

Manipulación Diestra de Objetos Desconocidos Usando Puntos de Contacto Virtuales

Andrés Montaña, Raúl Suárez*

*Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Av. Diagonal 647, planta 11, 08028 Barcelona, España.*

Resumen

En este trabajo se presenta una estrategia de manipulación que permite rotar objetos desconocidos usando una mano robótica equipada con sensores táctiles. Las configuraciones de la mano que permiten cambiar la posición del objeto se calculan usando la información táctil y cinemática que se obtiene mientras se manipula el objeto, y razonando en base a las posiciones deseadas y reales de las yemas de los dedos durante la manipulación, teniendo en cuenta que las primeras no son físicamente alcanzables al estar situadas en el interior del objeto y son por lo tanto posiciones virtuales que tienen asociados puntos de contacto virtuales. El enfoque propuesto fue probado exitosamente usando tres dedos de una mano robótica antropomorfa (Allegro Hand), cuyas puntas de los dedos han sido modificadas para incluir los sensores táctiles (WTS-FT). En la validación experimental se manipularon exitosamente varios objetos de uso cotidiano de diferentes formas, rotándolos satisfactoriamente sin necesidad de conocer su forma. *Copyright © CEA.*

Palabras Clave: Robótica, Manipulación, Control de fuerzas, Sensores.

1. Introducción

La manipulación diestra ha sido durante la última década uno de los campos con mayor interés en la investigación en robótica (Okamura et al., 2000). Muchos de los enfoques propuestos en este campo están inspirados en la capacidad humana para interactuar con todo tipo de objetos, lo que ha impulsado el diseño de una amplia variedad de manos robóticas con características antropomorfas (Bicchi, 2000). La inclusión de sensores táctiles en las manos robóticas incrementa sus capacidades, ya que permiten obtener información del contacto con el objeto durante la manipulación (Kappassov et al., 2015), ayudando a la ejecución de tareas de mayor complejidad tanto en entornos cotidianos como industriales. Una de las aplicaciones más interesantes de los sensores táctiles es en la manipulación de objetos desconocidos, considerándose como tales aquellos objetos que se manipulan sin conocer a priori información sobre su forma o características físicas como el peso o centro de masa.

El problema de manipulación de objetos desconocidos ha sido abordado desde diferentes perspectivas, algunas de ellas centradas en el diseño de hardware, por ejemplo, basándose en la capacidad de los dedos para rodar sobre la superficie del objeto se han propuesto diseños de garras especializadas que permiten identificar la superficie del objeto y planificar los movimientos para ejecutar la manipulación (Bicchi et al.,

1999), también se han propuesto diseños de sensores táctiles para obtener información sobre el contacto y aumentar las capacidades de manipulación de las manos robóticas (Ward-Cherrier et al., 2017). Otros enfoques están centrados en las estrategias de manipulación, por ejemplo, descomponiendo la manipulación en pequeños movimientos que permitan describir una tarea compleja en términos de acciones más simples (Felip et al., 2012), o diseñando controladores que usan realimentación de información táctil y cinemática para comandar el movimiento de la mano (Shaw-Cortez et al., 2018). Además, buscando dar soluciones para la tarea de exploración de objetos desconocidos se han usado sistemas de visión que complementen la información táctil (Li et al., 2015), o se han propuesto enfoques basados en redes neuronales (Funabashi et al., 2018), que también permiten la detección del deslizamiento de los dedos sobre la superficie el objeto (Agrimallós et al., 2018).

En general la manipulación tiene como objetivo la optimización de: la calidad del agarre, la configuración de la mano o la configuración del objeto manipulado, ya sea individualmente o de forma conjunta (Montaña y Suárez, 2015). Siguiendo estos objetivos se han propuesto diferentes estrategias de manipulación (Montaña y Suárez, 2018), que fueron probadas usando dos dedos de una garra industrial para manipular un objeto rotándolo en una dirección determinada.

En este artículo se presenta un enfoque que permite manipular objetos desconocidos manteniendo las fuerzas de contacto dentro de un rango deseado y evitando que el objeto caiga. La manipulación realizada es un procedimiento reactivo basado en información táctil y cinemática. Tomando como referencia los movimientos humanos cuando se rota un objeto,

*Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: andres.felipe.montano@upc.edu (Andrés Montaña), raul.suarez@upc.edu (Raúl Suárez)

URL: <https://iocnet.upc.edu/usuarios/raul.suarez/> (Raúl Suárez)

el enfoque propuesto usa tres dedos de la mano para sujetar y girar el objeto y, a diferencia de trabajos previos, no se basa en los puntos de contacto reales sino en aquellos considerados como consigna para las yemas de los dedos, aunque no sean realmente alcanzables.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: el planteamiento del problema se presenta en la Sección 2; la estrategia de manipulación propuesta y un algoritmo que resume los pasos más importantes de la misma se presentan en la Sección 3; el hardware y software utilizado en la implementación práctica, así como los resultados experimentales se encuentran en la Sección 4; y, finalmente, la Sección 5 presenta la conclusión del trabajo y una propuesta de trabajo futuro.

2. Planteamiento del problema

En este trabajo se aborda el problema de manipulación de objetos desconocidos, es decir, que durante la manipulación no se dispone de información sobre las características del objeto, como por ejemplo, su forma, peso o centro de masas. Para manipular el objeto se usan tres dedos de una mano robótica, los dedos realizan un agarre de tipo Trípodé (Feix et al., 2016), es decir, el dedo pulgar se posiciona opuesto a los otros dos dedos mediante el movimiento de abducción, de la misma forma que lo hacen los humanos. Se asume que el agarre inicial cumpla la propiedad de *force-closure* (Bicchi, 1995) (esta propiedad se describe en castellano con diferentes nombres, siendo la más habitual “equilibrio de fuerzas”). La determinación del agarre inicial está fuera del alcance de este trabajo, pero puede realizarse mediante un planificador de agarres genérico (Rosales et al., 2012) o incluso mediante prueba y error. Una vez que el objeto se encuentra sujeto en la mano, el objetivo del enfoque propuesto es calcular de forma iterativa las configuraciones de la mano que permiten rotar el objeto evitando que caiga, y, al mismo tiempo, mantener la fuerza de contacto aplicada por cada uno de los dedos dentro de un rango alrededor de un valor deseado. Las configuraciones de la mano se calculan usando únicamente información táctil y cinemática obtenida durante la manipulación, es decir, no se consideran otras fuentes externas de información, como por ejemplo un sistema de visión.

Considerando que los dedos de la mano son controlados en posición, para ejercer fuerza sobre la superficie del objeto manipulado es necesario que las posiciones de referencia enviadas a los dedos estén localizadas dentro del objeto, ya que si las puntas de los dedos se posicionan exactamente en la superficie del objeto no se produce fuerza de agarre. De aquí en adelante las posiciones de referencia enviadas a los dedos ubicadas dentro del objeto se llamarán “puntos de contacto virtuales”, ya que nunca pueden ser alcanzados. Por otra parte, la magnitud de la fuerza aplicada por las puntas de los dedos sobre el objeto depende de la distancia entre el punto de contacto virtual y el punto de contacto real alcanzado sobre la superficie del objeto. Por lo tanto, los puntos de contacto virtuales se ajustan en función del error de fuerza, calculado como la diferencia entre la fuerza deseada y la fuerza medida en cada una de las puntas de los dedos. Trabajar usando los puntos de contacto virtuales, permite manipular el objeto sin conocer su forma real.

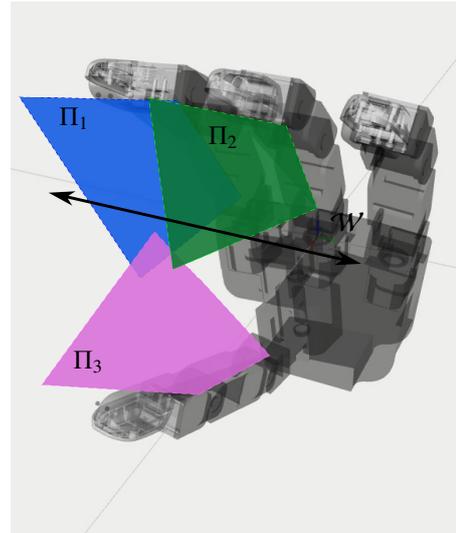


Figura 1: Mano Allegro Hand mostrando los planos de trabajo de los dedos índice, medio y pulgar, paralelos entre sí, permitiendo la rotación del objeto sobre un eje paralelo al plano de la palma de la mano y ortogonal a los planos Π_i .

La tarea de manipulación considerada es la rotación del objeto sobre un eje paralelo a la palma de la mano, que es un movimiento muy común en los humanos. Por lo tanto, los planos de trabajo de los dedos deben orientarse paralelos entre sí, tanto como sea posible, como se muestra en la Figura 1. Aunque en este trabajo la rotación se realice sobre este eje, el enfoque propuesto es fácilmente aplicable a la rotación del objeto sobre cualquier otro eje arbitrario. La manipulación podría hacerse autónomamente hasta que se alcance una orientación dada, sin embargo, la orientación actual del objeto no se puede calcular sin un observador externo. Por lo tanto, en este trabajo los comandos de manipulación deben ser proporcionados continuamente por un usuario, es decir, el objetivo es ejecutar únicamente un paso en la dirección requerida por el usuario en cada iteración.

En este trabajo el contacto entre cada dedo y el objeto se representa usando el modelo de contacto puntual. Sin embargo, generalmente, este contacto tiene lugar sobre una región de contacto, y por lo tanto el baricentro de esta región se considera como el punto de contacto real, y la suma de las fuerzas medidas en todos los taxels de la región de contacto se considera como la fuerza total de contacto.

3. Estrategia de manipulación

Un dedo f_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, es una cadena cinemática con n_i grados de libertad (*GDL*) y n_i segmentos. Cada segmento tiene asociado un sistema de referencia ε_{ij} , para ubicar su posición en el espacio. El sistema de referencia absoluto, \mathcal{W} , se encuentra ubicado en la palma de la mano. Un valor articular q_{ij} relaciona la configuración de cada segmento con respecto al segmento anterior. La configuración del dedo f_i está dada por todos los valores articulares de los segmentos que lo componen $\mathbf{q}_i = \{q_{i1}, \dots, q_{in_i}\}$. Una configuración de la mano está viene dada por la concatenación de las configuraciones de los dedos $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3\}$. En este trabajo, los dedos f_1 ,

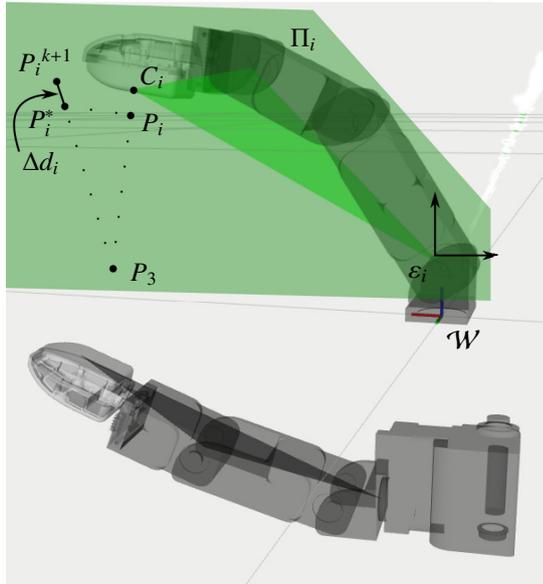


Figura 2: Ejemplo del cálculo de P_i^* y P_i^{k+1} . Cuando la fuerza de contacto F_i es mayor que la fuerza deseada F_{id} , el punto de contacto virtual deseado P_i^{k+1} se aleja una distancia Δd_i de P_i^* . Todos los puntos de interés está proyectados sobre el plano Π_i .

f_2 y f_3 corresponden a los dedos índice, medio y pulgar, respectivamente.

La manipulación es un proceso interactivo en el que el usuario debe indicar la dirección de rotación en cada iteración para ejecutar cada movimiento de la mano. Los puntos de contacto virtuales, P_i , y los puntos de contacto reales, C_i , se calculan usando la cinemática directa (FK) y las configuraciones deseadas y alcanzadas de los dedos, respectivamente. Los planos de trabajo de los dedos, Π_i , son definidos por tres puntos que corresponden a las posiciones de los sistemas de referencia de los últimos tres segmentos del dedo. Cada Π_i tiene a su vez asociado un sistema de referencia ε_i que coincide con el sistema de referencia del primer segmento que lo define.

En un agarre de tipo Trípode, el dedo pulgar actúa como dedo de soporte, mientras que los dedos índice y medio realizan el movimiento del objeto. Además, los puntos P_1 y P_2 de los dedos índice y medio son independientes entre sí. Por lo tanto, en cada iteración el dedo pulgar conserva su configuración mientras que los otros dedos rotan sobre el punto P_3 del dedo pulgar. El cálculo de todas las variables relevantes para la manipulación se realiza usando las proyecciones de los puntos P_i en los planos de trabajo de cada dedo.

Considérese el punto P_i^* , $i = 1, 2$, resultante de un desplazamiento $\pm\zeta$, de P_i sobre la línea perpendicular al segmento entre P_i y el punto de rotación fijado en P_3 , como se muestra en la Figura 2. El movimiento de los dedos correspondientes desde P_i a P_i^* rota el objeto en la dirección indicada por el usuario.

Sea d_i la distancia euclídea entre el punto de contacto virtual P_i y el punto de contacto real C_i . Dado que la forma del objeto es desconocida, cualquier movimiento de los dedos puede cambiar la fuerza de contacto F_i , y si esta fuerza se incrementa se puede dañar el objeto o la mano y si disminuye el objeto puede caer. Como uno de los objetivos de la manipulación es mantener F_i dentro de un rango alrededor de una fuerza deseada F_{id} , para

Algoritmo 1: Algoritmo de manipulación

Entrada: F_{id}

- 1 **repetir**
 - 2 Leer la dirección de rotación
 // Cálculo del estado actual del grasp
 - 3 Calcular P_i
 - 4 Calcular Π_i
 // Cálculo de nueva configuración de la mano
 - 5 Calcular P_i^* usando la dirección de rotación
 - 6 Calcular Δd_i en función de F_{id}
 - 7 Ajustar P_i^* para obtener P_i^{k+1}
 - 8 Calcular Q^{k+1} a partir de P_i^{k+1} usando IK
 // Verificación de condición de movimiento
 - 9 **si** Q^{k+1} pertenece al espacio de trabajo de la mano
 entonces
 - 10 // Mover los dedos
 Mover f_i usando Q^{k+1}
 - 11 **hasta que** Usuario finalice manipulación
-

reducir el error $e_i = F_i - F_{id}$ se calcula la variación Δd_i de la distancia d_i como,

$$\Delta d_i = \begin{cases} 2\lambda(e_i + e_i^2) & \text{if } e_i \leq 0 \\ -\lambda e_i & \text{if } e_i > 0 \end{cases}$$

donde λ es una constante predefinida determinada empíricamente. La razón de esta asimetría en el cálculo de Δd_i es que una caída potencial del objeto ($F_i \rightarrow 0$) se considera más crítica que una posible aplicación de una fuerza de agarre elevada ($F_i \gg F_d$). Entonces, para calcular los siguientes puntos de contacto virtuales P_i^{k+1} se ajusta P_i^* a lo largo del segmento que forman P_i^* y el punto de rotación P_3 , como se muestra en la Figura 2 (asumiendo de forma genérica que se está en la iteración k , el supraíndice $k + 1$ se usa para indicar los puntos o configuraciones calculados para la iteración siguiente).

La nueva configuración de la mano Q^{k+1} se calcula usando su cinemática inversa (IK) y los puntos P_i^{k+1} de cada dedo. El movimiento de los dedos sólo se realiza si los puntos de contacto P_i^{k+1} pertenecen al espacio de trabajo de los dedos, es decir, si la cinemática inversa tiene solución y permite que los puntos P_i^{k+1} puedan ser virtualmente alcanzados por la superficie de las puntas de los dedos. El Algoritmo 1 resume los pasos más importantes del procedimiento de manipulación propuesto.

4. Resultados experimentales

4.1. Descripción del hardware

Para la experimentación se utiliza la mano robótica Allegro Hand de Wonik Robotics, en su versión de mano izquierda. Esta mano tiene un diseño antropomorfo con cuatro dedos, cada uno con cuatro *GDL*, como se muestra en la Figura 3. Los dedos índice, medio y anular tiene la misma estructura cinemática, en la que el primer *GDL* permite cambiar la orientación del plano de trabajo del dedo, mientras que los otros tres *GDL* permiten alcanzar un punto con una determinada orientación dentro del plano de trabajo. En el caso del dedo pulgar, el primer *GDL*

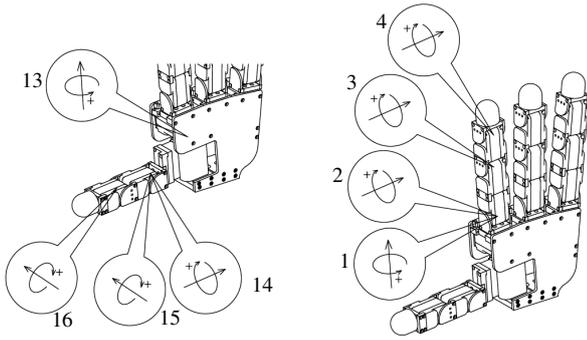


Figura 3: Mano antropomorfa Allegro Hand izquierda, con 16 GDL, indicando los ejes y direcciones de rotación de las articulaciones. Los dedos índice, medio y anular tienen la misma estructura cinemática.

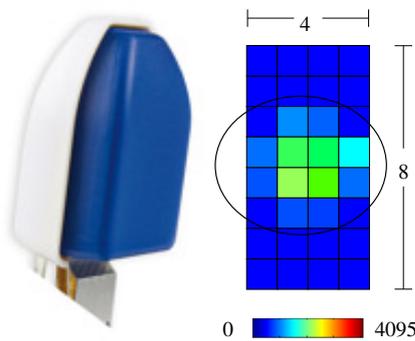


Figura 4: Sensores táctiles WTS-FT junto con una representación gráfica de una medida de fuerza en un ejemplo hipotético. La región de contacto está remarcada con una elipse. La barra de colores en la parte inferior indica la escala de colores correspondiente a los posibles valores de fuerza medibles en cada taxel.

controla el movimiento de abducción, que le permite trabajar en oposición a los otros dedos, el segundo GDL permite cambiar la orientación del plano de trabajo y los dos últimos GDL permiten alcanzar un punto dentro del plano (con dos GDL sólo es posible alcanzar una posición dentro del plano, la orientación no es controlable).

Cada articulación de la mano tiene un motor de corriente continua como actuador y un potenciómetro para medir su posición con una resolución de 0,002 grados. Los motores se controlan a bajo nivel usando un control de par. Además, se cuenta con un control PID de posición de las articulaciones que incluye compensación de gravedad, lo que permite poner la mano en una configuración deseada.

La versión comercial de la mano Allegro Hand no cuenta con sensores táctiles, por lo que las puntas de los dedos originales se han reemplazado por yemas de dedos sensorizadas WTS-FT de Weiss Robotics, de este modo se incrementan las capacidades sensoriales de la mano y es posible obtener información del contacto con los objetos que se están manipulando. Los sensores WTS-FT están compuestos por una matriz táctil de 4 x 8 taxels cuadrados de 3,8 mm de lado (ver Figura 4). Cuando se presiona sobre un taxel se obtiene un valor entre 0 y 4095, según se aplique, respectivamente, una fuerza nula o la máxima fuerza normal medible de 1,23 N.



Figura 5: Objetos de uso cotidiano utilizados para la experimentación: envase con múltiples curvaturas (izquierda), envase con caras planas (centro) y envase de forma cilíndrica (derecha).

La integración de cada uno de los módulos de software necesarios para implementar el enfoque propuesto se hizo usando Robot Operating System (ROS) (Quigley et al., 2009), que funciona como una capa de comunicaciones que permite el intercambio de datos. Entre los módulos implementados se encuentran: el controlador de posición PID de la mano Allegro Hand, un módulo para obtener la información de contacto de los sensores táctiles, una interfaz gráfica que permite cambiar la configuración de cada una de las articulaciones de la mano de forma independiente (usado para realizar el agarre inicial), y, finalmente, un módulo con la implementación del algoritmo de manipulación propuesto.

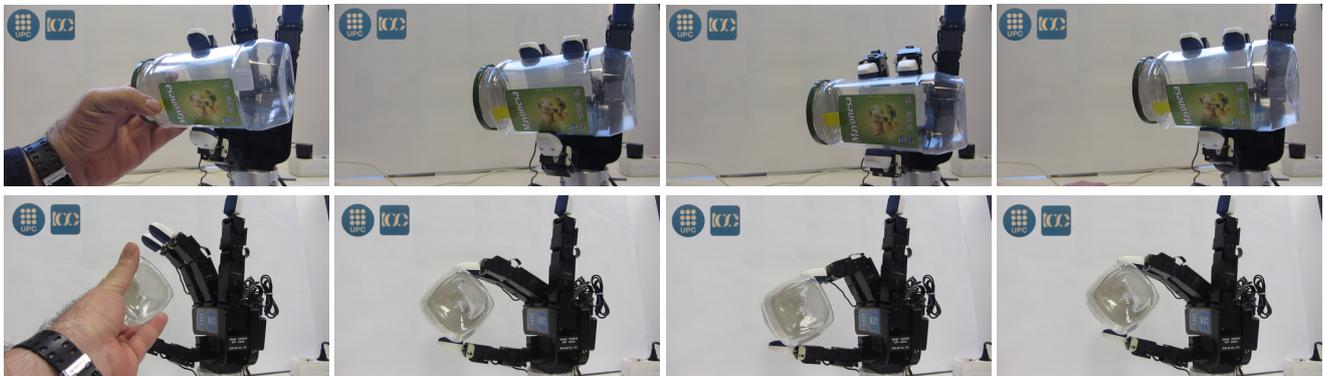
4.2. Ejemplos de manipulación

Para mostrar ejemplos ilustrativos se eligieron tres objetos de uso cotidiano con diferentes formas, mostrados en la Figura 5, a fin de mostrar que el enfoque propuesto es válido para diferentes casos. El agarre inicial se realizó usando la interfaz gráfica para controlar cada una de las articulaciones de la mano Allegro Hand, en cada uno de los ejemplos el usuario colocó el objeto en el espacio de trabajo de la mano y se cerraron los dedos sobre él hasta que se detectó fuerza en cada una de las yemas de los dedos. Las constantes empíricas requeridas en el algoritmo de manipulación propuesto fueron: la fuerza deseada se estableció en 5 N, la constante λ para calcular Δd_i se fijó en 1 mm, y la distancia ζ para calcular P_i^* se fijó en 1 mm.

En la Figura 6 se muestran instantáneas del proceso de manipulación de los tres objetos. En cada caso, la imagen de la izquierda muestra el momento previo al agarre inicial, en el que el usuario coloca el objeto en el espacio de trabajo de la mano y los dedos se van cerrando uno a uno usando la interfaz gráfica, la imagen del centro-izquierda muestra el agarre inicial resultante, la imagen del centro-derecha muestra objeto rotado en sentido horario (visto desde la derecha), y, finalmente, en la imagen de la derecha se muestra el objeto rotado en sentido antihorario. Las rotaciones en cada sentido se hicieron hasta que se alcanzó el límite del espacio del trabajo de la mano y por lo tanto ya no era posible rotar más en esa dirección.



Envase con múltiples curvaturas



Envase con caras planas



Envase de forma cilíndrica

Figura 6: Instantáneas del proceso de manipulación para los tres objetos usados en la experimentación, visto de frente y desde la derecha. Las imágenes de la izquierda muestran el momento previo al agarre inicial con el usuario sujetando el objeto en el espacio de trabajo de la mano. Las imágenes centro-izquierda muestran el agarre inicial resultante. Las imágenes centro-derecha muestran el objeto rotado en sentido horario (visto desde la derecha). Las imágenes de la derecha muestran el objeto rotado en sentido antihorario.

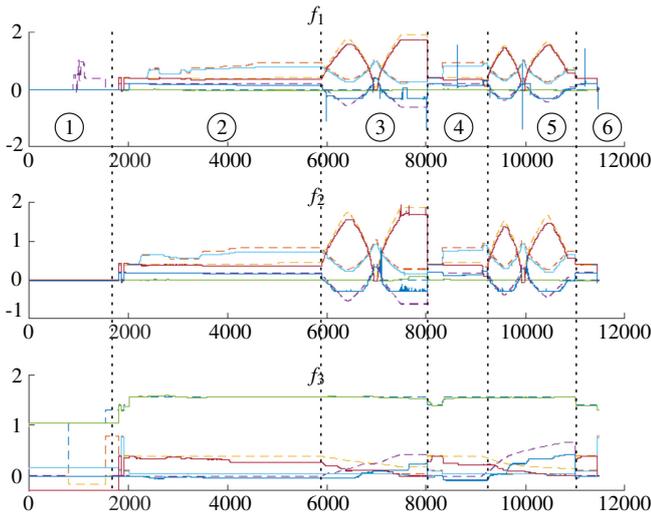


Figura 7: Evolución de los valores articulares de los tres dedos mientras se manipula el envase con múltiples curvaturas. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las seis regiones mencionadas en el texto. En las gráficas, las líneas continuas se muestran los valores articulares alcanzados por los dedos, mientras que las líneas discontinuas muestran los valores articulares deseados que se corresponden con los puntos de contacto virtuales usados para la manipulación. Todos los valores articulares están expresados en radianes.

En la Figura 7 se muestra la evolución de los valores articulares deseados y los alcanzados de los tres dedos cuando se manipuló el envase con múltiples curvaturas. Los valores articulares deseados corresponden a las configuraciones de los puntos de contacto virtuales P_i mientras que los valores articulares alcanzados corresponden a los puntos de contacto reales C_i resultantes sobre la superficie del objeto. En la figura se diferencian seis regiones delimitadas con líneas discontinuas verticales y marcadas con un número dentro de un círculo. La primera región muestra los valores articulares cuando se inicializa la mano y los dedos se encuentran en la posición inicial; en la segunda región se está realizando el agarre inicial del objeto; en la tercera región el objeto rota en una dirección, luego en la dirección contraria y finalmente se gira nuevamente en la dirección inicial; en la cuarta región se abre la mano liberando el objeto y se vuelve a hacer un agarre con los valores articulares del agarre inicial; en la quinta región se repite dos veces el proceso de rotación en ambos sentidos; finalmente, en la sexta región se libera nuevamente el objeto.

En la figura se puede observar también que los dedos f_1 (índice) y f_2 (medio) son los que varían su configuración significativamente para producir la rotación del objeto, mientras que la configuración del dedo f_3 (pulgar) permanece casi constante, cambiando solo para ajustar la fuerza de presión ejercida sobre el objeto.

La Figura 8 muestra la evolución de las fuerzas ejercidas por los tres dedos durante la manipulación del envase con múltiples curvaturas. La fuerza de presión en cada uno de los dedos se mantuvo al rededor de los 5 N durante todo el proceso de manipulación del objeto. En la figura se han marcado las mismas seis regiones descritas para los valores articulares, en este caso se puede apreciar que la fuerza en la primera región es nula debido a que el objeto aún no está sujeto en la mano, lo mismo sucede en la primera parte de la cuarta región y en la

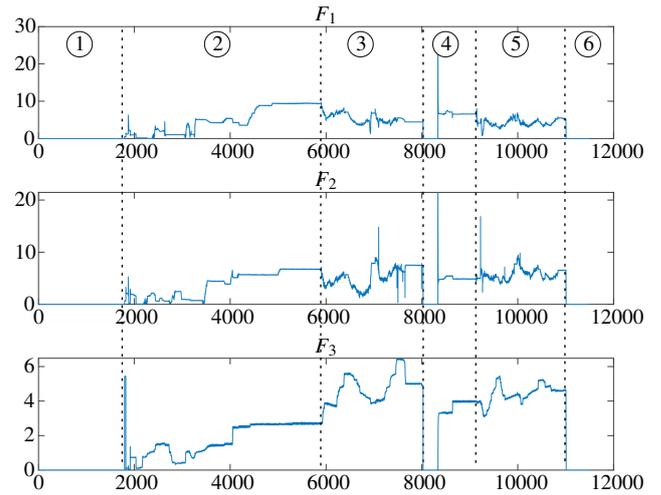


Figura 8: Evolución de las fuerzas de presión de los tres dedos mientras se manipula el envase con múltiples curvaturas. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las seis regiones mencionadas en el texto. Todas las fuerzas están expresadas en Newtons.

sexta, cuando los dedos se abrieron para liberar definitivamente el objeto.

Las Figuras 9 y 10 muestran los valores articulares y las fuerzas obtenidas en la manipulación del envase con caras planas. En este caso solo se remarcan cuatro regiones ya que se realizó un único proceso de sujeción, las dos primeras y la última son equivalentes al ejemplo anterior, mientras que en la tercera se realizan varias rotaciones consecutivas en ambas direcciones. Del mismo modo, las Figuras 11 y 12 muestran los resultados equivalentes obtenidos cuando se manipuló el objeto con forma cilíndrica.

5. Conclusión

En este trabajo se ha presentado un método para manipular objetos desconocidos basado en la información cinemática y táctil que se genera durante la propia manipulación y usando un sistema de control reactivo de fuerza para evitar presiones excesivas y posibles caídas del objeto. La validación experimental se realizó usando tres dedos de una mano robótica antropomorfa para rotar objetos con diferentes características en ambos sentidos alrededor de un determinado eje. En los experimentos, el usuario debe indicar la dirección en la que debe rotarse el objeto, y no se incluyó ningún procedimiento para medir la rotación real del objeto, que no puede obtenerse sin un observador externo como, por ejemplo, un sistema de visión. Este tipo de implementación permite emular una “telemanipulación” del objeto considerando que el usuario da órdenes de alto nivel sobre el sentido de rotación del objeto.

Una extensión natural del enfoque propuesto es la inclusión de alguna medida de calidad en la determinación de los movimientos de los dedos, ya sea relacionada con la mano, con el agarre o con la propia tarea, buscando de este modo optimizar el proceso de manipulación.

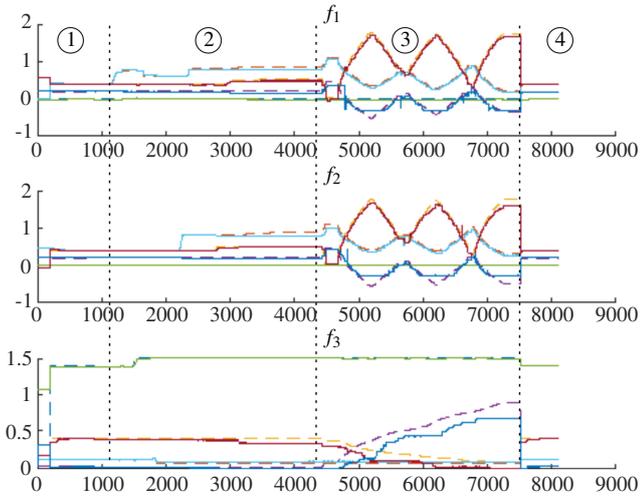


Figura 9: Evolución de los valores articulares de los tres dedos mientras se manipula el envase con caras planas. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las cuatro regiones mencionadas en el texto. En las gráficas, las líneas continuas muestran los valores articulares alcanzados por los dedos, mientras que las líneas discontinuas muestran los valores articulares deseados que se corresponden con los puntos de contacto virtuales usados para la manipulación. Todos los valores articulares están expresados en radianes.

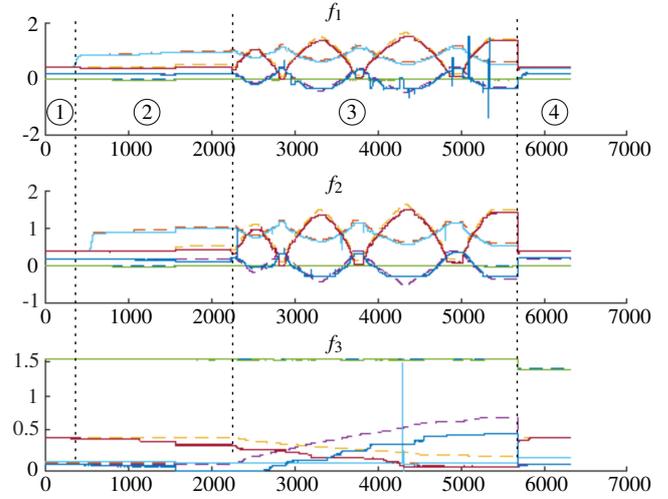


Figura 11: Evolución de los valores articulares de los tres dedos mientras se manipula el envase de forma cilíndrica. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las cuatro regiones mencionadas en el texto. En las gráficas, las líneas continuas muestran los valores articulares alcanzados por los dedos, mientras que las líneas discontinuas muestran los valores articulares deseados que se corresponden con los puntos de contacto virtuales usados para la manipulación. Todos los valores articulares están expresados en radianes.

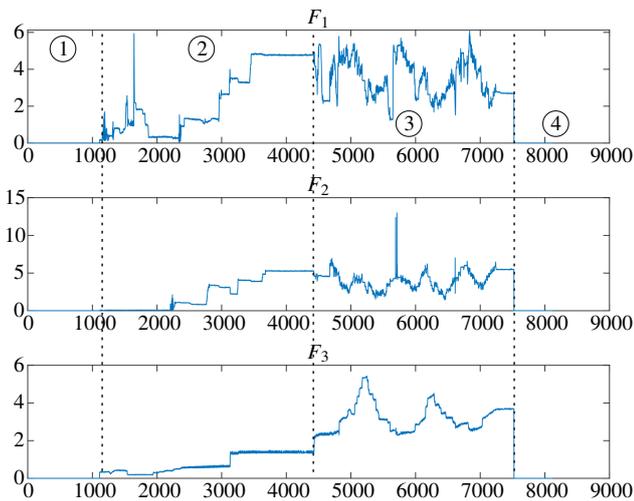


Figura 10: Evolución de las fuerzas de presión de los tres dedos mientras se manipula el envase con caras planas. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las cuatro regiones mencionadas en el texto. Todas las fuerzas están expresadas en Newtons.

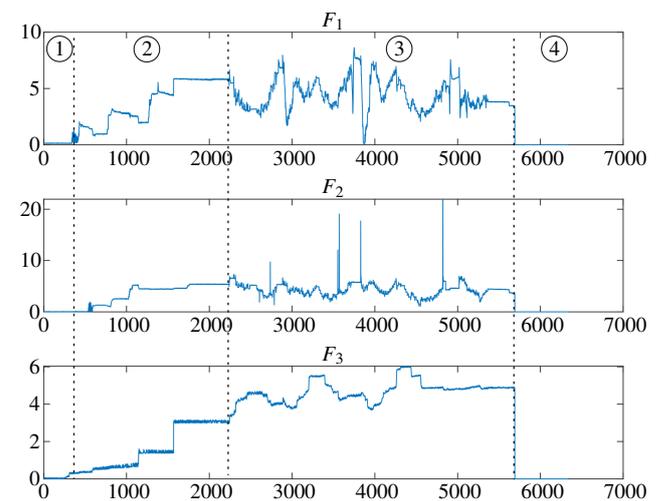


Figura 12: Evolución de las fuerzas de los tres dedos mientras se manipula el envase de forma cilíndrica. Las líneas verticales discontinuas marcan los límites de las cuatro regiones mencionadas en el texto. Todas las fuerzas están expresadas en Newtons.

English Summary

Unknown Object Dexterous Manipulation based on Virtual Contact Points

Abstract

This paper presents a simple strategy to manipulate unknown objects using a robotic hand equipped with tactile sensors. The hand configurations that allow the rotation of an unknown object are computed using tactile and kinematic information obtained during the manipulation process, and reasoning about the desired and real positions of the fingertips during the manipulation, taking into account that the desired positions of the fingertips are not physically reachable since they are located in the interior of the manipulated object and therefore they are virtual positions with associated virtual contact points. The proposed approach was satisfactorily validated using three fingers of an anthropomorphic robotic hand (Allegro Hand), with the original fingertips replaced by tactile sensors (WTS-FT). In the experimental validation several every-day objects with different shapes were successfully manipulated, rotating them without the need of knowing their shape.

Keywords:

Robotics, Manipulation, Pressure measurements, Force control, Sensors.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Español a través del proyecto DPI2016-80077-R.

Referencias

- Agriomallos, I., Doltsinis, S., Mitsioni, I., Doulgeri, Z., April 2018. Slippage detection generalizing to grasping of unknown objects using machine learning with novel features. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2), 942–948.
DOI: 10.1109/LRA.2018.2793346
- Bicchi, A., 1995. On the closure properties of robotic grasping. *The International Journal of Robotics Research* 14 (4), 319–334.
DOI: 10.1177/027836499501400402
- Bicchi, A., 2000. Hands for Dexterous Manipulation and Powerful Grasping: a Difficult Road Towards Simplicity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16 (6), 652–662.
DOI: 10.1109/70.897777

- Bicchi, A., Marigo, A., Prattichizzo, D., 1999. Dexterity through rolling: manipulation of unknown objects. En: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 2. pp. 1583–1588.
DOI: 10.1109/ROBOT.1999.772585
- Feix, T., Romero, J., Schmiedmayer, H., Dollar, A. M., Kragic, D., Feb 2016. The grasp taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 46 (1), 66–77.
DOI: 10.1109/THMS.2015.2470657
- Felip, J., Bernabé, J., Morales, A., Nov 2012. Contact-based blind grasping of unknown objects. En: *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. pp. 396–401.
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2012.6651550
- Funabashi, S., Morikuni, S., Geier, A., Schmitz, A., Ogasa, S., Tomo, T. P., Somlor, S., Sugano, S., Oct 2018. Object recognition through active sensing using a multi-fingered robot hand with 3d tactile sensors. En: *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 2589–2595.
DOI: 10.1109/IRoS.2018.8594159
- Kappassov, Z., Corrales, J. A., Perdereau, V., 2015. Tactile sensing in dexterous robot hands - review. *Robotics and Autonomous Systems* 74, 195 – 220.
DOI: 10.1016/j.robot.2015.07.015
- Li, Q., Haschke, R., Ritter, H., Nov 2015. A visuo-tactile control framework for manipulation and exploration of unknown objects. En: *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. pp. 610–615.
DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363434
- Montaño, A., Suárez, R., 2018. Manipulation of unknown objects to improve the grasp quality using tactile information. *Sensors* 18 (5).
DOI: 10.3390/s18051412
- Montaño, A., Suárez, R., 2015. Unknown object manipulation based on tactile information. En: *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. pp. 5642–5647.
DOI: 10.1109/IRoS.2015.7354178
- Okamura, A. M., Smaby, N., Cutkosky, M. R., April 2000. An overview of dexterous manipulation. En: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1. pp. 255–262.
DOI: 10.1109/ROBOT.2000.844067
- Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B. P., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R., Ng, A. Y., 2009. Ros: an open-source robot operating system. En: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation – Workshop on Open Source Software*. pp. 1–6.
- Rosales, C., Suárez, R., Gabiccini, M., Bicchi, A., may 2012. On the synthesis of feasible and prehensile robotic grasps. En: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 550–556.
DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225238
- Shaw-Cortez, W., Oetomo, D., Manzie, C., Choong, P., April 2018. Tactile-based blind grasping: A discrete-time object manipulation controller for robotic hands. *IEEE Robotics and Automation Letters* 3 (2), 1064–1071.
DOI: 10.1109/LRA.2018.2794612
- Ward-Cherrier, B., Rojas, N., Lepora, N. F., Oct 2017. Model-free precise in-hand manipulation with a 3d-printed tactile gripper. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2 (4), 2056–2063.
DOI: 10.1109/LRA.2017.2719761