

# ESTUDIO DE LAS FUERZAS DURANTE LA TAREA DE BIMANIPULACIÓN DE ELEVACIÓN Y TRASLACIÓN DE UNA CARGA

J. Hernandez-Vicen, S. Martínez, E. Menéndez, C. Balaguer  
 RoboticsLab, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid,  
 Av. De la Universidad 30, 28911 Leganés, España.  
 juanhernandezvicen@gmail.com, scasa@ing.uc3m.es, emenende@pa.uc3m.es, Balaguer@ing.uc3m.es

## Resumen

*En este artículo se aborda el estudio de las fuerzas que afectan a la hora de realizar la tarea de “pick and place” de cajas. A través de los experimentos presentados se persigue conocer el comportamiento del sistema desde el punto de vista de las fuerzas de fricción y de presión que se deben ejercer para realizar el agarre de la caja, como desde el punto de vista de cómo afecta el peso del cuerpo que se va a elevar y desplazar de un punto a otro. El objetivo final es adquirir el conocimiento necesario para saber cómo le afectan al robot estos estímulos para poder realizar la tarea de bimanipulación sin necesidad de conocer el peso de la caja de forma previa.*

**Palabras clave:** Bimanipulación, transporte de objetos, robótica humanoide.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances en el campo de la robótica están potenciando que paulatinamente se vayan sustituyendo algunas tareas ingratas, repetitivas y en ocasiones perjudiciales para la salud por sistemas automatizados con el objetivo de lograr una mejor calidad de vida.

Es un hecho, que debido al descenso de la natalidad y al aumento de la esperanza de vida, las sociedades de los países avanzados tienen cada vez un mayor porcentaje de población envejecida. Para una persona mayor, transportar un objeto pesado, subirlo por las escaleras o manipularlo puede ser una tarea laboriosa. Si además esa persona tiene alguna discapacidad, la dificultad aumenta. Como consecuencia, cada vez se hace más necesario encontrar formas de cubrir estas necesidades y sustituir aquellas profesiones tradicionalmente ocupadas por un sector más joven o que requieran un trabajo físico excesivo [1].

Además, el constante crecimiento del comercio electrónico está impulsando que surjan nuevas oportunidades de optimización y mejora en el sector logístico para poder cubrir esta creciente demanda.

Aprovechando esta coyuntura, con el objetivo de cubrir estas necesidades, se está desarrollando con el robot humanoide TEO en el RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid, la aplicación del robot humanoide empaquetador-desempaquetador. En esta aplicación, se pretende que el robot identifique por técnicas de visión artificial el objeto que se quiere manipular, en este caso una caja. Tras extraer sus propiedades, el objetivo final es conseguir la bimanipulación diestra sin agarre de estas para encontrar la cara de apertura y ayudar con el proceso de empaquetado.

En la revisión del estado del arte actual de tareas de bimanipulación sin agarre, se pueden encontrar ejemplos de tareas de manipulación de objetos pequeños realizadas con los dedos de una mano de un brazo robótico [2], [3]. Estas tareas, aunque a una escala más pequeña, tienen cierta similitud con el objetivo de bimanipular una caja. Además, se han realizado también estudios a esta escala sobre el deslizamiento de estos objetos durante el agarre mediante la utilización de sensores [4], [5]. También se pueden observar desarrollos de “pick and place” implementados en almacenes [6], [7].

La mayoría de las soluciones industriales para agarrar cajas suelen estar orientadas a sistemas neumáticos de ventosa y con una serie de condiciones de contorno conocidas, como por ejemplo el peso del paquete. Sin embargo, lo interesante sería conseguir un sistema que solo con la realimentación de la sensorial que lleva integrada pudiera adaptarse a cualquier tipología de caja, independientemente de su peso.

Por ello, en este trabajo nos centramos en el estudio desde el punto de vista de las fuerzas de una de las tareas necesarias para lograr bimanipular cajas diestramente: la elevación y el transporte de una posición a otra. Primero se han calculado las fuerzas

de contacto teóricas que son necesarias para elevarla. Se ha experimentado cómo varían estas en función del peso y del coeficiente de rozamiento del objeto realizando varias iteraciones y midiendo con los sensores de fuerza de las muñecas.

En un segundo paso, se ha utilizado la información obtenida por visión artificial para realimentar el sistema. A partir de la cual se ha generado la trayectoria para realizar el agarre de la caja con ambos brazos, elevarla y depositarla en otro lugar. En este caso se ha estudiado cómo influye el peso del objeto elevado sobre el centro de masas del robot al realizar esta tarea de traslación.

## 2. ESQUEMA GENERAL DE LA APLICACIÓN

La aplicación de TEO empaquetador, tal y como se puede observar en la Figura 1, se divide en tres bloques principales comunicados entre sí con el fin de bimanipular la caja y encontrar la cara de apertura.

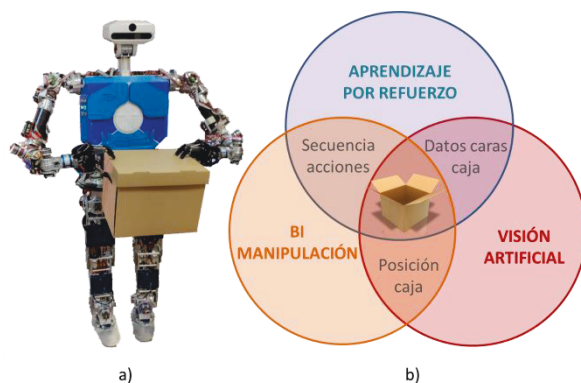


Figura 1 (a) TEO sujetando una caja. (b) Esquema general de la aplicación.

El bloque de visión artificial se centra en la segmentación del objeto que se quiere manipular y en la extracción de sus características. Por un lado, se obtienen las propiedades físicas del objeto: su forma, tamaño, posición en el espacio. Por otro lado, se distinguen características concretas de las caras que aportan información sobre la orientación del objeto: letras, logos, ranuras de apertura... Las características se obtienen siguiendo los pasos explicados en [8].

Las características físicas extraídas de la imagen permiten realimentar el sistema de control para que el robot pueda realizar la tarea de bimanipulación, que puede consistir en elevar la caja, transportarla de un punto a otro, rotarla sobre la mesa o volcarla. Con esta información y basándonos en el estudio previo de agarre para saber dónde aplicar las fuerzas, el robot genera la trayectoria para realizar el contacto

con la caja y bimanipularla hasta encontrar la cara de apertura.

En paralelo, para tomar la decisión de manipular la caja realizando una acción u otra, el robot procesa la información de las caras y mediante el aprendizaje por refuerzo genera la secuencia de acciones para realizar la tarea. Este último componente de la aplicación se está desarrollando actualmente.

## 3. CÁLCULO DE FUERZAS PARA ELEVAR LA CAJA

Tal y como se puede ver en [9], las tareas de manipulación con dos brazos pueden clasificarse en coordinadas (ambos efectores finales deben trabajar juntos teniendo en cuenta la realimentación del otro en un bucle cerrado) o no coordinadas (bucle abierto). A su vez, al realizar tareas coordinadas, los movimientos de los brazos pueden ser simétricos o asimétricos.

Teniendo en cuenta la clasificación anterior, para elevar una caja, los movimientos deben estar coordinados, ya que las fuerzas de cada efector final influyen en el otro para impedir un deslizamiento o desplazamiento no deseado de la caja. Además, es necesario que el movimiento sea simétrico respecto al plano central, Figura 02, para evitar generar un par.

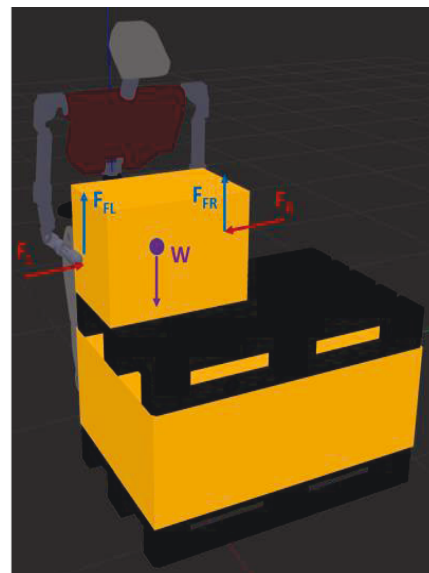


Figura 2 Esquema de las fuerzas implicadas en la operación de levantamiento de la caja.

Como el movimiento de elevación realizado por el robot se hace a una velocidad baja, las fuerzas de inercia se pueden despreciar en comparación con el valor de la aceleración de la masa causada por la gravedad. Por ello, la única fuerza que se opone al movimiento es el peso de la caja "W". Siguiendo la

ley de fricción de Coulomb [10], la fuerza aplicada por cada efector final sobre la superficie de la caja se transformará en fuerza de fricción estática, ya que, se va a evitar el deslizamiento de esta. Por lo tanto, la suma de las fuerzas realizadas por ambos brazos debe ser superior al peso de la caja, como se ve en la ecuación 1:

$$W = F_{FL} + F_{FR} \quad (1)$$

Siendo, la fuerza de fricción izquierda " $F_{FL}$ " igual a la fuerza de fricción derecha " $F_{FR}$ ", y el valor de la fuerza necesaria de cada mano " $N$ " como se muestra en la ecuación 2:

$$m \cdot g = 2\mu \cdot N \rightarrow N = \frac{m \cdot g}{2\mu} \quad (2)$$

donde " $m$ " es la masa de la caja, " $g$ " es la gravedad y " $\mu$ " es el coeficiente de fricción estático.

#### 4. EXPERIMENTACIÓN CON TEO

Tal y como se ha explicado previamente los experimentos se han dividido en dos: Estudio del levantamiento de la caja y estudio de cómo afecta al centro de masas del robot.

##### 4.1 FUERZAS PARA LEVANTAR LA CAJA

Para realizar los experimentos de elevación, la caja se ha colocado delante del robot. Se ha agarrado a  $\frac{3}{4}$  de la altura para permitir que esté por encima del centro de gravedad y reducir así la torsión de la caja al levantarla. Ambos brazos han aplicado la fuerza en el plano medio de la profundidad de la caja en direcciones opuestas, Figura 3.a. En el interior de la caja se ha mantenido la estructura de la Figura 3.b. para minimizar las deformaciones causadas por las fuerzas aplicadas en el agarre y posicionar las distintas cargas en el centro de masas.

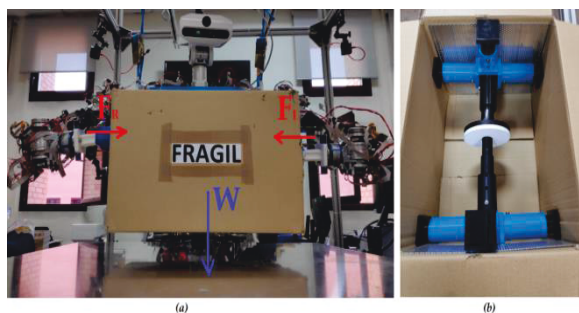


Figura 3 (a) Robot humanoide TEO levantando la caja. (b) Estructura interna para mantener la rigidez de la caja.

En el primer experimento de elevación se conocía el peso de la estructura y la caja (1,35Kg) y se ha ido modificando el coeficiente de fricción probando a

levantar la caja repetidamente para encontrar el valor de fricción que evita la caída de la caja.

Como resultado, en la Figura 4, podemos ver las fuerzas aplicadas por cada brazo en función del coeficiente de fricción " $\mu$ " utilizado. Después de probar en un rango de 1,1 a 0,3, se encontró que el coeficiente de fricción que proporciona un mejor agarre sin deslizamiento y sin aplicar más fuerza de la necesaria es  $\mu = 0,3$ .

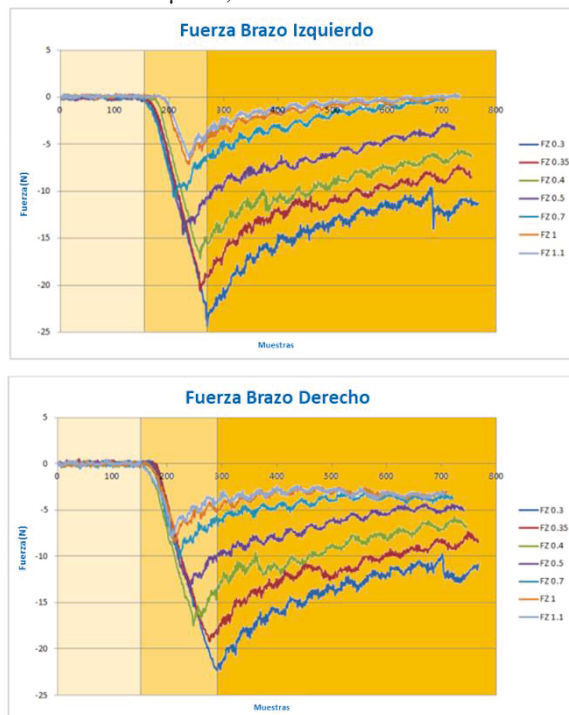


Figura 4 Fuerzas ejercidas por ambos brazos en función de la variación del coeficiente de rozamiento.

La representación en tono más claro coincide con la trayectoria de aproximación, el incremento en el tono medio coincide con el aumento de la fuerza al hacer el contacto con la cara de la caja y por último la parte más oscura corresponde al equilibrio de los brazos para aguantar la fuerza de agarre de la caja. En todas las repeticiones de elevación, la caja cayó cuando el valor de la fuerza bajó de 10N.

Tras elegir el valor de 0,3 para el coeficiente de fricción, se ha realizado un nuevo experimento cambiando los pesos de la caja para determinar si, con este valor, el agarre era estable sin deslizamiento. Como se observa en la Figura 5, los pesos utilizados fueron: 1,35, 1,45, 1,55 y 1,65Kg. A medida que aumenta el peso, también aumenta la fuerza necesaria para agarrar la caja con cada brazo. La caja se levantó en los cuatro casos, validando así el coeficiente de fricción que se estableció previamente y observando una repetición en el comportamiento independientemente del peso de la caja.

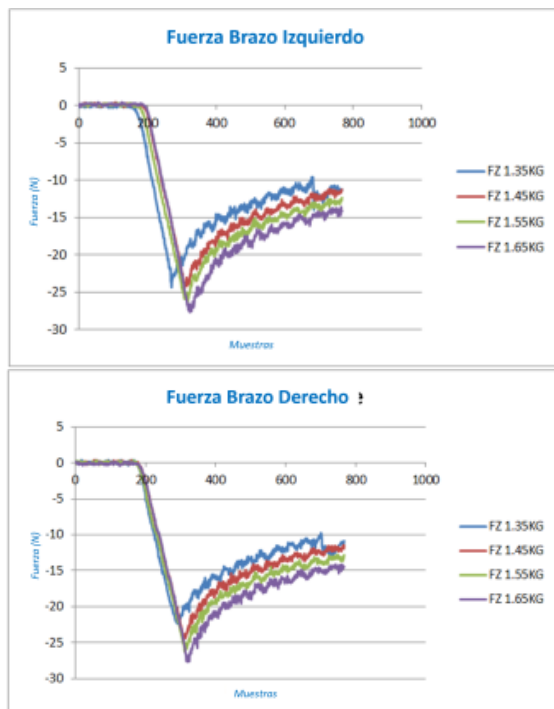


Figura 5 Fuerzas ejercidas por ambos brazos variando el peso y manteniendo el coeficiente de fricción constante.

Los experimentos de elevación mostrados previamente se han realizado utilizando una caja semirrígida con la estructura interna que se muestra en la Figura 3.b. Sin embargo, no se puede esperar el mismo comportamiento en el caso de una caja deformable. Por este motivo, se ha realizado un último experimento en el que se comparan los resultados de elevación de cajas rígidas y no rígidas. En este caso, el peso era constante (de nuevo 1,35Kg) y se aplicó una realimentación basada en la posición de los brazos para mantener la fuerza en el eje Z. En un caso, la estructura está montada, y en el segundo caso, para mantener el mismo peso sin la rigidez, la estructura está dentro de la caja, pero desmontada.

Tal y como se puede observar en la Figura 6.c. y 6.d. las fuerzas necesarias para sujetar la caja son las mismas, la diferencia que se aprecia es que con la caja rígida (gráfica azul), la fuerza necesaria se alcanza antes que con la caja no rígida (gráfica roja). Esto es consecuencia, como se puede ver en las gráficas 6.a. y 6.b. de que al deformarse tarda más tiempo en alcanzar la posición de agarre.

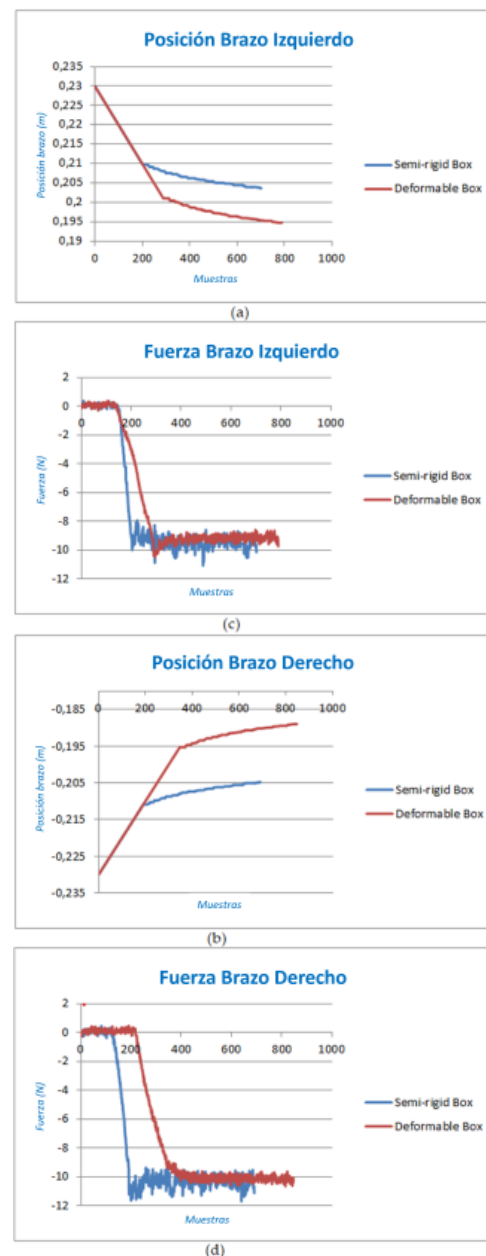


Figura 6 (a) y (b) Comparativa de las posiciones de los efectores finales. (c) y (d) Fuerza aplicada por cada brazo.

#### 4.2 ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL CENTRO DE MASAS

En esta segunda fase de experimentación, el robot ha identificado la caja, ha hecho una tarea de aproximación para realizar el contacto con esta y a continuación ha procedido a elevarla y desplazarla a otra posición girando sobre su tronco, tal y como puede apreciarse en la Figura 7.

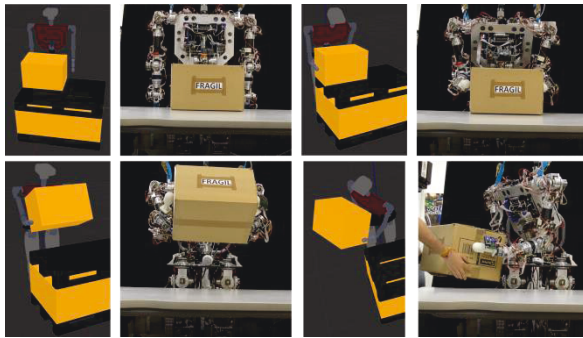


Figura 7 Experimento de agarre y traslación de la caja de un punto a otro.

Tal y como puede verse en la Figura 8, el experimento se divide en cinco fases: La primera es la estática que corresponde a la posición erguida inicial. A continuación, el robot, inclina el tronco hacia delante para agarrar la caja. Acto seguido eleva el tronco sosteniendo la caja. Después, gira el tronco y entrega la caja en otra posición diferente. Por último, vuelve a la posición erguida inicial.

Durante este experimento se ha tenido en cuenta la variación del centro de masa. En la Figura 8, se puede ver la evolución de este durante la duración de la prueba distinguiendo las cinco fases del proceso de transporte expuestas en la Figura previa.

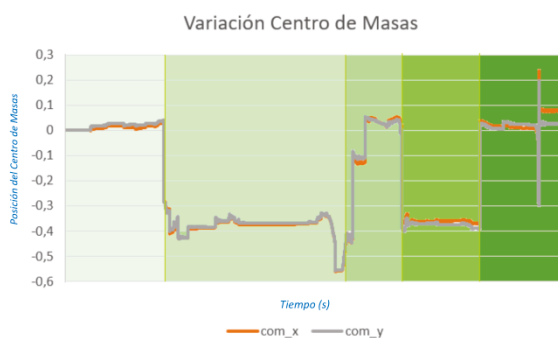


Figura 8 Evolución del centro de masas en relación con la tarea de desplazamiento de carga.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se han estudiado las fuerzas necesarias para elevar un objeto, comprobando que este comportamiento se reproduce de forma bastante similar independientemente del peso y de la rigidez de la caja. Estas gráficas de comportamiento van a servir para realimentar un sistema de aprendizaje que con la visión y la realimentación del sensor de fuerza podrá identificar si el proceso de elevar la caja se realiza de forma correcta o no sin conocer el peso.

Además, también se ha revisado cómo afecta al centro de masas del conjunto robot-caja la tarea de transporte de la caja de un punto a otro. De nuevo,

este comportamiento ha sido repetitivo y permitirá identificar durante la tarea de transporte si el objeto que está siendo transportado está bien sujeto o si por lo contrario puede sufrir una caída.

## Agradecimientos

La investigación que ha conducido a estos resultados ha recibido financiación del proyecto SOFIA: Articulación blanda inteligente con capacidades de reconfiguración y modularidad para plataformas robóticas, con referencia PID2020-13194GB-I00, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, y del proyecto RoboCity2030-DIH-CM, Madrid Robotics Digital Innovation Hub, S2018/NMT-4331, financiado por "Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid" y cofinanciado por Fondos Estructurales de la UE.

## English summary

### FORCES STUDY DURING DUAL ARM LIFTING AND TRANSLATION TASKS OF A LOAD

#### Abstract

*In this paper a study of the forces involved in a "pick and place" task is done. The experiments presented in this article seek to understand the behaviour of the system from the point of view of the friction and pressure forces that must be exerted to grip the box, as well as from the point of view of how the weight of the body to be lifted and moved from one point to another affects it. The final objective is to acquire the necessary knowledge of how these stimuli affect the robot in order to be able to carry out the task of bi-manipulation without the need to know the weight of the box beforehand.*

**Keywords:** Dual-arm manipulation, object transportation, humanoid robotics.

#### Referencias

- [1] Garcia-Haro, Juan Miguel, et al. (2021) Service Robots in Catering Applications: A Review and Future Challenges. *Electronics*, vol. 10, no 1, p.47
- [2] Fearing, R. O. N. A. L. D. S. (1986). Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(4), 188-195.
- [3] BORST, Christoph; FISCHER, Max; HIRZINGER, Gerd. (2003) Grasping the dice by dicing the grasp. En *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on*



- Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453). IEEE, 2003. p. 3692-3697.
- [4] AL-SHANOON, Abdulrahman Abdulkareem S., et al. (2005) Slip detection with accelerometer and tactile sensors in a robotic hand model. En IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 012001.
- [5] KAWAMURA, Takuya, et al. Measurement of slip, force and deformation using hybrid tactile sensor system for robot hand gripping an object. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, no 1, p. 83.
- [6] Harada, K., Tsuji, T., & Laumond, J. P. (2014, May). A manipulation motion planner for dual-arm industrial manipulators. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 928-934). IEEE.
- [7] PERUMAAL, S. Saravana; JAWAHAR, N. (2013) Automated trajectory planner of industrial robot for pick-and-place task. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no 2, p. 100.
- [8] Hernandez-Vicen, J., Martinez, S., & Balaguer, C. (2021). Basic principles for the development of an application to bi-manipulate boxes with a humanoid robot. *Revista Iberoamericana De Automatica E Informatica Industrial*, 125-133.
- [9] ZOLLNER, R.; ASFOUR, Tamim; DILLMANN, Rüdiger. (2004) Programming by demonstration: Dual-arm manipulation tasks for humanoid robots. En *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No. 04CH37566). IEEE. p. 479-484.

© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

