



MANFRED: ROBOT ANTROPOMÓRFICO DE SERVICIO FIABLE Y SEGURO PARA OPERAR EN ENTORNOS HUMANOS

DOLORES BLANCO¹, SALAH AL ANSARI¹, CRISTINA CASTEJÓN²,
BEATRIZ LÓPEZ BOADA², LUIS E. MORENO¹

Universidad Carlos III de Madrid

¹Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

²Departamento de Mecánica

Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, España

(Recibido 20 de octubre de 2004, para publicación 10 de enero de 2005)

Resumen – En este artículo se presenta el proyecto MANFRED, que está siendo desarrollado por el Grupo de Manipuladores Móviles del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática en la Universidad Carlos III de Madrid. El objetivo de este proyecto es la construcción de un robot manipulador móvil antropomórfico de servicios avanzado capaz de operar en entornos típicamente diseñados para humanos, seguro y fiable, y que pueda cooperar eficazmente con las personas en la realización de tareas diversas. La robustez, fiabilidad y seguridad, son requisitos fundamentales para que el robot pueda desarrollar su tarea de forma adecuada en entornos compartidos con seres humanos, sin necesidad de modificar el espacio de trabajo. En el desarrollo del proyecto MANFRED se ha abordado el diseño del robot desde su fase inicial asumiendo como condiciones prioritarias la robustez, seguridad y fiabilidad del sistema. En este artículo trataremos especialmente los aspectos relacionados con su diseño mecánico. Se exponen los resultados obtenidos centrándonos especialmente en las mejoras en cuanto a arquitectura hardware que presenta este manipulador móvil. En concreto se detallan ampliamente las características del manipulador ligero LWR-UC3M-1 cuyo diseño supone un avance significativo respecto a las soluciones industriales disponibles.

1. ESTADO DEL ARTE

Desde hace décadas la implantación de la robótica en la industria es una realidad. Hoy en día, sin embargo, el reto de la robótica es su incorporación a la vida cotidiana, fuera de las aplicaciones industriales tradicionales. Para alcanzar este objetivo se requieren robots capaces de realizar tareas de forma autónoma, manipular objetos, moverse en entornos diseñados para humanos, interactuar y colaborar con personas y que, simultáneamente, cumplan unos criterios de robustez operacional y seguridad física elevados.

El primer paso en el camino de la robótica para salir del entorno industrial incorporándose a todo tipo de tareas y espacios de trabajo [1] [2], es la necesidad de incorporar en un mismo sistema la movilidad y la capacidad para manipular objetos que se aúnan en los manipuladores móviles. Desde principio de los años 90 diversos grupos de investigación han trabajado en el desarrollo de manipuladores móviles capaces de operar de forma autónoma con un alto nivel de coordinación en el control de todos sus grados de libertad. Muchos de estos grupos han orientado su trabajo hacia el diseño de robots de servicio y, con un especial interés en los últimos años, hacia los robots de servicio antropomórficos. Uno de los más claros ejemplos de esta tendencia es el trabajo realizado por el Laboratorio de Robótica de la Universidad de Stanford liderado por el Prof. O. Khatib. Su trabajo ha evolucionado desde el proyecto SAMM en el que se desarrollaron los robots asistentes semiautónomos Romeo y Julieta, manipuladores móviles constituidos por un brazo industrial situado sobre una base móvil; pasando por manipuladores móviles con dos brazos convencionales, hasta el robot de servicio que actualmente están desarrollando con dos brazos ligeros de diseño y disposición antropomórfica [3] [4]. Actualmente, se centran en el diseño mecánico de manipuladores intrínsecamente seguros y robustos reduciendo el peso e inercia del manipulador para mejorar su seguridad al tiempo que se mantienen los niveles de funcionamiento necesarios.

Otros grupos también se han planteado la morfología antropomórfica como solución para las complejas tareas de manipulación que se requieren a un robot de servicio, pueden citarse como ejemplos los manipuladores móviles de la Universidad de Waseda, Wendy y Wamoeba [5], el proyecto HERMES de la Universidad Bundeswehr en Múnich [6], el robot ARMAR de la Universidad de Karlsruhe [7][8], o el proyecto MOVAID de aplicaciones biomédicas desarrollado en la Scuola Superiore Sant'Ana [9]. En aplicaciones relacionadas con el cuidado de personas, se debe citar el proyecto de manipulador móvil de la Universidad de Parma desarrollado dentro del programa Robocare [10]. Evidentemente también debemos hacer referencia a los proyectos sobre robots humanoides, principalmente los proyectos japoneses como los de la Universidad de Waseda, Honda o Sony.

El desarrollo de este tipo de robots de servicio ha puesto de manifiesto los especiales requisitos que plantean los sistemas que tienen que interactuar directamente con personas, principalmente la necesidad de preservar la seguridad física para los humanos y la robustez operacional del robot. Por el hecho de interactuar directamente con las personas en su propio entorno y no en un entorno industrial adaptado a las características de los robots, presentan unas necesidades específicas. Aspectos involucrados en el desarrollo de robots asistentes o de servicio, en general en el dominio de la robótica centrada en humanos, que hoy en día se engloban en el concepto general de "*dependability*", recientemente aplicado a la robótica pero de extensa tradición en otros campos como la ingeniería informática. Sobre este concepto es necesario referirse a las aportaciones presentadas por importantísimos grupos de investigación de todo el mundo: LAAS-CNRS (Francia), IPA (Alemania), INRIA (Francia), AIST-MITI (Japón), KAIST (Corea), Universidad de Stanford (USA), Universidad Carnegie Mellon (USA) y otros; puestas de manifiesto en el 1^{er} y 2^o *IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*, [11] [12]. Aún sin llegar a un consenso, parece claro que alcanzar los requisitos de los robots asistentes nos obliga a acercarnos al problema tanto con soluciones de diseño hardware como software.

El diseño de un robot asistente obliga a plantear desde el inicio requisitos de seguridad física, fiabilidad y robustez más allá de los típicos de un robot industrial. Para alcanzar estos objetivos deberán emplearse múltiples estrategias. Desde la etapa de diseño del manipulador móvil deben afrontarse estos aspectos integrando tanto el diseño hardware del sistema: mecánico, eléctrico, sensorial, ...; como la arquitectura software, ésta precisa un alto grado de robustez y capacidad para detectar y recuperar fallos en todos los niveles operacionales.

El grupo de investigación del Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid [13], ha desarrollado un amplio trabajo en el campo de la robótica móvil y, más recientemente, en la línea de los manipuladores móviles [14][15]. Es fundamentalmente en este área dónde la experiencia acumulada en proyectos previos nos ha permitido extraer conclusiones que se están aplicando en el desarrollo del robot MANFRED que aquí presentamos.

No es nuevo el interés de este grupo de investigación por el diseño y desarrollo de robots de diferentes morfologías. Desde hace años este laboratorio ha diseñado y construido diferentes robots escaladores [16][17], y actualmente se hayan en fase de desarrollo distintos robots humanoides, y varios robots de servicio [18] entre los que se encuentra MANFRED. La participación en estos proyectos está proporcionando al laboratorio una amplia experiencia en el desarrollo de sistemas mecánicos muy particulares para aplicaciones no convencionales.

2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO MANFRED

Tomando como referencia el conocimiento adquirido por este grupo de investigación en el campo de los manipuladores móviles gracias a los trabajos previos desarrollados, la fase de diseño del nuevo robot se inicia con la definición de las características esenciales que se requieren. Concretamente durante el desarrollo del manipulador móvil OTILIO (ver figura 1), se han observado limitaciones en la plataforma experimental formada por una base móvil RWI-B21 y un manipulador CRS-A465, que se pretenden salvar con el diseño del sistema actual:

- En cuanto a la arquitectura hardware es imprescindible dotar al manipulador móvil de la mayor estabilidad posible. En el robot OTILIO se apreciaba cierta inestabilidad en el sistema, especialmente importante al someterse a aceleraciones, que en ocasiones podía dar lugar a la pér-



Fig. 1. OTILIO.

vida de equilibrio. Dicha inestabilidad estaba causada por el peso excesivo del brazo y la inadecuada distribución general de pesos en el sistema que situaban el centro de gravedad excesivamente alto.

- Las restricciones derivadas de los controladores cerrados de base y manipulador limitan las prestaciones del sistema. El acoplamiento de dos sistemas industriales con sus respectivos controladores, cada uno de los cuales presenta características completamente distintas, no permite acceder a un control directo a bajo nivel y presenta problemas en cuanto a los retrasos y tiempos de ciclo de cada subsistema. De ahí la necesidad de un diseño completamente abierto del manipulador móvil con la integración en un sistema de control único para todos los grados de libertad.
- Las necesarias conversiones entre los diferentes modelos del entorno utilizados en los diversos módulos funcionales resta robustez al sistema, aumentando la incertidumbre y el error acumulado en las transformaciones. De ahí la decisión de utilizar un único modelo del entorno para las diferentes tareas sin necesidad de conversiones.
- La arquitectura funcional planteada adolece, en el actual punto de desarrollo, de la necesaria robustez para el funcionamiento seguro y continuo del sistema. Se plantea por tanto, diseñar cada módulo funcional (percepción, modelado, localización, navegación y planificación) con capacidad para manejar la incertidumbre de forma uniforme y con posibilidad de recuperarse de fallos de funcionamiento.

Por tanto, se asume desde el inicio del diseño mecánico el objetivo de aumentar la estabilidad del sistema y disminuir los riesgos derivados de una posible colisión con personas. Varios grupos están investigando en el desarrollo de brazos manipuladores de baja inercia, con reducido peso, que limiten el posible daño a las personas en un choque accidental con el robot y que permitan un control más eficaz del movimiento de los brazos. Una de las tareas principales que se han afrontado en la parte mecánica del proyecto



Fig. 2. MANFRED.

MANFRED, es el diseño de brazos manipuladores ligeros de forma que al disminuir la inercia consigamos un aumento considerable de la seguridad. Por otro lado, se busca una distribución adecuada del peso de los diferentes componentes del manipulador móvil para mejorar su estabilidad.

La elección del diseño antropomórfico con brazos situados lateralmente está siendo, cada día más, la estructura elegida para el diseño de robots asistentes. En los primeros manipuladores móviles que se construyeron se utilizaron manipuladores industriales comerciales que, debido a su estructura y elevado peso, hacen imposible la disposición lateral. Sin embargo, la realización de tareas de manipulación complejas, tanto en colaboración con personas como de forma autónoma, aconseja esta disposición que permite que los dos brazos manipuladores trabajen sobre el mismo objeto (manipulando y sujetando simultáneamente), sin interrumpir el campo de percepción frontal de los sensores acoplados al sistema.

La utilización de brazos manipuladores industriales para la construcción de manipuladores móviles, como se ha hecho en muchos casos, ha demostrado presentar varias desventajas. Por un lado, como ya hemos mencionado, la dificultad para situar el brazo lateralmente con disposición antropomórfica. Además, el controlador que acompaña al brazo industrial restringe la capacidad de control, aumentando el peso total del sistema y, por tanto, el consumo de potencia lo que reduce su autonomía. Para solventar estos problemas hemos optado por el diseño de un brazo ligero que incorpore en su estructura la electrónica de control. Uno de los objetivos que buscamos con la disminución de peso en el brazo, es hacer posible su disposición lateral, manteniendo la estabilidad del sistema. Por otro lado, se elimina el armario de control de los manipuladores industriales típicos, permitiendo el control de todas las articulaciones a través de una controladora de ejes y del computador de a bordo.

Como consecuencia de estos análisis, desde el punto de vista de la arquitectura física del sistema, se han planteado como objetivos básicos de diseño:

- Diseño antropomórfico
- Aumento de la estabilidad
- Control a bajo nivel, controladores abiertos
- Desarrollo de brazos ligeros

Otro aspecto clave del proyecto es la búsqueda de la robustez operacional del sistema. Para ello se propone una arquitectura de control del robot funcional y modular, verificando y controlando la integridad de funcionamiento del sistema, capaz de detectar y recuperar fallos en los diferentes niveles de modelado del entorno, planificación, navegación, percepción y manipulación. Además se han de considerar requisitos de fiabilidad y robustez en cada uno de los módulos operacionales de forma individual.

3. ARQUITECTURA DEL ROBOT MANFRED

3.1. Arquitectura Física

El primer paso en el desarrollo de este complejo proyecto es el diseño físico del manipulador móvil. Desde esta etapa inicial de diseño han de tenerse presentes los requerimientos de robustez, fiabilidad y seguridad del sistema, buscando mejoras en el diseño mecánico. Orientado a conseguir aumentar la seguridad física del manipulador móvil y la robustez de funcionamiento, a la vez que se diseña un sistema capaz de moverse y desarrollar tareas complejas en un entorno típicamente humano.

El resultado de imponer estas restricciones de diseño ha dado lugar al proyecto de manipulador móvil que se presenta en la figura 2. Se trata de un manipulador móvil con 8 grados de libertad dotado de una base móvil de tipo diferencial, con un brazo ligero de 6 grados de libertad y diseño antropomórfico.

El diseño actual del robot MANFRED permitirá la incorporación de un segundo brazo en etapas posteriores de desarrollo para completar el diseño antropomórfico deseado.

El diseño del nuevo brazo manipulador ligero LWR-UC3M-1, es un apartado de especial relevancia en este proyecto al que vamos a dedicar la sección 4.

3.1.1. Base móvil

Dentro del proyecto MANFRED se ha diseñado y construido una base móvil de tipo diferencial, que integra una tarjeta controladora de 8 ejes PMAC-2 insertada en el PC de a bordo, que permite controlar conjuntamente los grados de libertad correspondientes a la base y al brazo manipulador.

La base está equipada con 4 ruedas dispuestas en rombo. Dos son ruedas de apoyo y las otras dos ruedas motrices asociadas a dos motores tipo *brushless* con sus correspondientes servoamplificadores.

Las dos ruedas motrices dan lugar al movimiento tipo diferencial, que permite al robot girar sobre sí mismo. La cinemática de la base responde a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{d} & -\frac{1}{d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_r \\ v_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde v y ω son las velocidades lineal y angular de la base, respectivamente, v_r y v_l las velocidades de las ruedas derecha e izquierda, y d la distancia entre los ejes de ambas ruedas ($d = 54$ cm).

Sobre la base móvil se ha montado una estructura que aloja todo el cableado para la conexión del brazo manipulador con los computadores situados en la base, el cableado para la transmisión de potencia desde la base a los motores del brazo, los servoamplificadores asociados con los motores del manipulador y todo el cableado correspondiente a los sensores externos. Esta estructura sirve también como soporte para el anclaje del brazo, el sensor láser y de las cámaras para el sistema de visión.

3.1.2. Sistema de alimentación

La base alberga el sistema de alimentación compuesto por las baterías que dotan de autonomía a todo el robot. Se ha optado por la conexión serie de 4 baterías de 12 V para proporcionar una tensión de alimentación de 48 V en continua. Ya que deben proporcionar toda la potencia necesaria para el funcionamiento del sistema, uno de los requisitos en su elección ha sido la necesidad de utilizar baterías de gran capacidad. En concreto, las baterías seleccionadas son el modelo LC-X1242P de PANASONIC, que proporcionan una tensión de salida de 12V y una capacidad de 42 A/h. Asimismo, como sistema de seguridad, se



Fig. 3. Telemetría láser 3D.

ha diseñado un sistema de monitorización de las baterías a través de un microcontrolador PIC16F818, que permite medir en todo instante la tensión proporcionada por las baterías y la corriente que circula por ellas. Este sistema de seguridad permite comunicar continuamente el estado de la alimentación al computador de control, así como realizar una parada automática controlada de los motores del robot en caso de baja tensión de alimentación o de superar una corriente umbral.

3.1.3. Sistema sensorial

El sistema sensorial del manipulador móvil MANFRED está formado los siguientes elementos:

- **Subsistema de telemetría láser 3D.** Compuesto por un telémetro láser bidimensional PLS de Sick preparado para capturar 361 medidas en un barrido horizontal de 180 grados (se tomarán medidas cada $0,5^\circ$) y un motor de corriente continua más una reductora que se encarga de realizar el barrido vertical.

El PLS garantiza unos errores en la medida de profundidad que no superan los 20 mm. Este error se ve influenciado por dos parámetros, la distancia a medir y el ángulo de disparo del haz láser (de 0° a 180°).

En cuanto al conjunto motor+reductor, se ha elegido un sistema que no supusiera un aumento considerable de peso y que por sus dimensiones quedase integrado en la estructura del robot sin que ninguno de sus elementos sobresalgan del contorno de la base. Basándonos en estas consideraciones de tamaño y peso, se ha seleccionado un micromotor de Faulhaber 2642-024CR con reductor 26/1 (66:1). El conjunto se controla por medio del controlador MCDC2805 también de Faulhaber que se ha situado en uno de los laterales de la propia estructura de montaje del sistema de telemetría láser 3D.

El objetivo del sistema de telemetría láser es proporcionar al robot la información necesaria sobre la distancia a los objetos del entorno para realizar un modelado del espacio de trabajo que rodea al manipulador móvil. Esta información se utilizará principalmente en las tareas de navegación y localización del robot durante sus desplazamientos en un espacio de trabajo amplio, en estos casos se pueden utilizar datos de telemetría 2D o 3D según la complejidad y el grado de ocupación del espacio de trabajo. Durante la fase de navegación en entornos poco ocupados, como pueden ser pasillos, se utiliza telemetría 2D manteniendo parado el motor del sistema láser de forma que el escáner realice un barrido en un plano paralelo al suelo.

- **Subsistema de visión.** Se pretende que el sistema sea capaz de manipular objetos situados en un entorno 3D por lo que es necesario reconocer el objeto a manipular, determinar su posición y orientación relativa con respecto al manipulador móvil, así como determinar el punto y orientación adecuado para su manipulación. Las tareas de manipulación previstas consisten en la apertura de puertas, pulsar interruptores o coger objetos simples de una mesa.

El sistema incorpora para reconocer estos objetos y estimar su posición respecto al robot una cámara SONY EVY-100 que se sitúa en la parte frontal del cuerpo del manipulador móvil. También se incorpora una minicámara SONY B/N XC-ES50CE situada sobre la muñeca del manipulador. Esta cámara se utiliza en las tareas de manipulación cuando el brazo se encuentra situado delante del objeto a manipular de forma que interfiere en el campo de visión de la cámara EVY-100.

- **Sensor fuerza/par.** Para la interacción con el entorno en las tareas de manipulación el robot MANFRED porta en el extremo del brazo un sensor fuerza-par JR3 modelo 67M25A-U560. El sensor se sitúa entre el extremo del brazo y la pinza o elemento terminal. Este dispositivo proporciona medidas de fuerza y par en 6 ejes que se utilizan en el lazo de control de fuerza del manipulador móvil. El sensor se ha conectado a un receptor basado en DSP, con formato de tarjeta para bus PCI, de esta forma la corriente de medidas de fuerza y par accesibles por el software de control tiene un gran ancho de banda.

3.2. Arquitectura de Control

El segundo aspecto crítico en el diseño de un robot de servicios es la robustez operacional. Para conseguir este objetivo genérico, el diseño de la arquitectura software del sistema debe considerar los siguientes aspectos:

- Fiabilidad en la percepción
- Fiabilidad en el control
- Comportamiento tolerante a fallos
- Localización de fallos y aislamiento de los mismos
- Autonomía de decisión y manejo de situaciones excepcionales

Desde un punto de vista operacional, tanto los robots móviles como los manipuladores móviles presentan problemas de robustez que se derivan básicamente de la incapacidad para tratar adecuadamente la incertidumbre propia de entornos reales y, por otro lado, de la incapacidad para la detección y recuperación de fallos en los diferentes subsistemas.

En el diseño de la arquitectura software del robot MANFRED se ha considerado que la mejora de la robustez operacional puede afrontarse mejorando entre otros aspectos los siguientes:

- Algoritmos de percepción, modelado, navegación, localización y planificación capaces de tratar con la incertidumbre de forma homogénea.
- Modelos del entorno utilizables en diferentes tareas sin necesidad de conversiones entre modelos.
- Arquitectura modular que permita la supervisión y recuperación de fallos en cada módulo funcional.
- Flexibilidad en la arquitectura funcional para aumentar la eficacia y robustez del software incorporando para cada tarea concreta los módulos funcionales necesarios de forma dinámica.

Se ha diseñado una arquitectura funcional que integra la percepción, el control y la planificación local y global de forma que el robot pueda responder a un conjunto amplio de tareas típicas de un robot de servicios operando en un entorno humano (desplazamiento en entornos con pocos obstáculos, movimiento en zonas densamente ocupadas, manipulación de puertas y colaboración en el transporte de una pieza simple con una persona). Esta arquitectura está basada en la realimentación sensorial externa, tanto a nivel del control de interacciones como a nivel de la planificación local, para conseguir un nivel adecuado de reactividad al entorno y de suavidad en el control de las interacciones.

3.2.1. Arquitectura modular

Un manipulador móvil es un sistema de enorme complejidad que debe ser capaz de procesar e interpretar una gran cantidad de información sensorial y cerrar varios lazos de control simultáneamente. Esta

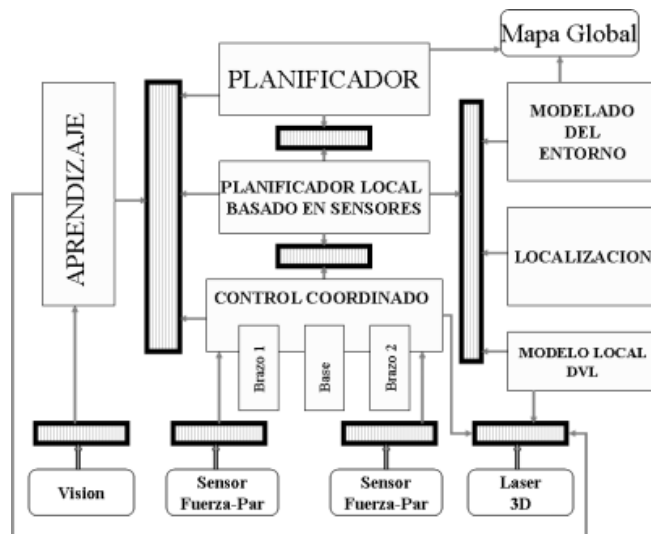


Fig. 4. Arquitectura funcional del proyecto MANFRED.

complejidad se traduce directamente en el crecimiento y complejidad del software que se desarrolla. Uno de las características principales sobre la que se ha estructurado la arquitectura software del sistema es la modularidad. Para favorecer el desarrollo y mantenimiento del sistema software del robot se ha optado por una arquitectura completamente modular que traduce cada función a realizar por el sistema en un módulo software independiente. La interacción entre los módulos se basa en el intercambio de datos. Se han desarrollado módulos funcionales que puedan trabajar conjuntamente mediante el intercambio de datos pero que se ejecuten como procesos completamente independientes. La sincronización entre los procesos, cuando es necesaria, se realiza por medio de mensajes o eventos.

Con esta estructura modular se facilita el desarrollo, comprobación y actualización de los diferentes algoritmos. Cada uno de los módulos funcionales se diseña con capacidad para el autodiagnóstico, de esta forma se dispone de un primer control de fallos en cada uno de los módulos.

La figura 4 muestra un esquema de la arquitectura de control propuesta para el robot MANFRED.

Al tratarse de módulos de ejecución completamente independiente, cada tarea o cada fase de una tarea definirá el conjunto de módulos necesarios para su desarrollo.

3.2.2. Modelo único de representación del entorno, Diagrama de Voronoi

Uno de los problemas clave que se plantean en robótica móvil en general y, más concretamente, en la robótica de servicio es el tratamiento de los datos que proporcionan los sensores para obtener un modelo o modelos del entorno como representación útil del mismo. En los últimos años se han producido avances muy significativos en este campo. Aún así, la elección de un modelo u otro del entorno es una tarea compleja que depende de factores como el tipo de entorno en que evoluciona el robot, la tarea a realizar y las limitaciones computacionales del sistema.

La cantidad de información y datos procedentes de los sensores que deben tratarse en este tipo de sistemas es mucho mayor que en un robot convencional y mucho más diversa. De ahí que la homogeneidad de los datos, su tratamiento uniforme y la fiabilidad de los mismos sean problemas decisivos para conseguir la capacitación del sistema para colaborar eficazmente con los seres humanos.

El modelado del entorno se ha afrontado desde muchos puntos de vista. Un gran número de investigadores trabaja con técnicas basadas en la estimación de características geométricas del entorno (puntos, rectas, esquinas, etc.) [23] [24]. Un segundo grupo de técnicas que han mostrado alta robustez operacional, estiman el valor de la función de densidad de probabilidad de ocupación en cada punto de una retícula asociada al entorno, estas retículas de ocupación modelan el entorno en términos de espacio ocupado por objetos y espacio libre [25]. Un tercer enfoque es el puramente topológico, en el que el problema del modelado se plantea en términos relacionales únicamente con respecto a algún elemento discriminable del

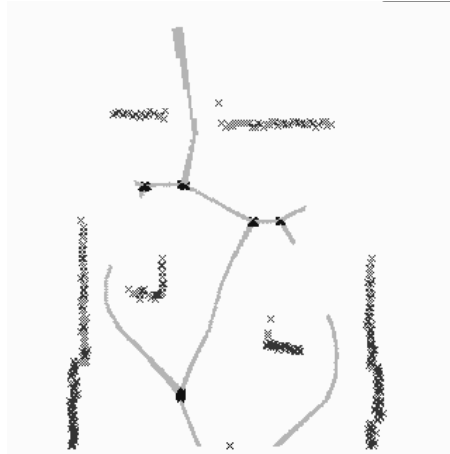


Fig. 5. Diagrama de Voronoi local.

entorno [26]. Un último enfoque consiste en modelar el entorno de forma que se combine información geométrica y topológica en algún tipo de modelo de entorno.

En nuestro proyecto es especialmente importante ser capaces de construir mapas del entorno en el que se mueve el robot de forma rápida y eficaz, evitando los problemas de incertidumbre, y homogeneizando en lo posible los modelos utilizados por los diferentes módulos funcionales del sistema para reducir la necesidad de conversiones que siempre conlleva un aumento de la incertidumbre y un retraso en la transmisión de la información.

En el caso del proyecto MANFRED se ha optado por una arquitectura de control basada en el uso de Diagramas de Voronoi (locales y globales) como modelos topo-geométricos del entorno, que podrán ser utilizados por los diferentes módulos funcionales del sistema: planificación, navegación, modelado y localización.

El diagrama de Voronoi representa el camino o serie de puntos que equidistan de al menos dos objetos del entorno [27]. Los puntos equidistantes a dos objetos del entorno forman las ramas del diagrama de Voronoi, y los puntos equidistantes a tres o más objetos son los nodos. De esta forma, se pueden ver las ramas del Diagrama de Voronoi como los caminos por los cuales el robot puede moverse de la forma más segura, alejándose cuanto puede de los obstáculos. Los Diagramas de Voronoi fueron propuestos hace años por diferentes grupos de investigación para planificación de trayectorias en robótica móvil [28]. En todos estos casos el mapa del entorno se considera absolutamente conocido a priori y por tanto la construcción del Diagrama de Voronoi por técnicas geométricas es previa al inicio de la ejecución de la tarea. Posteriormente, ya en los años 90, algunos autores han desarrollado algoritmos para construir Diagramas de Voronoi usando la información del entorno recogida por los sensores, eliminando la necesidad de disponer de un mapa previo.

En el proyecto MANFRED se utiliza el Diagrama de Voronoi Local (DVL) construido a partir de las medidas proporcionadas por el telémetro láser como representación del entorno. El algoritmo utilizado para la extracción del DVL se describe con detalle en [29]. En la figura 5 se puede ver un ejemplo del DVL obtenido con este algoritmo. El algoritmo permite la obtención del modelo en tiempo real, por tanto con el robot en movimiento, de los DVL de un área en torno al manipulador móvil que se ha establecido en 6 m. Esta representación se usa directamente en las tareas de navegación o planificación local [14] [30].

En otros casos, se utiliza el DVL obtenido como base para la obtención de un mapa topogeométrico del entorno [31]. Este mapa contiene tanto información topológica, relaciones entre nodos y ramas, como geométrica, situación de los nodos y los puntos de las ramas y distancias a los objetos. Este mapa topogeométrico se utiliza tanto en tareas de planificación sobre un entorno global conocido, como en tareas de localización [32]. También se utiliza para resolver el problema del SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), es decir, los casos en los que al moverse el manipulador móvil en un entorno completa-

mente desconocido debe construir un mapa del entorno por el que se mueve al mismo tiempo que se localiza, [33].

4. EL BRAZO MANIPULADOR

4.1. Diseño de brazos manipuladores: antecedentes

El diseño de brazos manipuladores para su incorporación en sistemas que interaccionan directamente con los seres humanos, como los manipuladores móviles, es un problema de gran complejidad mecánica. Precisamente, uno de los aspectos más destacados del diseño mecánico de nuestro manipulador móvil es el desarrollo de un nuevo brazo manipulador con características de bajo peso y robustez muy restrictivas.

Algunos de los antecedentes más importantes que se han estudiado detenidamente al afrontar este proyecto se mencionan en este punto:

- El brazo antropomórfico 7-D.O.F. MIA ARM de la Universidad de Waseda [19], incorporado a robots antropomórficos como "Wendy". Se trata de un brazo bastante pesado, alrededor de 25 kg comparable con los manipuladores industriales típicos, pero con un diseño muy similar a un brazo humano. Para este brazo se ha propuesto un método de control de impedancia pasivo usando MIA (*Mechanical Impedance Adjuster*) que simplifica y mejora el control de fuerza del manipulador en tareas de manipulación.
- El diseño del brazo para el robot ARMAR intenta reproducir el rango de movimientos de un brazo humano [7]. Este diseño reduce principalmente el peso del antebrazo que tiene un momento de inercia muy bajo. Se sitúa el centro de gravedad cercano al codo. El diseño mecánico de este brazo de 7 g.d.l. ha conseguido un peso reducido con una capacidad de carga y movilidad similares a las del brazo humano.
- En el Laboratorio de Robótica de la Universidad de Stanford, como ya hemos citado, están trabajando en brazos manipuladores de baja inercia [4]. Uno de los componentes críticos de este trabajo es la aplicación del método DECMMA (*Distributed Elastically Coupled Macro Mini Parallel Actuation*), su idea se basa en situar los actuadores cercanos a la base del manipulador reduciendo la inercia efectiva y el peso del manipulador completo. Hasta el momento sólo se ha construido un prototipo de 2 g.d.l. y se ha iniciado el diseño de un manipulador de 4 g.d.l..
- Sin lugar a dudas, el trabajo más interesante en el desarrollo de brazos ligeros para robótica son las diferentes versiones del "DLR Lightweight Robot" del Instituto de Robótica y Mecatrónica del Centro Aeroespacial Alemán, [20] [21]. La versión DLR II es un manipulador con 7 g.d.l., está construido principalmente en aluminio, integra en el brazo todos sus componentes electrónicos, y alcanza una capacidad de carga de 7 kg con tan sólo 17 kg de peso total. Actualmente el DLR III pretende reducir aún más el peso del brazo manipulador al incorporar fibra de carbono en su estructura y utilizar un nuevo diseño extremadamente ligero de los reductores armónicos y de los frenos electromagnéticos que se incorporan.
- La única solución comercializada hoy en día de un brazo manipulador de bajo peso es el ARM Service Manipulator, conocido como Manus [22]. Se trata de un manipulador de 14,3 kg de peso al que hay que añadir 1,3 kg. de la caja de control. Especialmente diseñado para incorporarse a una silla de ruedas como ayuda a personas con discapacidad en los miembros superiores. Sus prestaciones en cuanto a capacidad de carga, tan sólo 1,5 kg, y velocidad máxima, 9,9 cm/s, están limitadas en comparación con otros brazos manipuladores ligeros. Estas limitaciones se deben a las muy especiales aplicaciones para las que ha sido diseñado que obligan a mantener altos niveles de seguridad y control en el movimiento del brazo.

4.2. Brazo Ligero LWR-UC3M-1

La filosofía de diseño mecánico de este brazo manipulador ligero ha tenido como objetivo conseguir características de movilidad (número de grados de libertad, alcance y distribución) similares a las de un brazo humano. A la vez se ha buscado disminuir el peso, que en los manipuladores industriales comercia-

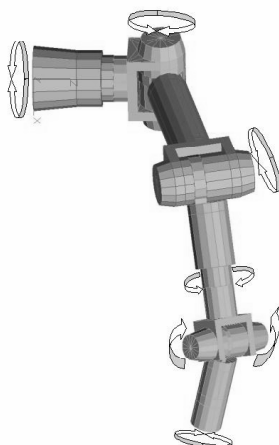


Fig. 6. Grados de libertad del LWR-UC3M-1.

les es excesivo para nuestros propósitos, sin alterar por ello la robustez y rigidez del sistema. Asegurar que el robot pueda realizar tareas de manipulación con suficiente destreza de forma eficaz obliga a su disposición antropomórfica y a mantener suficiente rigidez para facilitar el control del movimiento. A la vez para mejorar la seguridad de las personas con las que colabore, se impone disminuir la inercia del sistema en movimiento y en consecuencia la peligrosidad del impacto ante una posible colisión.

El diseño mecánico de este nuevo manipulador ha tenido dos fases diferenciadas muy importantes: el diseño cinemático del sistema y la elección de los materiales de construcción.

4.3. Proceso de diseño cinemático

El diseño mecánico se ha realizado con ayuda de software 3D-CAD que ha permitido optimizar la integración de los elementos mecánicos y electrónicos. El análisis de todos los componentes críticos con Métodos de Elementos Finitos (FEM) ha sido la herramienta que ha permitido la construcción de esta estructura extremadamente ligera. Los primeros diseños mecánicos se realizaron con AutoCAD. En las fases posteriores del diseño se ha utilizado el software SolidWorks. La figura 6 muestra el modelo del brazo LWR-UC3M-1 detallando la disposición de sus grados de libertad.

Aunque el objetivo inicial propuesto era reproducir la movilidad de un brazo humano, ha sido necesario limitar a 6 los g.d.l. del manipulador por restricciones económicas. En comparación con un modelo cinemático simplificado del brazo humano, en el que se consideran tres grados de libertad en el hombro, el manipulador diseñado dispone únicamente de dos. De esta forma se ha perdido la redundancia que presenta el brazo humano. Sin embargo, todas las simulaciones realizadas sobre el modelo, así como las pruebas realizadas con el manipulador construido, nos permiten asegurar que la configuración de articulaciones adoptada otorga al manipulador LWR-UC3M-1 suficiente flexibilidad de movimientos para realizar tareas de manipulación complejas.

Como se observa en la figura 7, en la etapa de diseño se ha puesto especial atención en eliminar cualquier arista en la estructura mecánica externa del manipulador LWR-UC3M-1, se han redondeado todas las terminaciones de los elementos que cubren las articulaciones y se han ocultado los tornillos en la propia estructura mecánica. El objetivo es eliminar en lo posible cualquier elemento que pudiese dañar a un ser humano. Por la misma razón tanto el cableado como toda la electrónica incorporada, se integran internamente en la estructura eliminando cualquier elemento fuera de los eslabones o las estructuras que cubren las articulaciones. Al presentar una estructura cerrada y tubular con un hueco en su interior de diámetro adecuado, los eslabones de fibra de carbono, puede contener todos los cables dedicados a control y alimentación de manera segura y limpia. Esta estructura cerrada disminuye, también, en alto grado los peligros de vibraciones e inexactitudes de posición en la estructura dándole una robustez considerable.

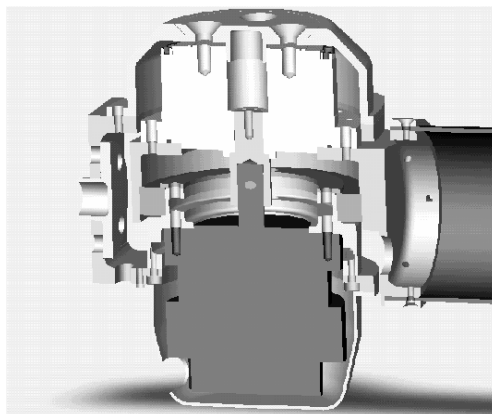


Fig. 7. Detalle de diseño.

4.4. Motores y reductores

El uso de motores compactos y reductores armónicos libres de *backlash* permite conseguir un movimiento muy preciso y una alta relación peso/capacidad de carga cercana a 1:3.

Los parámetros de las articulaciones se muestran en la tabla I.

4.5. Eliminación de frenos

Una de las características del diseño del brazo LWR-UC3M-1 es la eliminación de los frenos. Esta es una característica que no presentan el resto de los manipuladores ligeros desarrollados por otros grupos de investigación. Los reductores incorporados en cada articulación junto con la disposición antropomórfica y las configuraciones previstas para el manipulador en el desarrollo de sus tareas, permiten prescindir de la incorporación de sistemas de frenado en las articulaciones con la consiguiente reducción de coste y peso global.

4.6. Elección de materiales

La selección de los materiales constructivos ha sido uno de los aspectos del diseño mecánico en los que se ha llevado a cabo un análisis más exhaustivo. Hemos de tener en cuenta que al objetivo primordial de disminución del peso del manipulador, hay que añadir la necesidad de mantener la rigidez y resistencia de la estructura. Además ha sido necesario estudiar las posibilidades de mecanizado de los materiales dada la necesidad de fabricar diferentes piezas con formas, en muchos casos, complejas.

Se han analizado varios materiales compuestos tanto metálicos como polímeros.

Entre los compuestos metálicos se estudiaron aleaciones de magnesio (desechadas debido a la dificultad de su mecanizado); aleaciones de litio (presentan como principal inconveniente la peligrosidad del contacto directo con estos materiales); aleaciones de titanio (tienen una densidad elevada y un elevado coste para nuestro objetivo) y, por último, las aleaciones de aluminio, que ha sido una de las opciones seleccionadas.

La aleación de aluminio seleccionada, aunque presenta una densidad superior a la de otros compuestos metálicos analizados, $2,8 \text{ g/cm}^3$, no presenta sus inconvenientes. Es un material de fácil mecanizado, sin

Tabla I. Parámetros articulares.

	Articulaciones 1,2 y 3	Articulaciones 4 y 5	Articulación 6
Reducción Velocidad máxima	160 131 %s	120 180 %s	100 210 %s

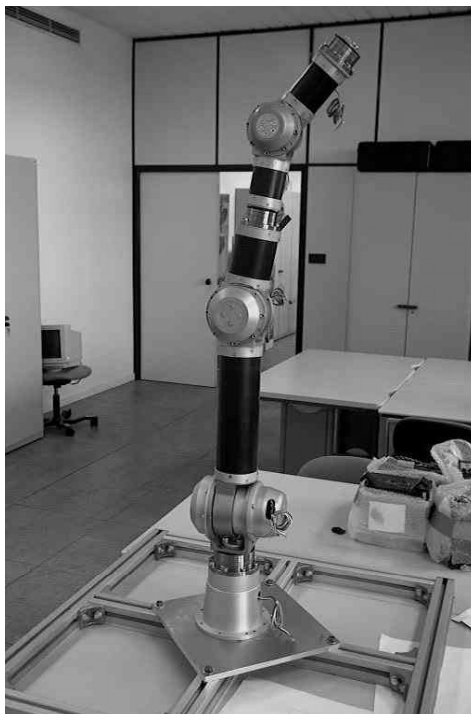


Fig. 8. Manipulador LWR-UC3M-1.

inconvenientes en cuanto a su peligrosidad o toxicidad.

También se llevó a cabo un exhaustivo estudio de varios polímeros. En general estos compuestos presentan muy buenas características en cuanto a su densidad y resistencia. Concretamente el poliéster termoplástico extruido (PETP; $1,39 \text{ g/cm}^3$), el sulfuro de polifenileno (PPS; $1,43 \text{ g/cm}^3$) y la polieteretercetona (PEEK; $1,32 \text{ g/cm}^3$), se pueden considerar compuestos muy adecuados para nuestra aplicación. Sin embargo, los costes y la dificultad de mecanizado han hecho desestimar su utilización para este primer prototipo.

Por último, se consideró la utilización de fibra de carbono, de densidad $1,6 \text{ g/cm}^3$.

Finalmente, los materiales seleccionados han sido el aluminio 7075 y la fibra de carbono. La mayoría de las partes estructurales se han fabricado con aluminio. Los eslabones 3, 4, 5 y 6 se han construido con fibra de carbono.

4.7. Características del brazo LWR-UC3M-1

Con el diseño actual se ha conseguido un manipulador con las características que se muestran en la tabla II.

Tabla II. Características del manipulador.

Grados de libertad	6
Peso (incluido cableado)	18 kg
Longitud	1205 mm
Alcance	955 mm
Capacidad de carga	6 kg
Velocidad máxima	180 °/s

El manipulador, en su actual forma, presenta una capacidad de carga muy aceptable para las tareas de manipulación previstas, a la vez que un peso muy reducido en comparación con los manipuladores industriales típicos. Las características de tamaño y alcance son similares a las de un brazo humano, consiguiéndose una alta flexibilidad en las tareas de manipulación gracias a la disposición de las 6 articulaciones. La estructura final es la mostrada en la figura 8.

Actualmente se han realizado todas las simulaciones cinemáticas y dinámicas del brazo manipulador, así como las pruebas de funcionamiento del prototipo construido, resultando todas ellas muy satisfactorias. Los resultados obtenidos serán recogidos en publicaciones próximas.

5. CONCLUSIONES

El diseño de manipuladores móviles capaces de colaborar con los seres humanos en un entorno adaptado a las personas es una tarea de enorme complejidad. El proyecto que presentamos en este artículo aborda el diseño y construcción de un manipulador móvil, MANFRED, estableciendo como objetivos desde el inicio la robustez, la fiabilidad y la seguridad para las personas.

El brazo manipulador ligero LWR-UC3M-1 es uno de los hitos principales de este proyecto. El manipulador LWR-UC3M-1 en su desarrollo actual es un sistema con 6 grados de libertad, de forma antropomórfica, especialmente diseñado para su acoplamiento a robots del tipo manipulador móvil. Su principal característica técnica es la alta relación capacidad de carga/peso (6:18), de gran importancia en el campo de aplicación específico de la robótica de servicios. Se ha conseguido un manipulador con movilidad y alcance similares a los de un brazo humano, y con una alta relación capacidad de carga/peso que lo hace muy superior en cuanto a prestaciones a la mayoría de los manipuladores comerciales.

La arquitectura hardware del robot MANFRED, incorporando el brazo ligero, consigue un alto grado de estabilidad gracias a la equilibrada distribución de los pesos en la plataforma. Se ha unificado el control del sistema en una única tarjeta controladora para los 8 grados de libertad. Y, por último se ha dotado al manipulador móvil de un sistema sensorial basado en visión y telemetría láser que le permite captar toda la información del entorno necesaria para realizar las tareas encomendadas de forma adecuada. Se completa el sistema sensorial con el sensor fuerza/par que permite controlar las interacciones con los objetos del entorno o en tareas de colaboración con seres humanos.

La modularidad de la arquitectura software es su principal característica mejorando el control de fallos y facilitando la actualización, mantenimiento y comprobación del complejo software necesario para desarrollar todas las funcionalidades del sistema.

La utilización de un modelo único del entorno basado en los Diagramas de Voronoi Locales construidos a partir los datos de la telemetría láser es uno de los puntos fundamentales del sistema de control. Con este modelo único se consigue un mayor grado de integración de los módulos funcionales, evitando las transformaciones y con ellas el crecimiento innecesario de la incertidumbre en la interpretación de la información sensorial. Los mapas topo-geométricos obtenidos a partir de los DVL permiten resolver de forma eficaz los problemas de localización o construcción de mapas en entornos desconocidos, SLAM.

El resultado del proyecto MANFRED es un manipulador móvil con capacidad para colaborar y desarrollar tareas complejas de manipulación en entornos diseñados para los seres humanos. La interpretación de la información proporcionada por su completo sistema sensorial permite su funcionamiento autónomo en un entorno desconocido y poblado por obstáculos. Por último, el diseño electro-mecánico del sistema le proporciona una alta capacidad de maniobra, gran estabilidad y aumenta la seguridad para las personas que puedan encontrarse en su entorno de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer sinceramente la financiación proporcionada por el Gobierno Español a través de los proyectos DPI2000-0425 y DPI2003-01170. También quieren agradecer a Ignacio Casillas la colaboración técnica en el desarrollo del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Khatib, K. Yokoi, O. Brock, K.S. Chang, and A. Casal, "Robots in human environments: Basic autonomous capabilities." *International Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 7, pp. 684–696, 1999.
- [2] *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, World Scientific Publishing, March 2004.
- [3] O. Khatib, "Mobile manipulation: The robotic assistant." *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 26, pp. 175–183, 1999.
- [4] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth, and J.K. Salisbury, "Towards a human-centered intrinsically-safe robotic manipulator." en *Second IARP - IEEE/RAS Joint Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*, G. Giralt and P. Corke, Eds., 2002.
- [5] T. Ogata, T. Komiya, and S. Sugano, "Development of arm system for human-robot emotional communication." en *Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON 2000)*, 2000, pp. 475–480.
- [6] R. Bischoff and V. Graefe, "Hermes: an intelligent humanoid robot, designed and tested for dependability." en *Proc. of the 8th International Symposium ISER02*, B. Siciliano and P. Dario, Eds., 2003, vol. 5 de *Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR)*.
- [7] K. Berns, and R. Dillmann, T. Asfour, "Armar - an anthropomorphic arm for humanoid service robot." en *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1999.
- [8] T. Asfour, K. Berns, and R. Dillmann, "The humanoid robot ARMAR: Design and control." en *The first IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2000)*, Boston, USA, 7-8 Septiembre, MIT.
- [9] P. Dario, E. Guglielmelli, V. Genovese, and M. Toro, "Robot assistant: Application and evolution." *Robotic and Autonomous Systems*, no. 18, pp. 225–234, 1996.
- [10] S. Caselli, E. Fantini, F. Monica, P. Occhi, and M. Reggiani, "Toward a mobile manipulator service robot for human assistance." en *1st Robocare Workshop*, Roma, Italia, 30 Octubre, 2003.
- [11] G. Giralt and P. Corke, Eds., "*Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*". *Proc. IARP/IEEE Workshop*, Seoul, Korea, 2001.
- [12] *Proceedings of the 2nd IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*, Toulouse, Francia, Octubre 2002. LAAS-CNRS.
- [13] Web del Robotics Lab en <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab>.
- [14] D. Blanco, *Planificación Local Basada en Sensores para un Manipulador Móvil en Tareas de Colaboración con Humanos*, Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2002.
- [15] D. Blanco, C. Balaguer, and L. Moreno, "Safe local path planning for human-mobile manipulator cooperation." en *Proceedings of the 2nd IARP/IEEE-RAS Joint Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments*, 2002, pp. 27–33.
- [16] C. Balaguer, A. Giménez, J.M. Pastor, V.M. Padrón, and M. Abderrahim, "A climbing autonomous robot for inspection application in 3d complex environment." *Robotica*, vol. 18, pp. 287–297, 2000.
- [17] M. Abderrahim, C. Balaguer, A. Giménez, J. M. Pastor, and V. M. Padrón, "Roma: A climbing robot for inspection operations." en *Proceedings of the Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA99)*, Detroit, USA, Mayo 1999, pp. 2303–2308.
- [18] C. Balaguer, A. Giménez, and A. Jardón, "Mats: An assistive robotics climbing system for personal care and service applications." en *Proc. of 1st. Int. Workshop on Advances in Service Robotics (ASER'03)*, Bardolino, Italia, Marzo 2003.
- [19] Web del proyecto MIA en <http://www.sugano.mech.waseda.ac.jp/wendy/arm/mia1-e.html>.
- [20] G. Hirzinger, N. Sporer, A. Albu-Schaffer, M. Hahnle, and A. Pascucci, "DLR's torque-controlled light weight robot III - are we reaching the technological limits now?." en *Proc. of the Intl. conf. on Robotics and Automation*, 2002, pp. 1710–1716.
- [21] G. Hirzinger, B. Brunner, K. Landzettel, J. Batterfab N. Sporer, and M. Shedl, "Space robotics-DLR's telerobotic concepts, lightweight arms and articulated hands." *Autonomous Robots*, vol. 14, pp. 127–145, 2003.
- [22] Exact Dynamics, "Assistive robotic manipulator (arm)," en <http://www.exactdynamics.nl/>.

- [23] J.A. Castellanos, J. M. Martínez, J.Ñeira, and J.D. Tardós, “Simultaneous map building and localization for mobile robots: A multisensor fusion approach.” en *Proc. of the 1998 IEEE Internat. Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Bélgica, Mayo 1998, pp. 1244–1249.
- [24] L. Zhang and B.K. Ghosh, “Geometric feature based 2 1/2d map building and planning with laser, sonar and tactile sensors.” en *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
- [25] A.C. Schultz, W. Adams, B. Yamauchi, and M. Jones, “Unifying exploration, localization, navigation and planning though a common representation.” en *Proc. of the 1999 IEEE Conference on Robotics and Automation*, 1999, pp. 2651–2658.
- [26] S. Thrun, “Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation.” *Artificial Intelligence*, vol. 99, no. 1, pp. 21–71, 1998.
- [27] A. Okabe, B. Boots, and K. Sugihara, “Spatial tessellations. Concepts and applications of Voronoi diagrams.” Wiley series in Probability and Mathematical Statistics, 1992.
- [28] J.C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [29] D. Blanco, B. L. Boada, L. Moreno, and M .A. Salichs, “Local mapping from on-line laser Voronoi extraction.” en *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
- [30] D. Blanco, B. L. Boada, and L. Moreno, “Localization by Voronoi Diagrams Correlation.” en *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, 2001.
- [31] B.L. Boada, D. Blanco, and L. Moreno, “Localization and modelling approach using topo-geometric maps.” en *Proc. of the Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS2002*, 2002.
- [32] D. Blanco, B. L. Boada, and L. Moreno, “Symbolic place recognition in Voronoi-based maps by using hidden Markov models.” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 39, pp. 173–197, 2004.
- [33] B.L. Boada, D. Blanco, C. Castejón, and L. Moreno, “A genetic solution for the SLAM problem.” en *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics ICAR2003.*, Coimbra, Portugal, 2003.

MANFRED: DEPENDABLE ANTHROPOMORPHIC SERVICE ROBOT TO OPERATE IN HUMAN ENVIRONMENTS

Abstract – The aim of the project is to develop a dependable anthropomorphic service robot to operate safely and robustly in environments where human manipulation capabilities are required. In order to operate safely a light weight robot of second generation has been developed to approach the arm manipulator to human arm characteristics. The characteristics for the new manipulator are: 18 kg, 6 DOF, 6 kg workload and 955 mm of reach. With this new manipulator mounted on a mobile base we have completed a mobile manipulator called MANFRED with an arm anthropomorphically located. The service robot proposed have a dynamical coordinated control to manage the 8 DOF of the system (2 DOF in the mobile base and 6 DOF in the arm) in order to achieve a good and robust force-position control that let the robot be able to manipulate objects and to collaborate with a person to transport an object. The sensor system includes a 3D laser scan, CCD cameras and a force-torque sensor at the arm. To obtain the operational robustness required, a new control architecture has been designed. The architecture uses Voronoi Diagrams (local and global) as topo-geometric models of the environment that can be used in different functionalities of the system: planning, navigation, mapping and localization. The architecture requires to graduate precisely the reactivity level in order to avoid unstabilities at the trajectories coordinate control of the base-arm system. Besides, the architecture has been designed to detect and recover fails at different levels of the system: planning, navigation, mapping, localization, perception and manipulation.