

Seguimiento de trayectorias autónomo en una grúa robótica hidráulica

Arzola, César^{a,*}, Rodríguez-Fortún, José-Manuel^a, Iglesias, Javier^a, Canalis, Pablo^a, Navarro, Juan^b

^aInstituto Tecnológico de Aragón, María de Luna, 7-8, 50018, Zaragoza, España.

^bMAXAM Terra Solutions, Avda del Partenón, 16, 28042, Madrid, España.

To cite this article: Arzola, C., Rodríguez-Fortún, J.-M., Iglesias, J., Canalis, P., Navarro, J.. 2026. Autonomous trajectory tracking in a hydraulic crane. Actas del II Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Zaragoza, España.

Resumen

El presente trabajo muestra el proceso de automatización de una grúa hidráulica para seguir de manera autónoma trayectorias definidas por el usuario en un entorno minero. Así, se describe la arquitectura hardware implementada a fin de poder comandar los actuadores y los sensores que hacen posible cerrar los diferentes bucles de control. El trabajo se ha implementado en una grúa de grandes dimensiones lo que obliga a la utilización de soluciones específicas para evitar las oscilaciones de la estructura y sus posibles efectos negativos.

Palabras clave: Control robusto, command shaping, generación de trayectorias, actuadores hidráulicos, grúa

Autonomous trajectory tracking in a hydraulic crane

Abstract

The present work describes the automation process of a hydraulic crane to follow user-defined trajectories in a mining environment. The text shows the developed hardware architecture to command the actuators and sensors to close the feedback loops. The presented work has been implemented in a large crane, which makes it necessary to use specific solutions for avoiding structural oscillations and their potential negative effects.

Keywords: Robust control, command shaping, trajectory generation, hydraulic actuators, crane

1. Introducción

El trabajo aquí presentado se orienta a la robotización y automatización de una grúa hidráulica para minería. Este tipo de aplicaciones ha suscitado gran interés en los últimos años debido a la posibilidad de aumentar la seguridad en la operación al alejar a los operarios humanos de zonas de trabajo potencialmente peligrosas, a la par que mejorar la eficiencia de procesos caracterizados por largas jornadas de trabajo donde el cansancio puede afectar negativamente a la productividad. Dada su importancia, es posible encontrar ejemplos de aplicación en la literatura reciente. Por ejemplo, Duz et al. (2024) describe la robotización en entornos de la construcción, y Bonchis et al. (2014) la automatización en el proceso de colocación de cargas explosivas en minería.

La automatización de este tipo de grúas no es una tarea sencilla dado que se trata de maquinaria de grandes dimensiones con actuadores hidráulicos altamente no lineales en su curva de comportamiento. El tamaño de la maquinaria es causa frecuente de vibraciones durante el movimiento, ya sea por la flexibilidad de las uniones o por la propia esbeltez de la estructura. En Riboli et al. (2023) se distingue entre métodos en bucle abierto y cerrado para evitar las oscilaciones, y usan trayectorias suaves definidas mediante funciones spline. En otros casos, se integran elementos que amortigüen el movimiento, como en el caso de Lima et al. (2019), que añaden actuadores magnetorreológicos en las uniones entre eslabones de la cadena cinemática. De manera similar, García-Pérez et al. (2019) combina el control en bucle cerrado basado en sliding con el uso de actuadores piezoeléctricos en los elementos esbeltos para reducir su oscilación

*Autor para correspondencia: carzola@ita.es



Figura 1: Grúa hidráulica sobre la que se realiza el control

propia usando PPF (Positive Position Feedback). Una complejidad añadida en el control de elementos flexibles es la necesidad de medir la posición del extremo afectada por la flexión de la estructura. Para ello, se incluyen a veces sensores adicionales como en Sahu et al. (2020) o Bonchis et al. (2014) donde se aplica visual servoing con una cámara en el extremo.

En el enfoque propuesto se combinan tres estrategias complementarias. Por un lado, se emplean dos técnicas en bucle abierto: la generación de trayectorias articulares suaves y la actuación mediante *command shaping*, con el objetivo de limitar la excitación dinámica del sistema y cuyo detalle se describe en Khorshid et al. (2020) y Conker et al. (2016). Por otro lado, el posicionamiento del cabezal se realiza en bucle cerrado, utilizando información de la configuración articular del manipulador y mediciones directas del entorno obtenidas mediante un sensor láser instalado en el extremo del brazo.

De forma complementaria, el control de sistemas hidráulicos constituye un problema común en maquinaria de minería y construcción. En Mattila et al. (2017) se describen sistemas de control en posición y velocidad para movimientos libres, así como controles en fuerza cuando se restringe el movimiento. En la literatura se identifican distintos algoritmos, desde el control tradicional basado en la linealización del sistema y el uso de PID's descrito en Manring and Fales (2020), hasta métodos más avanzados como el control adaptativo en Nurmi and Mattila (2017), el uso de redes neuronales propuesto por Nan and Hutter (2024), Reinforcement Learning como en Pascal and Hutter (2020), entre otros. Con objeto de mejorar la eficiencia del sistema, Mattila et al. (2017) propone el uso de SMISMO, que aplica un control diferencial de las presiones en las cámaras del actuador tal y como describe Koivumäki et al. (2019).

El presente trabajo realiza el control de los actuadores mediante control robusto H_∞ debido a la elevada incertidumbre en los actuadores y la evolución de su comportamiento a lo largo del tiempo en condiciones de operación difíciles.

A continuación se describe la robotización de una grúa de grandes dimensiones para minería y cómo se ha logrado cumplir con los objetivos funcionales de posicionado mediante una estructura de control que combina generación de trayectorias con dos modos de funcionamiento para el posicionamiento grueso y de precisión del extremo de la grúa. El sistema sobre el que se realiza la implementación se describe en la sección 2. Se

incluye el detalle de la arquitectura de control en la sección 3, así como los resultados de la validación en condiciones reales en la sección 4. Finalmente, la sección 5 resume el trabajo realizado.

2. Descripción del sistema

La Fig. 1 muestra la grúa sobre la cual se desarrolla este trabajo. Se trata de una estructura que puede alcanzar los 5 m de longitud con tres grados de libertad, correspondientes a la rotación respecto a su base, la elevación a través de un cilindro vertical y la extensión. El objeto de la máquina es posicionar el extremo sobre los barrenos de una mina a cielo abierto.

La grúa inicialmente no tiene ningún tipo de sensorización, por lo que es necesario dotarla de sensores para conocer la posición articular de cada grado de libertad. Para ello se instala un encóder para medir el primer giro, un inclinómetro para el nivel de inclinación y un sensor de hilo para la extensión.

El detalle del cabezal aparece en la Fig. 2, cuya posición y orientación se obtiene a partir de dos antenas GPS, y un sensor láser que permite detectar el barreno una vez el cabezal está lo suficientemente cerca.



Figura 2: Detalle del cabezal de la grúa donde se observan los sensores GPS y láser

El objetivo de la máquina es, partiendo de una posición objetivo GPS para el barreno, colocarse sobre el mismo de manera automática. Debido a que la posición inicialmente considerada

puede diferir de la real, se requiere el sensor láser que localiza el barreno y permite asegurar el correcto posicionamiento del cabezal.

3. Sistema de control

En esta sección se describe la arquitectura de control implementada en el sistema, la cual se ilustra en la Figura 3. El esquema propuesto combina una etapa de planificación, un control *grueso* en espacio articular, y un control *fino* en espacio cartesiano, permitiendo posicionar el cabezal de forma precisa y robusta a partir de las referencias definidas en el espacio de trabajo. La estructura modular del control facilita la compensación de errores debidos a inexactitudes del modelo cinemático utilizado y a efectos dinámicos no modelados, como la flexibilidad estructural del brazo.

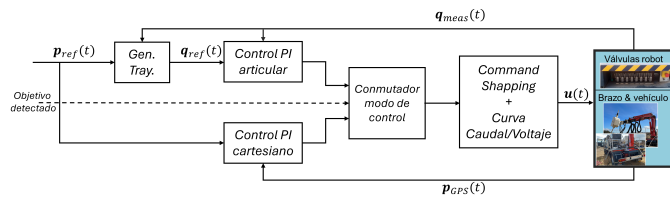


Figura 3: Bucle de control

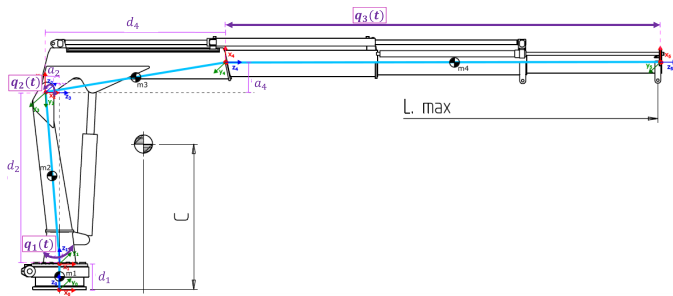


Figura 4: Principales dimensiones y grados de libertad de la grúa

3.1. Generación de trayectorias

El generador de trayectorias constituye la primera etapa del bucle de control y tiene como objetivo producir referencias articulares suaves que conduzcan al efector final hacia una posición deseada en el espacio cartesiano, minimizando la excitación dinámica del sistema. Los grados de libertad principales del manipulador se agrupan en el vector de estados articulares medidos

$$\mathbf{q}_{meas}(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad q_3(t)]^T \quad (1)$$

donde q_1 , q_2 y q_3 corresponden a la medición del ángulo de rotación, ángulo de elevación y longitud de extensión, respectivamente.

Dada una posición objetivo del efector final en el espacio cartesiano

$$\mathbf{p}_{ref} = [x_{ref} \quad y_{ref} \quad z_{ref}]^T \quad (2)$$

se obtiene una configuración articular objetivo $\mathbf{q}^*$ resolviendo el problema de cinemática inversa mediante el método de Denavit-Hartenberg, $\mathbf{q}^* = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{p}_{ref})$. La solución obtenida se utiliza como referencia para la planificación del movimiento grueso, sin considerar efectos de flexibilidad estructural.

La planificación del movimiento se realiza de manera secuencial, evitando la activación simultánea de múltiples grados de libertad. A partir de la configuración inicial, la estrategia prioriza secuencias de movimiento que mantienen el brazo en una configuración lo más retraída posible antes de alcanzar la posición y orientación finales. Esta aproximación reduce los momentos generados por la masa del brazo y, por ende, la excitación de modos flexibles.

Para cada articulación i , el tiempo total de ejecución T_i se calcula en función de la distancia a recorrer y de una velocidad promedio máxima permitida,

$$T_i = \frac{|q_i^* - q_i(0)|}{\bar{v}_i} \quad (3)$$

donde $q_i(0)$ representa la posición articular inicial y $\bar{v}_i$ la velocidad promedio deseada para la articulación i .

Las trayectorias articulares se generan mediante interpolación polinómica de quinto orden:

$$q_{i,ref}(t) = c_{i,0} + c_{i,1}t + c_{i,2}t^2 + c_{i,3}t^3 + c_{i,4}t^4 + c_{i,5}t^5, \quad t \in [t_i^{start}, t_i^{end}], \quad (4)$$

donde t_i^{start} y $t_i^{end} = t_i^{start} + T_i$ definen la ventana temporal de ejecución de la articulación i .

Los coeficientes $c_{i,j}$ se calculan de manera que se cumplan las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} q_{i,ref}(t_i^{start}) &= q_i(0), & \dot{q}_{i,ref}(t_i^{start}) &= 0, & \ddot{q}_{i,ref}(t_i^{start}) &= 0, \\ q_{i,ref}(t_i^{end}) &= q_i^*, & \dot{q}_{i,ref}(t_i^{end}) &= 0, & \ddot{q}_{i,ref}(t_i^{end}) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Cada articulación ejecuta su movimiento de forma secuencial dentro de su ventana temporal. Esto asegura perfiles suaves y minimiza la excitación dinámica del manipulador.

3.2. Control grueso en espacio articular

En esta fase, el objetivo es asegurar que cada articulación siga su referencia de forma estable y robusta. Definiendo el vector de referencias articulares generado por el planificador como

$$\mathbf{q}_{ref}(t) = [q_{1,ref}(t) \quad q_{2,ref}(t) \quad q_{3,ref}(t)]^T, \quad (6)$$

el error articular se obtiene directamente como

$$\mathbf{e}_q(t) = \mathbf{q}_{ref}(t) - \mathbf{q}_{meas}(t). \quad (7)$$

El control se implementa utilizando un controlador PI independiente para cada uno de los tres grados de libertad principales. El ajuste de las ganancias de los controladores se realizó utilizando técnicas de control robusto. En particular, el proceso de ajuste se formuló desde una perspectiva de diseño H_∞ , considerando las oscilaciones estructurales del brazo, caracterizadas experimentalmente, como perturbaciones aditivas en la salida de cada articulación, así como la presencia de incertidumbre en los parámetros de los actuadores. A partir de esta formulación, se definieron funciones de sensibilidad y sensibilidad complementaria con el objetivo de atenuar la influencia de dichas perturbaciones en las bandas de frecuencia asociadas a los modos flexibles identificados experimentalmente.

De este modo, los parámetros de cada controlador PI fueron seleccionados para garantizar un compromiso adecuado entre rapidez de seguimiento, rechazo de perturbaciones y estabilidad robusta.

3.3. Control fino en espacio cartesiano

Una vez que el control grueso posiciona el brazo en las proximidades del objetivo y se detecta el barrenado objetivo mediante el LIDAR, se activa un lazo de control fino en espacio cartesiano destinado a compensar los errores residuales debidos a diferencias entre el modelo cinemático ideal y el comportamiento real del sistema. Dado que la posición actual del cabezal está dada por:

$$\mathbf{p}_{\text{gps}}(t) = \begin{bmatrix} x_{\text{gps}}(t) & y_{\text{gps}}(t) & z_{\text{gps}}(t) \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

el error cartesiano se define como:

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_{\text{ref}} - \mathbf{p}_{\text{gps}} \quad (9)$$

Por simplicidad, en esta fase solo se consideran correcciones en el plano horizontal:

$$\mathbf{e}_{XY} = \begin{bmatrix} e_x & e_y \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

asumiendo $e_z = 0$.

Aunque el error se expresa en coordenadas cartesianas, la actuación se realiza sobre los grados de libertad articulares. Para ello, el error cartesiano se proyecta sobre las direcciones radial y tangencial asociadas a la posición instantánea del cabezal. Definiendo el vector radial:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_{\text{gps}} \\ y_{\text{gps}} \end{bmatrix}, \quad r = \|\mathbf{r}\| \quad (11)$$

y los vectores unitarios asociados son:

$$\mathbf{u}_r = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} x_{\text{gps}} \\ y_{\text{gps}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_t = \begin{bmatrix} -u_{r_y} \\ u_{r_x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Luego, la proyección del error cartesiano en coordenadas articulares equivalentes se puede representar como:

$$\Delta q_3 = e_x u_{r_1} + e_y u_{r_2} \quad (13)$$

$$\Delta q_1 = \frac{e_x u_{t_1} + e_y u_{t_2}}{r} \quad (14)$$

donde Δq_3 corresponde a la corrección requerida en extensión y Δq_1 a la corrección requerida en rotación.

Estas señales de error articular alimentan controladores PI independientes para los movimientos de rotación y extensión. Dichos controladores fueron ajustados siguiendo el mismo procedimiento que en el caso del control grueso.

3.4. Control Activo de Vibraciones

Debido a la flexibilidad estructural del manipulador, los movimientos de rotación y elevación pueden excitar modos de vibración dominantes, especialmente cuando el brazo se encuentra extendido. Con el fin de mitigar estas oscilaciones sin incrementar la complejidad del controlador en lazo cerrado, se implementó una técnica de *command shaping* aplicada a los movimientos articulares. En este trabajo se utilizó un filtro del tipo ZVD (Zero Vibration Derivative), definido por la secuencia de impulsos:

$$\text{ZVD} = \begin{bmatrix} A_j \\ t_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & T_d/2 & T_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, \quad T_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (16)$$

siendo ω_n la frecuencia natural dominante y ζ el coeficiente de amortiguamiento estimado experimentalmente.

Los parámetros necesarios para el diseño del filtro se obtuvieron a partir de ensayos experimentales realizados sobre el sistema real. La identificación de modos se realizó mediante análisis modal operacional y ensayos con martillo de impacto, midiendo la respuesta del cabezal mediante sensores inerciales.

Nº Seg.	Long. (m)	Y1	Y2	Z1	Z2
0	0.00	2.15	3.22	3.71	7.52
1	1.30	1.76	2.93	2.93	6.93
2	2.65	1.17	2.73	2.34	7.13
3	3.95	0.88	2.64	1.46	6.25
4	4.48	0.78	2.54	1.37	5.96

Tabla 1: Frecuencias de los modos de vibración dominantes (Hz.) identificados experimentalmente para distintas longitudes de brazo. Y1, Y2 se corresponden con el primer y segundo modos de vibración en la dirección horizontal; idénticamente, Z1 y Z2 se refieren a los dos primeros modos verticales

A partir de los resultados en la Tabla 1 y del análisis de la respuesta temporal del sistema, se seleccionaron los parámetros necesarios para el diseño de los filtros. Se tomó como referencia la frecuencia del primer modo de vibración correspondiente a la configuración de máxima longitud de brazo, al ser esta la condición más desfavorable desde el punto de vista dinámico.

Para el movimiento de rotación, se utilizó la frecuencia dominante identificada en el eje horizontal (Y), mientras que para el movimiento de elevación se empleó la frecuencia dominante asociada al eje vertical (Z). El coeficiente de amortiguamiento requerido para el diseño del filtro ZVD se estimó a partir de la respuesta temporal del sistema ante movimientos de rotación y elevación ejecutados a velocidad máxima, observando la envolvente de decaimiento de las oscilaciones residuales.

Finalmente, los filtros diseñados se implementan en serie con los controladores en lazo cerrado de rotación y elevación. La señal de referencia generada por los controladores PI se pasa primero por el filtro ZVD, de manera que la trayectoria final que sigue el efector reduce la excitación de los modos de vibración identificados. Esta configuración permite mantener la simplicidad de los controladores en lazo cerrado mientras se atenúan las oscilaciones estructurales, actuando únicamente como un preprocesamiento de la señal de control.

3.5. Caracterización curva voltaje/caudal

Si bien el manipulador hidráulico presenta una dinámica inherentemente no lineal, el ajuste de los controladores PI se realizó utilizando modelos linealizados simplificados, válidos en torno a los puntos de operación habituales. En particular, se consideró la dinámica de cada actuador en términos de posición y velocidad articular, asumiendo que su evolución puede representarse de forma lineal. Bajo esta hipótesis, la señal de control generada por los PI se interpreta como una referencia de velocidad del actuador, o, de manera equivalente, como una demanda de caudal hidráulico.

No obstante, la variable de control aplicada al sistema real corresponde al voltaje de accionamiento de las válvulas hidráulicas, cuya relación con el caudal es no lineal. Por este motivo, es necesario realizar una caracterización experimental de la curva voltaje/caudal mediante ensayos con el prototipo real. Se hizo una caracterización sobre la válvula de rotación a lo largo de todo su rango de operación. A partir de los datos obtenidos, se construyó una aproximación estática de dicha relación, empleada posteriormente para implementar su inversa dentro del esquema de control (Figura 5).

Esta compensación no lineal se aplica justo antes de la entrada a la planta, permitiendo que el diseño de los controladores PI se mantenga independiente de la no linealidad de la válvula, al tiempo que se preserve un comportamiento cercano al sistema real. La misma caracterización se implementó en el resto de los grados de libertad, asumiendo un comportamiento hidráulico equivalente entre actuadores.

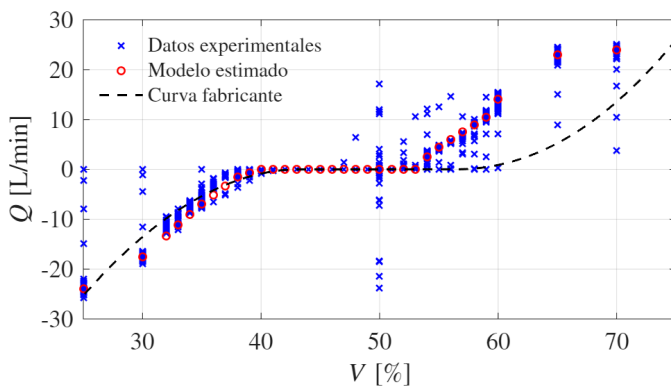


Figura 5: Curva característica de uno de los actuadores hidráulicos

4. Implementación y validación del esquema propuesto

En esta sección se describe la implementación en hardware del sistema de control, así como las pruebas de validación en el prototipo final.

4.1. Implementación en Hardware

Las pruebas funcionales se llevaron a cabo sobre el prototipo del camión equipado con el brazo robotizado, en un entorno controlado de ensayo. El sistema implementa la arquitectura mostrada en la Figura 6, donde el bucle de control completo se ejecuta en una unidad electrónica de control, programada en CODESYS.

La ECU recibe las mediciones de los sensores articulares del brazo, encargados de proporcionar la configuración del manipulador, así como la información de localización del sistema de referencia global. La detección del barreno se realiza mediante un sensor dedicado instalado en el cabezal de la grúa, mientras que la posición y orientación del conjunto camión-brazo se obtienen mediante un sistema GPS-RTK, con antenas montadas sobre la cabina y electrónica asociada ubicada en el cuadro eléctrico.

El control hidráulico se implementa directamente desde la ECU, que genera las señales de mando para las válvulas proporcionales. Un PC robótico industrial actúa como unidad de supervisión y soporte de alto nivel, mientras que la interfaz hom-

bre-máquina permite la monitorización y operación del sistema durante los ensayos.

La comunicación entre los distintos subsistemas se realiza mediante buses industriales CAN y Ethernet. Todo el conjunto se alimenta a través de una unidad de potencia dedicada integrada en el cuadro eléctrico, garantizando un suministro estable para los sensores y unidades de control.

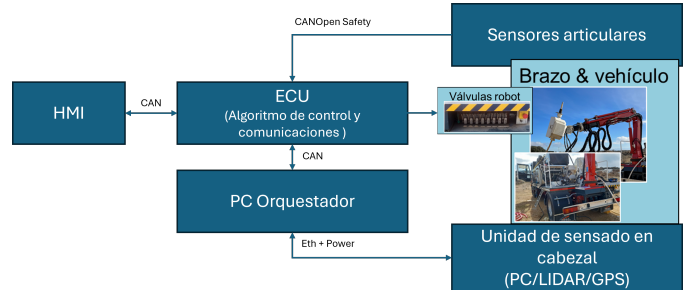


Figura 6: Arquitectura Hardware utilizada en la implementación final

4.2. Pruebas funcionales

El ensayo experimental se inicia desde una configuración inicial definida por el operador, con el manipulador situado en su posición *home*. A partir de esta condición, se selecciona el barreno objetivo mediante la interfaz de usuario, que proporciona la posición deseada del cabezal, $\mathbf{p}_{ref}$ (posición final aproximada).

Durante el intervalo inicial del ensayo (aprox. 0–30 s en Figura 7), se calculan las trayectorias articulares necesarias para mover el cabezal hacia la posición objetivo. En la Figura 7 se observan las trayectorias calculadas por el sistema, la evolución de las posiciones articulares, las señales de control demandadas durante el modo de control grueso, así como la evolución de la posición del cabezal medida por el GPS.

En esta prueba también se utiliza un mock-up de barreno (Figura 8, con el objetivo marcado con una *x*) para poder validar el correcto funcionamiento de todos los sistemas. Una vez que el cabezal se encuentra cercano al barreno, se activa el control fino (30s–42s en Figura 7) basado en medición directa del entorno. En este momento se actualiza la señal $\mathbf{p}_{ref}$ por la detectada del barreno (posición final real). Las diferencias entre la posición actual del cabezal y la posición detectada del barreno se utilizan para generar correcciones incrementales en el espacio cartesiano. Esta etapa asegura un posicionamiento final exacto, corrigiendo las desviación residuales.

5. Conclusiones

El presente trabajo describe una solución de automatización para maquinaria de grandes dimensiones con actuación hidráulica. El objetivo del sistema es el movimiento autónomo de una grúa en entornos mineros. La solución propuesta combina la integración de componentes industriales en el brazo, con algoritmos de monitorización, generación de trayectorias y control robusto. El sistema desarrollado ha sido implementado y probado en condiciones realistas con resultados positivos.

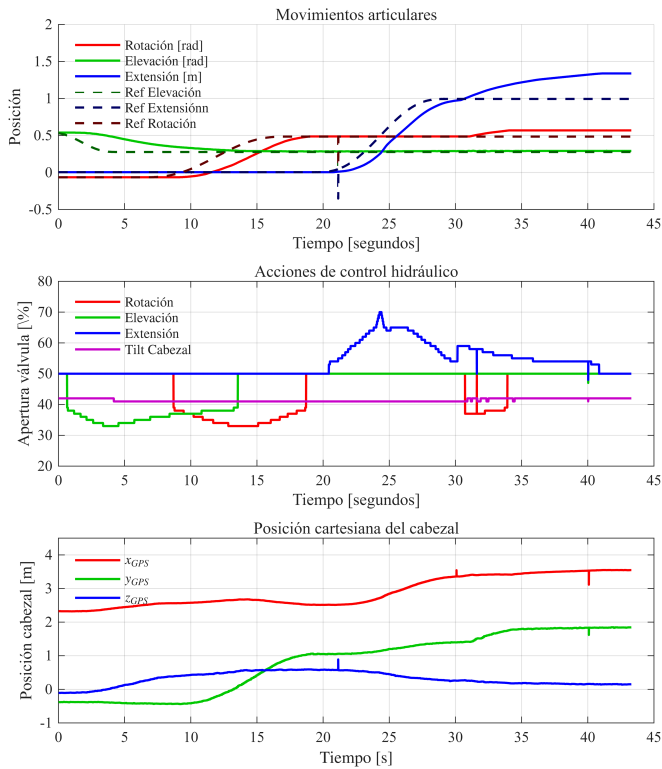


Figura 7: Detalle del seguimiento de trayectorias: posición en coordenadas articulares (arriba); apertura de las válvulas hidráulicas (centro); posición cartesiana del extremo de la grúa (abajo). Durante los primeros 30 s se aplica el modo de control grueso, mientras que a partir de $t = 30$ s se activa el modo fino.

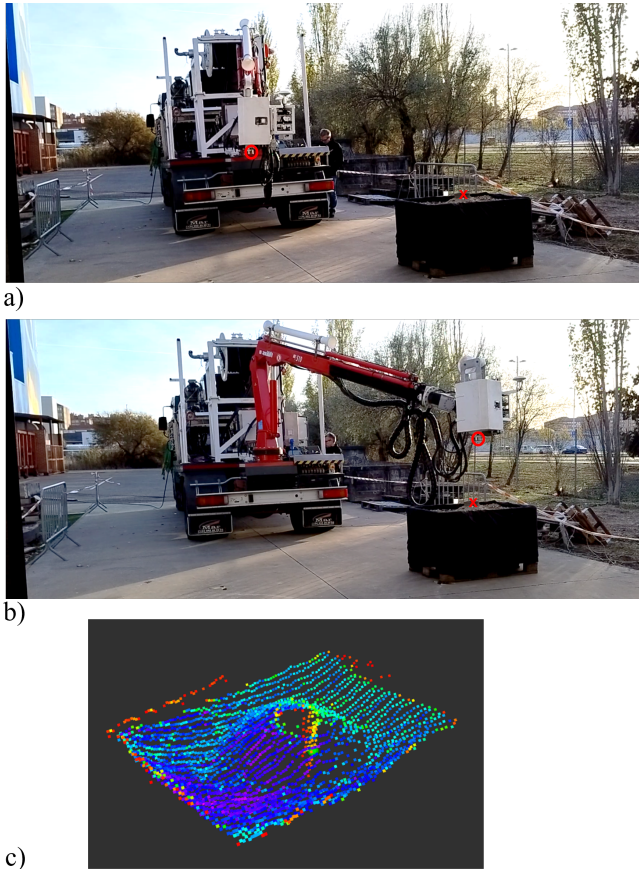


Figura 8: Entorno de ensayos: (a) posición inicial; (b) posición final; (c) nube de puntos láser obtenido de la posición final

Agradecimientos

El trabajo descrito en el presente artículo se ha realizado en el marco del proyecto "XMINENERGY:DESARROLLO EXPERIMENTAL DE SISTEMA DE CARGA INTELIGENTE DE EXPLOSIVOS PARA MINERÍA 4.0"(CPP2021-008981). La preparación de la publicación se ha realizado con el soporte de los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER) para la región de Aragón (España).

Referencias

- Bonchis, A., Duff, E., Roberts, J., Bosse, M., 2014. Robotic explosive charging in mining and construction applications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 11 (1), 245 – 250.
DOI: 10.1109/TASE.2013.2241425
- Conker, C., Yavuz, H., Bilgic, H. H., 2016. A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering* 18 (5), 2947 – 2958.
DOI: 10.21595/jve.2016.16725
- Duz, A., Negrello, F., Rucodainii, A., Lanzoni, D., Corsanici, M., Iapichino, A., Vitali, A., Regazzoni, D., Birolini, V., Signori, R., Ceresoli, R., Grioli, G., Bicchi, A., Catalano, M. G., 2024. From construction machines to remote construction robots: control, interfaces, and usability of the cranebot. *Frontiers in Robotics and AI* 11 (1504317).
DOI: 10.3389/frobt.2024.1504317
- Garcia-Perez, O., Silva-Navarro, G., Peza-Solis, J., 2019. Flexible-link robots with combined trajectory tracking and vibration control. *Applied Mathematical Modelling* 70, 285 – 298.
DOI: 10.1016/j.apm.2019.01.035
- Khorshid, E., Al-Fadhli, A., Alghanim, A., Baroon, J., 2020. Command shaping with reduced maneuvering time for crane control. *Journal of Vibration and Control* -, 1311–1323.
DOI: 10.1177/1077546320940872
- Koivumäki, J., Zhu, W.-H., Mattila, J., 2019. Energy-efficient and high-precision control of hydraulic robots. *Control Engineering Practice* 85, 176 – 193.
DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.12.013
- Lima, J. J., Balthazar, J. M., Rocha, R. T., Janzen, F. C., Bernardini, D., Litak, G., Bassinello, D., Dailhane, G., Tusset, A. M., 2019. On positioning and vibration control application to robotic manipulators with a nonideal load carrying. *Shock and Vibration* 5408519.
DOI: 10.1155/2019/5408519
- Manring, N. D., Fales, R. C., 2020. *Hydraulic control systems*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Mattila, J., Koivumäki, J., Caldwell, D., Semini, C., 2017. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22, 669 – 680.
DOI: 10.1109/TMECH.2017.2668604
- Nan, F., Hutter, M., 2024. Learning adaptive controller for hydraulic machinery automation. *IEEE Robotics and Automation Letters* 9 (4), 3972 – 3979.
DOI: 10.1109/LRA.2024.3372831
- Nurmi, J., Mattila, J., October 2017. Automated feed-forward learning for pressure-compensated mobile hydraulic valves with significant dead-zone. In: *Proceedings of the ASME/BATH 2017 Symposium on Fluid Power and Motion Control*. ASME.
- Pascal, E., Hutter, M., October 2020. Towards rl-based hydraulic excavator automation. In: *Proceedings of 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.
- Riboli, M., Manconi, E., Fusai, D., Silvestri, M., Aimi, A., 2023. Vibration minimisation of moving flexible slender structures based on time-parameterised b-spline. *Vibration* 6, 743 – 761.
DOI: 10.3390/vibration6040046
- Sahu, U. K., Patra, D., Subudhi, B., 2020. Vision-based tip position tracking control of two-link flexible manipulator. *IET Cyber-Syst. Robot.* 2, 53 – 66.
DOI: 10.1049/iet-csr.2019.0035