

ESTRATEGIAS DE CONTROL BASADAS EN INFORMACIÓN TÁCTIL PARA LA MANIPULACIÓN DE OBJETOS DEFORMABLES

Ángel Delgado, Damián Mira
Instituto Universitario de Investigación Informática
Universidad de Alicante
{angel.delgado, damian.mira}@ua.es

Carlos A. Jara, Fernando Torres
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal
Universidad de Alicante
{carlos.jara, fernando.torres}@ua.es

Resumen

La investigación en agarre y manipulación robótica de objetos deformables tiene en la actualidad varios retos. Los objetos deformables, debido a su textura y deformación, presentan una serie de características diferentes de los rígidos, por lo que pueden causar movimientos incontrolados durante el agarre y/o manipulación. Este artículo presenta una estrategia de control basada en información táctil para el agarre seguro de objetos deformables, centrándose en espumas elásticas. La aproximación consigue una adaptación a diferentes propiedades elásticas del objeto, ya que el grado de deformación del objeto se calcula durante el proceso de agarre. Finalmente, se exponen diversos experimentos para demostrar la fiabilidad de la estrategia de control presentada.

Palabras Clave: agarre y manipulación, control táctil, objeto deformable, reajuste de fuerza.

1 INTRODUCCIÓN

Las manos robóticas permiten tanto la ejecución de tareas de agarre, como de manipulación precisa [10]. Estas características permiten a las manos robóticas ser controladas no sólo para sujetar el objeto con un agarre firme y seguro, sino también para la generación de trayectorias del objeto con los movimientos de los dedos. Evidentemente, para desarrollar dichos algoritmos, la información táctil y su filtrado juega un papel importante [13]. Para este fin, los sensores táctiles se emplean generalmente para medir la fuerza o la presión ejercida por los dedos, así como la posición donde se produce el contacto con el propósito de alcanzar y/o mantener un valor deseado en la manipulación.

El término *force-closure* es considerado un punto clave para poder manipular de forma correcta y

precisa cuerpos rígidos [12]. Sin embargo, cuando los objetos son deformables, es necesario incorporar un algoritmo de reajuste basado información táctil sobre los puntos de agarre para asegurar un agarre seguro [2,8].

Los sensores táctiles normalmente se utilizan de una forma común dentro del campo de la robótica: analizar el contacto directo entre el robot y los objetos del entorno con el fin de adaptar la reacción de las articulaciones del robot para la manipulación del objeto. Esta información táctil se procesa fundamentalmente con dos objetivos diferentes: identificación de los objetos y control de la manipulación. Por un lado, las propiedades de los objetos extraídos mediante los sensores táctiles se pueden emplear para la clasificación de los objetos. Por otro lado, las mediciones de los sensores táctiles también se pueden aplicar para controlar la fuerza de interacción [4]. En este artículo, se presenta un nuevo algoritmo basado en información táctil con el fin de realizar un agarre seguro y para la estimación de la deformación del objeto.

Algunos trabajos han desarrollado sistemas multisensoriales para la planificación de trayectorias y ajuste de fuerzas para realizar el agarre de objetos deformables. La mayoría de estos trabajos utilizan tanto los datos visuales como los táctiles [1,6,9]. El sistema de visión normalmente se emplea para obtener el mapa de la deformación de los objetos, por lo que en general se utiliza un sistema estereoscópico [3,7]. Algunos trabajos utilizan la información proporcionada por un sistema de visión para compararlo con los modelos de objetos deformables para validar la deformación [5]. En este trabajo, no hay ningún sistema visual y sólo se aplica un algoritmo basado en información táctil con el fin de realizar el agarre y estimar la deformación.

El artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 describe la arquitectura del sistema. La

estrategia de agarre y manipulación se describe en la Sección 3. La Sección 4 muestra los resultados experimentales obtenidos. La última sección describe algunas conclusiones importantes.

2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA ROBÓTICO

El sistema robótico utilizado en este trabajo está basado en dos brazos robots articulados tipo Mitsubishi PA10 de 7 grados de libertad de cada uno. Un robot posee adaptado un sensor de rango Kinect en su extremo, mientras que el otro PA10 posee una mano Shadow incluyendo un sensor táctil tipo Tekscan Grip (véase Figura 1).

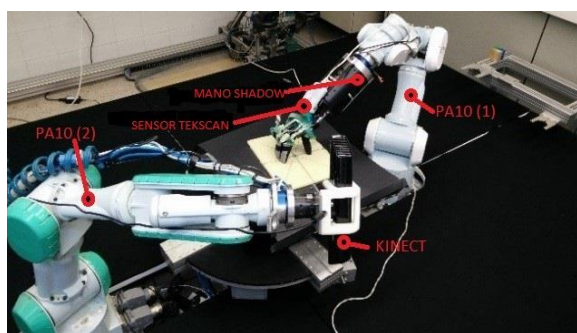


Figura 1: Arquitectura del sistema robótico

La mano Shadow [14] cuenta con cinco dedos y un total de 24 articulaciones rotacionales. Los dedos medio, anular y meñique tienen 2 articulaciones acopladas en el extremo del dedo. En cuanto al control, se utilizan dos tipos diferentes: control de posición y de esfuerzo para cada articulación.

Para obtener los datos de presión, el sensor *Grip Tekscan* [15] está acoplado a la mano robótica. Este sensor fue seleccionado debido a su fácil adaptación a diferentes tipos de manos robóticas, y la posibilidad de conseguir un mapa de presión completa de toda la mano. El sensor táctil se divide en dieciocho regiones que se disponen individualmente entre las secciones de los dedos y la palma. Teniendo en cuenta la morfología de la mano Shadow (muy similar a una mano humana), la adaptación de los sensores es relativamente fácil.

Para los experimentos mostrados en este artículo, sólo se ha empleado la información dada por las regiones de los extremos de los dedos (véase Figura 2). Para cada región, el valor de la presión táctil se almacena en una matriz de 4x4. Por lo tanto, se puede obtener el valor de presión y la fuerza para cada celda y, a continuación, la fuerza y la presión total en toda la región del dedo cubierto por el sensor.

En lo que respecta a las características del sensor, éste tiene una velocidad de muestreo alta (850 Hz) muy útil para el control por realimentación. A través de una red Ethernet local, se utiliza un servicio para obtener los datos de presión de cada una de las regiones de una forma asíncrona. Este servicio se llama desde el proceso principal de control de agarre-manipulación.

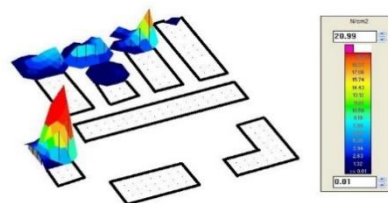


Figura 2: Visualización del mapa de presiones distribuido sobre las regiones del sensor

3 CONTROL TÁCTIL PARA AGARRE Y MANIPULACIÓN

3.1 PLANIFICADOR DE AGARRE

Para la obtención de puntos de contacto con el objeto, se usa el planificador de agarre presentado en [11], donde se eligen los puntos de contacto después de reconocer el objeto y seleccionar la tarea a realizar. Esta es la única manera de asegurar un agarre correcto para los objetos deformables. Con el fin de lograr esto, se emplea un algoritmo de aprendizaje con una serie de datos adquiridos en iteraciones anteriores. Esta parte del algoritmo permite determinar los puntos de contacto óptimos para la realización de la tarea.

3.2 ESTRATEGIA DE CONTROL TÁCTIL

En esta sección, se explica la estrategia para tareas de agarre basada en información táctil. En la primera parte de la estrategia se ejecuta el proceso de agarre, que comienza en las posiciones dadas por el planificador mencionado en la subsección anterior. El planificador determina el número de contactos y la posición de cada uno. En esta configuración inicial, existen puntos de contacto entre los dedos y los objetos. Sin embargo, esta configuración no es adecuada para obtener un agarre correcto y seguro, ya que las fuerzas ejercidas en los puntos de contacto pueden no ser suficientes para agarrar el objeto sin que se caiga. A continuación se explican los pasos que se llevan a cabo para lograr un agarre seguro, suficiente para soportar las fuerzas de gravedad del objeto deformable. La Figura 3 muestra el diagrama de flujo de la estrategia de control basada en información táctil.

En primer lugar, el objeto reconocido mediante el sistema de visión es agarrado por los puntos de contacto sugeridos. Los dedos de la mano robótica van a esas posiciones y ejercen una fuerza hasta obtener un valor de presión mínimo. Después de esto, se ejecuta un proceso de reajuste de fuerzas. En esta parte, se aplica un control de par directamente a cada dedo utilizado en el proceso de agarre inicial. La fuerza de cada dedo aumenta progresivamente al mismo tiempo que se guardan dichos datos para cada dedo. El proceso continúa hasta que se alcanza un umbral máximo inicial para los valores de fuerza.

adaptar el umbral máximo de fuerza que debe aplicarse en los dedos durante las tareas de agarre, y sustituye el valor máximo inicial. Para los objetos muy deformables, el umbral máximo puede ser menor que el inicial, debido a que el máximo inicial podría causar deformaciones no deseadas, no necesarias ya que el objeto ha sido agarrado correctamente.

En la etapa de ajuste de la posición (véase la Figura 3) el objeto es agarrado utilizando trayectorias de posición específicas de los dedos. Durante estas trayectorias, el pulgar se mantiene en la misma posición, mientras que el resto de dedos se mueven en trayectorias paralelas hacia el punto donde se coloca el pulgar. Al final del proceso de agarre, los dedos se colocan en una posición final determinada. Para los objetos con un grado de deformación bajo, esta posición final será casi la misma que la posición inicial. Para los objetos con grado de deformación alto, las posiciones finales serán diferentes a las iniciales, definidas por un desplazamiento conocido.

Como se ha comentado anteriormente, el grado de deformación se estima después de realizar el reajuste de la fuerza, y se calcula mediante una relación entre el desplazamiento y las fuerzas aplicadas después del proceso de agarre. Para los objetos deformables, el grado de deformación se calcula de la siguiente manera:

$$p = \left[\left(\frac{MD-d}{MD} \right) + (f/FI) \right] / 2 \quad (1)$$

El valor MD representa el desplazamiento máximo posible. Este valor se establece como el módulo del vector que va desde la posición inicial del dedo índice a la posición inicial del pulgar, que es, la distancia máxima que se pueden mover los dedos antes de que choquen. El valor d representa el desplazamiento actual y se configura como el mayor desplazamiento de todos los dedos después del proceso de reajuste de fuerza. El valor de f se establece como el máximo valor de fuerza ejercido por un dedo después del proceso de reajuste de fuerza. El valor FI representa el umbral de fuerza máxima inicial. De esta manera, el umbral de fuerza máxima adaptada, FA , se calcula de la siguiente manera:

$$FA = p * FI \quad (2)$$

El umbral máximo inicial se multiplica por el coeficiente, que es directamente proporcional al grado de deformación. Si el valor de FA obtenido es menor que la mínima fuerza inicial (FMI), el valor de FA se sustituye por el FMI .

Una vez se ha obtenido el valor adaptado FA , se continuará con la tarea de manipulación específica.

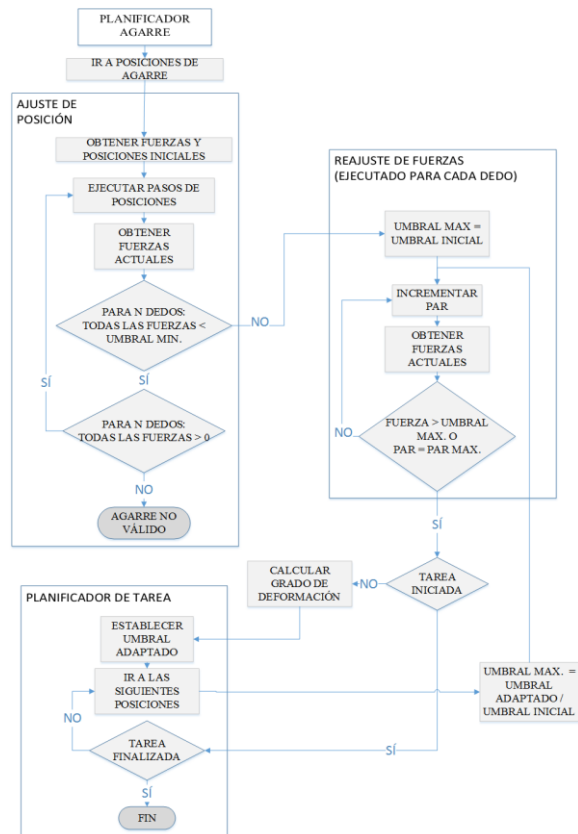


Figura 3: Diagrama de la estrategia de control basada en información táctil

Los umbrales de fuerza iniciales mínimo (FMI) y máximo (FI) se fijan después de la experimentación con diferentes objetos que tienen diferentes densidades y formas. El valor de la mínima fuerza inicial (FMI) representa la fuerza necesaria a ser aplicada al objeto con el fin de ser agarrado, y el valor máximo inicial (FI) indica un valor en el que los dedos están aplicando una alta presión al objeto.

Después de la tarea de agarre, se realiza una estimación del grado de deformación del objeto. Esta estimación es un valor relativo, entre 0 y 1 (donde 1 indica que no hay deformación, y 0 que el objeto se ha deformado lo suficiente como para permitir que los dedos se toquen). Este valor se utiliza para

Cada tarea de manipulación estará definida por distintas etapas. En cada etapa se indica la posición a ser alcanzada por cada dedo. Además, se indica una condición para el movimiento seguido por cada dedo: ajuste hasta obtener la fuerza máxima inicial, lo que asegura un agarre seguro, pero puede causar deformaciones no controladas, o ajuste hasta obtener la fuerza adaptada, para evitar deformaciones no controladas. Cada dedo se mueve a la siguiente posición definida por un algoritmo de la tarea, y la etapa de reajuste de fuerza se ejecuta con el valor máximo relacionado, dependiendo de las condiciones de trabajo. El planificador de tareas establece la condición (utilizando fuerza máxima o adaptada), dependiendo de la tarea que se va a desarrollar. Por ejemplo, para una espuma elástica, si la tarea tiene que agarrar el objeto y moverlo o girarlo, se utilizará el umbral de fuerza adaptado. Por el contrario, si la espuma tiene que ser deformada con el fin de introducirla en una caja o cilindro, se utilizará el umbral máximo inicial.

4 EXPERIMENTACIÓN

En esta sección, se explican los experimentos desarrollados para probar la estrategia de control. Se utilizan tres objetos diferentes. El primer objeto es una espuma con unas dimensiones de 26x10x1 cm, y una densidad de 0,038 g/cm³. El segundo objeto es una espuma de dimensiones 22x9x4 cm, y la misma densidad que el primer objeto. El tercer objeto es una espuma con unas dimensiones de 29x11x1 cm, y una menor densidad, de 0,015 g/cm³. Estos objetos fueron elegidos para poner a prueba el algoritmo desarrollado con objetos deformables, y estudiar cómo los cambios de densidad y volumen afectan a los resultados.

A continuación, se explican los resultados obtenidos con más detalle, para demostrar la validez de este método: estimar el grado de deformación de un objeto desconocido y adaptar las fuerzas aplicadas durante las tareas de manipulación. Para estos experimentos, se utilizan un umbral máximo inicial (FI) de 5 Newton y un valor mínimo inicial (FMI) de 1 Newton.

4.1 CASO PRÁCTICO 1: ESPUMA ELÁSTICA DE 26x10x1 cm Y DENSIDAD 0.038 g/cm³

Las Figuras 4 y 5 muestran la evolución de las posiciones de los extremos de los dedos y las fuerzas aplicadas por cada uno de ellos (se han empleado los cinco dedos de la mano). El sistema de referencia para las posiciones se encuentra en el antebrazo de la mano. De acuerdo con la orientación del sistema de referencia, existen grandes variaciones en el eje Y y

Z, y pequeñas desviaciones en el eje X. El desplazamiento de cada dedo se puede ver en la Figura 4, donde D1 a D5 representan pulgar, índice, medio, anular y meñique, respectivamente.

Después de ejecutar el ajuste de posición, se ejecuta el algoritmo de reajuste de fuerza, y así se obtiene el grado de deformación en cada caso, mediante los desplazamientos conocidos de los dedos y las fuerzas aplicadas por cada uno de ellos (véase Tabla 1). El número de iteraciones depende del instante en el que se alcanzan los umbrales de fuerza.

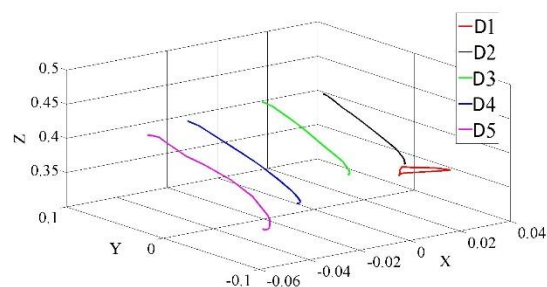


Figura 4: Desplazamiento de cada dedo para el primer experimento

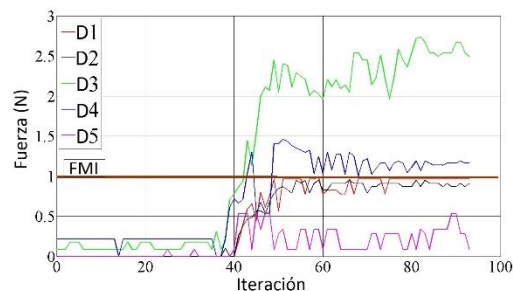


Figura 5: Evolución de las fuerzas aplicadas por cada dedo durante el primer experimento

Tabla 1. Valores de fuerza y deformación obtenidos en el primer experimento.

Fuerza final máxima (N)	2.49
Desplazamiento máximo permitido (m)	0.13
Desplazamiento máximo actual (m)	0.12
Grado de deformación	0.28
FA (N)	1.42

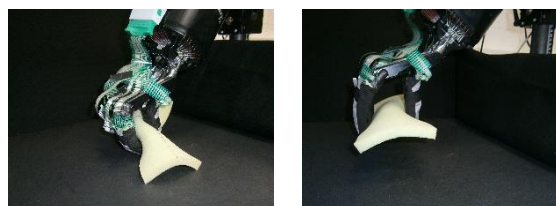


Figura 6: Posiciones finales utilizando el valor de fuerza inicial FI (izq.) y el valor adaptado FA (der.).

4.2 CASO PRÁCTICO 2: ESPUMA ELÁSTICA DE 22x9x4 cm Y DENSIDAD 0.038 g/cm³.

Los resultados obtenidos para la segunda espuma se muestran en las Figuras 7 y 8. Aquí se puede observar la evolución de las posiciones de los dedos y las fuerzas aplicadas. La Tabla 2 muestra los datos obtenidos sobre el grado de deformación de la segunda espuma.

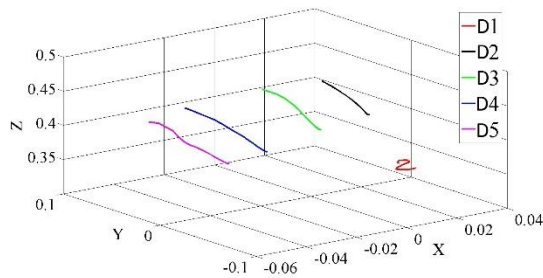


Figura 7: Desplazamiento de cada dedo para el segundo experimento

En este caso, el desplazamiento no es tan grande como en el primer experimento, lo que indica que para objetos con la misma densidad de masa, el grado de deformación depende de su forma.

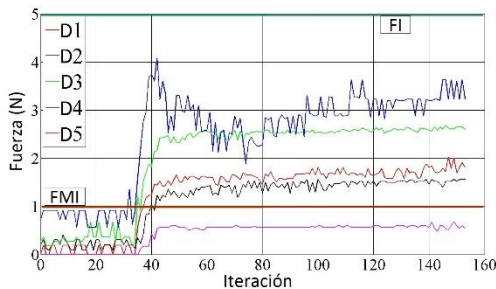


Figura 8. Evolución de las fuerzas aplicadas por cada dedo durante el segundo experimento

Tabla 2. Valores de fuerza y deformación obtenidos en el segundo experimento.

Fuerza final máxima (N)	3.22
Desplazamiento máximo permitido (m)	0.12
Desplazamiento máximo actual (m)	0.07
Grado de deformación	0.52
FA (N)	2.60



Figura 9: Posiciones finales utilizando el valor de fuerza inicial FI (izq.) y el valor adaptado FA (der.).

4.3 CASO PRÁCTICO 3: ESPUMA ELÁSTICA DE 29x11x1 cm Y DENSIDAD 0.015 g/cm³.

Las Figuras 10 y 11 muestran los resultados experimentales obtenidos. La forma de este objeto es similar a la forma de la primera espuma, pero con menor densidad. Los resultados obtenidos demuestran que la densidad afecta el grado de deformación y las fuerzas necesarias a aplicar.

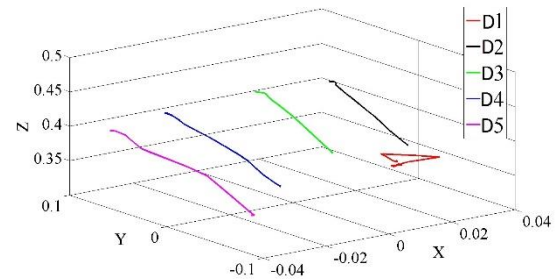


Figure 10: Desplazamiento de cada dedo para el tercer experimento

Los valores de deformación y de fuerza adaptado se muestran en la Tabla 3. Si comparamos estos resultados con los obtenidos para la primera espuma, se puede observar una disminución del grado de deformación y del umbral máximo adaptado. Por lo tanto, existe una relación directa entre la densidad y el grado de deformación de objetos con forma similar.

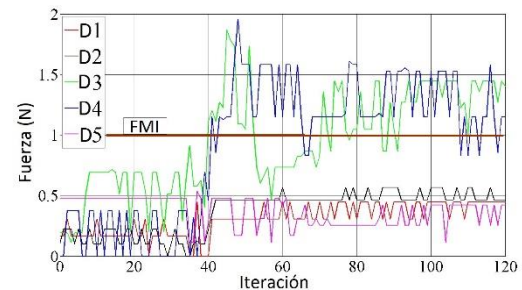


Figura 11. Evolución de las fuerzas aplicadas por cada dedo durante el segundo experimento.

Tabla 3. Valores de fuerza y deformación obtenidos en el tercer experimento.

Fuerza final máxima (N)	1.40
Desplazamiento máximo permitido (m)	0.13
Desplazamiento máximo actual (m)	0.12
Grado de deformación	0.17
FA (N)	0.88

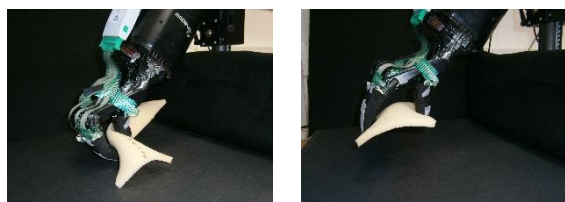


Figura 12: Posiciones finales utilizando el valor de fuerza inicial FI (izq.) y el valor adaptado FA (der.).

5 CONCLUSIONES

La estrategia de control propuesta en este trabajo permite calcular la capacidad de deformación de los objetos de una manera rápida. Se da una información relativa, que es útil para otros módulos que controlan las tareas de manipulación de la mano. La estrategia no requiere ni un modelo del objeto ni un reconocimiento visual para obtener una estimación fiable de la deformación. La información visual sólo es necesaria por el planificador de agarre para alcanzar el objeto, por lo que la carga de procesamiento del algoritmo es menor.

Este trabajo se ha desarrollado como una etapa previa para un sistema servo-táctil, que se encuentra actualmente en desarrollo. La clasificación de los objetos a manipular (gracias a la estimación del grado de deformación) es útil para la adaptación de los movimientos de los dedos con el fin de obtener una configuración mano-objeto adecuada. De esta manera, ni las articulaciones de los dedos, ni el objeto están sufriendo altas presiones o fuerzas que podrían causar resultados no deseados.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el Ministerio de Economía y la Generalitat Valenciana mediante los proyectos DPI2012-32390 y PROMETEO/2013/085.

Referencias

[1] Bimbo, J., Seneviratne, L., Althoefer, K., Liu, H., (2013) "Combining touch and vision for the estimation of and object's pose during manipulation" en Proc. *IEEE/RSJ Int. Conf. on*

Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4021-4026, Tokyo.

[2] Corrales, J.A., Torres, F., Perdereau, V., (2013) "Finger Readjustment Algorithm for Object Manipulation Based on Tactile Information". *Int J Adv Robot Syst*, Vol. 10, pp. 1-9.

[3] Gil, P., Mateo, C.M., Delgado, A., Torres, F., (2015) "Visual/Tactile sensing to monitor grasps with robot-hand for planar elastic objects", en Proc. *2th Iberian Robotics Conference (Robot2015)*, Lisboa (en proceso de revisión).

[4] Han, L., Trinkle, J., (1998) "Dexterous Manipulation by Rolling and Finger Gaiting", en Proc. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 730-735, Belgium.

[5] Khalil, F.F., Curtis, P., Payeur, P., (2010) "Visual monitoring of surface deformations on objects manipulated with a robotic hand" en Proc. *IEEE International Workshop Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, Vol. 1., pp 15-16.

[6] Khalil, F.F., Payeur, P., (2010) "Dexterous Robotic Manipulation of Deformable Objects with Multi-Sensory Feedback - a Review". *Robot Manipulators Trends and Development*.

[7] Khalil, F. F., Payeur, P., Cretu, A-M, (2010) "Integrated Multisensory Robotic Hand System for Deformable Object Manipulation" en Proc. *Int. Conf. Robotics and Applications*, pp. 159-166, Massachusetts.

[8] Kien-Cuong, N., Perdereau, V., (2013) "Fingertip force control based on max torque adjustment for dexterous manipulation of an anthropomorphic hand" en Proc. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3557-3563.

[9] Luo, Y., Nelson, B.J., (2001) "Fusing force and vision feedback for manipulating deformable objects," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 18(3), pp. 103-117.

[10] Melchiorri, C., Kaneko, M., (2008) "Robot Hands" in *Handbook of Robotics*. Siciliano, B., Oussama, K.. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, Germany, pp. 345-360.

[11] Mira, D., Delgado, A., Mateo, C.M., Puente, S.T., Candelas, F.A., Torres, F., (2015) "Study of dexterous robotic grasping for deformable

objects manipulation”, in *Proc. IEEE/Mediterranean Conference on Control and Automation*, Spain (aceptado).

- [12] Yoshikawa, T., (2010) “Multifingered robot hands: Control for grasping and manipulation”. *Annual Reviews in Control*, Vol. 34, pp. 199-208.
- [13] Yousef, H., Boukallel, M., Althoefer, K. (2011) “Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics - A review”. *Sensors and Actuators*, Vol. 167 (2), pp. 171-187.
- [14] Shadow Robot, “Dexterous Hand”. [Online]. Available:<http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>.
- [15] Tactile Sensor Tekscan. [Online]. Available: <http://www.tekscan.com/grip-pressure-measurement>.