



Prensión y manipulación diestra, móvil y cooperativa

Raúl Suárez*

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

Resumen

Este artículo resume algunas de las principales contribuciones realizadas en el marco del proyecto detallado, agrupadas según sus tres áreas de trabajo: manipulación diestra, manipulación cooperativa entre varios brazos, haciendo énfasis en movimientos antropomorfos, y manipulación móvil. Se describen tanto contribuciones teóricas como las implementaciones y los resultados experimentales que avalan las propuestas realizadas en cada una de las áreas mencionadas. Copyright © 2017 CEA.

Palabras Clave:

robótica, manipulación diestra, manipulación cooperativa, manipuladores móviles.

Datos del Proyecto:

Denominación del proyecto: Prensión y manipulación diestra, móvil y cooperativa (DEMCO)

Referencia: DPI2013-40882-P

Investigador/es responsable/es: Raúl Suárez

Tipo de proyecto: nacional

Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Economía y Competitividad

Fecha de inicio/fin: 1-1-2014 / 31-12-2017

1. Introducción

La finalidad de este proyecto es avanzar hacia la generalización de los sistemas de prensión y manipulación de objetos mediante robots móviles. En los últimos años se ha avanzado significativamente en el diseño de dispositivos prensores (actualmente ya se encuentran en el mercado diversas versiones de manos mecánicas antropomorfas), así como en la búsqueda de soluciones a los problemas propios de la robótica móvil. No obstante, a pesar de estos avances quedan retos de importancia entre los que destacan: el incremento de la capacidad sensorial de los elementos prensores, particularmente en relación al tacto, no sólo desde el punto de vista del hardware sino de la capacidad y habilidad para procesar la información resultante; incremento de la capacidad de colaboración entre varios brazos, siendo un caso particular la colaboración bi-brazo y la emulación de movimientos antropomorfos; y, finalmente, la extensión de los procedimientos desarrollados para sistemas estáticos a sistemas de prensión diestra móviles.

El proyecto pretende realizar un avance hacia la resolución de estos aspectos. Avanzar en esta dirección ampliaría de forma notable la capacidad de actuación de los robots móviles, sean humanoides o no, incrementando el número y tipo de tareas que podrían realizar tanto en la robótica industrial como, muy especialmente, en la robótica de servicios.

En este artículo se describen algunos de los desarrollos más significativos llevados a cabo en el marco del proyecto en cada uno de los temas mencionados, que por otra parte se corresponden tanto con un objetivo específico del proyecto como con un paquete de trabajo del mismo. Tras esta introducción, la Sección 2 presenta desarrollos teóricos e implementaciones reales sobre manipulación diestra, moviendo un objeto desconocido entre los dedos de la mano haciendo uso únicamente de realimentación táctil; la Sección 3 trata sobre manipulación cooperativa, usando dos brazos para sujetar un objeto voluminoso y para quitar de forma cooperativa obstáculos que impiden alcanzar unos objetos deseados, y buscando emular movimientos antropomorfos; la Sección 4 describe brevemente el manipulador móvil bi-brazo construido en el marco del proyecto, y en la Sección 5 se mencionan algunas conclusiones y la línea en la que se continúa trabajando.

*Autor para la correspondencia:

Correo electrónico: raul.suares@upc.edu (Raúl Suárez)

URL: <https://iocnet.upc.edu/usuarios/raul.suares/>

2. Manipulación diestra

El concepto de manipulación diestra se refiere aquí a la manipulación de objetos dentro del espacio de trabajo de la mano usando solamente los dedos (in-hand manipulation). La manipulación diestra persigue normalmente tres objetivos, individual o conjuntamente (Montaño and Suárez, 2015):

- Desde el punto de vista de la mano, la optimización de su configuración, es decir, que la configuración sea confortable mientras se sujeta un objeto.
- Desde el punto de vista de la prensión (relación objeto-mano), la optimización de la calidad de la prensión, es decir, la búsqueda de prensiones seguras en las que la mano pueda resistir fuerzas externas aplicadas al objeto.
- Desde el punto de vista del objeto, la optimización de su configuración, es decir, la búsqueda de una posición y orientación que satisfagan los requisitos de una tarea dada.

Por otro lado, en entornos de trabajo reales generalmente el modelo del objeto a manipular solo es parcialmente conocido, o incluso puede llegar a ser totalmente desconocido. En este contexto, los sensores táctiles ayudan al reconocimiento del objeto ayudando a construir su modelo geométrico o reduciendo su incertidumbre.

El objetivo principal del trabajo es determinar los movimientos (secuencias de configuraciones de la mano) para cambiar la configuración del objeto en la mano mientras se mejora un índice de calidad asociado a cada uno de los objetivos de la manipulación mencionados. Para ello, se consideran como únicas entradas al sistema: la información táctil obtenida de los sensores en la yema de los dedos, la información cinemática de la mano (propioceptiva) y el objetivo perseguido con la manipulación (o la combinación de objetivos).

Las principales asunciones son:

- La mano robótica tiene un sistema de sensores táctiles que permite obtener información del punto de contacto y de la fuerza ejercida sobre el objeto manipulado, no se tienen otras fuentes de realimentación, como por ejemplo realimentación visual.
- Se utilizan dos dedos de la mano para manipular el objeto, emulando la sujeción del objeto mediante los dedos pulgar e índice de la mano humana.
- No se tiene información previa sobre la forma del objeto, pero se asume que es un cuerpo sólido rígido.
- No se conoce el coeficiente de fricción, pero se asume que está por encima de un valor crítico prefijado en función del material de la yema del dedo, que es conocido.
- La mano robótica utilizada tiene un sistema de control de posición de las articulaciones de los dedos, por lo que el enfoque propuesto cierra un bucle de control de más alto nivel que genera comandos de posición para este sistema de control.

Para medir el desempeño de la manipulación según los objetivos mencionados se proponen los siguientes índices:

- El confort de la mano se calcula mediante la sumatoria de la diferencia de los valores de las articulaciones de cada dedo respecto a unas posiciones de referencia consideradas de máximo confort (normalizadas con

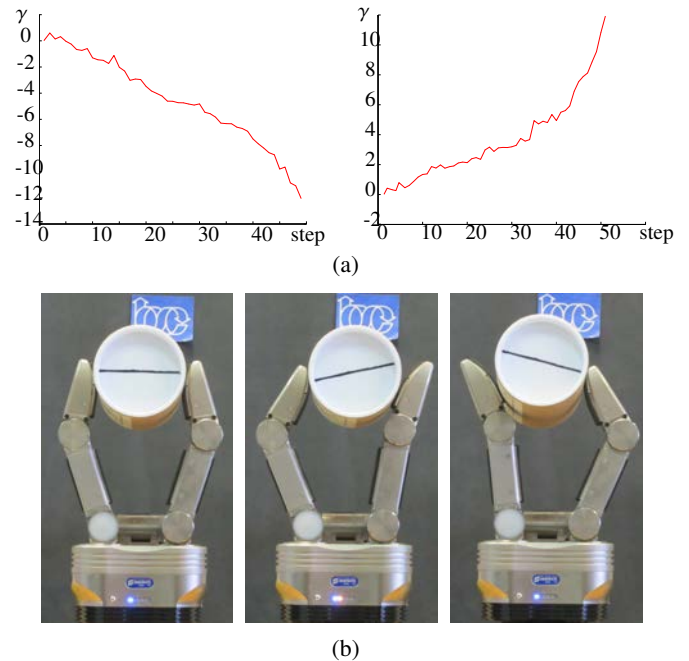


Figura 1: a) Variación de la orientación de un objeto cilíndrico cuando es rotado en sentido horario (izquierda) y en sentido antihorario (derecha), y, b) instantáneas de la prensión inicial (izquierda) y de las rotaciones máximas obtenidas en sentido antihorario (centro) y horario (derecha).

respecto al rango máximo de cada articulación).

- La calidad de la prensión se calcula mediante la suma de los ángulos existentes entre el segmento que une los puntos de contacto sobre cada dedo y la dirección normal a la superficie del sensor en cada punto de contacto, lo que indica cuán lejos se está de los límites del cono de fricción.
- El error en la orientación del objeto es directamente el ángulo que el objeto debe ser rotado para alcanzar la orientación deseada.

La minimización de cada uno de estos índices de calidad implica una mejora en el desempeño de la manipulación según el objetivo correspondiente. Un ejemplo de manipulación diestra se muestra en la Fig. 1.

Aparte de la manipulación diestra autónoma de objetos, el enfoque propuesto se ha usado también en tareas de teleoperación de una mano robótica (Montaño and Suárez, 2016a, 2017). En esta aplicación se tiene un sistema de control compartido entre el operador y el sistema robótico remoto, en el que el operador solo envía comandos de alto nivel indicando en que sentido se debe rotar el objeto, y el sistema remoto usa un grafo de estados y la información táctil y cinemática de la mano para controlar localmente las fuerzas de prensión y los movimientos de los dedos, generando así manipulaciones robustas y estables que evitan caídas del objeto independientemente de los posibles retardos que pudieran existir en el canal de comunicación.

3. Manipulación cooperativa

Todos los desarrollos y ejemplos presentados en esta sección han sido implementados, antes de su ejecución real,

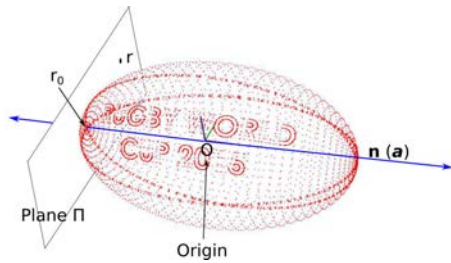


Figura 2: Objeto representado por una nube de puntos y plano ortogonal a un eje de inercia para dividir el objeto en rebanadas.

con The Kautham Project (Rosell et al., 2014), un entorno de planificación y simulación de movimientos desarrollado en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) para docencia e investigación.

3.1. Cooperación para sujeción de objetos voluminosos

Uno de los principales problemas abordados en manipulación cooperativa es la sujeción robusta de objetos voluminosos que no pueden ser sujetados con una sola mano. Para solucionar este problema se desarrolló un nuevo planificador de prensiones bimanuales de objetos voluminosos basado en un método de segmentación del objeto (Rojas-de-Silva and Suárez, 2016; Rodríguez et al., 2016), que ha sido validado experimentalmente utilizando el sistemas bi-brazo antropomorfo disponible para el proyecto.

En primer lugar se buscan los puntos de sujeción para cada dedo sobre la superficie del objeto, que se representa mediante una nube de punto 3D cuya información asociada incluye la dirección normal al objeto en cada punto. Solo se consideran contactos puntuales con fricción e inicialmente solo se utilizaron tres dedos por mano para sujetar el objeto (6 contactos en total, lo que da redundancia a la prensión). El planificador busca los tres puntos de contacto alcanzables por cada mano dividiendo la nube de puntos que representa la superficie del objeto en dos conjuntos de rebanadas ortogonales a uno de los ejes de inercia del objeto, que se van utilizando secuencialmente comenzando por el eje de inercia que forma el ángulo más pequeño con respecto al segmento definido por los orígenes de los sistemas de referencia de las bases de los brazos, es decir el segmento que va de “hombro a hombro”. Para definir cada rebanada se usan planos ortogonales al eje de inercia usado y a una distancia predeterminada entre ellos, siendo el primero tangente al objeto (Fig. 2) y el último a una distancia del primero equivalente a la máxima distancia alcanzable por los dedos sobre un objeto cualquiera sin que éste penetre en palma de la mano.

A continuación, se selecciona iterativamente una tripleta de puntos de una rebanada de cada extremo del objeto. Las rebanadas se van explorando siguiendo una secuencia que asegura que se exploran desde el extremo hacia el centro el objeto y que no se avanza más de un lado que de otro, asegurando de este modo, dentro de lo posible, una cierta coherencia en las posiciones de las manos al sujetar el objeto. A fin de eliminar tripletas de puntos claramente no alcanzables

por las dedos, éstas se filtran acorde a las siguientes tres condiciones:

- El área del triángulo formado por los tres puntos de la tripleta debe ser menor que el área del triángulo formado por los puntos centrales de las yemas de los tres dedos usados de cada mano cuando estos están extendidos;
- La distancia entre los puntos debe ser menor que la máxima distancia posible entre las yemas de los dedos de la mano usada;
- Un índice que indica que tan cerca está el triángulo definido por los tres puntos de ser equilátero debe estar por encima de un umbral dado (este índice es igual a 1 para triángulos equiláteros e igual a 0 para triángulos degenerados de área nula).

Cada par de tripletas de puntos se evalúa a fin de verificar si haciendo contacto en cada uno de los seis puntos se puede obtener una prensión que satisfaga la condición de equilibrio de fuerzas (*force-closure*, FC) y tenga además una calidad superior a un umbral deseado prefijado. La calidad de la prensión está dada por el módulo de la máxima perturbación (fuerza y/o par) que la prensión puede resistir en cualquier dirección.

Una vez encontrado un par de tripletas que permita una prensión FC, se realiza un análisis de alcanzabilidad para ver si los puntos seleccionados son alcanzables por el sistema bi-brazo; para ello se calcula la cinemática inversa del sistema robótico completo, es decir, los dos brazos con sus respectivas manos, usando estrategias de asignación de puntos a cada dedo que permiten simplificar el proceso. Si existe una solución cinemática, se procede a la planificación de los movimientos de cada conjunto brazo-mano que permitan alcanzar los puntos de contacto elegidos.

Para mostrar el funcionamiento del planificador bimanual propuesto se utilizaron diferentes objetos, tales como botes de diferentes formas, una sartén, un balón de fútbol y uno de rugby, un casco de moto, un casco de bicicleta, y una rueda, entre otros. Tras realizar 30 ensayos por objeto, colocando los objetos frente al sistema bi-brazo, se han obtenido prensiones bimanuales válidas en el 86.66% de los casos, de los cuales en el 90.49% se encontró una solución cinemática y de éstos se encontraron movimientos de los brazos libres de colisiones en un 90.33% de los casos. A modo ilustrativo, la Fig. 3 muestra los puntos de contacto encontrados sobre tres de los objetos utilizados e instantáneas de la ejecución de la prensión con el sistema bimanual real.

3.2. Manipulación cooperativa en entornos con obstáculos

Otra variante de manipulación coordinada utilizando sistemas bi-brazo es la denominada coordinación por metas, en la que ambos manipuladores trabajan en la misma tarea pero sin interactuar físicamente entre ellos. En este contexto se ha desarrollado una aplicación para sujetar dos objetos específicos con un sistema bi-brazo (cada objeto puede sujetarse con cualquiera de los dos brazos o bien puede ser preasignado a uno de ellos) en un entorno en que el acceso a los objetos de interés puede estar bloqueado por otros objetos que deberán ser quitados (Rodríguez et al., 2014; Rodríguez and Suárez, 2016). Se asume que las posiciones de los objetos son conocidas.

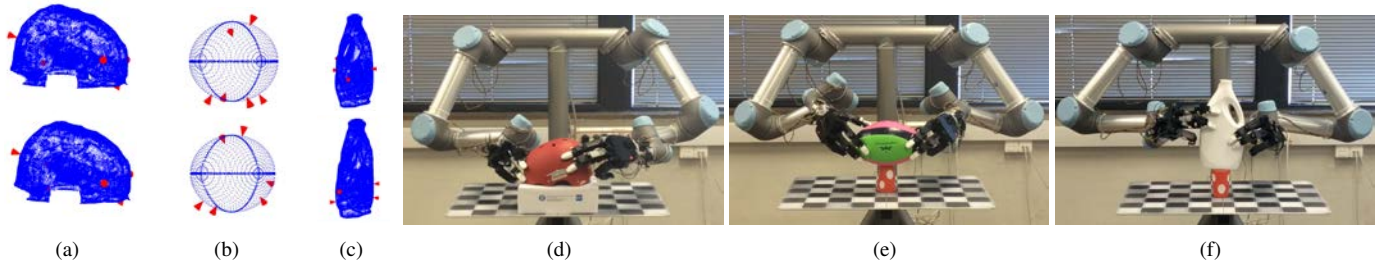


Figura 3: Ejemplos de prensiones bimanuales: a)-c) Ejemplos de puntos de contacto alcanzables por el sistema bi-brazo; d)-f) Prensiones de un casco, un balón de rugby y un bote de detergente.

Para calcular las trayectorias de los brazos hasta cada objeto se usa una variación de un planificador probabilístico, pero, a diferencia de otros planificadores, no se descartan las configuraciones en las que se producen colisiones con objetos amovibles, sino que se acepta la ruta marcando la necesidad de quitar los obstáculos encontrados para que sea válida. El planificador de movimientos se utiliza de forma recursiva, comenzando con los objetos de interés, siguiendo con los obstáculos encontrados y así sucesivamente. De esta forma se genera un grafo de precedencias, de cuyo análisis se obtiene una secuencia de acciones de cada brazo que permite quitar el menor número de obstáculos necesario para acceder a los objetos de interés.

Las rutas deben ser ejecutadas por el sistema bi-brazo, que puede hacerlo paralelizando algunas acciones, pero debido a que éstas no han sido coordinadas temporalmente podrían existir colisiones entre los brazos. Para evitar estas colisiones se ejecuta un proceso de coordinación en línea que prioriza las tareas de acuerdo con su precedencia en el grafo y ajusta la evolución temporal de los movimientos de los brazos sin cambiar sus rutas geométricas (Montaño and Suárez, 2016b).

En la Fig. 4 se muestra un ejemplo del funcionamiento del sistema. Los objetos de interés son los cilindros verdes O_1 y O_2 que deben ser sujetados por cada mano, y los cilindros azules $O_i, i \neq 1, 2$ son obstáculos amovibles.

3.3. Movimientos antropomorfos

En la última década se están desarrollando robots que pueden interactuar con los humanos, y en este contexto es deseable que los robots realicen movimientos antropomorfos para que la interacción humano-robot sea más natural y segura (si los robots se mueven antropomórficamente, los usuarios pueden optimizar la interacción y minimizar el riesgo de posibles colisiones de forma intuitiva).

Buscando que los robots realicen movimientos antropomorfos, se ha analizado y modelado la coordinación conjunta de los brazos humanos durante la ejecución de diferentes tareas (Fig. 5) con el objetivo de obtener información relevante para su aplicación en la planificación de movimientos de un sistema robótico bi-brazo, como son las sinergias existentes entre las articulaciones de los brazos. Esta información también se usa para conseguir una mayor eficiencia en la planificación. Este enfoque ya había sido aplicado a manos mecánicas y se ha extendido en este proyecto al caso de un sistema bi-brazo.

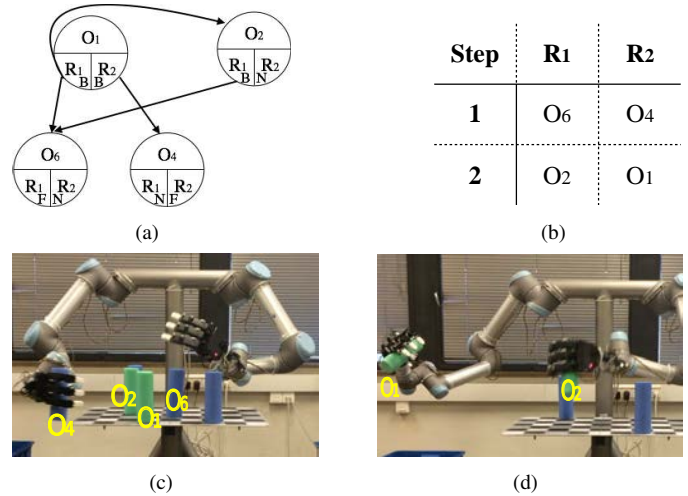


Figura 4: Ejemplo de cooperación bibraso, los objetos de interés son los cilindros verdes O_1 y O_2 : a) Grafo de precedencias; b) secuencia de acciones, el brazo R_1 quita O_6 y el R_2 quita O_4 en paralelo, luego R_1 sujeta O_1 y R_2 sujeta O_4 ; c) y d) instantáneas de la ejecución real.

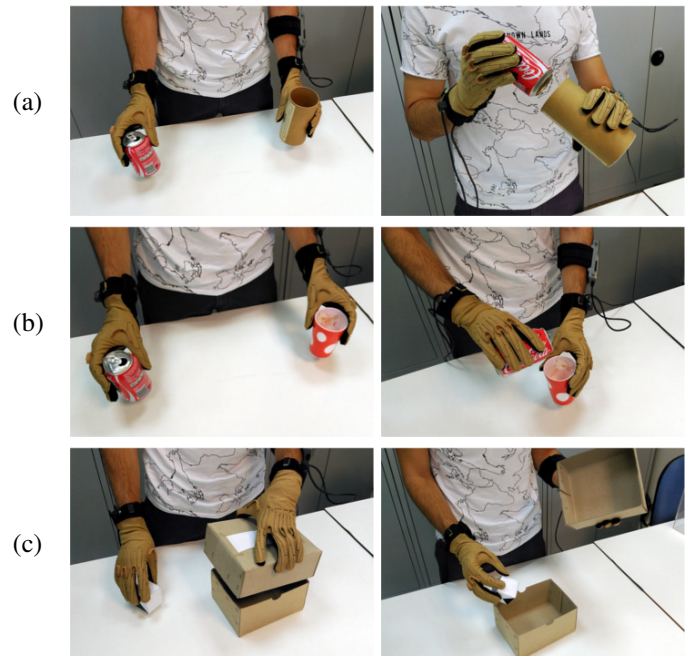


Figura 5: Operario humano realizando tareas de demostración mientras usa el equipo de captura de movimientos: a) tarea *Assembly*, b) tarea *Pouring*, c) tarea *Box*. Las columnas izquierda y derecha muestran, respectivamente, ejemplos de las configuraciones iniciales y finales.

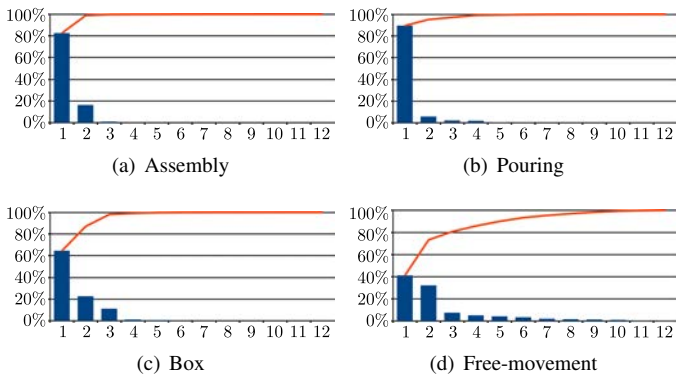


Figura 6: Varianza muestral por PDM y acumulada versus el número de PMDs. La tarea *Free-movement* corresponde a movimientos libres del operario con el único objetivo de intentar cubrir su espacio de trabajo.

Las sinergias de orden cero representan correlaciones entre los grados de libertad del sistema en estudio (como son las posiciones articulares de los brazos), y se obtienen a partir de un *Análisis de Componentes Principales* (PCA) de un conjunto de muestras de configuraciones de dicho sistema. El PCA devuelve una nueva base del espacio de configuraciones (vectores propios) con los ejes ordenados según la dispersión de las muestras a lo largo de cada nuevo eje (valores propios). Cada eje de esta base representa una sinergia de orden cero (también llamadas Direcciones de Movimiento Principales, PMD), es decir, el movimiento a lo largo de un eje, equivalente a un único grado de libertad, implica un movimiento correlacionado de varios (o todos) los grados de libertad reales del sistema. Utilizando solo un adecuado subconjunto de estas sinergias se reduce de forma significativa el coste computacional de la planificación sin grandes restricciones en los movimientos (Suárez et al., 2015). Ejemplos de la dispersión de las muestras según cada PMD en las diferentes tareas realizadas por el humano se muestran en la Fig. 6, donde puede apreciarse que tomando entre dos y seis PMDs puede cubrirse el 95 % de la dispersión acumulada, reduciendo drásticamente de este modo el espacio de planificación. Un ejemplo de la ejecución real de una tarea con el sistema bi-brazo se muestra en la Fig. 7. Otra aportación realizada en el proyecto es el uso de campos de potenciales en la fase de planificación para guiar la búsqueda de soluciones según unas condiciones preestablecidas (García et al., 2015).

Como generalización de las sinergias de orden cero se ha introducido el concepto de sinergias de primer orden, denominando así al resultado de aplicar el PCA a un conjunto de muestras de velocidades en lugar de muestras de configuraciones (García et al., 2015). En la práctica se muestrean los movimientos de demostración capturando configuraciones con una frecuencia de muestreo dada, y se aproxima la velocidad con el método de diferencias finitas centrales de precisión de segundo orden. Posteriormente se realiza un PCA sobre el conjunto de muestras de velocidad, obteniéndose una nueva base del espacio de velocidades. Estas sinergias se utilizan para particionar el espacio de planificación dando prioridades a determinadas velocidades en función de

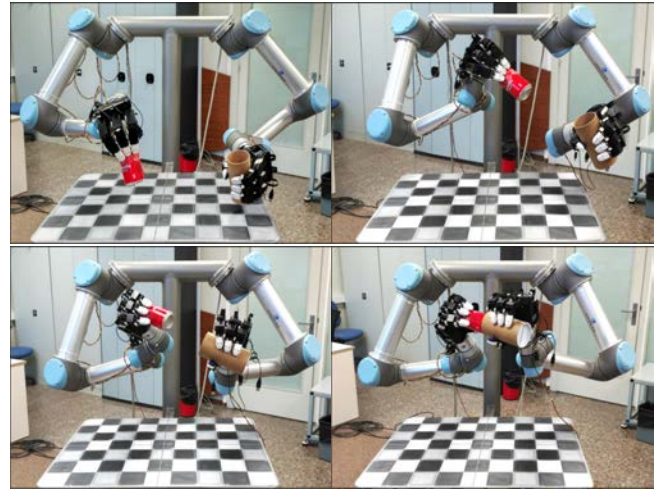


Figura 7: Instantáneas de la ejecución con el sistema robótico bi-brazo real de la tarea *assembly*.

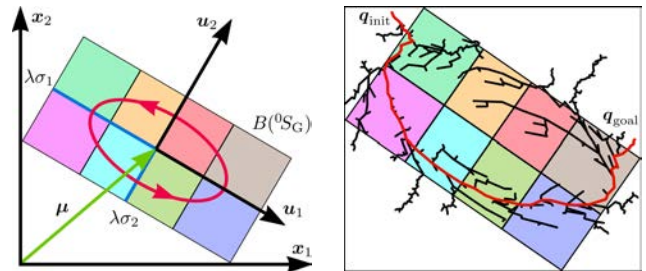


Figura 8: Movimiento elíptico en el sentido anti-horario (izquierda) y resultado de la planificación de movimientos entre dos configuraciones siguiendo las sinergias obtenidas de este movimiento (derecha). Las regiones marcadas con diferentes colores corresponden a regiones del espacio con diferentes sinergias de primer orden asignadas según la partición realizada.

la configuración. Un ejemplo ilustrativo en 2D se muestra en la Fig. 8. La aplicación de este concepto en un sistema robótico bi-brazo permite obtener movimientos que intentan seguir los movimientos naturales demostrados por un humano (García et al., 2017a).

Otra aplicación original resultante del estudio de las sinergias es su aplicación en la definición de una medida de similitud entre tareas en función de los movimientos realizados para llevarlas a cabo (García et al., 2017b), lo que permite una representación geométrica en la que la distancia entre tareas representa su similitud (Fig. 9). Esto permite agrupar las tareas según su similitud, realizando una taxonomía de tareas. Así, cuando se quiere llevar a cabo una nueva tarea, no demostrada previamente por el operario, se puede elegir con un cierto criterio las sinergias más adecuadas para realizar una planificación eficiente.

4. Manipulador móvil

En el marco del proyecto se ha desarrollado un manipulador móvil con las siguientes características principales, que pueden apreciarse en la Fig. 10a. El dispositivo consta de una plataforma móvil, de planta circular y un diámetro de 72 cm a fin de que pueda pasar por puertas de dimensiones estándar. La

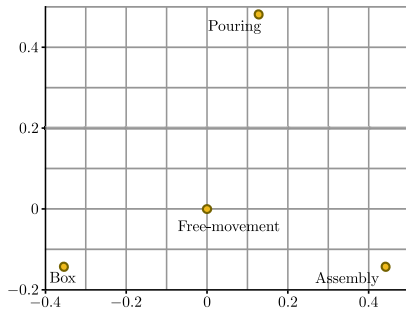


Figura 9: Mapa de distancias entre las tareas demostradas.

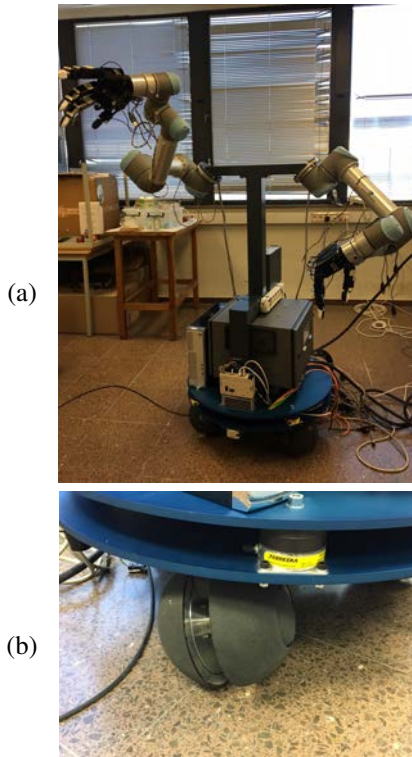


Figura 10: a) Manipulador bi-brazo móvil; b) Detalle de las ruedas.

plataforma tiene tres ruedas de diseño especial (ver detalle en la Fig. 10b) cuyo accionamiento coordinado permite llevar a cabo movimientos independientes en un espacio de movimiento 3D, es decir la plataforma puede girar sobre sí misma y moverse linealmente en direcciones ortogonales. Para evitar colisiones la plataforma se ha equipado con tres sensores modelo Tim561 de SICK Optic Inc. instalados a 120 grados en su contorno, estos sensores realizan un escaneo mediante láser hasta una distancia de 10 m en un plano paralelo a la superficie del suelo, y si bien no garantizan la detección de posibles colisiones en cualquier entorno, si permiten realizar experimentación de forma práctica en diversos entornos reales, lo que es suficiente para adecuarse a los objetivos del proyecto. La plataforma está equipada con dos brazos manipuladores UR5 de Universal Robot siguiendo una estructura antropomorfa, y cada brazo está equipado a su vez con una mano Allegro, también antropomorfa de 4 dedos, cada uno con 4 grados de libertad y con sensores táctiles en su yema.

5. Conclusión

El artículo ha presentado algunas de las contribuciones más relevantes del proyecto al que se hace referencia. Una buena parte del trabajo a realizar en la etapa final del proyecto estará orientada a la integración de resultados obtenidos por separado en cada uno de los paquetes de trabajo planteados, fundamentalmente entre las estrategias de colaboración entre los brazos y la movilidad de la base, ya que la manipulación de objetos en la propia mano tiene un carácter más independiente.

Se espera que las aportaciones realizadas en el marco del proyecto contribuyan a ampliar el campo de aplicación de los manipuladores móviles diestros, y, de forma especial, en ámbitos donde sea necesaria la interacción con seres humanos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno Español mediante el proyecto del Plan Nacional de I+D+I con referencia DPI2013-40882-P.

Referencias

- García, N., Rosell, J., Suárez, R., 2015. Motion planning using first-order synergies. In: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 2058–2063.
- García, N., Suárez, R., Rosell, J., 2015. HG-RRT*: Human-Guided optimal random trees for motion planning. In: Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).
- García, N., Suárez, R., Rosell, J., 2017a. First-order synergies for motion planning of anthropomorphic dual-arm robots. In: Proc. World Congr. Int. Federation Automatic Control (IFAC).
- García, N., Suárez, R., Rosell, J., 2017b. Task-Dependent synergies for motion planning of an anthropomorphic dual-arm system. IEEE Trans. Robotics 33 (4).
- Montaño, A., Suárez, R., 2015. Unknown object manipulation based on tactile information. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 5642–5647.
- Montaño, A., Suárez, R., 2016a. Commanding the object orientation using dexterous manipulation. In: Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 418. Springer Verlag, pp. 69–79.
- Montaño, A., Suárez, R., 2016b. Coordination of several robots based on temporal synchronization. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 42, 73–85.
- Montaño, A., Suárez, R., 2017. Robust dexterous telemanipulation following object-orientation commands. Industrial Robot: An International Journal (aceptado, pendiente de publicación).
- Rodríguez, C., Montaño, A., Suárez, R., 2014. Planning manipulation movements of a dual-arm system considering obstacle removing. Robotics and Autonomous Systems 12 (12), 1816 – 1826.
- Rodríguez, C., Rojas-de-Silva, A., Suárez, R., 2016. Dual-arm framework for cooperative applications. In: IEEE 21st Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).
- Rodríguez, C., Suárez, R., 2016. Combining motion planning and task planning for a dual-arm system. In: IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016). pp. 4238–4243.
- Rojas-de-Silva, A., Suárez, R., 2016. Grasping bulky objects with two anthropomorphic hands. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 877–884.
- Rosell, J., Pérez, A., Aliakbar, A., Muhayyuddin, Palomo, L., García, N., 2014. The Kautham project: A teaching and research tool for robot motion planning. In: Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).
- Suárez, R., Rosell, J., García, N., 2015. Using synergies in dual-arm manipulation tasks. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA). pp. 5655–5661.