

## Manipulador móvil, bibrazo y diestro con nuevas ruedas omnidireccionales

R. Suárez<sup>a</sup>, L. Palomo-Avellaneda<sup>a</sup>, J. Martínez<sup>b</sup>, D. Clos<sup>b</sup>, N. García<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain

<sup>b</sup>Department d'Enginyeria Mecànica, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain

### Resumen

Este artículo describe un manipulador móvil, bimanual y con capacidad de manipulación diestra denominado MADAR (del inglés *Mobile Anthropomorphic Dual-Arm Robot*). Básicamente, el manipulador puede dividirse en dos partes, una base móvil y una estructura superior portando dos brazos en configuración antropomorfa con manos mecánicas diestras equipadas con sensores táctiles. La base, completamente de desarrollo propio, es de forma circular y tiene tres ruedas con un diseño novedoso que permiten una movilidad omnidireccional. La estructura superior integra elementos comerciales, como los brazos, las manos y distintos sensores, que han sido adaptados para su funcionamiento conjunto. El artículo incluye tanto la descripción de los principales elementos del hardware como del software desarrollado para su control y uso.

### Palabras Clave:

Robótica y sistemas robotizados, Robótica industrial y manipuladores robóticos, Manipuladores móviles, manipuladores diestros.

### Dual-arm dexterous mobile manipulator with new omnidirectional wheels

### Abstract

This article describes a mobile manipulator, equipped with two arms with dexterous capabilities, called MADAR (from *Mobile Anthropomorphic Dual-Arm Robot*). Basically, the manipulator can be divided into two parts, a mobile base and an upper structure that includes two arms with dexterous hands equipped with tactile sensors. The base, completely self-developed, is circular in shape and has three wheels with a novel design that allow omnidirectional mobility. The upper structure integrates commercial elements, such as the arms, the hands and different sensors. The article includes the description of the main elements of the hardware and the software developed for its control and use.

### Keywords:

Robotics and robotic systems, Industrial Robotics and robotic manipulators, Robot manipulators, Dexterous manipulators.

## 1. Introducción

Cada vez son más los campos en los que la robótica va tomando mayor protagonismo, y una de las causas de esta expansión es el desarrollo de diferentes tipos de robots, cada uno con diferentes características que facilitan su aplicación en distintos tareas. Esta gran variedad de robots abarca desde robots industriales tradicionales hasta humanoides complejos y sofisticados, pero con bastante frecuencia muchas aplicaciones no necesitan o no pueden ser resueltas eficientemente por estos tipos extremos de robots, por lo que continuamente se están desarrollando

otras variantes de mayor practicidad. Un caso típico son los manipuladores móviles, que, desde el punto de vista práctico, en muchos casos se construyen simplemente instalando un brazo manipulador (o más de uno) sobre una plataforma móvil, utilizando distintas ruedas según el tipo de dispositivo elegido y el rendimiento deseado en función de las condiciones del entorno de trabajo. El manipulador móvil que se presenta aquí sigue este enfoque, con la intención de disponer de un torso parecido al de un humano, con dos brazos, posibilidad de realizar manipulación diestra y capacidad para movimiento omnidireccional.

\*Autor para correspondencia: raul.suarez@upc.edu

Los desarrollos de manipuladores móviles considerados como antecedentes de este trabajo comenzaron con plataformas móviles portando un único brazo sobre ellas (Khatib, 1999), estructura que mantienen actualmente numerosos dispositivos, tanto experimentales en centros de investigación como comerciales. En la tabla 1 se muestran algunos datos relevantes de varios de estos robots<sup>1</sup>.

Por otra parte, tanto en los manipuladores móviles como estáticos, la capacidad de manipulación depende de las prestaciones de las manos con las que estén equipados. Por esta razón, la comunidad robótica ha desarrollado diferentes manos diestras, como, por ejemplo MA-I (Suárez and Grosch, 2004), DLR-HIT II (Butterfass et al., 2004), Shadow (Company, 2015), Schunk (SCHUNK GmbH, 2011), Robonaut 2 (Bridgewater et al., 2012), Robotiq three-finger gripper (Sadun et al., 2016), y Allegro (SimLab-Wonik Robotics, 2012). Las manos diestras permiten optimizar la prensión y manipulación de objetos siguiendo distintos criterios (Roa et al., 2008).

Los manipuladores móviles generan nuevas perspectivas en la colaboración entre humanos y robots, especialmente cuando los dispositivos tienen seguridad intrínseca debido a las particularidades de su diseño mecánico y de sus sistemas de control (Reitelshöfer et al., 2014). Ahora bien, para que este tipo de dispositivos sean de utilidad en diferentes entornos deben tener un alto grado de autonomía y versatilidad, por lo que deben incorporar cierta capacidad de planificación, tanto a nivel de movimientos como de la tarea a realizar, y, asimismo, capacidad para realizar tanto manipulación diestra de pequeños objetos (Montaño and Suárez, 2015, 2018b,a) como manipulación de objetos voluminosos (Rojas-de-Silva and Suárez, 2016).

Este artículo presenta un manipulador móvil de doble brazo de uso general llamado MADAR (de *Mobile Anthropomorphic Dual-Arm Robot*), que se muestra en la figura 1. El robot dispone de dos brazos manipuladores y dos manos diestras (dispositivos comerciales) ensamblados e integrados funcionalmente en una plataforma móvil omnidireccional con un nuevo tipo de ruedas. Esta es una versión ampliada del trabajo presentado por Suárez et al. (2018). Entre las consignas de diseño cabe destacar que los brazos manipuladores debían colocarse de forma de poder emular el tipo y alcance de los movimientos de un humano, lo que imponía restricciones en el diseño de su soporte y de la plataforma móvil, cuya estabilidad podía verse comprometida en algunas tareas aumentando significativamente el riesgo de vuelco. También se debe tener en cuenta la capacidad de carga deseada, cuya consigna es que MADAR pueda manipular, como mínimo, objetos que el humano usa en su vida cotidiana con un peso de alrededor de 5 kg, y la velocidad máxima de desplazamiento, pensada de forma que el robot pueda moverse a la misma velocidad que una persona caminando normalmente, es decir, aproximadamente a 1 m/s. Por otra parte, para que el manipulador pueda moverse y trabajar de forma autónoma, todos los componentes mecánicos e informáticos deben ir a bordo, como por ejemplo los dispositivos de control de los brazos, manos y elementos motrices, las baterías y los distintos sensores. El tamaño final deseado de todo el robot debía permitir su

uso en interiores de edificios, y por lo tanto debía ser tal que pudiese pasar por puertas de medidas normalizadas, habitualmente de 800 mm, lo que también impuso serias restricciones de diseño.

Tabla 1: Comparación de algunos manipuladores (M = motrices; OA = Orientación activa)

Robot	Manos diestras	Brazos (GDL)	Ruedas
Justin	si	2 (7)	4 M con OA
TOMM	si	2 (6)	4 M Mecanum
PR2	no	2 (7)	4 M con OA
Hollie	si	2 (6)	4 M Mecanum
Kitech	si	2 (7)	0 (estático)
Tiago	no	1 (7)	4 caster y 2 M fijas
KMR iiwa	no	1 (7)	4 M Mecanum
YuMi	no	2 (7)	0 (estático)
Baxter	no	2 (7)	0 (estático)
Pioneer	no	2 (6)	4 caster y 2 M fijas
BMM2	no	1 (7)	3 M Omnidireccional

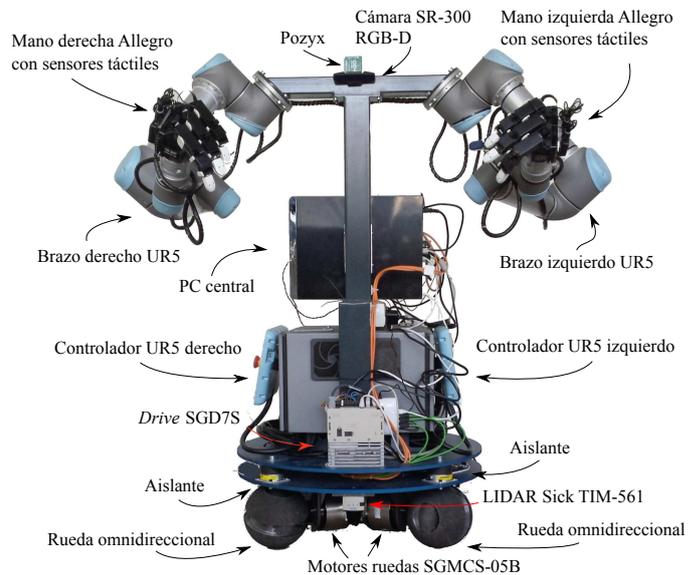


Figura 1: Vista frontal del manipulador móvil MADAR.

La razón que motiva el desarrollo del manipulador móvil aquí presentado es la necesidad de una plataforma completamente abierta para realizar experimentos en los campos de planificación y control de movimientos y tareas en manipulación móvil y diestra, contemplando además la posibilidad de la interacción del robot con operadores humanos. Por lo tanto, el robot no está diseñado para una aplicación en particular sino como manipulador móvil diestro de uso general, particularmente en interiores, a diferencia de otros dispositivos pensados especialmente para exteriores (Fentanes et al., 2012).

Después de esta introducción, el resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 describe la estructura mecánica del manipulador móvil y el principal hardware

<sup>1</sup>Justin (Albu-Schöffer et al., 2007), TOMM (Dean-Leon et al., 2017), PR2 (Willow Garage, 2010), Hollie (Hermann et al., 2013), Kitech (of Industrial Technology, 2014), Tiago (PAL Robotics, 2018), KMR iiwa (Kuka Robotics, 2018), YuMi (ABB, 2018), Baxter (Fitzgerald, 2013), Pioneer (Adept, 2018) y BMM2 (SYN-TENET, 2014).

utilizado. Esta sección incluye la descripción de un nuevo tipo de ruedas de diseño original que permiten el movimiento omnidireccional. La sección 3 describe el esquema de control desarrollado, que permite operar cada uno de los elementos individualmente o de forma conjunta. Concluyendo el artículo, la sección 4 resume las características más destacadas del trabajo y el trabajo futuro previsto.

## 2. Hardware y estructura mecánica

### 2.1. Tipos de ruedas para movimientos omnidireccionales

Las plataformas móviles de alta maniobrabilidad han sido ampliamente utilizadas en el diseño de robots móviles (Bischoff et al., 2011), en aplicaciones específicas entre las que destacan vehículos autoguiados (denominados AGV, del inglés *Automated Guided Vehicles* o *Automatic Guided Vehicles*), sillas de ruedas y carretillas elevadoras (Adascalitei and Doroftei, 2011). En estas aplicaciones, el movimiento en espacios reducidos es frecuentemente una prestación básica muy deseada.

Según el tipo de ruedas usado, existen básicamente dos enfoques en el desarrollo de plataformas móviles. El primero se basa en el uso de ruedas convencionales, utilizadas en múltiples posibles configuraciones. En la figura 2 se muestran, como ejemplo, dos de las configuraciones más utilizadas. La primera es una plataforma tipo “triciclo”, formada por dos ruedas que giran libre e independientemente sobre un mismo eje fijo a la plataforma y por una única rueda motriz, que además es directriz (figura 2a). La segunda es una plataforma tipo “silla de ruedas”, formada por dos ruedas motrices coaxiales de accionamiento independiente y por una o más ruedas libres de orientación también libre, denominadas ruedas “castor” (figura 2b). En ambos ejemplos las plataformas poseen solo dos grados de libertad en su movimiento en un plano. La principal ventaja de este tipo de plataformas es su simplicidad constructiva, pero como contrapartida su movimiento es no holónomico, lo que significa, por ejemplo, que la posición y orientación final de la plataforma al concluir una maniobra no queda unívocamente determinada por el incremento de las variables que describen el movimiento de sus grados de libertad (normalmente posiciones y velocidades angulares de los accionamientos) si no que se debe tener en cuenta la evolución temporal de dichas variables. Este hecho dificulta la planificación de movimientos y su control. También cabe comentar que los dos ejemplos citados corresponden a plataformas con solo dos grados de libertad independientes (rotaciones de los dos motores) por lo que para poder llevar la plataforma a cualquier localización y cualquier orientación será necesario hacer maniobras.

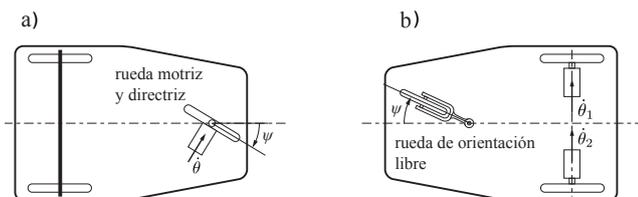


Figura 2: Ejemplos de plataformas móviles con ruedas convencionales: a) tipo triciclo; b) tipo silla de ruedas.

El segundo enfoque se basa en el uso de ruedas no convencionales, denominadas también omnidireccionales. Estas ruer-

das están compuestas por elementos rodantes que giran libremente alrededor de su eje, permitiendo simular un movimiento deslizante de la rueda en una dirección específica en el plano al mismo tiempo que la rueda puede girar alrededor de su eje horizontal con velocidad  $\dot{\theta}$  controlada por un actuador. Las plataformas equipadas con este tipo de ruedas disponen de los tres grados de libertad del movimiento en el plano sin necesidad de ninguna rueda directriz, y presentan comportamiento holónomico en los movimientos que no producen rotaciones alrededor de un eje ortogonal al plano de movimiento. Un ejemplo de ruedas omnidireccionales son las ruedas Mecanum, ampliamente utilizadas en aplicaciones comerciales, que están compuestas por rodillos de perfil curvado dispuestos sobre la periferia de la rueda con una inclinación determinada, típicamente de  $45^\circ$  (figura 3a). Otro ejemplo son las ruedas esféricas, que están compuestas por uno o dos rodillos de perfil esférico (figura 3b).

No obstante, las ruedas omnidireccionales presentan algunos inconvenientes que afectan a su comportamiento y complejidad constructiva. En el caso de las ruedas Mecanum, y otras similares que utilizan rodillos colocados en la periferia de la rueda actuada, el contacto de la rueda con el suelo se va trasladando de un rodillo al rodillo contiguo a medida que la rueda va girando, lo que implica que la distancia del punto de contacto al centro geométrico de la rueda no es constante. Este hecho afecta la cinemática y la odometría de la plataforma, ya que introduce variaciones en sus parámetros que dificultan su control. Además, el transitorio que se produce al pasar el contacto de un rodillo al siguiente introduce una discontinuidad en las fuerzas de contacto rueda-suelo, aun existiendo un cierto grado de solapamiento entre rodillos consecutivos, lo que favorece la aparición de vibraciones tanto verticales como horizontales.

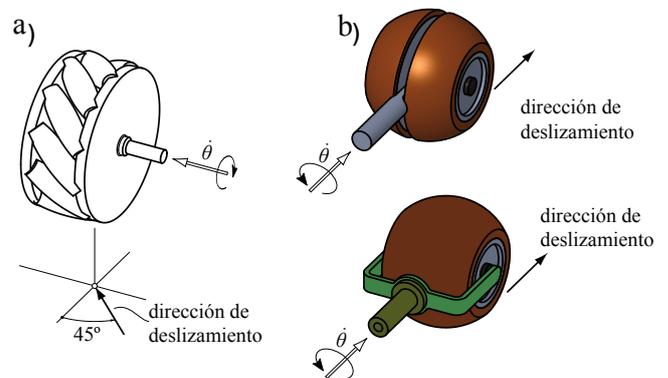


Figura 3: Ruedas omnidireccionales: a) rueda Mecanum con rodillos curvos de movimiento libre; b) ruedas esféricas.

Las ruedas esféricas no presentan los inconvenientes de las ruedas Mecanum ya que, al estar formadas por rodillos de perfil esférico, el punto de contacto rueda-suelo se mantiene siempre a la misma distancia del centro de la rueda, sobre la circunferencia perpendicular al eje de giro. Sin embargo tienen otros problemas que complican su uso y afectan también a sus prestaciones. Las ruedas esféricas adoptan una configuración singular cuando el eje de giro de los rodillos que las componen se acerca a la dirección perpendicular al suelo (Batlle and Barjau, 2009; Batlle et al., 2010), con lo que se pierde la rotación libre de los rodillos y por lo tanto pierden un grado de libertad. Es-

te problema se puede resolver utilizando dos ruedas esféricas truncadas por sus polos, girando síncronamente accionadas por el mismo motor, y dispuestas de manera que los ejes de giro de sus respectivos rodillos sean perpendiculares entre sí (figura 4). De este modo las esferas se van intercambiando el contacto con el suelo, con un cierto solapamiento, garantizando así que en todo momento haya contacto. No obstante, con esta solución se introduce una variación en la localización de la fuerza de contacto con el suelo, que se va alternando entre ambas esferas a un ritmo de dos veces por vuelta, y puede ser fuente de vibraciones de origen paramétrico en la plataforma. Para una velocidad de la plataforma de 1 m/s y un diámetro de esfera de 120 mm, la frecuencia de variación de la fuerza de contacto puede alcanzar los 5.3 Hz, suficiente para excitar modos propios en estructuras esbeltas y ligeras como los brazos de un manipulador móvil.

Otro problema asociado a las ruedas esféricas es el diseño del eje motriz que al mismo tiempo soporta la rueda. Tal como se observa en la figura 3b, el accionamiento se puede realizar a través de una horquilla o por el centro de la rueda. En el primer caso, el poco espacio libre que queda entre la horquilla y el suelo cuando el eje de giro libre de la rueda se orienta verticalmente limita la capacidad de la plataforma de sortear pequeños escalones o irregularidades en el suelo. En el segundo caso, para fijar el eje al centro de la rueda, esta debe estar constituida por dos rodillos semiesféricos truncados, lo que introduce una discontinuidad en el perfil de rodadura y por tanto también una fluctuación en la fuerza de contacto.

Algunos autores también han propuesto el uso de ruedas completamente esféricas inspiradas en el diseño de ratones de ordenador mecánicos (Ferriere and Raucent, 1998; Runge et al., 2014). No obstante, estas propuestas han sido implementadas solo en el caso de plataformas ligeras, con poca capacidad de carga y bajos pares de accionamiento, a causa de las dificultades que comporta el diseño de los enlaces entre una esfera y la plataforma, tanto en lo referido a su sujeción como a la transmisión del movimiento.

En el apartado siguiente se describe un nuevo tipo de rueda que combina los aspectos positivos de los tipos de ruedas mencionados anteriormente.

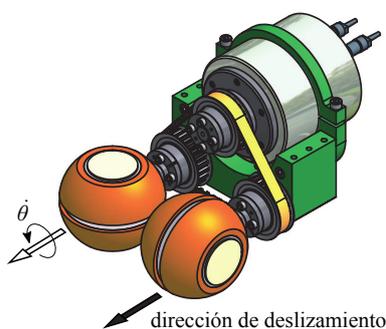


Figura 4: Rueda omnidireccional basada en una pareja de ruedas esféricas truncadas.

## 2.2. Solución adoptada para el diseño de las ruedas

En el manipulador móvil presentado en este artículo se ha utilizado un nuevo concepto de rueda omnidireccional desarrollada por los autores (Clos and Martínez, 2015). Se trata de una

rueda esférica compuesta por dos rodillos en forma de casquete esférico y cuatro rodillos abombados. En la figura 5 se puede observar una sección de la rueda según el plano diametral que contiene el perfil circular de rodadura; en ella se distinguen los rodillos en forma de casquete esférico (1), los rodillos polares (2), y por último los rodillos (3) que salvan la separación entre los casquetes, separación necesaria para la fijación del eje de giro al núcleo de la rueda. También se puede ver claramente la disposición de los ejes y los rodamientos que soportan los distintos rodillos. En la figura 6 se muestran imágenes de una rueda real desde distintos ángulos. Este diseño reduce el espacio necesario para la rueda y simplifica el diseño de los grupos motrices de la plataforma.

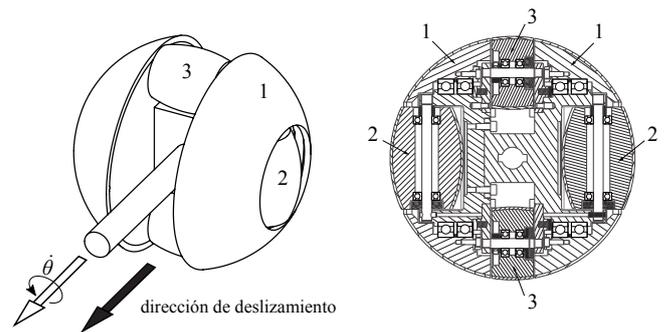


Figura 5: Esquema de las ruedas omnidireccionales usadas en el manipulador móvil MADAR.



Figura 6: Imágenes desde distintos ángulos de las ruedas omnidireccionales usadas en el manipulador móvil MADAR.

La disposición y la forma de los rodillos define un perfil de rodadura circular, perpendicular al eje de giro del motor. El rodillo que en cada instante se encuentra en contacto con el suelo presenta dos componentes de rotación respecto de la plataforma: la rotación  $\theta$  alrededor del eje de giro controlado por el motor y la rotación libre alrededor de su propio eje. Gracias a esta segunda rotación libre, el centro de la rueda se mueve de forma análoga a como lo haría el centro de una rueda convencional cuyo punto de contacto con el suelo pudiera deslizarse en la dirección transversal a dicha rueda, es decir, en la dirección del eje de giro controlado por el motor. Esta propiedad es la que permite a la plataforma disponer de tres grados de libertad en el plano, o dicho de otro modo, de movimiento omnidireccional. El perfil de rodadura circular definido por los rodillos presenta solo ligeras discontinuidades y no requiere trincar la rueda por sus polos, por lo que es innecesario utilizar dos ruedas sincronizadas accionadas por el mismo motor como en el caso representado en la figura 4.

En el diseño de las ruedas se ha primado la robustez y la capacidad de carga. El núcleo y los diferentes rodillos que conforman el perfil de las ruedas son de aleación ligera de aluminio

con un recubrimiento de elastómero que mejora la adherencia con el suelo. Todos los rodillos se montan sobre ejes de acero mediante rodamientos de bolas de alta capacidad de carga, lo que permite que las ruedas soporten sin problemas el peso de la plataforma y de los elementos montados sobre ella, principalmente los brazos robóticos y todos sus complementos. La capacidad de carga de cada rueda es de 140 kg, este valor ha obtenido a partir de la carga máxima que soportan los rodamientos de menores dimensiones montados en el interior de la rueda, es decir, los rodamientos que soportan los rodillos polares y los que salvan la separación entre los casquetes (rodillos 2 y 3, respectivamente, mostrados en la figura 5). El diámetro escogido para las ruedas es de 200 mm, lo que permite disponer de suficiente espacio para la ubicación de ejes y rodamientos. El manipulador necesita una superficie prácticamente lisa para su buen desplazamiento, pero puede superar escalones o pequeños obstáculos cuando las ruedas los enfrentan con sus direcciones de movimiento libre paralelas a la perturbación, aunque esto puede requerir maniobras para ubicar las ruedas en la posición adecuada, factor que no se considera en su uso habitual. Experimentalmente se ha superado un escalón de 10 mm y se ha pasado sin problemas sobre cables de un diámetro de 10 mm extendidos en el suelo y sobre un pasacables curvo de 20 mm de altura por 70 mm de ancho (nótese que, a diferencia del escalón, el pasacables tiene una pendiente inicial más suave). El peso total de cada rueda es de aproximadamente 10 kg. El coste aproximado de fabricación de cada rueda es de 3.500 €, incluyendo el mecanizado, el material comercial utilizado y la imprimación de goma en su superficie.

Tal como se describe y justifica posteriormente, se han usado tres de estas ruedas para soportar y desplazar omnidireccionalmente el manipulador móvil objeto de este trabajo.

### 2.3. Plataforma base móvil

La base móvil que soporta todo el equipamiento del manipulador fue inicialmente desarrollada en el marco del proyecto SYNTENET (2014) y, posteriormente, adoptada para el manipulador que se presenta en este trabajo. La base es circular, con un diámetro exterior de 780 mm que le permite pasar por puertas de anchura estándar. Está formada por dos discos de aluminio de 11 mm de grosor y de 15 kg de peso unidos por aislantes mecánicos pasivos (descritos más adelante), y equipada con tres ruedas con las características descritas en el apartado 2.2, cada una de ellas movida por un motor independiente que la acciona directamente, y con los ejes de giro situados en direcciones radiales a  $120^\circ$  una de otra (ver figura 7). El peso de cada grupo motriz es de 23 kg, así, los tres grupos motrices y el disco inferior suman 84 kg, lo que contribuye notablemente a bajar el centro de masa de todo el manipulador que con todos sus componentes (incluidos los descritos en el apartado siguiente) tiene un peso total de 210 kg. El uso de tres ruedas garantiza el contacto permanente de cada rueda con el suelo sin la necesidad de dotar a la plataforma de un sistema de suspensión. Además, controlando de forma independiente las rotaciones de las tres ruedas, la base puede desplazarse en cualquier dirección y también rotar sobre sí misma, es decir, tiene movimiento omnidireccional.

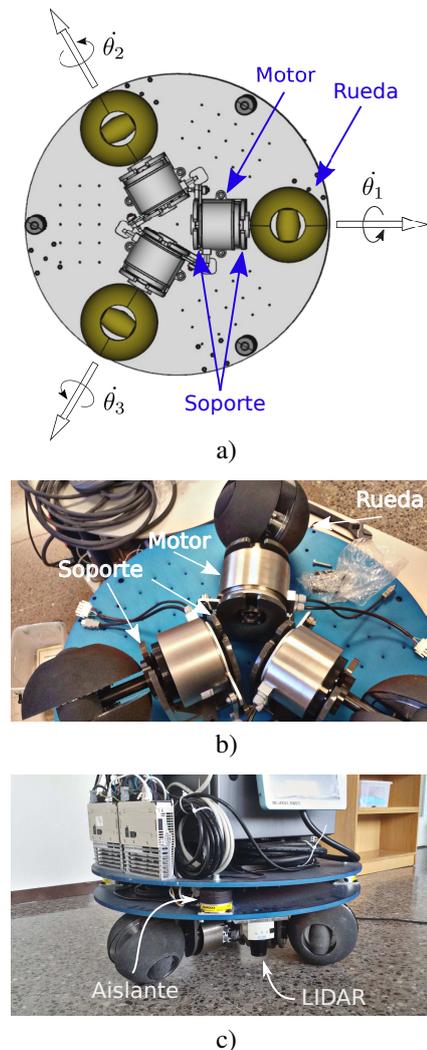


Figura 7: a) Representación CAD de la disposición de las ruedas y los motores respecto a la circunferencia de la base, b) vista inferior de la base real, y, c) vista lateral de la plataforma.

Los motores seleccionados para accionar las ruedas son de baja velocidad y par elevado, sin reductor. Esto evita la imprecisión que introduce el juego mecánico de los engranajes de un reductor, y el coste económico es equivalente al de la solución con motores convencionales y reductores de mínimo juego. Se trata de motores sin escobillas Yaskawa SGMCS-05B equipados con un *encoder* absoluto de 20 bits de resolución integrado en el cuerpo del motor. Su par nominal es de 5 Nm y su velocidad nominal de  $200 \text{ min}^{-1}$ , pudiendo llegar ocasionalmente a picos de par de hasta 15 Nm y de velocidad máxima de  $500 \text{ min}^{-1}$ . Estas prestaciones son suficientes para permitir una velocidad y una aceleración de translación de  $1 \text{ m/s}$  y  $1 \text{ m/s}^2$  respectivamente, con el manipulador móvil completamente equipado en condiciones normales de funcionamiento. Estos motores tienen un tamaño relativamente reducido, 135 mm de diámetro y 88 mm de largo, lo que ayuda a su integración en el diseño mecánico.

MADAR puede trabajar tanto conectado a la red eléctrica como de forma autónoma mediante un módulo de alimentación con un paquete de 14 baterías de ion de litio (Li-ION) de 3.6 V y 10 Ah cada una, un ondulator MeanWell TS-1500 de 1500 W, y la correspondiente electrónica de control. Estos componentes van sujetos a la parte superior de la base.

Como ya se ha mencionado, los dos discos de la base están unidos mediante aislantes de vibraciones pasivos para reducir, en lo posible, la transmisión de vibraciones desde las ruedas hacia la estructura superior del manipulador. La principal fuente de vibraciones se debe a las fluctuaciones de las fuerzas de contacto entre las ruedas y el suelo, inherentes al propio movimiento de rodadura entre superficies rígidas. Incluso con perfiles de rodadura sin discontinuidades apreciables, la propia rugosidad superficial provoca una vibración de amplio espectro. La figura 8 muestra el espectro de potencia de la velocidad vertical de vibración medida experimentalmente en la estructura superior mientras el manipulador efectuaba un movimiento de traslación, para el caso de la plataforma funcionando sin y con aislantes. En el primer caso, el valor eficaz (RMS) de la velocidad de vibración alcanza 10.1 mm/s, mientras que en el segundo caso este valor disminuye hasta los 6.1 mm/s. El uso de aislantes no solo reduce de forma global los niveles de vibración para las distintas componentes frecuenciales, si no que al mismo tiempo desplazan el ancho de banda a frecuencias más bajas. En MADAR los aislantes empleados son neumáticos y es posible regular su rigidez variando la presión de inflado, lo que permite ajustar la frecuencia de corte por encima de la cual se eliminan las vibraciones. Como puede observarse en la figura 8, gracias a los aislantes por encima de 10 Hz ya no aparecen componentes de vibración.

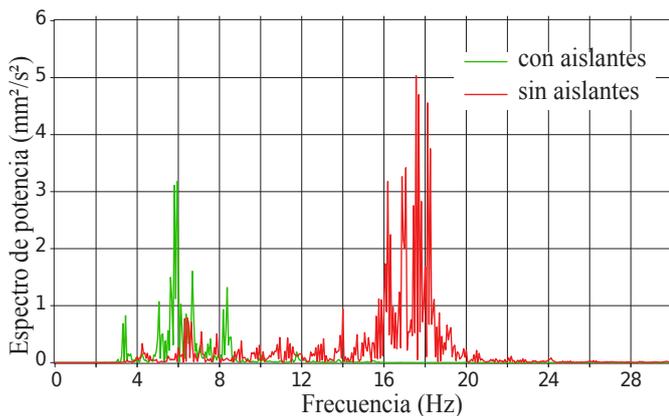


Figura 8: Espectro de potencia de la velocidad vertical de vibración medida en la estructura superior cuando no se usan aisladores (línea roja) y cuando sí se usan (línea verde).

Como complemento a la información suministrada anteriormente, la figura 9 ilustra la vibración generada al pasar por encima de un cable de 10 mm de diámetro extendido en el suelo. Esta vibración se ha medido con dos acelerómetros capacitivos, que no filtran la componente continua, colocados en la parte delantera del soporte de los brazos, de forma que uno mide la aceleración vertical y el otro la horizontal en la dirección de avance. Los gráficos muestran la evolución temporal de la aceleración. En el gráfico de la aceleración vertical se observa claramente un fuerte impulso que alcanza los 18 m/s<sup>2</sup> debido al choque de la primera rueda con el suelo tras pasar por encima del cable. También se observa un segundo choque, más pequeño, debido al paso de las dos ruedas posteriores (que saltan simultáneamente). La oscilación residual es la asociada a toda la masa suspendida sobre los aislantes de vibraciones. En el gráfico de la aceleración horizontal se aprecian también los

momentos en que las ruedas saltan sobre el cable, pero los niveles de vibración producidos son inferiores.

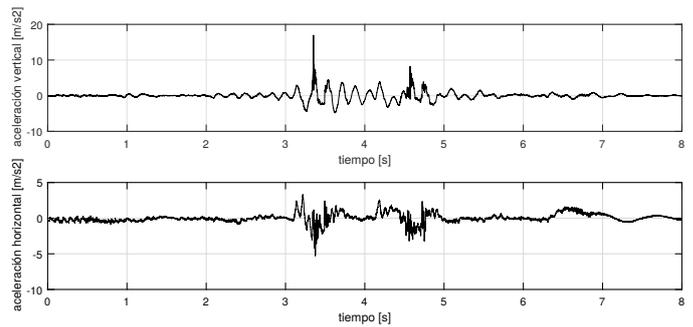


Figura 9: Vibración generada al pasar por encima de un cable de 10 mm de diámetro extendido en el suelo.

#### 2.4. Estructura superior

Sobre la base móvil se ha montado la estructura soporte del sistema bi-brazo que emula un torso humano (figura 10). La estructura principal está construida con tubos rectangulares de acero con un grosor de pared de 4 mm que le confieren la rigidez necesaria, tiene forma de “T” en su parte superior y de “U” invertida en la inferior (tubos de 80 × 60 mm), contactando con la base en dos puntos de anclaje; el soporte central es una única columna que actúa como tronco (tubo de 80 × 80 mm). El diseño se ha realizado de forma que los controladores de los brazos se puedan alojar sobre la base entre los puntos de anclaje, y considerando que la estructura ha de soportar el peso de los brazos, de las manos, de un PC, además de elementos mecánicos auxiliares y de los objetos que se quieran manipular. El PC va fijado a la columna central a modo de mochila.

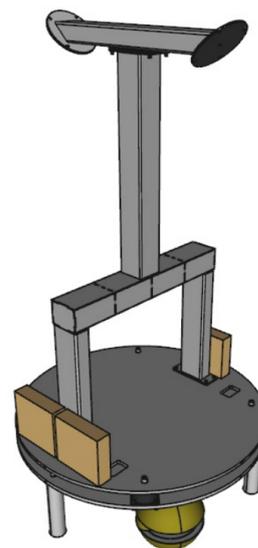


Figura 10: Estructura de soporte de los brazos sobre la base móvil, los paralelepípedos marrones representan los controladores de los tres motores que accionan las ruedas.

Los componentes más pesados se han montado tratando de mantener el centro de gravedad lo más bajo posible, a fin de aumentar el margen de estabilidad. Este diseño da al robot una

altura similar a la de un humano pero con una mayor envergadura, lo que permite que el manipulador trabaje en entornos propios de los humanos, por ejemplo, manipulando objetos sobre una mesa o recogiendo y depositando objetos en una estantería convencional (figura 11).



Figura 11: MADAR situado delante de una mesa estándar.

Los brazos del robot móvil son dos robots industriales UR5 (Universal Robots, 2019) equipados con sendas manos Allegro (SimLab-Wonik Robotics, 2012). La figura 12 muestra uno de los brazos con su correspondiente mano.



Figura 12: Detalle del brazo y mano robóticos izquierdos.

Los brazos UR5 tienen 6 grados de libertad, un radio de trabajo de hasta 85 cm y pueden cargar hasta 5 kg; poseen además un sistema de medición de las corrientes que pasan por los motores que permite detectar sobre-esfuerzos, por ejemplo los que se producen en el caso de una colisión o restricción externa a su movimiento. Esta característica permite que los brazos trabajen de forma segura en entornos con humanos.

Los brazos están montados en el manipulador móvil emulando la configuración humana (ver figura 1 y figura 12), y de tal manera que, cuando están plegados, no sobresalgan del área circular de la base para que el robot pueda pasar por puertas estándar y entrar en ascensores de tamaño medio. La distancia entre los soportes de los brazos es de 53 cm, y su orientación permite obtener una adecuada superposición de los espacios de trabajo de cada uno de ellos, así como una buena manipulabilidad (Kurazume and Hasegawa, 2006) en la parte frontal del manipulador, donde se espera que realice la mayoría de las tareas de manipulación bimanual.

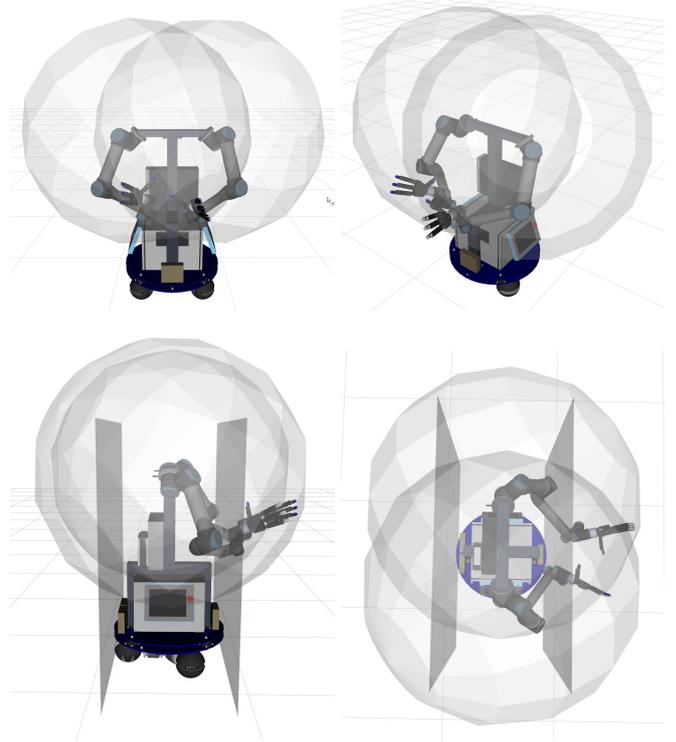


Figura 13: Espacio de trabajo de cada brazo de MADAR (sin considerar las manos). En las imágenes inferiores se han incluido dos planos marcando el espacio de trabajo al que acceden los brazos cuando la base tiene restricciones de movimiento.

A fin de ilustrar el espacio de trabajo del manipulador, en la figura 13 se muestra el alcance de cada brazo (sin considerar la mano), equivalente a una esfera de radio 85 cm con el centro en el anclaje del brazo a la estructura de soporte. Puede apreciarse el notable solapamiento del área correspondiente a cada brazo, lo que genera el área de trabajo en común. También se han incluido en las ilustraciones dos planos verticales tangentes a la base circular del manipulador, lo que permite visualizar el holgado alcance de los brazos sobre una mesa o elemento equivalente cuando este limita el movimiento de la base. Dado que la línea que une los sistemas de referencia de las bases de los brazos pasa sobre el centro de la base circular, los planos mencionados están a 39 cm del centro de las esferas.

La influencia de los movimientos de los brazos en el movimiento de la plataforma no es significativa, se ha verificado experimentalmente y se justifica mediante el siguiente análisis. Con la plataforma en reposo, se ha simulado un movimiento de rotación de ambos brazos extendidos respecto a un eje vertical en su base, como si giraran simétricamente en un plano horizontal, con una aceleración angular de  $1 \text{ rad/s}^2$  (esta es una situación extrema no alcanzable en la práctica, ya que los brazos no pueden girar completamente extendidos en un plano horizontal). En estas condiciones, la fuerza de reacción requerida que debe ejercer el suelo sobre las ruedas para evitar el movimiento de la plataforma no supera los 16 N, que con una carga media por rueda (debida al peso que soporta) de 687 N (70 kg) requiere un coeficiente de fricción mínimo entre la rueda y el suelo de solo  $16/687 = 0,023$ , valor muy bajo que no genera ningún problema ya que con los materiales usados se supera ampliamente. Multiplicando la fuerza de reacción requerida sobre las ruedas por el radio de las mismas se obtiene el par estático que

el motor de cada rueda debe ejercer para conseguir esta fuerza,  $16 \text{ N } 0.01 \text{ m} = 1,6 \text{ Nm}$ , valor bastante por debajo del par nominal del motor, que es de  $5 \text{ Nm}$ .

Las manos Allegro tienen 4 dedos con 4 articulaciones independientes cada uno, es decir, 16 grados de libertad, y una capacidad de carga máxima de 5 kg. Las articulaciones de las manos pueden controlarse por posición, velocidad o par, a una frecuencia máxima de 333 Hz, mediante una interfaz CAN. Las yemas de los dedos se han equipado con sensores táctiles WTS-FT 0408 (Weiss Robotics, 2015) (figura 14). Cada sensor tiene una matriz de detección de  $8 \times 4$  celdas, cada una de las cuales devuelve un valor entre 0 y 4095 que corresponde a una fuerza normal aplicada sobre ella entre 0 y 3 N. La electrónica de procesamiento de la señal está completamente contenida en el sensor, que transmite los datos a 400 Hz a través de USB.



Figura 14: Detalle de un dedo con el sensor táctil instalado en su yema.

## 2.5. Sensorización para la localización del manipulador y detección de obstáculos

A pesar de que el modelo teórico permitiría determinar con precisión la posición de la base en función de los movimientos realizados por las ruedas, en la práctica, y corroborado por pruebas experimentales, el contacto entre las ruedas y el suelo no es perfecto, debido a las pequeñas irregularidades en las superficies tanto de las ruedas como del suelo, y a que se producen pequeños deslizamientos en la rodadura. Estas imperfecciones introducen errores en el posicionamiento absoluto basado únicamente en odometría, haciendo necesario un bucle externo de control de la posición. Para este fin, el manipulador móvil posee los siguientes sensores que permiten obtener información sobre su posición y orientación en el entorno de trabajo así como detectar potenciales obstáculos.

*a) Sistema de posicionamiento absoluto.* Se ha instalado un sistema de sensores *pozyx* (Pozyx NV, 2018), que en esta implementación consta de seis elementos (balizas) fijos en el espacio de trabajo donde se usa el robot y uno móvil que se fija en el manipulador (figura 15), y que va conectado mediante USB al PC central, usando este puerto para transmitir la información y obtener su alimentación sin necesidad de ningún elemento adicional. La necesidad de tener las balizas fijas cubriendo el espacio de trabajo del manipulado hace que este sistema sea de especial utilidad en interiores. El elemento móvil se comunica por radio con las balizas y mediante triangulación es capaz de determinar su posición absoluta, y tiene además un acelerómetro de alta precisión, un giroscopio, un magnetómetro y un sensor de presión. Toda esta información la comunica al PC central usando distintas frecuencias entre 13 Hz y 138 Hz en función

de la cantidad de información a transmitir y de la precisión requerida. El error de posicionamiento máximo es de 10 cm con el sistema adecuadamente calibrado, pero aun hay margen para reducirlo mediante la fusión de la información absoluta de posición con la del resto de sensores incorporados en el elemento móvil.



Figura 15: Componentes del sistema *pozyx*. A la izquierda el elemento colocado en el manipulador móvil. A la derecha uno de los seis elementos colocados en posiciones fijas en el espacio de trabajo

*b) Sistema de sensores de barrido láser 2D (LIDAR) para reconocimiento del entorno y detección de obstáculos alrededor del robot.* El sistema está compuesto por tres sensores TIM-561 (SICK Vertriebs-GmbH, 2018), montados a 120 grados entre sí alrededor de la base circular del manipulador e intercalados entre cada par de ruedas, como se aprecia en las figura 1 y figura 7c. Cada sensor tiene un campo de visión de 270 grados, por lo que la combinación de los tres sensores permite la detección de obstáculos en cualquier dirección alrededor del robot, con mediciones redundantes en algunas áreas. Cada sensor tiene un rango de trabajo de 0.05 m a 10 m, con una resolución angular de  $0.33^\circ$  y una frecuencia de muestreo de 15 Hz. El error sistemático máximo (precisión) es de 60 mm y el error estadístico (repetitividad) de 20 mm. Este sistema proporciona información sobre el entorno que rodea al manipulador y es útil tanto para detectar obstáculos como para determinar su localización.

*c) Sistema de visión RGB-D.* En la parte superior de la estructura, entre los soportes de los brazos, se ha montado una cámara RGB-D. En esta posición se han probado dos modelos de cámaras: la Intel RealSense 3D Camera (Front SR300) y la Microsoft KinectV2. La Intel RealSense SR300 es una cámara pequeña ( $12.6 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 4.1 \text{ mm}$ ), que permite un flujo de vídeo 1080p (Full HD) a 30 fps o 720p a 60 fps. Esta cámara da información de profundidad en un rango relativamente pequeño de 0.2 m a 1.5 m con una resolución de  $640 \times 480$  pixels. La Microsoft KinectV2 es una cámara de mayor tamaño ( $160 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ) con un flujo de vídeo 1080p a 30 fps. La información de profundidad cubre un rango de trabajo de 0.5 m a 4.5 m con una resolución de  $512 \times 424$  pixels. Ambas cámaras se conectan al PC central mediante USB 3.0. La principal diferencia de una respecto a la otra reside en la información 3D que suministran. La cámara Microsoft KinectV2 está optimizada para trabajar a mayor distancias que la Intel RealSense, por lo que si se requiere trabajar con información 3D del entorno la KinectV2 resulta más adecuada; en cambio,

si se quiere trabajar con objetos cercanos, por ejemplo los situados en una mesa, la Intel RealSense realiza mejor la función.

### 3. Control y coordinación

#### 3.1. Control de la base móvil

La ubicación del nuevo tipo de ruedas en la base del manipulador hace que su modelo cinemático sea sencillo, lo que facilita su control.

Considérese la velocidad generalizada absoluta de la base del manipulador en el plano expresada según unos ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  fijos a la plataforma,  $\{v_x, v_y, \dot{\psi}\}^T$ , con  $v_x$  y  $v_y$  indicando las dos componentes de velocidad lineal del centro  $O$  y  $\dot{\psi}$  la velocidad angular de la plataforma (ver figura 16a).

Considérese ahora los ejes  $x'_i, y'_i$  y  $z'_i, i \in \{1, 2, 3\}$ , con origen en el centro de la rueda  $i$  y orientados tal que  $x'_i$  coincida con la dirección del grupo motriz  $i$  (es decir, con el eje del motor  $i$ ), como se ilustra en la figura 16b, donde se representa una rueda y las dos rotaciones implicadas en su movimiento: la rotación  $\theta_i$  controlada por el motor y la rotación  $\dot{\psi}$  que comparte con la plataforma.

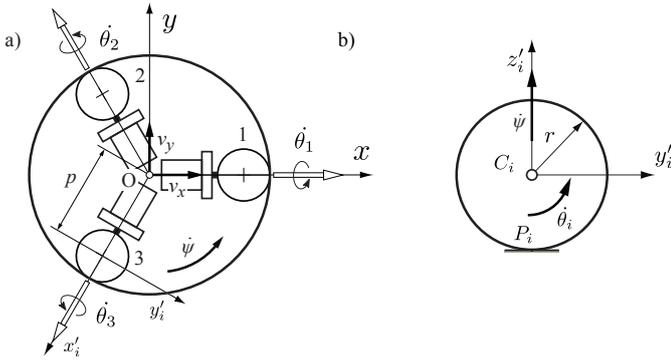


Figura 16: Ejes y variables asociadas a: a) la base, b) las ruedas.

La relación entre las coordenadas de velocidad  $\{v_x, v_y, \dot{\psi}\}^T$  y las velocidades de rotación de las ruedas  $\{\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3\}$  controladas por los motores se obtiene imponiendo la condición de enlace en el contacto entre cada rueda y el suelo. El enlace rueda-suelo implica que el punto  $P_i$  de contacto de la rueda  $i$  con el suelo se mueve como si se pudiera deslizar en la dirección  $x'_i$  gracias a la rotación libre de los diferentes rodillos que conforman el perfil de rodadura de la rueda, mientras que en la dirección  $y'_i$  el movimiento se encuentra impedido. Relacionando, para cada rueda  $i$ , la velocidad de su centro  $v(C_i)$  con la velocidad del punto de contacto  $P_i$ , se obtiene la siguiente expresión vectorial,

$$v(C_i) = \begin{bmatrix} v(P_i) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta}_i \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(P_i) \\ -r \dot{\theta}_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde  $r$  representa el radio de las ruedas.

Relacionando la velocidad del centro de cada rueda con las tres coordenadas generalizadas de velocidad, se obtiene la matriz Jacobiana  $J$  de la plataforma que permite determinar las

rotaciones que deben efectuar los motores para obtener el movimiento deseado de la base, resultando,

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 0 & -1 & -p \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -p \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $p$  es la distancia desde el centro  $O$  de la plataforma al centro  $C_i$  de cada rueda (ver figura 16).

Para que la plataforma sea realmente controlable, la matriz  $J$  debe ser invertible, condición que se satisface para la configuración utilizada al ser su determinante distinto de cero:

$$|J| = -\frac{3\sqrt{3}}{2r^3} p \quad (3)$$

Así, usando  $J^{-1}$  se obtiene la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3p} & -\frac{1}{3p} & -\frac{1}{3p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Conocidas estas relaciones, ya puede controlarse el movimiento del manipulador móvil mediante el adecuado control del movimiento de las ruedas. Debe destacarse que el movimiento de la plataforma es holonómico si el movimiento global es únicamente de traslación, en cuyo caso la posición final de la plataforma queda unívocamente definida por el cambio en la posición de los motores, mientras que cuando existe un cambio en la orientación de la base el movimiento es no-holonómico.

Para controlar los motores que mueven las ruedas se ha escogido el controlador *drive* SGD7S del mismo fabricante que los motores. Esto garantiza la compatibilidad, facilitando el acoplamiento controlador-motor y su funcionamiento conjunto como un único bloque. Este controlador tiene un ancho de banda de 3.1 kHz y acepta consignas de posición, velocidad o torque para los motores.

La comunicación entre el PC central montado en el manipulador móvil y el *drive* de cada motor se realiza mediante un protocolo de bus de campo EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) desarrollado por Beckhoff Automation como protocolo de red industrial utilizado para control distribuido en tiempo real (norma IEC 61158). En concreto, se utilizó la biblioteca SOEM (Arthur Ketels and M.J.G. van den Molengraft, 2014), una implementación de software libre del protocolo EtherCAT que provee casi toda su funcionalidad. Para asegurar la correcta coordinación del movimiento de las ruedas que genera la trayectoria deseada de la base, la latencia de las rutinas de control debe ser suficientemente baja, lo que requiere el uso de un sistema operativo de tiempo real (SOTR). Por otra parte, uno de los paquetes de software más utilizados actualmente en el ámbito de la robótica es ROS (Quigley et al., 2009), que funciona principalmente con GNU/Linux. Por lo tanto, de las diversas opciones de SOTR disponibles se optó por un GNU/Linux con Xenomai (Gerum, 2004), que es una modificación del núcleo de Linux transformándolo en un SOTR mediante el mecanismo de núcleo dual. Xenomai funciona como un GNU/Linux utilizando unas bibliotecas y un núcleo (*kernel*) modificado, que proporciona unas prestaciones de SOTR con latencias muy pequeñas, aunque éstas suelen depender del

*harwdare* utilizado. Para nuestra implementación (IOC Robotics Lab, 2014), la biblioteca original SOEM fue modificada para funcionar como una aplicación de tiempo real utilizando Xenomai, adaptando las llamadas a los dispositivos de un kernel de Linux a uno modificado de Xenomai.

Toda la lógica y control de más alto nivel de la plataforma ha sido implementada principalmente en C++, construyendo diversas capas y bloques de software que se han ido interconectado entre sí. Los bloques que tienen que ver con dispositivos (motores, brazos, manos, sensores) y que cumplen funciones de control han sido desarrollados pensando en los requerimientos del tiempo real (reservas de memoria, comunicaciones, etc.). En particular, para el control de los movimientos de la plataforma se han desarrollado dos bibliotecas: la *Cpp4Ec* y la *libplatform*.

La biblioteca *Cpp4Ec* encapsula toda la funcionalidad de SOEM y permite al usuario dar a los controladores de los motores comandos de posición, velocidad o par, y trabajar con los conjuntos controlador-motor como si se tratase de una caja negra, pudiendo acceder al estado de los motores y comandarlos sin tener que preocuparse del intercambio de información entre la parte de tiempo real y la que no lo es.

La biblioteca *libplatform* provee diferentes funciones de movimiento de la base, permitiendo al programador comandar una trayectoria o una velocidad sin tener que preocuparse por los movimientos individuales que necesita cada una de las ruedas. Además, permite utilizar odometría para hacer una estimación de la posición actual de la base durante los movimientos.

### 3.2. Control de los elementos de la estructura superior

Todos los elementos de la estructura superior están controlados por una capa de software que se ejecuta en el PC central. Cada elemento está controlado por una biblioteca específica, por lo que puede trabajar de forma independiente, sin usar necesariamente su capa de ROS.

En el caso de los brazos, sus posiciones, velocidades y pares se controlan utilizando el controlador CB2 del fabricante. Este controlador incluye una biblioteca (*ur\_c\_api*) que permite el acceso (aunque limitado) al control de bajo nivel, deshabilitando la interfaz de usuario predeterminada y dando acceso a las posiciones, velocidades y pares de las articulaciones del brazo a 125 Hz. Utilizando esta biblioteca, se ha desarrollado una aplicación específica (Low Level UR server, *llur-server*) que se ejecuta en el controlador de cada brazo actuando como servidor y estableciendo una comunicación a través de Ethernet con otra aplicación (Low Level UR client, *llur-client*), que se ejecuta en el ordenador central y actúa como cliente. De esta manera, cada controlador CB2 solo ejecuta rutinas de bajo nivel usando la aplicación *llur-server*, y la estrategia de control, que requiere un elevado coste computacional, se ejecuta en el PC central usando *llur-client*. Una primera versión de estas aplicaciones ya fue usada satisfactoriamente para realizar el control conjunto de dos brazos estáticos con sus respectivas manos con el fin de que sujeten coordinadamente objetos voluminosos (Rojas-de-Silva and Suárez, 2016).

Estas aplicaciones cliente/servidor funcionan estableciendo tres canales de comunicación mediante *sockets* de red entre ellas. El primer canal está dedicado al control de las comunicaciones, y, a través de él, el cliente establece el modo de control

(control de posición, velocidad, o par) y también puede solicitar al servidor un informe del estado del brazo cuando una bandera *s* indica que el estado del brazo no es correcto. En el segundo canal, el servidor actúa como *Publisher*, enviando periódicamente, cada 8 ms, las posiciones  $q_a$ , velocidades  $\dot{q}_a$ , los pares  $\tau_a$ , y la bandera *s* que indica si el estado del brazo es correcto o no. En el lado del cliente hay un *Listener* que escucha y actualiza continuamente las variables internas que describen el estado del brazo. En el tercer canal, el cliente actúa como *Publisher*, enviando asíncronamente las referencias ordenadas al brazo, y, en el lado del servidor, hay un *Listener* que, de acuerdo con los comandos recibidos, actualiza las referencias del brazo.

Aunque existe un retraso en la comunicación de alrededor de 12 ms (Lind et al., 2010), los resultados experimentales obtenidos son buenos incluso cuando todos los elementos funcionan simultáneamente. Existen otras alternativas para controlar los brazos UR5, como por ejemplo usando ROS industrial (ROSI Consortium, 2012). Originariamente ROS industrial utilizaba un controlador que introducía un retraso en las comunicaciones cercano a los 160 ms que dificultaba su uso en aplicaciones como, por ejemplo, el seguimiento de trayectorias. Posteriormente, se ha presentado el controlador *ur\_modern\_driver* (Andersen, 2015) que es una alternativa válida, ya que tiene unas prestaciones muy superiores que reducen los retardos a valores alrededor de los 30 ms.

En el control de las manos se utiliza el protocolo CAN para las comunicaciones. El fabricante proporciona un controlador PD que solo acepta consignas de pares,  $\tau_h$ , para controlar las posiciones de las articulaciones de los dedos,  $q_h$ , medidas mediante *encoders* en las falanges. Este controlador es muy limitado, por lo que el control de las manos y el tratamiento de la información táctil obtenida en la yema de los dedos se realiza mediante bibliotecas de desarrollo propio. Por un lado se ha desarrollado una biblioteca (*AHandLib*) que incluye la implementación de diversos controladores (P, PD, PI y PID) en tiempo discreto. Estos controladores tienen en cuenta la posición de la mano para aplicar pares que compensen el efecto de la gravedad, lo que permite un control más preciso de los pares netos que los dedos aplican sobre un objeto independientemente de la orientación de la mano, tanto en tareas de prensión como de manipulación. Por otro lado, se ha desarrollado una biblioteca (*weiss-sensor*) para la comunicación con los sensores de tacto y la gestión de la información asociada, incorporando funciones que permiten el cálculo del área de contacto y, lo que es de gran utilidad cuando en la manipulación se considera un modelo de contacto de tipo puntual, el cálculo del punto de contacto y de la fuerza normal equivalentes que producen un efecto equivalente al contacto real.

### 3.3. Control y coordinación general

Todos los dispositivos que forman el manipulador MADAR están conectados y son controlados por el PC central, que puede llegar a comandar hasta 47 grados de libertad (3 de la base, 6 de cada brazo y 16 de cada mano). La figura 17 muestra los dispositivos principales del manipulador móvil y un diagrama de las conexiones de comunicación de los principales elementos del hardware. Su equivalente en lo referente a los módulos de software se puede ver en la figura 18. Debe destacarse que cada módulo de software puede trabajar tanto por separado (de forma

independiente) como coordinadamente con los demás gracias a un módulo de control multimodal que asegura que todos los grados de libertad de los diferentes elementos mecánicos del sistema ejecuten sus consignas de forma coordinada.

Este enfoque encaja bien con el uso de planificadores como *The Kautham Project* (Rosell et al., 2014), un entorno de simulación y planificación de movimiento (desarrollado en el IOC-UPC para enseñanza e investigación) que incluye módulos de planificación que intentan generar movimientos similares a los humanos (Suárez et al., 2015; García et al., 2017). Este planificador genera caminos geométricos multidimensionales definidos por una secuencia de posiciones de cada uno de los 47 grados de libertad del manipulador móvil.

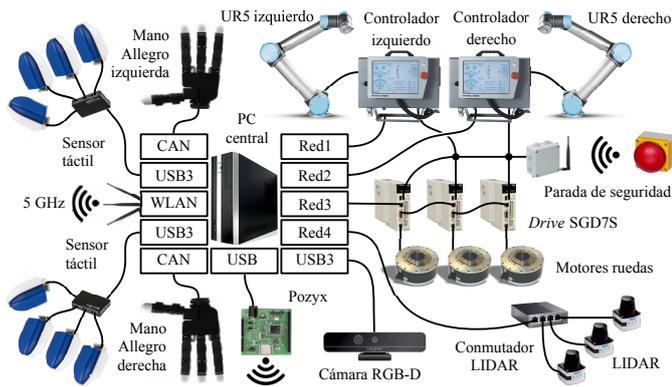


Figura 17: Elementos del hardware y sus interfaces de comunicación.

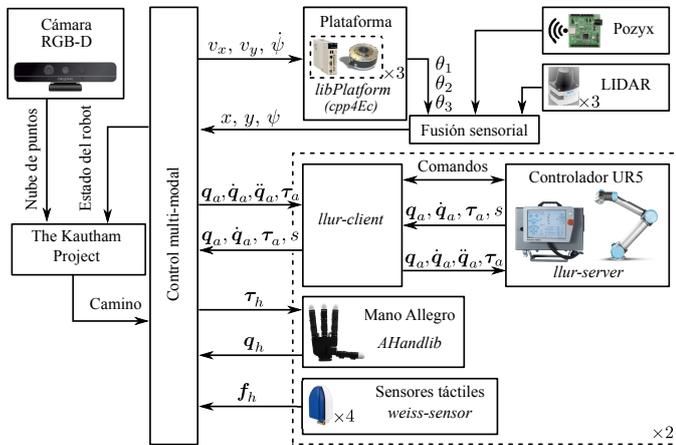


Figura 18: Módulos del software del manipulador móvil.

Posteriormente, el módulo multimodal transforma estos caminos en trayectorias coordinadas temporalmente utilizando la biblioteca *Reflexes* (Kröger, 2011), que acelera y desacelera sincronizadamente todas las articulaciones teniendo en cuenta los límites físicos del robot (velocidades y aceleraciones máximas alcanzables por cada articulación). Además, el módulo multimodal lee continuamente el estado del robot y comanda los 47 grados de libertad de las ruedas, los brazos y las manos para que sigan las trayectorias deseadas. Cuando se está ejecutando una trayectoria, el módulo multimodal es también el encargado de verificar que no haya obstáculos, usando para ello

la información de los diversos sensores del manipulador, y, en caso de haberlos, reinicia el proceso de planificación. Debe destacarse que se pretende una estructura altamente modular, que permita ejecutar diferentes planificadores o controles reactivos como módulos independientes del software básico de funcionamiento y control del manipulador.

Adicionalmente, el manipulador MADAR puede establecer una conexión inalámbrica de 5 GHz mediante el PC central, a través de la cual puede enviar instrucciones a otros dispositivos, o, por el contrario, recibir información de sensores externos o de otro planificador, es decir, puede actuar como un robot maestro o como un robot teleoperado.

#### 4. Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo se ha presentado MADAR, un manipulador móvil de uso general con ruedas omnidireccionales originales y equipado con dos brazos, emulando una estructura antropomorfa, que a su vez tienen manos diestras, también antropomorfas, con sensorización táctil. Se ha descrito el diseño, la instalación y el esquema de control del nuevo tipo de ruedas, así como las principales características del software implementado para el control conjunto de los brazos y las manos. MADAR es una plataforma de experimentación abierta que facilita el ensayo de nuevos algoritmos de planificación para manipulación móvil, así como su combinación con algoritmos de manipulación diestra para las manos sensorizadas. En <https://sir.upc.edu/projects/madar/videos> pueden verse videos del funcionamiento del manipulador.

Como trabajo futuro está previsto profundizar en el estudio de las vibraciones originadas por las ruedas omnidireccionales y su influencia en la manipulación diestra. Este es un tema relevante que no suele ser tratado por los fabricantes de manipuladores móviles y muy pocas veces se trata en los desarrollos realizados en los laboratorios de investigación. En la práctica, frecuentemente este problema se minimiza moviendo las plataformas móviles a velocidades muy lentas o deteniéndolas antes de realizar tareas de manipulación diestra. Otros temas abiertos a futuras contribuciones son la ampliación de la capacidad sensorial del manipulador móvil y la optimización del rendimiento de las bibliotecas de sincronización y control. Asimismo, aunque actualmente no está previsto, el manipulador podría adaptarse para su funcionamiento en exteriores (entornos no sensorizados), siempre que las condiciones del suelo lo permitan y reemplazando, por ejemplo, el sistema de localización *pozyx* por un sistema GPS.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el gobierno español mediante el proyecto DPI2016-80077-R.

#### Referencias

ABB, Jan. 2018. YuMi. [www.abb.com/yumi](http://www.abb.com/yumi), visitado el 2019/02/12.  
 Adascalitei, F., Doroftei, I., Jan. 2011. Practical applications for mobile robots based on mecatronics wheels - a systematic survey. *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, 21–29.  
 Adept, Jan. 2018. Pioneer manipulator. <https://www.generationrobots.com/media/Pioneer/Manipulator/datasheet.pdf>.

- Albu-Schöffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T., Hirzinger, G., May 2007. The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot: An Int. J.* 34 (5), 376–385.
- Andersen, T., 2015. Optimizing the universal robots ros driver. Tech. rep., Technical University of Denmark, Department of Electrical Engineering.
- Arthur Ketels and M.J.G. van den Molengraft, 2014. Open ethercat society: Home of soem and soes. [openethercatsociety.github.io](https://github.com/openethercatsociety), visitado el 2019/02/12.
- Battle, J., Barjau, A., 2009. Holonomy in mobile robots. *Robotics and Auton. Systems* 57 (4), 433 – 440.
- Battle, J., Font-Llagunes, J., Barjau, A., Jan. 2010. Calibration for mobile robots with an invariant Jacobian. *Robotics and Auton. Systems* 58, 10–15.
- Bischoff, R., Huggenberger, U., Prassler, E., May 2011. KUKA youBot - A mobile manipulator for research and education. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. pp. 1–4.
- Bridgwater, L., A. Ihrke, C., Diftler, M., Abdallah, M., Radford, N., Rogers, J., Yayathi, S., S. Askew, R., M. Linn, D., 05 2012. The robonaut 2 hand - designed to do work with tools. In: Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 3425–3430. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224772
- Butterfass, J., Fischer, M., Grebenstein, M., Haidacher, S., Hirzinger, G., 2004. Design and experiences with DLR hand II. In: Proc. of World Automation Congress. Vol. 15. pp. 105–110.
- Clos, D., Martínez, J., 2015. Omnidirectional wheel, and omnidirectional mobile device. World Intellectual Property Organization (Patent WO 2015/121521 A1, [lens.org/084-354-767-767-633](https://www.patentlens.org/084-354-767-767-633)).
- Company, S. R., 2015. Shadow Robot Company. Shadow Dexterous Hand. [Online] <http://www.shadowrobot.com>.
- Dean-Leon, E., Pierce, B., Bergner, F., Mittendorfer, P., Ramirez-Amaro, K., Burger, W., Cheng, G., 2017. TOMM: Tactile omnidirectional mobile manipulator. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Autom. pp. 2441–2447.
- Fentanes, J. P., Zalama, E., García-Bermejo, J. G., 2012. Plataforma robótica para tareas de reconstrucción tridimensional de entornos exteriores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 9 (1), 81–82. DOI: 10.1016/j.riai.2011.11.009.
- Ferriere, L., Raucent, B., May 1998. ROLLMOBS, a new universal wheel concept. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. Vol. 3. pp. 1877–1882.
- Fitzgerald, C., Apr. 2013. Developing baxter. In: Proc. IEEE Int. Conf. Technologies for Practical Robot Appl. pp. 1–6.
- García, N., Rosell, J., Suárez, R., 2017. Motion planning by demonstration with human-likeness evaluation for dual-arm robots. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Systems PP* (99), 1–10. DOI: 10.1109/TSMC.2017.2756856
- Gerum, P., 2004. Xenomai-Implementing a RTOS emulation framework on GNU/Linux. <https://xenomai.org/documentation/xenomai-2.1/pdf/xenomai.pdf>, visitado el 2019/05/31.
- Hermann, A., Sun, J., Xue, Z., Rühl, S. W., Oberländer, J., Roennau, A., Zöllner, J. M., Dillmann, R., July 2013. Hardware and software architecture of the bimanual mobile manipulation robot hollie and its actuated upper body. In: 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Wollongong, NSW, Australia, pp. 286–292.
- IOC Robotics Lab, 2014. SOEM for RTNET and Xenomai. [github.com/iocrobotlab/soem](https://github.com/iocrobotlab/soem), visitado el 2019/02/12.
- Khatib, O., 1999. Mobile manipulation: The robotic as-sistant. *Robotics and Auton. Systems* 26 (2), 175 – 183.
- Kröger, T., May 2011. Opening the door to new sensor-based robot applications - The Reflexx Motion Libraries. In: IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. pp. 1–4.
- Kuka Robotics, 2018. KMR iiwa. [www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-robot-systems/kmr-iiwa](https://www.kuka.com/en-us/products/mobility/mobile-robot-systems/kmr-iiwa), visitado el 2019/02/12.
- Kurazume, R., Hasegawa, T., Oct 2006. A new index of serial-link manipulator performance combining dynamic manipulability and manipulating force ellipsoids. *IEEE Trans. Robotics* 22 (5), 1022–1028.
- Lind, M., Schrimpf, J., Ullberg, T., 2010. Open real-time robot controller framework. In: Proc. CIRP Conf. Assembly Technology and Systems - Responsive, customer demand driven, adaptive assembly. pp. 13–18.
- Montaño, A., Suárez, R., 2015. Unknown object manipulation based on tactile information. In: IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. pp. 5642–5647.
- Montaño, A., Suárez, R., Oct 2018a. Improving grasping forces during the manipulation of unknown objects. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). pp. 3490–3495. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593655
- Montaño, A., Suárez, R., 2018b. Manipulation of unknown objects to improve the grasp quality using tactile information. *Sensors* 18 (5-1412).
- of Industrial Technology, K. I., 2014. Robotic dual-arm. [https://www.youtube.com/watch?v=ZtP-I\\_Bpibs](https://www.youtube.com/watch?v=ZtP-I_Bpibs), visitado el 2019/06/06.
- PAL Robotics, Jan. 2018. Tiago. [tiago.pal-robotics.com](https://www.tiago.pal-robotics.com), visitado el 2019/02/12.
- Pozyx NV, 2018. Creator Pozyx. [www.pozyx.io](https://www.pozyx.io), visitado el 2019/02/12.
- 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. In: ICRA Workshop on Open Source Software.
- Reitelshöfer, S., Ramer, C., Gräf, D., Matern, F., Franke, J., Dec. 2014. Combining a collaborative robot and a lightweight Jamming-Gripper to realize an intuitively to use and flexible co-worker. In: Proc. IEEE/SICE Int. Symp. System Integration. pp. 1–5.
- Roa, M., Suárez, R., Cornella, J., 2008. Medidas de calidad para la prensión de objetos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, RIAI* 5 (1), 66–82.
- Rojas-de-Silva, A., Suárez, R., 2016. Grasping bulky objects with two anthropomorphic hands. In: IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. pp. 877–884.
- ROS-I Consortium, 2012. ROS-Industrial. [rosindustrial.org/](https://www.rosindustrial.org/), visitado el 2019/02/12.
- Rosell, J., Pérez, A., Aliakbar, A., Muhayyuddin, Palomo, L., García, N., Sept. 2014. The Kautham Project: A teaching and research tool for robot motion planning. In: Proc. IEEE Int. Conf. Emerging Technologies and Factory Automation.
- Runge, G., Borchert, G., Raatz, A., Sept 2014. Design of a holonomic ball drive for mobile robots. In: Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Mechatronic and Embedded Systems and Applications. pp. 1–6.
- Sadun, A. S., Jalani, J., Jamil, F., Sep. 2016. Grasping analysis for a 3-finger adaptive robot gripper. In: 2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA). pp. 1–6. DOI: 10.1109/ROMA.2016.7847806
- SCHUNK GmbH, 2011. Shunk dexterous hand - SDH2. [schunk.com/us/en/gripping-systems/series/sdh/](https://www.schunk.com/us/en/gripping-systems/series/sdh/), visitado el 2019/02/12.
- SICK Vertriebs-GmbH, 2018. TiM5xx. [www.sick.com/de/en/detection-and-ranging-solutions/2d-lidar-sensors/tim5xx/tim561-2050101/p/p369446](https://www.sick.com/de/en/detection-and-ranging-solutions/2d-lidar-sensors/tim5xx/tim561-2050101/p/p369446), visitado el 2019/02/12.
- SimLab-Wonik Robotics, Set. 2012. Allegro hand is a low-cost and highly adaptive robotic hand. [www.simlab.co.kr/Allegro-Hand.htm](https://www.simlab.co.kr/Allegro-Hand.htm), visitado el 2019/02/12.
- Suárez, R., Grosch, P., Jul 2004. Dexterous robotic hand ma-i, software and hardware architecture. In: Intelligent Manipulation and Grasping International Conference, IMG'04. pp. 91–96.
- Suárez, R., Rosell, J., García, N., May 2015. Using synergies in dual-arm manipulation tasks. In: Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. pp. 5655–5661.
- Suárez, R., Palomo-Avellaneda, L., Martínez, J., Clos, D., García, N., 2018. Development of a dexterous dual-arm omnidirectional mobile manipulator. *IFAC-PapersOnLine* 51 (22), 126 – 131, 12th IFAC Symposium on Robot Control SYROCO 2018.
- SYNTENET, 2014. Proyecto: Sincronización y teleoperación con interacción visual 3d de redes de manipuladores móviles y robots con articulaciones flexibles. Referencia: DPI2011-22471, Perido: 01/01/2012 al 31/12/2014, IP: Luis Basañez, IOC-UPC.
- Universal Robots, Feb. 2019. Ur5 collaborative robot arm. [www.universal-robots.com/products/ur5-robot](https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot), visitado el 2019/02/12.
- Weiss Robotics, 2015. WTS-FT; Weiss Robotics GmbH&Co.KG. [www.weiss-robotics.com/en/produkte/tactile-sensing/wts-ft-en/](https://www.weiss-robotics.com/en/produkte/tactile-sensing/wts-ft-en/), visitado el 2019/02/12.
- Willow Garage, 2010. Willow Garage PR2. [http://www.willowgarage.com/pages/pr2/overview](https://www.willowgarage.com/pages/pr2/overview), visitado el 2019/06/06.