

Aplicaciones de una garra robótica adaptativa con dedos rotativos

Garralon-López, R.¹, Acebal-Colli, S.¹, Ruiz-Ruiz, F.J.¹, Gómez-de-Gabriel, J.M.^{a,*}, Fernández-Madrigal, J.A.¹

^aDpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Málaga, 29071, Málaga, España.

To cite this article: Garralon-López, R., Acebal-Colli, S., Ruiz-Ruiz, F.J., Gómez-de-Gabriel, J.M., Fernández-Madrigal, J.A. 2023. Applications of a robotic hand with rolling fingers. XLIV Jornadas de Automática. 593-598. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.593>

Resumen

La automatización industrial permite una importante reducción de costes en la fabricación de gran diversidad de productos. En esta optimización comercial juegan un papel esencial los robots manipuladores. Sin embargo, a pesar de su éxito, la flexibilidad de los efectores finales de dichos robots aún tiene margen de mejora, en particular de cara a la industria ágil que se contempla actualmente en el contexto Europeo. En este trabajo presentamos los resultados del diseño e implantación de un prototipo de garra robótica con dedos cuya piel tiene capacidad de rotación activa además de tendones, lo que permite desplazar de forma segura la posición de los objetos agarrados sin soltarlos. Las implicaciones de este diseño pueden ser muy importantes, desde tareas colaborativas de ensamblado donde se requieren actualmente múltiples brazos, que se podrían hacer solamente desplazando el punto de agarre, hasta la manipulación avanzada de componentes no rígidos como mazos de cables. En este artículo describimos los dedos con superficies activas, la garra donde se han montado y los experimentos realizados para demostrar su utilidad.

Palabras clave: Dedo robotico, manipulador subactuado, tendón, superficie activa, agarre, flexión, rodante.

Applications of an adaptive robotic hand with rolling fingers

Abstract

Industrial automation has made possible to commercialize a wide range of products while reducing their manufacturing cost. Robot manipulators have played an essential role in this revolution; however, despite their success, the flexibility of the end effectors still has room for improvement, in particular regarding the agile industry that is currently envisaged in the European context. In this paper we present the results of the design and implementation of a prototype of a robotic gripper with rolling fingers that can also grasp, which allows the position of grasped objects to be shifted. The implications of this design can be very important, ranging from collaborative assembly tasks where multiple arms are currently used, which could be done by just one arm by shifting the grasping point, to the manipulation of non-rigid components in a safe way. In this paper we describe the fingers with active surfaces, the gripper where they have been mounted, and the experiments performed to demonstrate their utility.

Keywords: Robotic finger, underactuated manipulator, tendon, active surface, grasping, bending motion, rolling.

1. Introducción

La competitividad actual del mercado obliga a ofrecer una cada vez mayor gama de productos, de más complejidad de fabricación, con menores plazos de entrega y a mejores precios. La automatización de procesos industriales es una herramienta básica hoy en día para satisfacer todos estos objetivos. En la fabricación industrial, el uso de sistemas robóticos en particular

crece de manera sostenida desde hace décadas, particularmente en el caso de los brazos manipuladores (International Federation of Robotics (IFR), 2022).

Este tipo de robots suele estar dotado de efectores finales intercambiables, lo que aporta gran adaptabilidad a diversas tareas de manipulación, pero aun así, las garras robóticas comerciales suelen tener poca capacidad de configuración automática. En el ámbito de la investigación, en los últimos años se han

*Autor para correspondencia: jmgomez@uma.es

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

propuesto diseños innovadores para efectores finales (Pelliccia et al., 2018; Beddow et al., 2021), algunos con capacidad de mantener un agarre estable y manipular objetos en la mano a la vez (Gómez-de Gabriel et al., 2019; Yuan et al., 2020; Yuan et al., 2020; Trinh et al., 2019; Spiers et al., 2018; Bircher et al., 2017).

El concepto de garra adaptativa ha sido ampliamente estudiado por la comunidad científica, produciendo diseños tanto de tipo blando (*soft*) (Zhou et al., 2019; Abondance et al., 2020) como de tipo subactuado (Laliberte et al., 2002; Luo et al., 2016). El principal inconveniente de las garras blandas es que su fuerza de agarre es limitada y no proporcionan una alta precisión, por lo que no son adecuadas para la manipulación de algunos tipos de objetos. Respecto a las garras subactuadas, nos encontramos aquellas que tienen enlaces rígidos (*rigid links*) (Kim et al., 2020), que se pueden encontrar de hecho en el mercado de la mano de fabricantes de sistemas de automatización industrial como *Robotiq* (Robotiq, 2023) o *Robotis* (Robotis, 2023), o con tendones (Yoon et al., 2022). Cuanto mayor es el número de falanges, es también mayor el número de puntos de contacto con el objeto, lo que proporciona una mayor adaptabilidad y estabilidad de sujeción. El enfoque basado en tendones posee la ventaja de poder actuar sobre múltiples falanges con un único tendón, simplificando así el diseño de la garra.

Los aportes científicos sobre el desplazamiento de objetos durante el agarre (*in-hand manipulation*) basados en la modificación de las superficies de los dedos de la garra comenzaron mediante el empleo tanto de superficies pasivas, añadiendo fricción variable (Spiers et al., 2018; Trinh et al., 2019), como de métodos activos, como los que incorporan algún tipo de rodillo (Kazerooni and Foley, 2005). Por ejemplo, podemos encontrar desarrollos que pretenden obtener movimientos homónomos sobre la superficie de tres dedos, incluyendo en las falanges de los dedos rodillos y esferas activas con dos grados de libertad (Yuan et al., 2020; Yuan et al., 2020). Sin embargo, los trabajos descritos sólo proporcionan unos pocos puntos de contacto sobre la superficie, lo cual reduce su aplicación. En (Ma and Dollar, 2016; Bircher et al., 2021) se proponen superficies activas más amplias, similares a cintas transportadoras, para garras robóticas.

En esta línea, hemos presentado anteriormente un diseño de dedos altamente articulados y adaptativos originalmente ideados para integrar sistemas mecatrónicos con humanos teniendo en cuenta la sensibilidad que esto requiere (Gómez-de-Gabriel and Wurdemann, 2021) (véase Fig. 3). La piel de estos dedos mecánicos es capaz de rotar axialmente mientras que el dedo en su conjunto puede realizar un agarre adaptativo subactuado mediante tendones. En el *Workshop* (ITT, 2021) del congreso *IEEE Humanoids 2020* se realizaron demostraciones de este diseño de dedo.

Con este diseño de dedo es posible construir garras de robot capaces de desplazar o rotar objetos de forma totalmente controlada en un único agarre; la idea es dotar al efector final de varios dedos de este tipo, tal y como puede observarse en la Fig. 1 y en los prototipos mostrados en los videos (Gómez-de Gabriel, 2021a,b).

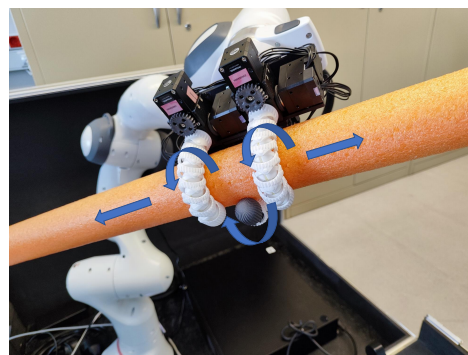


Figura 1: Vista general del demostrador de la célula robotizada con garra robótica dotada de dedos sub-actuados adaptativos con flexión y rotación.

En el presente trabajo se describe una solución basada en este tipo de dedos con superficies activas y tendones que permite realizar diversas operaciones dentro de una misma célula industrial con el objetivo de reducir costes. La utilización de varios dedos como los anteriormente descritos en una garra robótica permite que ésta pueda adaptarse a objetos con formas o tamaños variables y ejecutar diferentes tareas que por lo común involucrarían varios robots manipuladores, como la recolocación de objetos rígidos para la ampliación del espacio de trabajo efectivo, la manipulación de componentes no rígidos (p.e. cables eléctricos) de manera segura, o el ensamblado de elementos alargados. En general, las ventajas de combinar superficies activas más tendones en los dedos de una garra robótica son las siguientes:

- Ampliación de las capacidades de manipulación del robot.
- Simplificación del diseño y mantenimiento de la solución robótica mediante el uso de garras reconfigurables en lugar de elementos fijos a medida.
- Reducción de los tiempos de ejecución de las operaciones.
- Reducción del gasto energético y operacional (sensores, equipamientos...) del sistema robótico.
- Reducción del número de manipuladores requeridos para realizar ciertas tareas.

El diseño de garra robótica descrito en este trabajo se ha implantado en un manipulador real, empleando para su programado su software de control en Matlab, y se ha validado en la práctica mediante un demostrador que contiene todos los elementos mencionados y que ha sido presentado hasta la fecha en varias ferias nacionales e internacionales sobre innovación industrial (véase Fig. 1).

El presente documento está estructurado de la siguiente forma: En la sección 2 se explica el diseño mecánico de la garra con dedos subactuados adaptativos, que incluye la piel rotatoria articulada. En la sección 3 se describe la implementación del demostrador. En la sección 4 se evalúa la superficie activa propuesta durante el agarre de un objeto y se describen los tres experimentos llevados a cabo para demostrar sus potenciales aplicaciones. Finalmente, en la sección 5 se resumen las conclusiones y futuras líneas de trabajo.

2. Modelo de la garra con dedos adaptativos rotatorios

El diseño de los dedos que conforman la garra robótica propuesta se esquematiza en el despiece de la Fig. 2.

Su estructura interna, formada por falanges en forma de esferas, proporciona rigidez y soporte para el movimiento de extensión y cierre del dedo. Dos cables de nylon trenzado sujeto en la punta del dedo conecta con el servomotor, actuando como si fueran los tendones. Este tendón es desplazado por poleas de cable servocontroladas que no interfieren en las superficies de contacto entre las falanges. El mecanismo de actuación está inspirado en el mecanismo de Da Vinci (Birglen et al., 2007), pero nuestro diseño no utiliza muelles a lo largo del tendón. Además, para la acción de cierre del dedo, el primer eslabón comparte su eje con la polea del cabrestante. La posición del dedo abierto es recta y está limitada por topes mecánicos.

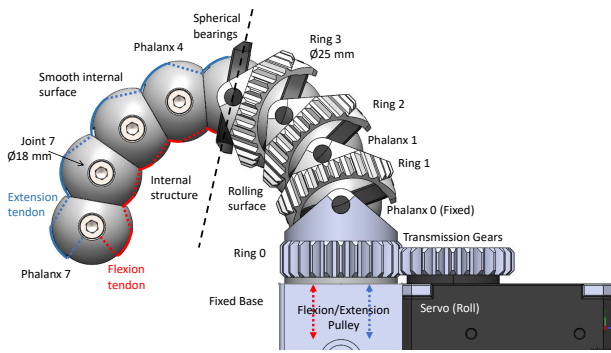


Figura 2: Vista explosionada del dedo sub-actuado adaptativo con dos grados de libertad en el que se basa esta propuesta. La estructura interior está compuesta por un conjunto de falanges unidas por articulaciones pasivas y tendones que circulan dentro del mecanismo. Una polea actuada por un servo produce el movimiento de agarre. La estructura exterior ("piel") está hecha mediante una cadena de transmisiones cardán que realizan un movimiento de precesión alrededor de las falanges, y es actuada desde la base por otro servo-actuador.

La formulación matemática completa de los movimientos del dedo puede encontrarse en Gómez-de-Gabriel and Wurde-mann (2021). Durante la flexión/extensión del dedo (movimiento 1 en la Fig. 3), el desplazamiento del tendón depende del ángulo del actuador q_a (movimiento 2 en la Fig. 3), de los valores de la unión dentada q_i y del radio de las poleas r_p y r_r , según la ec. (1):

$$r_p(q_a - q_1) = r \sum_{i=2}^n q_i \quad (1)$$

donde $0 \leq q_a \leq 90^\circ$. Las uniones restantes tienen su propio movimiento limitado para evitar interferencias mecánicas entre anillos adyacentes; en concreto $0 \leq q_i \leq q_{max}$ para todo $i = 2, \dots, n$.

Cuando el piñón gira, el movimiento se transmite través de las juntas universales que componen la piel del dedo, provocando la rotación de la superficie exterior del mismo (Fig. 2). El desplazamiento entre el ángulo de entrada y el de salida de cada articulación es de 90° . Como el movimiento angular que se transmite entre anillos adyacentes (Fig. 4) depende del ángulo de articulación q_i (las velocidades de rotación de la superficie de dos anillos adyacentes tienen una relación sinusoidal que depende de q_i), la velocidad de la superficie no es constante y que-

da limitada a medida que aumenta el número de falanges n , ya que el ángulo entre articulaciones se reduce con dicho número.

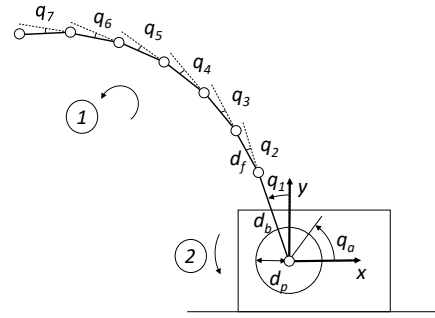


Figura 3: Modelo cinetostático simplificado de la estructura del dedo subactuado, que posee dos movimientos principales: variación de la curvatura (1) y apertura-cierre (2).

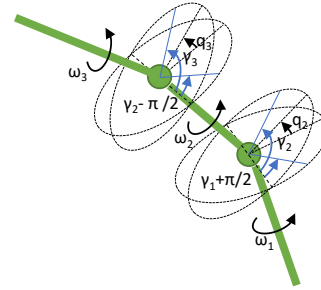


Figura 4: Modelo de la propagación de la velocidad en una junta universal doble que muestra los vínculos y ángulos relacionados.

La velocidad de avance debida a la rotación que ejerce la superficie activa del dedo viene dada por las velocidades de los diferentes anillos y su diámetro exterior d . El actuador aplica un control de velocidad con referencia ω_d en el primer anillo ω_1 y esta se transmite mediante una transmisión de tipo Cardan a los siguientes anillos ω_i en cascada. Por lo tanto, conociendo la velocidad ω_1 , podemos calcular las siguientes de velocidades ω_i de forma iterativa como se muestra en la ecuación (2), donde γ_i es el ángulo de rotación de cada anillo y q_i son los ángulos de curvatura de sus correspondientes falanges.

$$\omega_1 = \omega_d; \quad \omega_i = \frac{\omega_{i-1} \cos(q_i)}{1 - \sin^2(q_i) \cos^2(\gamma_{i-1})}, \quad i = 2, \dots, n \quad (2)$$

La velocidad de desplazamiento efectiva de un objeto dependerá de las características de las superficies de los anillos y del objeto, así como de las fuerzas de contacto de cada anillo, por lo que no pueden esperarse movimientos de desplazamiento muy suaves.

3. Implementación de la garra dotada de dedos rotatorios sub-actuados

El prototipo de un solo dedo está construido con piezas fabricadas en Nylon PA12 en una impresora 3D SLS (Selective Laser Sintering), y cuenta con una longitud total de 112 mm, excluyendo los servomotores que lo accionan. Además, las falanges y los rodamientos están tratados químicamente (pulido con vapor químico) para reducir la fricción entre piezas. Como se ha explicado anteriormente, el dedo está subactuado por la

acción de dos servomotores independientes, uno conectado mediante poleas (tendón) a lo largo de la estructura y encargado de la flexión/extensión del dedo según un movimiento horario/antihorario (*bending*), y otro conectado a través de engranajes a los anillos del dedo (piel), que hace que la superficie activa rote (*rolling*). El radio de curvatura mínimo del dedo es de 16 mm aproximadamente en la flexión. En la Tabla 1 se resumen los parámetros físicos del diseño del dedo subactuado con tendones.

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|-----------------------------------|-----------|---------|
| Número de falanges | n | 7 |
| Longitud de la falange | l | 12 mm |
| Longitud de la base de la falange | l_b | 32,5 mm |
| Diámetro exterior del dedo | d | 25 mm |
| Radio del tendón de la falange | r | 8 mm |
| Radio de la polea del tendón | r_p | 10 mm |
| Ángulo máximo de doblado en unión | q_{max} | 25° |

Tabla 1: Parámetros físicos del dedo con superficie activa y tendón.

El modelo de los dos servomotores que accionan las poleas (flexión/extensión) y la superficie activa por engranajes (rotación) del dedo oponible es Dynamixel XL430-W250-T (57.2 g); para los otros dos dedos se ha usado el servomotor Dynamixel XM430-W210-T (82 g) para accionar las poleas y el servomotor Dynamixel XM430-W210-R (82 g) para rotar la piel del dedo. Los servomotores se configuran con un límite en el par máximo de cada dedo, siendo la mitad el que se marca en los dos dedos de punta blanca respecto al dedo oponible, con el objetivo de contrarrestar la fuerza aplicada de los dos dedos y así permitir la estabilidad del agarre.

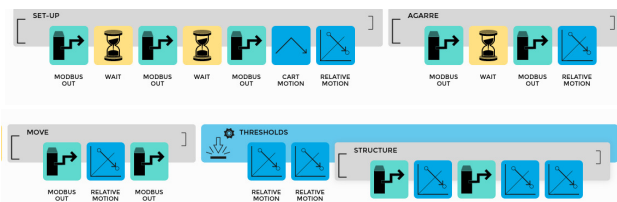


Figura 5: Interfaz de la aplicación para controlar el robot Franka Emika.

Los dos servomotores están accionados por una placa de control U2D2, logrando una fuerza de cierre máxima de 19 N y una fuerza de rozadura de 14 N.

Se han montado tres dedos como los descritos aquí en una palma para la formación de la garra robótica, distribuyéndolos de tal forma que un dedo (dedo opuesto, con punta de color gris en la Fig. 1) queda frente a los otros dos (dedos con punta blanca). Así, el brazo manipulador al que se le fija la palma como efector final adquiere la capacidad de agarrar con seguridad diversos objetos al mismo tiempo que los desplaza sin soltarlos.

Para proporcionar las señales de referencia a los servomotores se emplea el software propio del robot Research 3, de Franka Emika (Fig 5), usando el protocolo de comunicación de *modbus*. Dicha señal se envía a MATLAB usando un programa escrito en Python como servidor intermedio. Desde MATLAB se controla la garra dándole las señales de posición o de velocidad deseadas, y también se establecen las configuraciones que deberá tener antes de empezar la ejecución.

4. Aplicaciones propuestas de demostración y resultados obtenidos

El diseño propuesto de garra robótica con tres dedos subactuados con superficies activas se ha evaluado instalándola como efector final de un brazo robótico Franka Emika. Para las demostraciones se han diseñado tres experimentos, ideados para ilustrar su utilidad en aplicaciones industriales que aprovechen las superficies activas de los dedos: ampliación del espacio de trabajo (*pick, roll and place*), ensamblado (*assembly*) y manejo de materiales no rígidos (*cable manipulation*). Las tres demostraciones propuestas se muestran en la Fig. 6. La descripción de los experimentos llevados a cabo se describe a continuación:



(a) Ampliación de espacio de trabajo (*Pick, Roll and Place*)



(b) Ensamblado (*Assembly*)



(c) Manipulación de materiales no rígidos (*Cable Manipulation*)

Figura 6: Tareas de demostración en la célula robotizada utilizando una única garra con *rolling fingers* para diferentes tipos y tamaños de materiales: (a) mejora en alcance del manipulador; (b) ensamblado de perfiles y elementos tubulares con un solo manipulador; (c) acciones de cableado con un solo manipulador.

- Ampliación del espacio de trabajo —*Pick, Roll and Place* (Fig. 6(a)): En la manipulación de objetos alargados, y dadas las limitaciones de par de la muñeca del robot, es útil contar con la garra de dedos rotatorios sub-actuados, pues ésta permite realizar un agarre próximo al centro de gravedad de la pieza sin aumentar el área del espacio de trabajo. En primer lugar, se agarra el objeto por uno de sus extremos, con el centro de gravedad lejos del efector final. Posteriormente, la piel rodante de los dedos se acciona para desplazar el agarre hasta dicho centro de gravedad sin cambiar la postura del brazo. Finalmente se manipula el objeto de forma habitual.
- Ensamblado —*Assembly* (Fig. 6(b)): Se parte de un objeto agarrado que ha de ser alineado sobre los soportes donde se va a ensamblar. Una vez alineado usando la rotación de la piel de los dedos, la garra se desplaza sobre el objeto hasta el primer extremo y aplica la fuerza necesaria para encajar su extremo en uno de los soportes. Luego, se mueve hasta el

otro extremo y se aplica la fuerza necesaria para encajarlo y así completar la operación de ensamblado.

- (c) Manipulación de materiales no rígidos —*Cable Manipulation* (Fig. 6(c)): Se agarra el objeto próximo a un extremo, el brazo eleva el cable hasta la posición de inserción, y, manteniéndolo agarrado en suspensión, se acciona la rotación de la piel de los dedos para poder manipularlo de manera estable y segura, colocándolo en la posición final deseada.

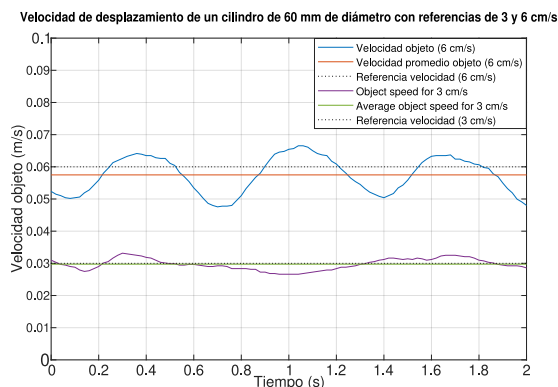


Figura 7: Comparación entre las velocidades de rotación de la piel y de desplazamiento del tubo de espuma de polietileno agarrado. Se han probado dos velocidades: 3 cm/s (velocidad del objeto correspondiente a la curva morada, cuyo promedio se dibuja con la línea verde) y 6 cm/s (velocidad del objeto correspondiente a la curva azul, cuyo promedio se dibuja con la línea roja).

Durante estos experimentos se han evaluado las funciones de flexión y rotación de los dedos sub-actuados mediante la medición a través de un sensor externo de la velocidad de desplazamiento resultante al aplicar distintas velocidades de rotación de la piel. En particular, se ha utilizado como objeto manipulable un tubo de espuma de polietileno de 6 cm de diámetro durante el agarre de un dedo. Se muestran los resultados en la Fig. 7. Para una velocidad de rotación en superficie de referencia de 3 cm/s se obtiene una velocidad de desplazamiento del objeto con pequeñas ondulaciones ligeramente atenuadas (curva morada), cuyo valor promedio (línea verde) es prácticamente igual a la velocidad de referencia (3 cm/s). Estas ondulaciones son más pronunciadas cuando aumentamos la velocidad de rotación de la piel del dedo (superficie activa), como puede comprobarse fijando la velocidad de rotación de referencia en 6 cm/s; así se obtienen pequeñas variaciones de la velocidad del tubo durante su desplazamiento, como indica la curva de color azul, cuya forma es sinusoidal (como se describe en la ec. (2)). El valor promedio de esta curva (línea roja) permanece debajo del valor referencia (6 cm/s). En la práctica, estas variaciones son visualmente inapreciables, pero sí producen sonido audible durante las pruebas. Esto se debe a que la transmisión entre uniones no es perfecta, y en ningún momento ha supuesto el no poder llevar a cabo las pruebas, sin producirse mal funcionamiento ni daños sobre la superficie del objeto.

En la Fig. 8 se muestra el par de torsión que soporta la garra al sujetar un objeto a medida que se aleja de su centro de gravedad. Se han realizado experimentos con diferentes objetos y se han medido los pares obtenidos durante el desplazamiento utilizando la capacidad de estimación de fuerzas y pares externos proporcionada por el brazo robot. En la figura se muestran los

datos de tres casos utilizando objetos cilíndricos con tres masas ($m_1 = 237\text{g}$, $m_2 = 158\text{g}$, $m_3 = 62\text{g}$) y diámetros diferentes ($d_1 = 50\text{mm}$, $d_2 = 95\text{mm}$, $d_3 = 60\text{mm}$) partiendo desde el centro de gravedad del objeto, efectuando medidas durante el desplazamiento mediante el efecto rotativo de los dedos. A medida que se desplaza el centro de gravedad, se obtienen mayores pares sobre la garra, el objeto.

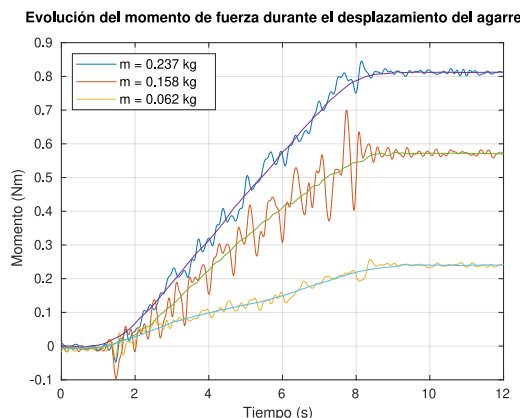


Figura 8: Comparación de la evolución en tiempo del par aplicado por la piel del dedo subactuado con filtro paso bajo para tres objetos con masa diferente, junto al valor promedio de cada curva aplicando un filtro ventana.

Durante el movimiento de desplazamiento con referencia constante de 6 cm/s, se obtienen perturbaciones causadas por la ausencia de velocidad constante en los anillos de los dedos, en combinación con las diferentes propiedades físicas de los objetos. Sin embargo, mejorando la calidad de la estimación de pares y una vez filtradas estas señales, se pueden reconstruir parámetros clave del objeto agarrado como serían la masa y la distancia al centro de gravedad, pudiéndose así identificar parámetros o clasificar los objetos que se están manipulando.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha implementado un diseño de garra con superficies activas en tres dedos sub-actuados con el objetivo de mejorar aplicaciones industriales.

Se ha evaluado la eficacia de la superficie activa rodante del dedo subactuado midiendo la velocidad de desplazamiento final del objeto, viéndose reducida a la velocidad de referencia pero sin afectar a los resultados. Esta reducción es mayor según se aumenta la velocidad de rotación de la piel del dedo. De igual manera, depende del número de falanges del dedo y del radio del objeto desplazado. Este comportamiento se podría mitigar si se emplearan materiales de construcción de mayor calidad.

Tras la puesta en marcha de tres experimentos diferentes, se ha demostrado que con una única garra podríamos obtener ventajas en operaciones industriales, como el ensamblado. La capacidad de desplazamiento de nuestro efector final permite reubicar al punto de agarre dinámicamente sin soltar el objeto. Con ello, se pueden utilizar manipuladores de tamaño más reducido o directamente eliminar la necesidad de plataformas móviles, lo que reduciría el coste monetario. Gracias a la estructura interna del dedo, en un agarre simple se podrían realizar manipulaciones de objetos con diferentes formas, incluso de materiales no rígidos, como por ejemplo cables eléctricos. En lugar de utilizar dos manipuladores convencionales, con la

garra propuesta se puede desplazar el cable con el movimiento de rotación de la piel de los dedos. Con esto se obtiene un agarre eficiente continuamente del objeto. Además, la posibilidad de añadir dedos sería totalmente factible según las operaciones destinadas de la garra.

Este diseño se ha llevado a cabo con materiales y motores de bajo coste, por lo que las fuerzas y la capacidad de trabajo sobre diferentes objetos podrían mejorarse si se fabricara con materiales y servomotores de altas prestaciones.

Como trabajos futuros sobre el diseño del presente artículo, se estudiará la inclusión de distintas tecnologías en busca de ampliar las aplicaciones de la garra, como pudiera ser añadir sensores que nos permitan analizar el material del objeto a trabajar para la clasificación u óptima manipulación del mismo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el contexto del proyecto AT21-00051 de transferencia de conocimiento entre los agentes del sistema andaluz del conocimiento y el tejido productivo (Gómez-de Gabriel and Fernández-Madrigal, 2023), financiado en el marco del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (PAIDI 2020), y también como parte del proyecto de investigación UMA20-FEDERJA0052 financiado por el Operativo FEDER 2014-2020.

Referencias

Abondance, S., Teeple, C. B., Wood, R. J., 2020. A Dexterous Soft Robotic Hand for Delicate In-Hand Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters* 5 (4), 5502–5509.
DOI: 10.1109/LRA.2020.3007411

Beddow, L., Wurdemann, H., Kanoulas, D., 2021. A caging inspired gripper using flexible fingers and a movable palm. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

Bircher, W. G., Dollar, A. M., Rojas, N., 2017. A two-fingered robot gripper with large object reorientation range. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 3453–3460.
DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989394

Bircher, W. G., Morgan, A. S., Dollar, A. M., 2021. Complex manipulation with a simple robotic hand through contact breaking and caging. *Science Robotics* 6 (54), eabd2666.
URL: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abd2666>
DOI: 10.1126/scirobotics.abd2666

Birglen, L., Laliberté, T., Gosselin, C. M., 2007. *Underactuated robotic hands*. Vol. 40. Springer.

Gómez-de Gabriel, J., 2021a. Video of the preliminary final effector using rolling fingers (1).
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9k1vntjJ9sU>

Gómez-de Gabriel, J., 2021b. Video of the preliminary final effector using rolling fingers (2).
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ykNHeZwr1rU>

Gómez-de Gabriel, J., Fernández-Madrigal, J., 2023. Website of the research project AT21-00051.
URL: <https://babel.isa.uma.es/rollgrip/>

Gómez-de Gabriel, J., Muñoz-Ramírez, A. J., Palacios, M., Parras, L., 2019. Rapid end-of-arm-tooling manufacturing of vacuum grippers. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 32 (12), 1231–1241.

URL: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1690684>
DOI: 10.1080/0951192X.2019.1690684

Gómez-de-Gabriel, J. M., Wurdemann, H. A., 2021. Adaptive underactuated finger with active rolling surface. *IEEE Robotics and Automation Letters* (Under evaluation 6).

International Federation of Robotics (IFR), 2022. *World Robotics 2022 – Industrial Robots*. Tech. rep., IFR, VDMA Services GmbH, Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt, Germany.
URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2022.pdf

ITT, 2021. *Workshop Humanoids 2020*.
URL: <https://www.iit.it/web/hrii/humanoids2020-workshop>

Kazerouni, H., Foley, C., April 2005. A robotic mechanism for grasping sacks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 2 (2), 111–120.
DOI: 10.1109/TASE.2005.844630

Kim, Y.-J., Song, H., Maeng, C.-Y., 2020. BLT Gripper: An Adaptive Gripper With Active Transition Capability Between Precise Pinch and Compliant Grasp. *IEEE Robotics and Automation Letters* 5 (4), 5518–5525.
DOI: 10.1109/LRA.2020.3008137

Laliberte, T., Birglen, L., Gosselin, C., 2002. Underactuation in robotic grasping hands. *Machine Intelligence & Robotic Control* 4 (3), 1–11.

Luo, C., Yang, S., Zhang, W., Ren, Z., Liang, J., 2016. MPJ Hand: A self-adaptive underactuated hand with flexible fingers of multiple passive joints (), 184–189.
DOI: 10.1109/ICARM.2016.7606916

Ma, R. R., Dollar, A. M., 08 2016. In-Hand Manipulation Primitives for a Minimal, Underactuated Gripper With Active Surfaces Volume 5A: 40th Mechanisms and Robotics Conference.
URL: <https://doi.org/10.1115/DETC2016-60354>
DOI: 10.1115/DETC2016-60354

Pelliccia, L., Schumann, M., Dudczig, M., Lamonaca, M., Klimant, P., Gironimo, G. D., 2018. Implementation of tactile sensors on a 3-fingers robotic adaptive gripper and visualization in vr using arduino controller. *Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* 67, 250–255.

Robotiq, 2023. Pinzas rígidas del fabricante de sistemas de automatización ROBOTIQ.
URL: <https://robotiq.com/es/productos>

Robotis, 2023. Pinzas rígidas del fabricante de sistemas de automatización ROBOTIQ.
URL: <https://www.robotis.us/robotis-hand/>

Spiers, A. J., Calli, B., Dollar, A. M., 2018. Variable-friction finger surfaces to enable within-hand manipulation via gripping and sliding. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (4), 4116–4123.
DOI: 10.1109/LRA.2018.2856398

Trinh, H. X., Ho, V. A., Shibuya, K., 2019. Theoretical foundation for design of friction-tunable soft finger with wrinkle's morphology. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (4), 4027–4034.
DOI: 10.1109/LRA.2019.2926960

Yoon, S. J., Choi, M., Jeong, B., Park, Y.-L., 2022. Elongatable Gripper Fingers With Integrated Stretchable Tactile Sensors for Underactuated Grasping and Dexterous Manipulation. *IEEE Transactions on Robotics* 38 (4), 2179–2193.
DOI: 10.1109/TR0.2022.3144949

Yuan, S., Epps, A. D., Nowak, J. B., Salisbury, J. K., 2020. Design of a roller-based dexterous hand for object grasping and within-hand manipulation. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 8870–8876.
DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197146

Yuan, S., Shao, L., Yako, C. L., Gruebele, A., Salisbury, J. K., 2020. Design and control of roller grasper v2 for in-hand manipulation. In: *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 9151–9158.
DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340953

Zhou, J., Chen, X., Chang, U., Lu, J.-T., Leung, C. C. Y., Chen, Y., Hu, Y., Wang, Z., 2019. A Soft-Robotic Approach to Anthropomorphic Robotic Hand Dexterity. *IEEE Access* 7, 101483–101495.
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929690