más pequeñas e inaccesibles, así como diseñar un sistema para la calibración automática y búsqueda del cero que ahora se realiza de forma manual. También se

propone diseñar un sistema de auto nivelación y reposicionamiento de la cesta en caso de deslizamiento del cable sobre la rueda del codificador incremental.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Estatal de Investigación. Proyectos generación de conocimiento Ministerio de Ciencia e Innovación referencia: de PID2021-123020OB-I00/AEI/10.13039/501100011033 y fondos FEDER.

Referencias

- N. Mir-Nasiri, H. J. Siswoyo, and M. H. Ali, "Portable autonomous window cleaning robot," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 133, pp. 197_204, Jan. 2018. URL: www.doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.024
- T. Akinfiyev, M. Armada, and S. Nabulsi, "Climbing cleaning robot for vertical surfaces," *Ind. Robot, Int. J.*, vol. 36, no. 4, pp. 352_357, Jun. 2009. URL: www.https://doi.org/10.1108/01439910910957110
- H. Zhang, J. Zhang, R. Liu, and G. Zong, "Mechanical design and dynamics of an autonomous climbing robot for elliptic half-shell cleaning," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 437_446, 2007. URL: www.doi.org/10.5772/5670
- R. Aracil, J. Roque J. Salterán, J. M. Sabater, and O. Reinoso. Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 3, no. 1 (2006): 16-28.
- J. Albus, R. Bostelman, N. Dagalakis, The nist robocrane, *Journal of Robotic Systems* 10 (5) (1993) 709-724. URL: www.doi.org/10.1002/rob.4620100509
- 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. URL: www.doi.org/10.1109/AIM.2013.6584163
- 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. URL: [www.doi.org/10.1016/S0957-4158\(98\)00034-8](http://www.doi.org/10.1016/S0957-4158(98)00034-8)
- E. Ottaviano, M. Ceccarelli, M. Toti, C.A. Carrasco, Catrasys (cassino tracking system): A wire system for experimental evaluation of robot workspace, *Journal of Robotics and Mechatronics* 14 (1) (2002) 78-87. URL: www.doi.org/10.20965/jrm.2002.p0078
- R.L. Williams II, Cable-suspended haptic interface, *Journal of Virtual Reality* 3 (3) (1998) 13-21. URL: www.doi.org/10.20870/IJVR.1998.3.3.2627
- 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. URL: www.doi.org/10.1007/s10514-016-9609-6
- 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.
- 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. URL: www.doi.org/10.1007/978-3-319-60867-9_20
- S. Qian et al. A Review on Cable-driven Parallel Robots. *Chin. J. Mech. Eng.* (2018) 31:66. URL: www.doi.org/10.1186/s10033-018-0267-9
- Cable-driven parallel robots – Motion simulation in a new dimension URL: www.innovations-report.com/interdisciplinary-research/cable-driven-parallel-robots-motion-simulation-in-a-new-dimension/ (2015).
- W. Yulong, H.C. Hung, F. Adam, C. Kristof, Y. Yeung and L. Darwin "CU-brick cable-driven robot for automated construction of complex brick structures: From simulation to hardware realization" 2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN). 11 June 2018
- Tecnalia. URL: www.tecnalia.com (2021).
- Hightec gekko facade URL: www.serbot.ch/es/limpieza-de-fachadas-y-superficies/robot-gekko-facade Accedido (2023).
- Serbot swiss innovations URL: www.serbot.ch/es Accedido (2023)
- W. Wang, B. Tang, H. Zhang, and G. Zong, "Robotic cleaning system for glass façade of high-rise airport control tower," *Ind. Robot, Int. J.*, vol. 37, no. 5, pp. 469-478, Aug. 2010
- Kite robotics. URL: <https://www.kiterobotics.com> Accedido (2023).
- S. M. Moon, C. Y. Shin, J. Huh, K. W. Oh, and D. Hong, "Window cleaning system with water circulation for building façade maintenancerobot and its efficiency analysis," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 65-72, Jan. 2015.
- H. Choi and K.-M. Jung, "Windoro: The world's first commercialized window cleaning robot for domestic use," in *Proc. 8th Int. Conf. Ubiquitous Robots Ambient Intell. (URAI)*, Incheon, South Korea, Nov. 2011, pp. 131-136.
- R. Gómez, E. Zalama J. Gómez-García-Bermejo. Robot de cables para operación en superficies verticales. *Actas de las Jornadas Nacionales de Robótica 2019*. Organizado por Universidad de Alicante, Universidad Miguel Hernández de Elche, Comité Español de Automática-Grupo Temático de Robótica, 2019, p. 15-20.
- Espressif Systems, 2018. ESP32 DEVKIT V1. URL: www.espressif.com/en/products/modules/esp32
- Espressif ESP-NOW, 2019. Protocolo ESP-NOW URL: www.espressif.com/en/products/software/esp-now/overview