

Robots autónomos diestros como co-trabajadores con operadores humanos

Raúl Suárez y Jan Rosell

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

1. Introducción

El campo de aplicación de la robótica crece constantemente a medida que los avances tecnológicos van permitiendo nuevas prestaciones. Entre las nuevas aplicaciones destaca, por su potencial trascendencia tanto desde el punto de vista productivo como desde el social, aquellas en las que los robots trabajan conjuntamente con los seres humanos, dando origen al concepto de “robot co-trabajador”. En estas aplicaciones los robots requieren características particulares. Por un lado, han de tener cierta autonomía y capacidad de decisión, ya que su función no es la de realizar tareas de forma repetitiva en el sentido clásico, sino que deberán adaptarse con cierta celeridad a condiciones cambiantes, sobretudo generadas por los operarios con los que comparten el entorno de actuación. Esta adaptación implica una capacidad de interacción con los operarios que condiciona los movimientos y forma de actuar de los robots, a fin de evitar posibles daños a la integridad física de los humanos, pero evidentemente manteniendo la eficiencia de sus acciones. Por otra parte, para que los robots co-trabajadores sean realmente útiles es necesario, además, que tengan un nivel de destreza suficiente que les permita ejecutar diferentes acciones requeridas en las actividades humanas.

En este contexto, en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) se está llevando a cabo el proyecto “Robots autónomos diestros como co-trabajadores con operadores humanos” financiado por el Plan Nacional de I+D+I (DPI2016-80077-R) en el que se pretende incrementar las prestaciones de los robots co-trabajadores para acercarlos a su implantación definitiva en nuestra sociedad, y facilitar también su aceptación por parte de los humanos. Con este fin se desarrollarán algoritmos y procedimientos que faciliten una cooperación eficiente entre los robots co-trabajadores y los humanos. Concretamente, se plantean avances en temas tan relevantes como: el aumento de la capacidad del robot para gestionar autónomamente las tareas y los movimientos para llevarla a cabo, representando el conocimiento mediante ontologías; el incremento de la capacidad de manipulación diestra y bimanual, monitorizando las acciones para prevenir potenciales fallos; y la mejora en la interacción con el operario humano, en referencia a movimientos reactivos, de cooperación, de transferencia de objetos. Todos los desarrollos teóricos realizados son probados y validados experimentalmente en los sistemas específicamente preparados para tal fin en el marco del proyecto. Por otra parte, los problemas mencionados se abordan con la intención de aportar soluciones generales que sean válidas tanto en la robótica industrial como en la de servicios, previendo tanto la influencia puramente industrial de los resultados como la componente social de los mismos.

2. Motivación

Aunque la introducción de robots avanza de manera imparable en distintos ámbitos, la disponibilidad de robots humanoides con capacidades “casi humanas” y que realicen para el hombre tareas avanzadas en el trabajo y en el hogar no es inmediata. Sin

embargo, la existencia de robots manipuladores móviles con capacidades de manipulación diestra capaces de asistir al ser humano de manera versátil en distintas tareas simples es ya una realidad, por ejemplo como transportadores logísticos o adaptaciones de manipuladores clásicos, y algunos fabricantes ya comercializan modelos que cumplen las normativas de seguridad requeridas para compartir espacio de trabajo con los seres humanos. En cualquier caso, lograr una adecuada efectividad, depende de mejoras de hardware y de software que permitan un grado elevado de adaptabilidad.

El uso de robots como compañeros de trabajo es un salto evolutivo en la robótica industrial. La disponibilidad de robots que puedan realizar distintas tareas, autónomamente o en cooperación, y compartir de forma segura el espacio con los humanos, puede permitir incrementar la producción y los puestos de trabajo. Los robots co-trabajadores necesitan la interacción y supervisión humanas, pueden considerarse como herramientas avanzadas y es posible establecer con ellos una relación simbiótica, permitiendo realizar más tareas en menos tiempo, con mayor calidad y de forma más confortable.

La propuesta de introducir en el entorno de trabajo robots co-trabajadores tiene un carácter disruptivo que puede tener efectos importantes sobre el modelo productivo actual, y el comportamiento y la convivencia laboral. Por ello, en los desarrollos en este campo hay que tener en cuenta la importancia de los comportamientos y percepciones sociales que esta tecnología pueda generar, ampliando sus ventajas y minimizando los riesgos asociados, para que estos comportamientos propicien el proceso de innovación, que debe conllevar un aumento de la productividad y de la calidad, así como una mejora de las condiciones de trabajo. En este sentido, deben implementarse sistemas en los que los robots co-trabajadores den soporte y se integren en las tareas y movimientos de los operarios de manera fluida, natural, mínimamente invasiva y segura.

Ahora bien, para que el concepto de robots co-trabajadores se consolide, tanto en el ambiente industrial como en el de servicios, aún se deben realizar avances científicos y tecnológicos en determinados temas afines. Por ejemplo, aunque ya existen propuestas y ensayos experimentales, la manipulación diestra y la cooperación bimanual en su sentido más riguroso aún son temas de trabajo en centros de investigación, así como la capacidad de cooperación con el operador humano en cuanto a planificación simultánea de movimientos y tareas para una adecuada interacción, desde el punto de seguridad, de eficiencia, y también de confort para el humano. Por lo tanto, resulta razonable y pertinente trabajar en estos aspectos.

Así, entre las motivaciones más relevantes para llevar a cabo un proyecto de investigación abordando los temas que se describen en las secciones siguientes podemos mencionar: a) los robots co-trabajadores se presentan actualmente como una de las herramientas de alto nivel más versátil y útiles, b) se dispone en el mercado de robots manipuladores móviles de prestaciones mecánicas aceptables, pero que tienen fuertes limitaciones en cuanto a destreza y capacidad de interacción con el operario humano; c) entre las causas de estas limitaciones están las carencias en la capacidad de manipulación diestra, por ejemplo explotando adecuadamente el uso de información táctil, y en la de cooperación segura y eficiente con el humano, por ejemplo planificando adecuadamente las tareas y movimientos en concordancia con los del humano.

3. Aspectos técnicos

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de un sistema de robots co-trabajadores diestros que tengan capacidad de manipulación y que sean capaces de

interactuar con operarios humanos en la realización de tareas diversas. Se plantea, por un lado, una manipulación bimanual y móvil que permita, mediante la coordinación entre brazos y mediante los grados de libertad de la base móvil, una amplia versatilidad de acciones de soporte al operario humano. Por otro lado, usando manos mecánicas sensorizadas adecuadamente, se busca llevar a cabo una manipulación diestra que amplíe el rango de tareas a realizar. Además, los movimientos de los brazos y de las manos deberán tener apariencia humana para facilitar la interacción con operarios humanos. Esta interacción se pretende que abarque diferentes grados, desde una interacción mínima en la que los robots reciben indicaciones de la tarea a realizar y deben ser capaces de ejecutarla de la manera más autónoma posible (planificando la tarea y los movimientos para llevarla a cabo, siendo capaces para ello de obtener el conocimiento de una codificación basada en ontologías), hasta una máxima cooperación entre humanos y robots en la ejecución conjunta de una tarea determinada (en este caso es necesario que el robot tenga capacidad de comunicación con el operario humano, así como de adaptación a los cambios, tanto en lo que se refiere a la planificación de la tarea como a la planificación de los movimientos).

En los subapartados siguientes se describen los principales aspectos científico-técnicos abordados con el objetivo de mejorar las prestaciones de los robots autónomos diestros en su aplicación como co-trabajadores con operadores humanos.

3.1 Capacidad de gestión autónoma de tareas y movimientos

Los robots co-trabajadores deben tener de la capacidad de planificación a nivel de tarea y a nivel de movimientos, para que puedan ejecutar las indicaciones del operario respecto de la tarea que deben llevar a cabo. El proceso de razonamiento ligado a la planificación de las tareas puede verse facilitado mediante una adecuada representación del conocimiento usando ontologías. Esta representación permite la formulación de categorías y relaciones que describen los objetos y las acciones de manipulación, facilitando la integración de información semántica con el proceso de razonamiento. Asimismo, es importante que la planificación de tareas y de movimientos se haga de manera coordinada para obtener de manera eficiente un plan realizable, y que sea robusta a las incertidumbres tanto a nivel de tarea en cuanto a los resultados de las acciones, como a nivel de movimientos respecto a la imprecisión del modelo del entorno.

Representación del conocimiento mediante ontologías. El “*Web Ontology Language*” (OWL) permite modelar el conocimiento sobre las tareas de manipulación en forma de ontologías, que pueden ser accesibles para cualquier robot a través de Internet. Se definen dos ontologías: una centrada en los objetos, en sus propiedades físicas y en cómo y con qué garras/manos pueden ser manipulados, y otra centrada en las acciones que son capaces de realizar los robots, en sus precondiciones y sus efectos.

Planificación de movimientos para tareas de manipulación. La planificación de movimientos se centra en la búsqueda de caminos para el robot que eviten colisiones con el entorno. Sin embargo, para tareas de manipulación, deben permitirse el contacto con algunos de los objetos del entorno, facilitando la interacción con el propósito de reposicionarlos. Para ello, se equipa a los algoritmos clásicos de planificación de movimientos basados en muestreo con un motor de simulación dinámica, y se incorpora asimismo el conocimiento sobre cómo se interactúa con los diferentes objetos. Este enfoque también se puede extender a los planificadores basados en “*Linear Temporal Logic*”, permitiendo la realización de acciones más complejas que requieran la consecución temporal de diferentes objetivos.

Planificación simultánea de tareas y de movimientos. Una de las posibles alternativas para la integración de la planificación de tareas y de movimientos se basa en la

planificación de tareas en el espacio de estado usando el método heurístico de planificación *Fast Forward (FF)*, que estima el coste hasta el estado final en base al número de acciones a realizar. Integrando la planificación de movimientos en el cálculo de esta heurística se pueden encontrar planes factibles y de coste mínimo de manera eficiente.

3.2 Capacidad de manipulación bimanual y diestra

Un robot co-trabajador debe tener en sí mismo capacidades avanzadas de manipulación, lo que incluye el uso coordinado de dos brazos para llevar a cabo una tarea (sea a cadena cinemática abierta o cerrada cuando dos brazos sujetan un único objeto) así como la capacidad de manipular objetos de forma diestra con los dedos de la mano. Las soluciones actuales no tienen la robustez y eficiencia que una aplicación práctica necesita y aún se deben perfeccionar. En el marco del proyecto se están trabajando los siguientes temas.

Estrategias para la optimización de la sujeción bimanual de objetos. Se está trabajando en metodologías que permitan resolver de forma práctica como sujetar un objeto con dos manos, considerando que la prensión resultante resista fuerzas de perturbación en cualquier dirección. Los desarrollos realizados ya permiten encontrar soluciones básicas, dando la posición de los brazos, las manos y los dedos que sujetan conjuntamente un objeto demasiado voluminoso para ser sujetado con una única mano. (ver Figura 1). Los trabajos en curso están orientados a optimizar las fuerzas que deben aplicarse en las articulaciones de los dedos para optimizar a su vez las fuerzas resultantes sobre el objeto siguiendo diferentes criterios: hacer que los dedos hagan las fuerzas mínimas necesarias para la sujeción, hacer que el objeto esté sometido a las menores fuerzas internas posibles, e intentar evitar que una mano haga mucha más fuerza que la otra al sujetar el objeto.

Colaboración bimanual en la manipulación independiente de objetos. Otra variante de manipulación coordinada utilizando sistemas bi-brazo es la denominada coordinación por metas, en la que ambos brazos trabajan en la misma tarea pero sin interactuar físicamente entre ellos. En este contexto se ha desarrollado una aplicación para sujetar dos objetos específicos (cada objeto puede sujetarse con cualquiera de los dos brazos o bien puede ser pre-asignado a uno de ellos) en un entorno en que el acceso a estos objetos puede estar bloqueado por otros que deberán ser apartados (ver Figura 2). Para ello se han utilizado variantes de planificadores de movimientos basados en muestreo, tras su uso el problema se ha modelado como un grafo de precedencias, y de este grafo se puede extraer una secuencia de acciones para cada mano que permita apartar los obstáculos y hacer accesibles los objetos deseados. Actualmente se trabaja en nuevos modelos para buscar soluciones óptimas de forma sistemática y también en la determinación de funciones de coste para optimizar la transferencia de un objeto de una mano a otra (robot-robot o robot-operario), intentando establecer una medida de calidad que indique cuán buena es una prensión de cara a la posterior transferencia del objeto.

Búsqueda de apariencia humana en los movimientos de las manos y los brazos robóticos. Un aspecto importante cuando un robot va a interactuar con un operario humano es que los movimientos del primero sean fácilmente interpretados por el segundo, tanto por razones de optimización del trabajo como de seguridad para el operario. Para ello se procura que la apariencia de los movimientos de los brazos robóticos se aproxime a la humana, aun cuando el robot tenga una estructura cinemática diferente (ver Figura 3). Para ello se han estudiado las relaciones entre las variaciones de las articulaciones de los humanos cuando realizan las tareas, tanto en lo relativo a posición como a velocidades (sinergias denominadas de orden cero y uno respectivamente). Este criterio se aplica tanto a los movimientos coordinados de cada

brazo en cadena cinemática abierta como a los movimientos restringidos en cadena cinemática cerrada cuando ambos brazos estén manipulando un mismo objeto.

Manipulación diestra. El concepto de manipulación diestra se refiere a la manipulación de objetos usando solamente los dedos. La manipulación diestra persigue tres objetivos principales: a) Desde el punto de vista de la mano, la optimización de su configuración, es decir, que sea confortable mientras se sujeta un objeto; b) Desde el punto de vista de la prensión (relación objeto-mano), la optimización de su calidad, es decir, la búsqueda de prensiones seguras en las que la mano pueda resistir fuerzas externas aplicadas al objeto; y c) 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. En el proyecto se trabaja siguiendo estos tres criterios en la manipulación de objetos desconocidos usando solamente información táctil y el conocimiento de la cinemática de la mano. Se tienen resultados muy satisfactorios para manipulación de objetos en un plano usando dos dedos y se trabaja actualmente en la extensión al caso de sujeción del objeto con tres o más dedos para poder rotarlo en diferentes direcciones.

3.3 Capacidad de interacción con operarios humanos

Es necesario que los robots co-trabajadores tengan la capacidad de interacción con los operarios humanos. El sistema debe ser capaz de planificar tareas en las que el operario humano es uno de los actores en su ejecución y el robot co-trabajador el otro. La introducción de los operarios humanos fuerza al sistema a ser flexible, a tener una capacidad de replanificación que le permita adaptarse a las incertidumbres y a los cambios. Asimismo, en cuanto a la planificación de los movimientos del robot, como ya se mencionó anteriormente, es deseable que estos tengan apariencia humana (particularmente en el caso de robots bimanuales), para que el operario se sienta seguro a su lado, así como capacidad reactiva para evitar colisiones con los operarios (ver Figura 4).

Planificación de tareas compartidas. Para poder llevar a cabo una correcta colaboración, es necesario el desarrollo de estrategias de planificación de tareas compartidas entre el operario humano y el robot co-trabajador, realizándose dicha planificación en base al conocimiento sobre las capacidades de ambos, disponible en las ontologías de manipulación. La discrecionalidad del operario humano en la ejecución de las tareas es un punto clave, que obliga a considerar estrategias flexibles de replanificación que, en base a la monitorización continua de la tarea, permitan adaptarse a los cambios de manera rápida y efectiva.

Planificación reactiva de movimientos. Mediante un sistema de cámaras se puede monitorizar los movimientos del operario humano dentro del espacio de trabajo, e integrar en el robot la capacidad de evitar colisiones mediante estrategias dinámicas de evitación de obstáculos que modifican ligeramente el camino planificado. Sin embargo, ante posibles obstaculizaciones, es indispensable dotar al robot co-trabajador de la capacidad de replanificación que le permita recalcular los movimientos a realizar de manera rápida y eficiente.

Transferencia de objetos entre humanos-robots. Dentro del contexto de la interacción humano-robot, la realización de tareas compartidas en las que se requiere de la transferencia de objetos humano-robot, en ambos sentidos, es de especial interés. Este problema requiere optimizar la posición más conveniente de transferencia y la configuración del manipulador en función del contexto, así como la cesión y agarre robustos del objeto en el intercambio. Asimismo, en este tipo de tareas es de especial importancia que el robot co-trabajador se mueva como lo haría un operario humano.

4. Conclusiones

La evolución de la robótica industrial se dirige hacia la robótica colaborativa, que debe permitir el uso de robots como co-trabajadores que puedan realizar distintas tareas, autónomamente o en cooperación, y compartir de forma segura el espacio con los humanos, facilitando su integración en la pequeña y mediana empresa y permitiendo un aumento de la producción y de la calidad de los puestos de trabajo.

En este marco, el proyecto "Robots autónomos diestros como co-trabajadores con operadores humanos" DPI2016-80077-R reseñado en este artículo persigue abordar algunos de los principales retos científicos y tecnológicos que esto comporta. En particular, contribuir a dotar a los robots co-trabajadores de la capacidad de planificación simultánea de movimientos y tareas para una adecuada gestión autónoma, de capacidades avanzadas de manipulación, incluyendo manipulación diestra y cooperación bimanual, para su desempeño en entornos humanos, así como de la capacidad de interacción con los operarios humanos para realizar tareas en cooperación con ellos, moviéndose en su entorno y en su presencia de manera segura y fiable.

Figura 1. Manipulación bimanual de objetos voluminosos para una única mano.

Figura 2. Robot manipulador bimanual manipulando objetos en presencia de obstáculos.

Figura 3. Robot manipulador móvil antropomorfo.

Figura 4. Operario humano interactuando con un robot antropomorfo colaborativo.