

Jornadas de Automática

Banco de pruebas robotizado para modelar procesos de pulido de superficies

Bastida-Miguel, Héctor ^{a,*}, Navarro-González, J. Daniel ^b, Tornero, Josep ^a, Gírbés-Juan, Vicent ^b

^a Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, Camino Vera s/n, 46022, Valencia, España.

^b Departament d'Enginyeria Electrònica, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria, Universitat de València, Av. Universitat s/n, 46100 Burjassot, España

To cite this article: Bastida-Miguel, Héctor; Navarro-González, J. Daniel; Tornero, Josep; Gírbés-Juan, Vicent. 2025. Robotic testing bench for modelling surface polishing processes. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12255>

Resumen

El tratamiento de superficies mediante robots se ha convertido en una tarea habitual en la industria, en especial cuando se tratan grandes superficies. Tareas como matizado, pulido o lijado se llevan a cabo mediante esponjas abrasivas que recorren la superficie. Este trabajo presenta el diseño de una plataforma experimental orientada al estudio del pulido automatizado mediante un manipulador robótico colaborativo. Se ha integrado un robot KUKA LBR iiwa 14 con un sensor de fuerza y una herramienta con esponja de pulido para simular condiciones reales de trabajo sobre superficies planas. A través de varios ensayos experimentales se registran fuerzas, pares de fuerza y estados articulares para analizar el comportamiento mecánico de la esponja durante las fases de compresión y desplazamiento. Los resultados servirán de base para modelar la relación fuerza-penetración, así como para calcular parámetros como la rigidez, la viscosidad y el coeficiente de fricción. La plataforma abre la posibilidad de realizar futuras pruebas sobre superficies curvas, incorporar abrasivos líquidos y desarrollar estrategias avanzadas de control de fuerza. Este trabajo constituye una primera aproximación experimental hacia la optimización del pulido con robots.

Palabras clave: Manipuladores robóticos, control de fuerza, robots colaborativos, herramientas flexibles, identificación experimental

Robotic testing bench for modelling surface polishing processes

Abstract

Surface treatment using robots has become a common task in industry, particularly when dealing with large areas. Operations such as matting, polishing, or sanding are typically performed using abrasive sponges that move along the surface. This work presents the design of an experimental platform aimed at studying automated polishing with a collaborative robotic manipulator. A KUKA LBR iiwa 14 robot has been integrated with a force sensor and a sponge-based polishing tool to replicate real working conditions on flat surfaces. Through several experimental trials, forces, torques, and joint states are recorded to analyse the mechanical behaviour of the sponge during the compression and lateral movement phases. The results will provide a basis for modelling the force–penetration relationship, as well as for estimating parameters such as stiffness, damping and friction coefficient. The platform enables future developments including testing on curved surfaces, incorporating liquid abrasives, and implementing advanced force control strategies. This work represents an initial experimental approach toward the optimization of robotic polishing processes.

Keywords: Robotic manipulators, force control, collaborative robots, flexible tools, experimental identification

1. Introducción

El creciente uso de robots colaborativos en entornos industriales ha abierto nuevas oportunidades para automatizar tareas tradicionalmente manuales, como el pulido de superficies, tanto asistido (Ke *et al.*, 2023) como automático (Dieste *et al.*, 2013). En los últimos años ha habido varias investigaciones sobre este tema, como por ejemplo el trabajo de Xiao y Ding (2020), donde se realiza un modelado de la fuerza de contacto que aparece entre la esponja y una superficie rígida con cierto grado de inclinación, y posteriormente se verifica la eficacia mediante un ensayo usando un brazo robótico.

También es interesante el trabajo de Tian *et al.* (2016), en el que se realiza un estudio acerca de la importancia de la presión constante durante un pulido y de cómo conseguirla al trabajar sobre superficies curvas usando un brazo robótico. El instante en el que se produce el contacto entre la herramienta y la superficie es delicado porque hay un cambio abrupto en la dinámica del sistema (García *et al.*, 2021a). En García *et al.* (2021b) se utiliza control por modos deslizantes para resolver el problema del tratamiento superficial mediante dos robots trabajando de forma sincronizada.

Por todo esto, este trabajo sale de la motivación de seguir acercándose a automatizar procesos manuales mediante soluciones robotizadas, más repetibles y eficientes. Operaciones como el pulido o el lijado requieren un control preciso de la interacción herramienta-superficie, especialmente cuando se emplean materiales deformables como las esponjas. El uso de robots colaborativos en combinación con herramientas blandas plantea un campo de estudio con gran potencial, tanto para mejorar la calidad del acabado superficial como para avanzar en el desarrollo de sistemas de control de fuerza adaptativos.

2. Planteamiento del problema a resolver

Uno de los principales retos en la automatización del proceso de pulido mediante robots colaborativos es el control preciso de la fuerza de contacto entre la herramienta y la superficie a tratar, especialmente cuando se emplean elementos blandos como esponjas. A diferencia de herramientas rígidas, el comportamiento mecánico de una esponja depende no solo de la geometría de contacto, sino también de su compresibilidad y de la distribución de presiones en la zona de interacción. Esta complejidad se incrementa cuando el robot se desplaza lateralmente mientras mantiene el contacto, generando además esfuerzos tangenciales y momentos que afectan al sistema.

En trabajos anteriores, como el de Xiao y Ding (2020), se ha propuesto un modelo de contacto no lineal para una herramienta de esponja inclinada sobre superficies rígidas, demostrando la utilidad de modelos fuerza-penetración para anticipar el comportamiento del sistema. No obstante, dichos modelos están basados en condiciones particulares de contacto y geometría, y su aplicación práctica requiere ser validada experimentalmente en configuraciones más simples y controladas, como el caso de superficies planas.

Por otro lado, estudios como el de Tian *et al.* (2016) han puesto de manifiesto la influencia de la presión de contacto en la calidad del acabado superficial, y la necesidad de

mantenerla constante a lo largo del movimiento del robot. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en superficies curvas o configuraciones específicas, sin haber antes analizado de forma detallada cómo varía la fuerza durante desplazamientos sobre superficies planas con herramientas deformables. Con nuestro planteamiento pretendemos crear bases más sólidas de conocimiento antes de abordar casos más complejos.

A partir de estas consideraciones, el presente trabajo plantea como objetivo desarrollar un procedimiento experimental que permita caracterizar la relación entre la penetración de una herramienta de esponja y la fuerza normal ejercida sobre una superficie plana no deformable. Además, se busca analizar el comportamiento dinámico de la herramienta durante el desplazamiento horizontal, incluyendo la evolución de las fuerzas tangenciales y momentos en la muñeca del robot. Esta caracterización servirá como base para futuros desarrollos de estrategias de control de fuerza en procesos automatizados de pulido con herramientas blandas, lo cual está fuera del alcance del presente trabajo.

3. Metodología

3.1. Sistema robótico

El modelo de robot elegido es el KUKA LBR iiwa 14 R820, un robot colaborativo de siete ejes (ver Figura 1). Este modelo incorpora sensores de par en cada una de sus articulaciones, lo que permite detectar fuerzas externas con alta precisión y aplicar estrategias de control por fuerza. La configuración del robot se gestiona mediante el sistema ROS (Robot Operating System) que es un middleware empleado en robótica.



Figura 1 Robot KUKA LBR iiwa 14 R820 (Fuente: KUKA Robotics).

3.2. Sensor

Para la medición de las fuerzas y momentos en la muñeca del robot durante los ensayos, en la base de la herramienta final se ha incorporado un sensor de fuerza y par (sensor F/T) modelo FT-45 del Instituto Italiano de Tecnología (IIT). Este sensor proporciona información tridimensional de fuerzas y torques, y ha sido especialmente configurado para capturar la interacción entre la esponja y la superficie.

3.3 Esponjas de pulido

Para el contacto con la superficie se utiliza el kit de tratamiento superficial para carrocerías de automóvil que se muestra en la Figura 2 (modelo SPTA POSWMIX36), con un adaptador estático (sin rotación) que incorpora 5 esponjas abrasivas de 80 mm de diámetro y diferentes durezas, desde T20 hasta T120. La elección de estas esponjas permite simular condiciones reales de trabajo en procesos de acabado superficial, como matizado, pulido o abrillantado, en los que es común el uso de útiles deformables.



Figura 2 Esponjas de pulido SPTA

3.4 Setup experimental

Todo el sistema ha sido integrado en una plataforma portátil montada sobre un carro con elementos de chapa pulida de acero inoxidable 316 (dureza 79 HRB y acabado 2B), que contiene el robot KUKA LBR iiwa 14, el panel de control industrial OMRON NYP27 con pantalla táctil, y un sistema de adquisición de datos formado por los sensores internos del robot y el sensor F/T montado en la muñeca del robot (ver Figura 3). Esta configuración permite transportar el equipo fácilmente a ferias de robótica o sesiones de demostración, sin comprometer la estabilidad o precisión del experimento. Los ensayos se realizan sobre una superficie plana de acero inoxidable, lo que proporciona condiciones homogéneas para la caracterización.

3.5 Procedimiento de los experimentos y parámetros

Se ha diseñado una metodología para caracterizar esponjas que consiste en 3 experimentos diferentes. El primero es una bajada hasta una profundidad variable, se mantiene la posición con la esponja bajo presión durante 20 segundos y luego se retira el robot a su posición de reposo. Este experimento se repite cambiando la profundidad con incrementos de 0.5 mm hasta 10 mm de profundidad. Para dar mayor robustez al estudio, el ensayo completo se repite 10 veces con el objetivo de obtener valores estadísticos de cada parámetro.



Figura 3 Plataforma experimental con el robot KUKA LBR iiwa 14

El segundo ensayo es igual que el anterior, pero añade una ligera vibración para ver su efecto sobre la fuerza de contacto y vencer la fricción estática. Se modifican los mismos parámetros que en el caso anterior, añadiendo la frecuencia (10-100 Hz) y amplitud de vibración (1.0-10.0 mm).

El último experimento es una secuencia de movimientos: aproximación, contacto inicial, desplazamiento lateral y retirada. Los parámetros que varían en este experimento son la profundidad (1-10 mm con incrementos de 1 mm) y la velocidad de desplazamiento lateral (10-100 mm/s con incrementos de 10 mm/s). Durante todos los ensayos se registran los datos de fuerzas, pares de fuerza y estados articulares (posiciones, velocidades y pares), para su posterior análisis.

4. Resultados

Se han realizado dos ensayos preliminares, para observar cómo actúan las esponjas y los resultados que previsiblemente se van a obtener cuando finalice el estudio completo. Para estos ensayos se ha utilizado la esponja verde cuyo material es el más rígido y duro (T120). En la Figura 4 se muestran los resultados del primer experimento, donde se han ejecutado varios movimientos de bajada vertical. En cada repetición se ha aumentado la profundidad de penetración en 0,5 mm, hasta una penetración de 10 mm. Se observa que hasta la quinta iteración (aproximadamente 2 mm de penetración) la fuerza es proporcional a la penetración. Además, aparece un transitorio que se atribuye al efecto amortiguador que tiene el material viscoelástico de la esponja. La Figura 5 muestra el segundo ensayo, en el que se ha bajado hasta una profundidad de 5 mm y se han realizado 8 desplazamientos laterales a una velocidad de 150 mm/s.

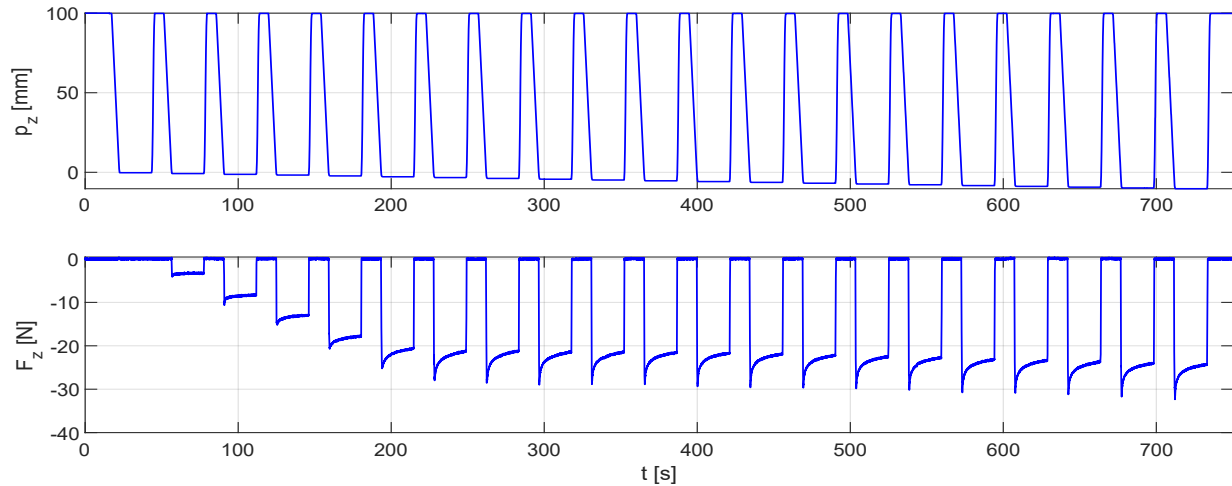


Figura 4 Variables del sensor F/T durante el ensayo experimental: penetración (p_z) en mm y fuerza en el eje z (F_z) en N.

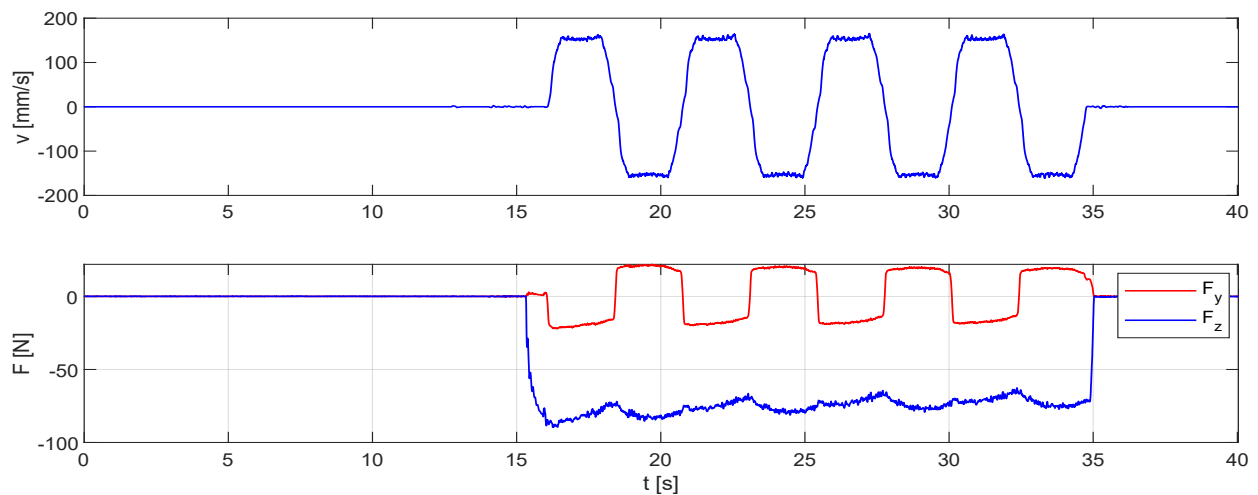


Figura 5 Variables del sensor F/T durante el ensayo experimental: velocidad de desplazamiento (v) en mm/s y fuerza en los ejes z e y (F_z , F_y) en N.

Con los datos de estos ensayos se estudiará la relación entre la fuerza normal y la penetración vertical en todas las esponjas, así como la evolución de las fuerzas laterales y momentos generados durante el desplazamiento.

Para estudiar la relación entre la fuerza normal y la penetración se utilizará la ley de Hooke, $F_z = k \cdot \delta$, siendo k la constante elástica o de rigidez y δ la penetración. Si se el comportamiento no es lineal se probará a usar un modelo no lineal, por ejemplo, $F_z = a \cdot \delta^b$, u otros modelos de regresión que permitan un mejor ajuste de los datos.

Para la fuerza en el eje y (dirección de desplazamiento), se usará una ecuación de fuerza de fricción $F_y = \mu \cdot F_z$ para obtener el coeficiente de fricción entre la superficie de los ensayos y cada una de las esponjas.

Como se ha explicado en la Sección 3.4, además del coeficiente de rigidez (o constante elástica) de la esponja y el de rozamiento, también se van a estudiar otro tipo de relaciones, como por ejemplo la velocidad de desplazamiento lateral con los momentos que aparecen en la esponja.

Se ha realizado otro experimento de penetración vertical sin desplazamiento, como el de la Figura 4, con la esponja más blanda de color rojo (T20) y con los datos se ha obtenido un primer valor de la constante de rigidez (k). En la Figura 6 se observa linealidad hasta una penetración de 1.2 mm, pero

después aparece un efecto de saturación y el comportamiento tiende a ser menos lineal, por lo que el modelo no se ajusta bien para valores altos de penetración.

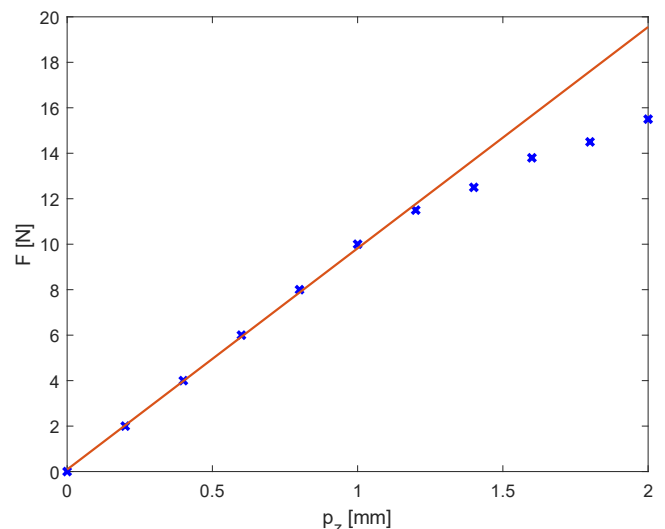


Figura 6 Datos del segundo ensayo: se representa la Fuerza [N] frente a la penetración [mm]. Los puntos representan los datos tomados y la recta roja, la línea obtenida.

Para obtener la constante de rigidez de la esponja con el mayor ajuste posible se han usado sólo los datos de la zona lineal. Se ha obtenido un valor de $k = 9.73 \text{ N/mm}$.

Aunque este primer ensayo para la identificación paramétrica se ha realizado con la esponja más blanda de todas (T20), se han hecho pruebas con otras esponjas de mayor rigidez y se han observado comportamientos viscoelásticos, como en la Figura 4. Esto hace que al penetrar con la esponja aparezca un periodo transitorio en el que la fuerza se va reduciendo hasta estabilizarse en el valor final. Por tanto, para caracterizar mejor las esponjas, hará falta modelar un sistema de primer orden del tipo muelle-amortiguador: $F = k \cdot \delta + c \frac{d\delta}{dt}$, siendo c el coeficiente de viscosidad.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de una plataforma y una metodología experimental para el estudio del pulido mediante robots colaborativos con herramientas que incorporan partes blandas. Se ha logrado integrar con éxito el robot KUKA LBR iiwa 14, un sensor de fuerza/par, y una herramienta de esponja comercial en un entorno controlado, permitiendo registrar de forma precisa las fuerzas, torques y parámetros articulares durante el proceso de contacto y desplazamiento sobre superficies planas.

A través del primer ensayo experimental, se ha podido visualizar el comportamiento dinámico de la esponja en contacto con la superficie, tanto en fase de compresión como durante el desplazamiento lateral. Los datos obtenidos constituyen una base sólida para el modelado del comportamiento mecánico de la herramienta, así como para el diseño de futuras estrategias de control de fuerza en procesos de pulido automatizado.

6. Futuros trabajos

La puesta a punto de esta plataforma experimental y la caracterización inicial de las esponjas abren la puerta a múltiples líneas de trabajo futuras. En primer lugar, una vez obtenido un modelo válido de la relación entre fuerza y penetración, será posible realizar ensayos sobre superficies curvas o irregulares, como por ejemplo moldes, chapas o carrocerías, donde el control de la fuerza de contacto adquiere mayor relevancia.

Asimismo, se plantea la posibilidad de modificar la herramienta de pulido, incorporando abrasivos líquidos o en pasta a la esponja, simulando condiciones más realistas de

aplicaciones industriales. Otra línea de interés es el estudio del desgaste de la esponja y su influencia en el modelo de contacto, lo cual puede ser relevante en ensayos prolongados o en procesos de producción repetitiva.

También se podrían integrar sistemas de visión artificial para el seguimiento de trayectorias y control adaptativo del robot, o incluso implementar estrategias de aprendizaje automático para ajustar los parámetros de contacto en función del material o geometría de la pieza. Finalmente, la plataforma se presta a ser utilizada como herramienta educativa o de demostración en cursos de robótica y automatización, al combinar elementos reales de sensorización, planificación y análisis de datos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) del Gobierno de España, a través del proyecto PID2023-146747NA-C22, y por la Unión Europea a través del programa Europa Digital (Grant Agreement 101083002).

Referencias

- Dieste, J.A., Fernández, A., Roba, D., Gonzalvo, B., Lucas, P. 2013. Automatic Grinding and Polishing Using Spherical Robot, *Procedia Engineering* 63, 938-946.
DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.221
- García, A., Gracia, L., Solanes, J.E., Gírbés-Juan, V., Perez-Vidal, C., Tornero, J., 2021. Robotic assistance for industrial sanding with a smooth approach to the surface and boundary constraints, *Computers & Industrial Engineering* 158, 107-366.
DOI: 10.1016/j.cie.2021.107366
- García, A., Solanes, J.E., Gracia, L., Muñoz-Benavent, P., Gírbés-Juan, V., Tornero, J., 2021. Bimanual robot control for surface treatment tasks. *International Journal of Systems Science* 53, 74-107.
DOI: 10.1080/00207721.2021.1938279
- Ke, X., Yu, Y., Li, K., Wang, T., Zhong, B., Wang, Z., Wang, C., 2023. Review on robot-assisted polishing: Status and future trends. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 80, 102-482.
DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102482
- Tian, F., Jiang, G., Zhang, S., Wang, Y., Xu, J., 2016. Polishing pressure investigations of robot automatic polishing on curved surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89, 1963-1972.
DOI: 10.1007/s00170-016-8527-2
- Xiao, Y., Ding, H., 2020. Experimental investigation and modeling of contact characteristics for polishing with a tilted sponge polishing disc. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, 101-833.
DOI: 10.1016/j.rcim.2019.10