

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

PRESENTE Y FUTURO DE LOS ROBOTS ASISTENCIALES:  
DESAFÍOS TECNOCIENTÍFICOS Y ÉTICOS

DISCURSO DE LA ACADÉMICA ELECTA

EXCMA. SRA. D<sup>a</sup>. CARME TORRAS GENÍS

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA

EL DÍA 20 DE FEBRERO DE 2024

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. PERE BRUNET CROSA



MADRID MMXXIV

PRESENTE Y FUTURO DE LOS ROBOTS ASISTENCIALES:  
DESAFÍOS TECNOCIENTÍFICOS Y ÉTICOS



REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

PRESENTE Y FUTURO DE LOS ROBOTS ASISTENCIALES:  
DESAFÍOS TECNOCIENTÍFICOS Y ÉTICOS

DISCURSO DE LA ACADÉMICA ELECTA

EXCMA. SRA. D<sup>a</sup>. CARME TORRAS GENÍS

LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA  
EL DÍA 20 DE FEBRERO DE 2024

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. PERE BRUNET CROSA



MADRID MMXXIV

Obra producida en el ámbito de la subvención  
concedida a la Real Academia de Ingeniería  
por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Editado por la Real Academia de Ingeniería  
© 2024, Real Academia de Ingeniería  
© 2024 del texto, Carme Torras Genís  
ISBN: 978-84-95662-95-8  
Depósito legal: M-4065-2024  
Impreso en España

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS .....	11
2.1. Precursores de los robots asistenciales .....	12
2.2. Primeros robots manipuladores .....	14
2.3. De los robots industriales a los asistentes robóticos .....	17
3. DESAFÍOS TECNOCIENTÍFICOS DE LA ROBÓTICA ASISTENCIAL .....	18
4. INVESTIGACIÓN QUE ABORDA ESTOS DESAFÍOS .....	20
4.1. Facilidad de instrucción por personas sin experiencia tecnológica .....	22
4.2. Personalización según las preferencias y limitaciones de los usuarios ...	28
4.3. Seguridad en la interacción con personas .....	33
4.4. Percepción y manipulación de objetos deformables .....	35
4.5. Colaboración con el usuario en la realización de tareas .....	44
4.6. Capacidad de adaptación y aprendizaje .....	46
5. CO-DISEÑO Y TRANSFERENCIA .....	49
6. DESPLIEGUE ÉTICO: REGULACIÓN Y FORMACIÓN .....	54
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS .....	59
REFERENCIAS .....	62



Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería,  
Excelentísimas Sras. Académicas y Sres. Académicos,  
Señoras y señores, familia, amigas y amigos.

Agradezco vuestra presencia y acompañamiento en este solemne Acto que recordaré siempre. Gracias a los Académicos Avelino Corma, Josefina Gómez Mendoza, José Antonio Martín Pereda y María Vallet, que me habéis honrado presentando mi candidatura, a Pere Brunet y Nuria Oliver que me animaron repetidamente a formar parte de esta ilustre institución, y a todos los que, con vuestro voto, lo habéis hecho posible.

Es un gran honor asimismo recibir la medalla XXIX, que perteneció al insigne Académico Don Adriano García-Loygorri y Ruiz, Doctor Ingeniero de Minas y Catedrático en el Departamento de Ingeniería Geológica de la Universidad Politécnica de Madrid. He tenido el placer de ver el vídeo de la entrevista que le realizó Manuel Seara Valero para esta Real Academia dentro del ciclo “Charlas con... Grandes Figuras de la Ingeniería”, donde queda patente su incansable entrega a la profesión, a la cual dedicó por lo menos cuatro vidas: gran docente, reconocido científico, impulsor de empresas, y generoso en la asunción de responsabilidades en administraciones públicas. Aunque pudiera parecer que nuestras especialidades son muy dispares, dos aspectos nos vinculan. A finales de los noventa participé en el proyecto “PARALIN: *Parallel Computing Modelling for Industrial Problems*”, dirigido por el también Académico Don Mateo Valero, en que participaba el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica de Chile. En una de las reuniones del proyecto, tuve la inolvidable experiencia de bajar a la mina de El Teniente, la mina subterránea más grande del mundo, aunque no es de carbón, la es-



pecialidad de Don Adriano, sino de cobre. El segundo vínculo deriva de mi admiración por las personas polifacéticas como él, a quienes siempre he intentado emular.

Si en los inicios de mi carrera investigadora hubiera podido trasladarme por un instante a hoy y aquí, y participar de lo que está sucediendo, me hubiera sentido en un sueño que no me habría creído. De ese período inicial quiero agradecer la formación y el apoyo recibido del profesor Michael A. Arbib, que me abrió las puertas no solo de su laboratorio en la Universidad de Massachusetts, sino también al fascinante mundo de la investigación en la frontera de la Informática y las Neurociencias. Mi más sentido agradecimiento al Académico Gabriel Ferraté y al profesor Luis Basañez quienes, a mi vuelta de EEUU, me dieron la oportunidad de trabajar en Robótica e Inteligencia Artificial en el Instituto de Cibernética, y a los profesores Josep Amat, Pere Brunet y Rafael Huber, por la magnífica colaboración en el llamado ‘grupo de los cuatro (IRI-4)’, que en 1995 condujo a la creación y posterior consolidación del Instituto de Robótica e Informática Industrial, CSIC-UPC. Fruto de aquellos inicios fue la escritura conjunta del libro “Robótica Industrial” [1], pionero en la materia y que 38 años después de su publicación todavía es citado como referencia.

Quiero destacar lo mucho que he aprendido de mis exdoctorandos, en especial de los doctores Guillem Alenyà, Federico Thomas y Adrià Colomé, mis coautores más frecuentes, así como el apoyo recibido de Maria Alberich, Júlia Borràs, PabLo Jiménez y Sergi Foix a lo largo de tantos años, y de todos y cada uno de los integrantes del grupo de Percepción y Manipulación Robotizada, que tengo el privilegio de coordinar.

A los presidentes del CSIC durante los últimos cuarenta años agradezco que hayan luchado por mantener en pie este gran organismo de investigación en tiempos difíciles, y en particular a Rafael Rodrigo y a los miembros de la Comisión de Área que él presidió donde intentamos realizar cambios ambiciosos como la introducción de comisiones de evaluación internacionales. También debo a los sucesivos directores del instituto, Alberto Sanfeliu y Juan Andrade entre los no citados más arriba, que hayan creado el ambiente propicio para que pudiera centrarme en la investigación, y al personal de administración y servicios, que día a día bregan con la burocracia para simplificar el trabajo. A todos ellos, a los compañeros pasados y presentes,

y a los numerosos investigadores –nacionales e internacionales– con los que he colaborado y seguiré colaborando, ¡muchas gracias!

Y no doy las gracias a mi familia y a los amigos más cercanos porque sería como dármelas a mí misma, ya que sois parte de mí.

A continuación haré una breve introducción a la robótica asistencial y sus antecedentes históricos, para seguidamente exponer los retos tecnocientíficos que plantea y cómo están siendo abordados por la comunidad investigadora, así como las implicaciones sociales y éticas que se derivan.

## 1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de la población es un hecho incontrovertible y supone una carga creciente para el sistema de salud y para las familias. Si no se pone remedio, la situación puede convertirse en insostenible, puesto que el personal sanitario y de asistencia será insuficiente para atender a esta gran demanda, lo cual perjudicará especialmente a los más desfavorecidos. Implementar soluciones que disminuyan esta carga aumentando la calidad de vida y la autonomía de las personas mayores y con limitaciones físicas o cognitivas es una necesidad urgente. Hay dos vías de solución: la prevención, para que el envejecimiento sea lo más saludable posible, y la ayuda a los cuidadores, liberándolos de tareas rutinarias con poco valor humano añadido. La tecnología puede contribuir mucho a ambas vías.

En particular, la robótica asistencial se señala como una tecnología decisiva, ya que es un campo en rápido crecimiento destinado a ayudar a los cuidadores en hospitales, centros de rehabilitación y residencias de ancianos, así como a empoderar a las personas con movilidad reducida en el hogar para que puedan vivir de manera autónoma. Este es un ámbito altamente interdisciplinar, que requiere aunar no solo conocimientos de varias áreas tecno-científicas, sino también de ciencias sociales y humanidades. En el despliegue de esta tecnología, el co-diseño y la colaboración de todos los actores intervinientes en el sector de la asistencia y los cuidados es particularmente importante, debido a la gran diversidad de condicionantes, tanto tecnológicos como éticos, a que está sujeta.

La mayoría de las tareas que los robots asistenciales deben realizar (por ejemplo, ayudar a los usuarios a vestirse y alimentarse, o

guiarlos en sus ejercicios de rehabilitación física o cognitiva) requieren gran destreza manipulativa, que los cuidadores tienen que poder enseñarles de manera fácil, por demostración o guiado. Además, los movimientos de dichos robots han de ser intrínsecamente seguros para las personas, muy adaptables y personalizables, así como permitir el manejo de materiales deformables como la ropa. Estos son importantes desafíos en que está centrada la investigación actual [2], más arduos que el manejo de piezas rígidas según secuencias pre-programadas de movimientos que realizan los robots industriales en las cadenas de fabricación.

Riek [3] proporciona una panorámica general de los entornos en que se producen los cuidados y de los agentes involucrados en el desarrollo de la robótica asistencial, así como ejemplos que contextualizan su relación con la investigación. No existe una solución única para todos: cada persona, tarea y entorno de atención son diferentes y requieren que los robots puedan aprender y adaptarse de manera eficaz y segura. Construir un modelo del paciente (su grado de movilidad y preferencias) para personalizar las habilidades del robot, así como captar la intención del usuario en cada situación, son objeto de investigación puntera en la intersección de la robótica, la visión por computador y la inteligencia artificial. Un reto compartido con otros tipos de robots es la necesidad de “comprender” semánticamente las situaciones, en lugar de simplemente reaccionar ante ellas en una mera asociación percepción-acción.

También se están llevando a cabo investigaciones de vanguardia sobre la integración de robots asistenciales e inteligencia ambiental (es decir, entornos sensorizados) y bases de datos sanitarias, lo que ha llevado al establecimiento de laboratorios de vida asistida en varias universidades europeas, como el Bristol Robotics Lab [4]. En la misma línea, la comunidad de investigación en robótica, junto con varias administraciones, ha promovido iniciativas para el desarrollo de tecnología asistencial. A modo de ejemplo, podemos citar Geriatrics [5], una acción impulsada por la Universidad Técnica de Múnich y la región de Baviera, que pretende apoyar a las personas mayores para afrontar la vida cotidiana solas en casa, en situaciones de reposo en cama, durante las visitas al médico, en tareas de rehabilitación y en la higiene diaria. Asimismo, concursos de robótica como RobotCup@Home y la Liga Europea de Robótica en la modalidad de robots de servicios, patrocinados por euRobotics, están fa-

voreciendo el desarrollo público de la robótica asistencial. Esta combinación de robots asistenciales, inteligencia artificial e Internet de las cosas ofrece inmensas posibilidades para mejorar la atención médica y la asistencia en las actividades de la vida diaria en los próximos años.

A menudo se dice que estas nuevas tecnologías de la información representan un paso más en la transformación social que comenzó con las revoluciones agraria e industrial. Es cierto, pero hay una diferencia cualitativa: ya no se trata solo de automatizar el trabajo pesado y repetitivo en los campos y en las fábricas, o de que los electrodomésticos brinden a las personas tiempo libre para disfrutarlo de forma más creativa. La diferencia radica en el hecho de que estas tecnologías digitales están diseñadas para interactuar con las personas en sus entornos cotidianos, lo que no solo impone nuevos requerimientos técnicos como los antes mencionados, sino que también tiene importantes implicaciones éticas y sociales. Muchas de ellas derivan del conflicto entre la toma de decisiones automática y la preservación de la libertad y la dignidad humanas. Gobiernos, instituciones y asociaciones profesionales están desarrollando normativas éticas y estándares de seguridad, y diversas iniciativas de educación ética incluyen contenidos sobre interacción persona-robot y dignidad humana en contextos asistenciales.

## 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El diccionario de la Real Academia Española define ‘ingenio’ como la facultad del ser humano para discurrir o inventar con prontitud y facilidad; e ‘imaginación’ como la facultad del alma que representa las imágenes de las cosas reales o ideales. Podríamos decir, pues, que el ingenio nos permite materializar los productos de nuestra imaginación, que a su vez recibe inspiración de dicha materialización para idear nuevas imágenes. El vínculo entre ingeniería e imaginación es de este modo bidireccional: se inspiran mutuamente. Por un lado, el diseño y la creación de artefactos técnicos siempre comienzan con actos deliberados de imaginación, en los que se conciben formas diferentes de hacer algo, nuevas prácticas o metas que hasta el momento eran impensables. Por el otro, las tecnologías disponibles en una sociedad modelan y condicionan en gran medida los límites de lo imaginable [6].

Este es el fructífero bucle de retroalimentación que ha impulsado el avance científico y tecnológico a lo largo de la historia humana y que, como mostraremos en esta sección, resulta particularmente diáfano en el caso de los asistentes robóticos, en que la fantasía de crear humanos artificiales ha propiciado un desarrollo tecnológico, que a su vez ha posibilitado acercarse más y más a la realización de dicha fantasía.

### 2.1. Precursores de los robots asistenciales

La fascinación por los cuerpos y las mentes artificiales, tan antigua como la capacidad de fabulación humana, se ve reflejada en casi todas las culturas y épocas de una u otra forma. Por ejemplo, en la cultura egipcia ya encontramos autómatas rudimentarios que utilizan la fuerza del agua para mover partes de estatuas y hasta una paloma mecánica capaz de levantar el vuelo propulsada por chorros de aire. Los autómatas fueron evolucionando a la par que el desarrollo tecnocientífico, hasta alcanzar hitos tan célebres como el Pato del relojero francés Jacques de Vaucanson, que constaba de más de 400 partes móviles y batía las alas, comía y realizaba la digestión imitando el comportamiento natural del ave.

Centrándonos en los autómatas que pueden considerarse precursores de los asistentes robóticos, en Japón, a principios del período Edo, proliferaron los Karakuri, unas delicadas figuras de madera con mecanismos que les daban movilidad para sorprender, entretener y servir el té a los invitados (Figura 1, izquierda). También en Europa, con las ideas filosóficas de la Ilustración y gracias a los avances en relojería, los autómatas cobraron gran auge. En el siglo XVIII, además del mencionado Pato de Vaucanson, tuvo gran resonancia el Turco jugador de ajedrez del inventor húngaro Wolfgang von Kempelen, que movía las piezas con su brazo extensible y ganaba la mayoría de partidas contra jugadores ilustres (Figura 1, derecha). Ambos ingenios compartían un truco: un compartimento oculto, donde entraba grano y salía excremento, en el caso del pato, y donde se escondía un enano experto en ajedrez, en el caso del turco.

En la misma época, el suizo Pierre Jaquet-Droz construyó tres autómatas muy complejos sin recurrir a ningún engaño: Pianista, Dibujante y Escritor. El mecanismo de este último tenía más de 6.000 piezas y era capaz de escribir textos de hasta 40 palabras utilizando

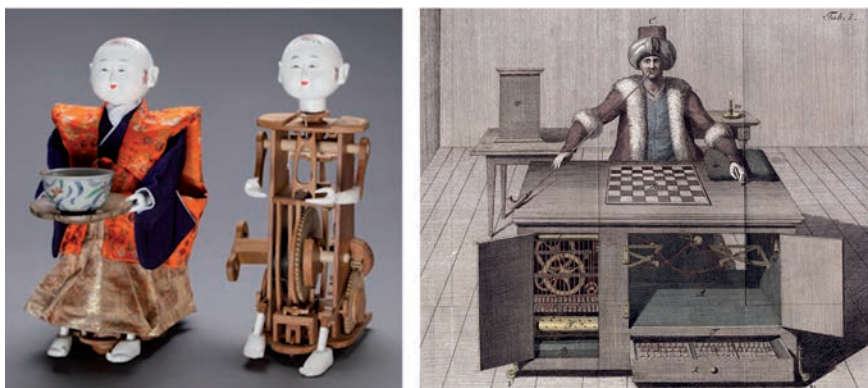


Figura 1. Karakuri (izquierda) y El Turco (derecha).



Figura 2. El Escritor (izquierda) y Euphonia (derecha).

la pluma, que mojaba en el tintero y seguía con la mirada mientras escribía (Figura 2, izquierda). Ya en el siglo XIX, el inventor austriaco Joseph Faber construyó, también sin engaño, el autómeta parlante Euphonia (Figura 2, derecha). Pulsando las teclas del piano que llevaba incorporado, además de producirse sonidos, se hinchaban unos fuelles que hacían que la boca mecánica se abriera y la lengua y los órganos vocales se movieran. Euphonia era capaz de producir frases en inglés, francés y alemán.

No puedo dejar de mencionar aquí el trabajo pionero de un ingeniero español, inventor polifacético como pocos, a quien se ha lle-





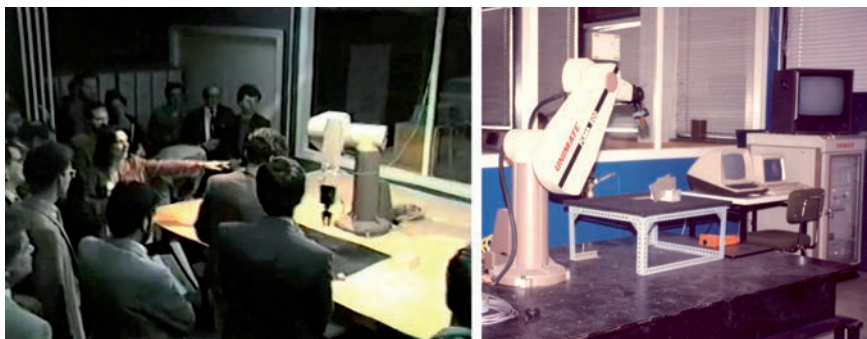
**Figura 3.** Máquina algébrica (izquierda) y autómata ajedrecista (derecha).  
Crédito: Museo Leonardo Torres Quevedo, Universidad Politécnica de Madrid.

gado a señalar como el precursor de la robótica: Don Leonardo Torres Quevedo. Miembro numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, se le conoce sobre todo por sus diseños de intrincados mecanismos, como la máquina algébrica [7] y el autómata ajedrecista (Figura 3), aunque sus inventos fueron muchos y muy variados, incluyendo teleféricos, dirigibles, transbordadores, aparatos de radiocontrol, e incluso instrumentos pedagógicos, con patentes de máquinas de escribir, un puntero proyectable y un proyector didáctico.

De forma similar a los autómatas físicos, las réplicas humanoides irrumpieron en obras de ficción especulativa del XIX, como “El hombre de la arena” de E.T.A. Hoffmann o “Frankenstein” de Mary Shelley, suscitando emociones contrapuestas: enamoramiento, en la primera, y repulsión, en la segunda. La palabra robot apareció por primera vez en 1920 en la obra teatral *RUR: Rossum’s Universal Robots*, del dramaturgo Karel Čapek. En checo, *robota* significa “trabajo forzado”, y la obra versa sobre la empresa RUR, que, para aligerar el trabajo a los obreros, produce androides que pueden hacerse pasar por humanos. Esta visión de los robots como sustitutos de los trabajadores en las cadenas de producción marcó fuertemente el desarrollo de la ingeniería robótica en sus inicios, a mediados del siglo XX.

## 2.2. Primeros robots manipuladores

En 1954 George Devol desarrolló en EEUU un manipulador hidráulico para el traslado de artículos pesados y, poco después, fundó con Joseph Engelberger la empresa Unimation para comercializarlo. Ge-



**Figura 4.** Robot PUMA 500 de Unimation en el Instituto de Cibernética en la UPC en 1982.

neral Motors incorporó estos brazos robóticos a sus líneas de producción donde realizaban tareas peligrosas para los operarios, como levantar grandes piezas de metal caliente para sumergirlas en líquidos refrigerantes. Se convirtió así en la empresa pionera en la utilización de robots industriales. Unos años después Kawasaki trajo a Japón la fabricación de este tipo de robots, en parte gracias a la compra de las licencias en Unimation. Para extender la robotización a la manipulación de productos menos pesados y otras tareas como el pintado de carrocerías, en Europa la empresa ABB desarrolló el primer robot eléctrico, el ASEA IRB, controlado por un microprocesador de Intel.

A estos primeros robots comerciales siguieron sucesivas generaciones de robots industriales –esencialmente brazos articulados programables para realizar tareas repetitivas– cada vez con mayores capacidades sensoriales y mejores prestaciones de movimiento. La robótica ha sido desde sus inicios un campo altamente interdisciplinar: si inicialmente fue fruto del esfuerzo conjunto de ingenieros mecánicos, eléctricos y de control, con el tiempo se le añadieron avances en otras disciplinas como la informática, el procesado de señal, la visión computacional, y la inteligencia artificial. Así, las secuencias de movimiento de los primeros manipuladores se registraban por guiado mediante un teclado de mando, pero pronto los brazos robot se hicieron más versátiles con la introducción de lenguajes de programación específicos para robots, y las demás disciplinas mencionadas tuvieron un papel destacado en la mejora de las capacidades de percepción, adaptación y planificación de tareas y movimientos de los robots.

El robot que inauguró el laboratorio de robótica del Instituto de Cibernética en la UPC fue un PUMA 500 de Unimation (Figura 4),



que ya incorporaba tanto la programación por guiado mediante un teclado de mando, como el lenguaje de programación VAL.

De la misma forma que los autómatas fueron precursores de los robots asistenciales, podríamos decir que los manipuladores industriales han sido pioneros en el desarrollo de capacidades de interacción con el entorno en sectores productivos y, posteriormente, de robots que colaboran con trabajadores humanos en la realización conjunta de determinadas tareas. Dicha evolución ha llevado los robots colaborativos a contextos asistenciales donde ayudan a los cuidadores en la asistencia a personas con limitaciones físicas o cognitivas.

Paralelamente, en el terreno literario se exploraban los aspectos íntimos y morales de unos robots humanoides alejados de los brazos industriales, no sólo por su forma, sino también por su ámbito de actuación, principalmente doméstico y social. Relatos de Isaac Asimov, Ray Bradbury o Philip K. Dick exploran temas como la falta de privacidad, el totalitarismo tecnológico y la manipulación, los sustitutos emocionales, la incidencia en el mercado laboral, la responsabilidad moral, la pérdida del control humano, o problemas existenciales relacionados con el libre albedrío, lo que nos hace humanos, las creencias y la inmortalidad. Toda esta casuística anticipa el desarrollo de una robótica que saldrá del ámbito industrial para entrar en entornos cotidianos y sociales, donde la relación persona-robot se convertirá en primordial y planteará multitud de preguntas éticas, psicológicas y sociales. En ese contexto, Isaac Asimov formuló sus famosas tres leyes de la robótica que han resultado premonitorias:

1. Un robot no puede dañar a un ser humano o, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes de los seres humanos, salvo si entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

Se anticipaban no solo las innovaciones científicas y tecnológicas, sino también las implicaciones éticas del despliegue actual de la robótica asistencial.

### 2.3. De los robots industriales a los asistentes robóticos

En las primeras décadas del siglo XXI, dada la creciente necesidad de mano de obra en el sector asistencial y de servicios –motivada en parte por el envejecimiento de la población en los países más desarrollados–, el campo potencial de aplicación de los robots se amplía: los robots ya no están limitados a las fábricas, sino que se extienden progresivamente a los dominios urbanos, sociales y de asistencia. De forma todavía incipiente los encontramos en entornos cotidianos: asistiendo a personas mayores o con discapacidades, haciendo de guías en ferias y museos, de recepcionistas o dependientes en centros comerciales, de camareros en restaurantes, actuando como compañeros de juegos para jóvenes y adultos, e incluso como niñeras y maestros de refuerzo en las aulas. A menudo tienen una apariencia humanoide, con una cabeza y un torso sobre ruedas, y los más sofisticados tienen uno o dos brazos, o incluso piernas.

Los robots van encontrando aplicación no solo en ámbitos que requieren gran interacción con humanos como la sanidad, la educación y el entretenimiento, sino también en áreas de servicios como la logística, la limpieza de grandes superficies y la monitorización ambiental [8]. También aumenta su repertorio de actividades en el ámbito laboral y ya no los encontramos solo en cadenas de producción en fábricas, sino que cada vez colaboran más con operarios humanos. Este desplazamiento de la robótica hacia el sector de servicios se alinea con el auge de las tecnologías para ciudades inteligentes (*smart cities*). Aplicaciones tan diversas como la recogida de basura, el reciclaje, la vigilancia y la seguridad vial, requieren combinar inteligencia ambiental con robots autónomos.

La expansión de la robótica hacia entornos frecuentados por las personas en su vida cotidiana y, en particular, hacia la actividad asistencial, ha hecho emerger la necesidad de dotar a los robots de capacidades cognitivas, que les permitan una adecuada comprensión de las situaciones, un correcto comportamiento en circunstancias no predefinidas, así como una amigable comunicación y adaptabilidad a la idiosincrasia de cada usuario. No es extraño, pues, que la investigación en robótica asistencial sea altamente interdisciplinar, combinando las diversas especialidades de ingeniería que aunaba ya la robótica industrial, con la inteligencia artificial a nivel técnico y también con las humanidades y las ciencias so-

ciales en lo relativo a la ética y las condiciones de su experimentación y despliegue.

Este giro de la robótica industrial hacia la robótica social plantea una serie de nuevos desafíos para la investigación tecnocientífica, que serán abordados en el siguiente apartado.

### 3. DESAFÍOS TECNOCIENTÍFICOS DE LA ROBÓTICA ASISTENCIAL

En relación a los robots industriales, los robots asistenciales plantean nuevos retos para la investigación [9-13]. Dado que actúan en entornos de la vida cotidiana donde deben interactuar con personas en gran cercanía e incluso a veces en contacto con ellas, estos robots deben ser:

- *Fáciles de instruir por personas sin experiencia tecnológica.* En el contexto asistencial, deberá ser un cuidador o un familiar del usuario final quien adapte las trayectorias o los comportamientos preprogramados de fábrica en el robot a una tarea concreta. Por ejemplo, para enseñarles tareas de manipulación, se están desarrollando técnicas de aprendizaje por demostración (p.e., mediante guiado cinestésico) o por imitación (p.e., vistiendo la persona sensores de movimiento). Este es un tema al que nuestro grupo ha dedicado mucha atención y para el que se han desarrollado algoritmos tanto de tipo simbólico como subsimbólico, que serán descritos en la Sección 4.1.
- *Personalizables según las preferencias y limitaciones del usuario.* Esto requiere la construcción de un modelo de la persona a partir de sus datos y diseñar algoritmos que permitan configurar los comportamientos del robot atendiendo a los gustos y capacidades del usuario. Entre las preferencias merecen especial atención las de interacción, tanto física como comunicativa. En la Sección 4.2 se ejemplificarán algunas de las técnicas de personalización, tanto de tipo cognitivo como de ajuste de los movimientos del robot, desarrollados en los proyectos SOCRATES e I-DRESS, respectivamente.

- *Intrínsecamente seguros para las personas*, tanto en lo referente a datos y software, como a la prevención de cualquier daño físico por parte del robot. A diferencia de los entornos industriales, no es posible enjaular a los robots en espacios sensorizados donde, si alguien entra inadvertidamente, todo se detiene, por eso los procedimientos de seguridad deben estar en el propio controlador del robot. Se utilizan distintos niveles de seguridad, desde la detección y evitación de colisiones utilizando la información proveniente de cámaras y sensores de profundidad, hasta la interacción física con las personas basada en las señales provenientes de los sensores propioceptivos, de fuerza y táctiles. Dicha interacción puede tener por objetivo el comportamiento acomodaticio del robot o bien obedecer funciones comunicativas y de guía. Cuando hay contacto, se requiere un control de fuerza basado en un modelo cuidadoso de la dinámica del robot, que a menudo se adquiere online mediante técnicas de aprendizaje por refuerzo. Ejemplos de los enfoques utilizados en tareas asistenciales, como la ayuda a vestirse, serán mostrados en la Sección 4.3.
  
- *Capaces de percibir y manipular objetos deformables*, tales como ropa, cables, líquidos o las propias personas. Es un reto formidable, puesto que estos objetos tienen unos espacios de estados mucho más complejos que las seis variables de posición y orientación que caracterizan el estado de los objetos rígidos habituales en las líneas robotizadas de fabricación. Las técnicas geométricas de visión desarrolladas para objetos rígidos no son escalables a espacios de deformación de dimensión potencialmente infinita, lo que ha propiciado que se recurra a técnicas de aprendizaje para encontrar las características visuales relevantes para realizar una tarea sin tener que determinar de forma precisa la forma que ha adoptado el objeto. En la Sección 4.4 se expondrán algunas de las técnicas para percibir y manipular ropa desarrolladas en los proyectos I-DRESS, CLOTHILDE y SoftEnable.
  
- *Preparados para colaborar con cuidadores y pacientes*, tanto en ámbitos sociosanitarios como domésticos. El tema de la interacción persona-robot cobra especial relevancia en ese contexto. A menudo se requiere la integración de información multimodal, es

decir, de voz, texto, imagen, gestos, posturas, contacto y/o fuerzas captadas mediante sensores que pueden no corresponderse exactamente con las modalidades de sensación humanas (por ejemplo, sensores de profundidad). Centrándonos en la información visual, se han desarrollado algoritmos generativos y discriminativos para la determinación de la postura humana y también para el reconocimiento y detección del estado de objetos. En robótica social, se trabaja sobre todo en la fusión de instrucciones verbales y visuales, mientras que en robótica de manipulación se focaliza especialmente en fusionar datos de visión y fuerza, tal como se mostrará en la Sección 4.5.

- *Dotados de una gran capacidad de aprendizaje y adaptabilidad.* Es probablemente la competencia esencial que deben tener los robots que realizan labores colaborativas con personas, ya que les permitirá generalizar de una tarea a otra, ser tolerantes a percepciones y acciones imprecisas, desarrollarse adecuadamente en entornos no predefinidos y dinámicos, y mejorar con la experiencia. Como se explicará en la Sección 4.6, esta capacidad es abordada a varios niveles, desde la adaptación a cambios en la cinemática del robot mediante algoritmos de aproximación de funciones paramétricas utilizando aprendizaje por refuerzo, hasta la planificación de tareas y transferencia de conocimiento mediante técnicas de aprendizaje simbólico.

Numerosos grupos de investigación están llevando a cabo proyectos de robótica asistencial en universidades y centros de investigación de todo el mundo, entre los cuales el CSIC y la mayoría de universidades españolas. En el siguiente apartado mostraré las principales líneas de investigación mediante las que se están abordando los desafíos mencionados, ilustrándolas con resultados de algunos de los proyectos europeos en que nuestro grupo ha participado o está participando en la actualidad.

#### 4. INVESTIGACIÓN QUE ABORDA ESTOS DESAFÍOS

En el grupo de Percepción y Manipulación Robotizada (Figura 5) del Instituto de Robótica e Informática Industrial, CSIC-UPC, hemos intentado dar respuesta a los desafíos mencionados durante el



**Figura 5.** El Grupo de Percepción y Manipulación Robotizada del IRI, CSIC-UPC, está formado en la actualidad por 12 investigadores permanentes, 6 postdocs, 25 doctorandos, 12 estudiantes de máster, 6 técnicos, y algunos estudiantes realizando su trabajo de fin de grado. Sirva esta foto como reconocimiento a la gran labor de investigación que han realizado, están realizando y espero que sigamos realizando en los próximos años.

desarrollo de prototipos de robots para ayudar a vestir, poner zapatos, abrir puertas y cajones, dar de comer, servir líquidos, y proporcionar entrenamiento cognitivo, en el marco de los siguientes proyectos europeos recientes:

- CLOTHILDE: *CLOTH manipulation Learning from DEMonstration*, una ERC Advanced Grant cuyo sexto año justo acaba de concluir y que tenía por objetivo la manipulación robotizada de ropa, combinando técnicas de topología computacional con aprendizaje automático.
- SOCRATES: *Social cognitive robotics in the European society*, ya finalizado en el marco del Programa Horizon 2020 y dedicado a la robótica asistencial para personas mayores con deficiencias cognitivas leves.
- I-DRESS: *Assistive interactive robotic system for support in dressing*, un proyecto Chist-Era también finalizado y centrado en dotar a un robot bimanual de las habilidades de percepción y manipulación necesarias para ayudar a vestirse a personas mayores y con movilidad reducida.

- SoftEnable: *Towards soft fixture-based manipulation primitives enabling safe robotic manipulation in hazardous healthcare and food handling applications*, un proyecto del Programa Horizon Europe, que se encuentra en su segundo año de ejecución y cuyo objetivo es la manipulación de objetos deformables; en concreto, textiles en un entorno hospitalario, y carne y pescado en la venta de alimentos frescos por internet.

La contribución de nuestro grupo a estos proyectos se sitúa en la frontera de la Robótica y la Inteligencia Artificial, ya que nuestra investigación consiste en desarrollar e integrar algoritmos de visión por computador, fusión de información multimodal, aprendizaje automático y planificación de la manipulación, a fin de obtener sistemas robotizados capaces de realizar las tareas encomendadas en entornos humanos.

En sucesivos subapartados describiré los enfoques de investigación con que se han abordado los seis desafíos mencionados en la sección anterior, ilustrados con ejemplos tomados de los proyectos arriba listados, que han sido desarrollados en el Laboratorio de Percepción y Manipulación Robotizada (Figura 6). Dicho laboratorio alberga un simulacro de piso de vida asistida de 35 m<sup>2</sup> con dos habitaciones: un dormitorio y una sala de estar, que también hace la función de comedor provisto de una mini cocina, donde los prototipos de robots asistenciales son testeados antes de ser sometidos a experimentación con usuarios finales en programas piloto realizados conjuntamente con entidades externas.

#### **4.1. Facilidad de instrucción por personas sin experiencia tecnológica**

Para que personas no expertas en programación puedan instruir a los robots, es necesario proporcionarles formas muy naturales de hacerlo. El aprendizaje mediante demostraciones [14] ha emergido como una poderosa herramienta que permite a los robots adquirir las habilidades deseadas a partir de demostraciones realizadas por humanos. Las primeras investigaciones utilizaban cámaras para captar las demostraciones con las que se enseñaba a los robots una secuencia de coger y colocar piezas en una determinada disposición, mientras que actualmente la atención se centra en la realización de tareas dinámicas basadas en fuerza. De hecho, las fuerzas juegan un papel





**Figura 6.** Simulacro de apartamento de vida asistida dentro del Laboratorio de Percepción y Manipulación Robotizada del IRI, CSIC-UPC.

importante en muchas habilidades que los robots asistenciales deben tener, como abrir puertas y recipientes, servir líquidos, cortar ciertos alimentos, y hacer camas, por poner algunos ejemplos.

La instrucción más sencilla de realizar por demostración es la de trayectorias, ya sea de desplazamiento del robot o de sus brazos, y se puede implementar por imitación de una persona equipada con sensores de movimiento [15], o bien mediante guiado cinestésico, en particular de los brazos del robot [16]. La Figura 7 muestra ejemplos de ambos casos. En el primer caso se requiere realizar la transformación de la cinemática de la persona a la del robot y, en el segundo, puesto que los brazos del robot ofrecen cierta resistencia y la demostración puede ser deficiente, a menudo habrá que realizar un ajuste posterior mediante aprendizaje por refuerzo, como se describirá en la Sección 4.6.

En nuestro grupo se ha utilizado también guiado cinestésico y aprendizaje por demostración para instruir a un manipulador robótico a dar de comer [17]. El escenario utilizado se muestra en la Figura 8. Mediante guiado cinestésico se enseña al brazo robótico a coger comida con cuchara del plato naranja y a pincharlo con horquilla del plato azul y llevarlo a la boca del maniquí. Debido a que el robot aprende los movimientos de forma contextualizada, en la



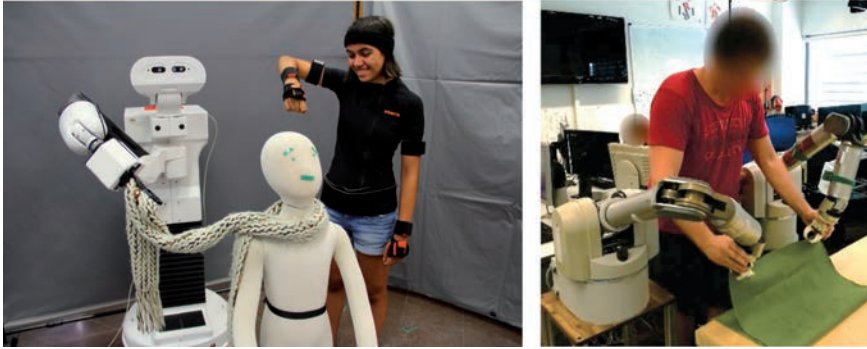


Figura 7. Instrucción por imitación (izquierda) y por guiado cinestésico (derecha).

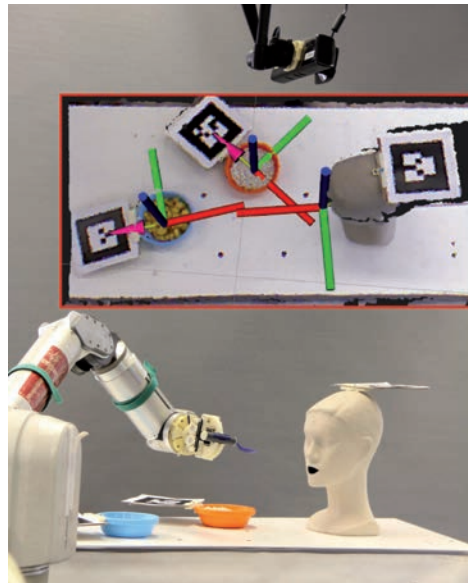


Figura 8. Escenario en el que se enseña al robot a dar de comer mediante guiado cinestésico y aprendizaje por demostración. En el recuadro rojo se muestra la imagen que capta la cámara cenital y la localización de los platos y boca del maniquí.

fase de ejecución, será capaz de generalizar correctamente para diferentes posiciones de los platos y del maniquí. Así pues, resulta muy fácil para cualquier persona enseñar esta habilidad al robot.

Las tareas que involucran fuerzas son de dos tipos: aquellas en que el movimiento del robot depende de la fuerza sensada, y aquellas en que el robot debe ejercer una fuerza que varía en distintas fases de la ejecución de la tarea.

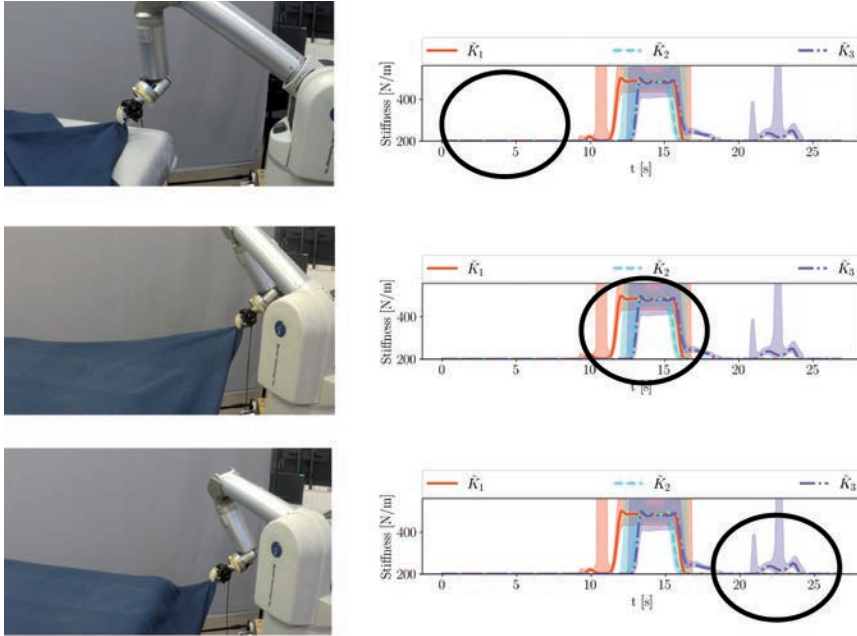
Una tarea del primer tipo es la de servir bebidas, en que el robot debe inclinar más la botella cuanto menos líquido contiene, esto es, cuanto menor es su peso. Se puede instruir esta tarea mediante de-



**Figura 9.** El robot HSR abre con éxito distintos tipos de puertas, sin conocer a priori su modelo cinemático [19].

mostraciones codificándolas por medio de un modelo oculto de *Markov* (*Hidden Markov Model – HMM*) e implementar la ejecución del robot por regresión sobre una combinación de Gaussianas (*Gaussian Mixture Regression*) que utiliza la información temporal del HMM. Esta información es necesaria para abordar tareas en que las percepciones de fuerza pueden ser ambiguas, por ejemplo, al sacar una pieza por el agujero de un contenedor, donde la misma fuerza puede ser detectada en el punto en que las trayectorias procedentes de distintos orígenes se cruzan. Resultados experimentales muestran que el robot es capaz de aprender y reproducir dos tareas de este tipo: dispensar píldoras y verter bebidas, con un rendimiento comparable al de la persona que realiza las demostraciones [18].

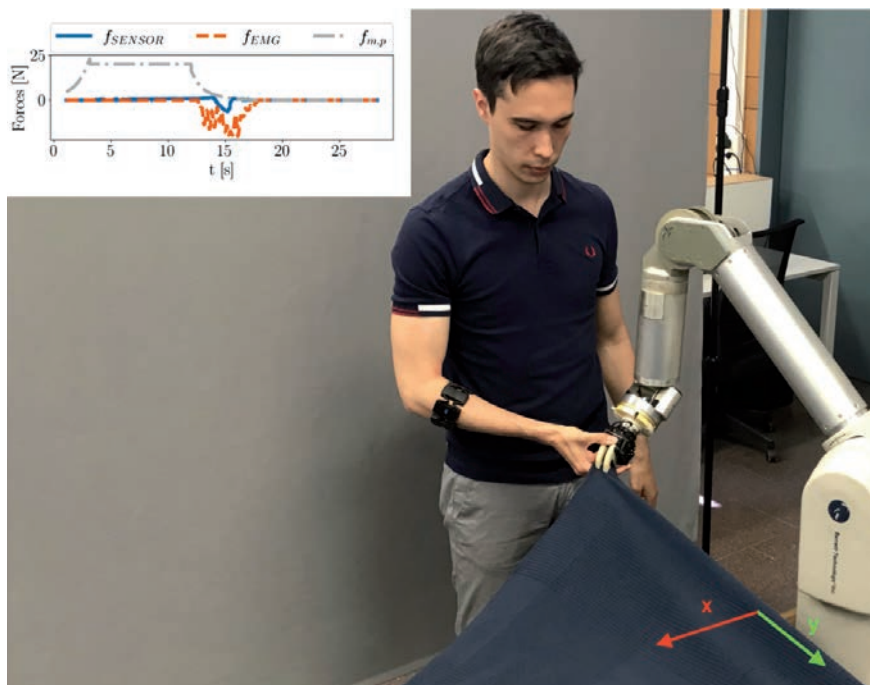
La capacidad de manejar objetos articulados, que ofrecen resistencia en determinadas direcciones y no en otras, es importante en la ayuda a personas con dificultades de movilidad. En un trabajo conjunto con la universidad de Texas en Austin [19] diseñamos un algoritmo que, fusionando una red neuronal convolucional con el procesamiento eficiente de nubes de puntos, estima en tiempo real la postura de agarre para múltiples manijas de puertas y cajones utilizando imágenes RGB-D. Un enfoque bayesiano permite al robot inferir el modelo cinemático del objeto articulado a partir de observaciones de su movimiento y aprender de experiencias previas o demostraciones humanas. Combinando estos elementos se consigue una operación eficiente de puertas y cajones, que ha sido incorporada y validada en el Human Support Robot (HSR) de Toyota (Figura 9).



**Figura 10.** Las tres fases de colocación de un cobertor en la esquina de un colchón: en la primera, no se requiere aplicar fuerza alguna; en la segunda, el robot tiene que mantenerse rígido en los tres grados de libertad, mientras que en la tercera fase solo debe aplicar fuerza en el eje vertical.

Un ejemplo de tarea en que el robot debe ejercer una fuerza que varía en distintas fases de su ejecución es la de hacer camas. En concreto, el perfil de rigidez del brazo robótico al colocar una esquina de una sábana o cobertor de cama consta de tres fases, como se muestra en la Figura 10.

Estos perfiles de rigidez variable en el tiempo pueden también ser enseñados al robot mediante aprendizaje por demostración. En concreto, se ha diseñado un algoritmo basado en la fuerza que, aprovechando la relación entre rigidez y error de seguimiento e involucrando la interacción humano-robot, permite inferir perfiles de rigidez [20]. Primero se muestra al robot un conjunto de demostraciones mediante guiado cinestésico. Luego, el robot ejecuta una referencia perturbada, obtenida de estas demostraciones mediante un proceso de regresión gaussiano, y el humano interviene si la perturbación hace que el manipulador se desvíe de su comportamiento esperado. La intervención humana se mide con un sensor electromiográfico en el brazo de la persona instructora y un sensor de



**Figura 11.** Aprendizaje de perfiles de rigidez variable mediante la interacción del instructor con el robot. La trayectoria de referencia sujeta a una fuerza perturbadora (curva gris en el gráfico) ejecutada por el robot es corregida por el instructor si se viola la especificación de la tarea. Las medidas de fuerza a lo largo del eje de la perturbación, obtenidas con una pulsera de electromiografía y con un sensor de fuerza, se muestran respectivamente en naranja y azul en el gráfico.

fuerza en el robot, y su combinación permite satisfacer también las restricciones físicas impuestas por el entorno (Figura 11).

Asimismo, es posible enseñar tareas no físicas, sino cognitivas, mediante demostraciones. Por ejemplo, en un entorno asistencial, el robot puede aprender de un profesional de salud mental (un terapeuta o cuidador) nuevos ejercicios cognitivos que luego pueden administrarse a pacientes con cierto deterioro [21]. Hemos implementado un sistema de este tipo que permite aprender las reglas de juegos consistentes en ordenar fichas sobre un tablero. El sistema no solo infiere reglas a partir de demostraciones, sino que acelera el aprendizaje mediante: 1) la explotación de ejemplos negativos; 2) la interacción proactiva con el instructor haciéndole preguntas sobre la legalidad de ciertos movimientos; y 3) permitiendo definir objetivos de aprendizaje además de acciones legales [22-23]. En la Figura 12 se muestran dos versiones del sistema, una en que el instructor re-



**Figura 12.** Dos versiones del sistema de instrucción mediante demostraciones de nuevos ejercicios cognitivos consistentes en ordenar fichas sobre un tablero.

cibe información de cómo avanza el aprendizaje de reglas en una pantalla, y otra en que el robot no solo proporciona realimentación, sino que adopta un rol activo haciendo preguntas sobre determinados movimientos de fichas.

#### 4.2. Personalización según las preferencias y limitaciones de los usuarios

Más allá de instruir al robot para que realice una tarea correctamente, en el ámbito asistencial cobra especial relevancia que la ejecución se adapte a las limitaciones y preferencias del usuario. La personalización, que es objeto de intensa investigación en la actualidad, suele realizarse construyendo un modelo del paciente (su grado de movilidad y deterioro cognitivo si lo hubiere) a partir de sus datos y refinándolo en sucesivas interacciones. En el caso de robots sociales, que no entran en contacto físico con las personas, basta tener en cuenta las capacidades cognitivas y las preferencias del usuario relativas a sus intereses y la forma de comunicarse. Cuando, por el contrario, el robot debe interactuar físicamente con la persona, es necesario tener en cuenta también otras preferencias de tipo físico, como distancias y velocidades de interacción, así como las limitaciones de movimiento que pueda tener el paciente.

En [24] se presenta una taxonomía jerárquica de preferencias utilizada para diseñar la interacción persona-robot (HRI, por sus siglas en inglés) en escenarios de asistencia en que el robot debe ayudar a pacientes que tienen dificultades para realizar las actividades de la vida diaria. La taxonomía no distingue entre preferencias y limitaciones del usuario (como cuestiones de movilidad), ya que estas úl-



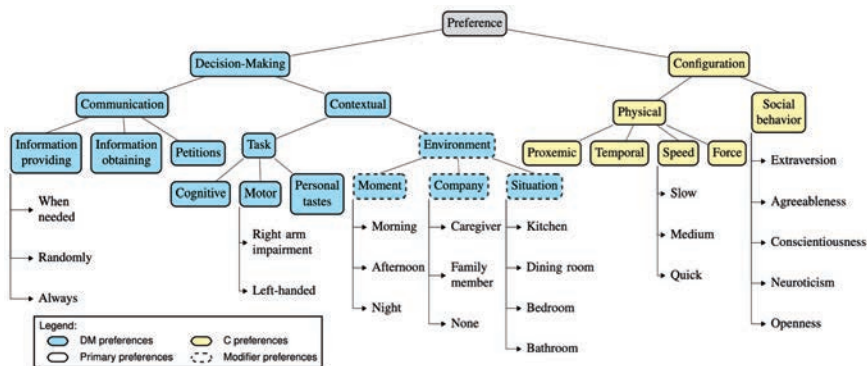


Figura 13. Taxonomía de preferencias para la interacción persona-robot en un contexto asistencial [24].

timas pueden expresarse como una preferencia. Por ejemplo, un usuario que no puede mover el brazo izquierdo “preferirá” no utilizar ese brazo.

Como puede observarse en la Figura 13, se distingue entre dos tipos de preferencias: las primarias y las modificadoras. Las primarias son preferencias directamente aplicables, mientras que las modificadoras condicionan la aplicabilidad de las primarias. La taxonomía divide también las preferencias en dos grupos: las de toma de decisiones y las de configuración. Las preferencias de toma de decisiones (DM, por sus siglas en inglés) ayudan al robot a elegir entre las diferentes acciones que puede ejecutar en un momento dado, siempre que todas conduzcan al objetivo asistencial final (rama izquierda de la Figura 13). Por su parte, las preferencias de configuración (C) (rama derecha de la Figura 13) se utilizan para ajustar los parámetros de las acciones de la secuencia elegida para resolver la tarea. Tanto las preferencias DM como las C se dividen en dos categorías, que a su vez se subdividen en tipos de preferencias más detallados.

Hay que mencionar la gran redundancia que se produce al instanciar la taxonomía para cada tarea específica. Por ejemplo, un usuario que prefiere que el robot se mueva lentamente mientras le calza un zapato probablemente preferirá que sea lento también a la hora de ponerle una chaqueta. Un usuario con movilidad reducida en el brazo derecho necesita asistencia especial para realizar cualquier actividad que involucre ese brazo. Para reducir dicha redundancia, las

preferencias se estructuran en dos niveles: global y específico. Las globales son preferencias genéricas del usuario y limitaciones personales aplicables a cualquier tarea, mientras que las específicas están relacionadas con determinadas actividades y solo se aplican en la ejecución de tareas específicas. Los dos niveles permiten evitar potenciales conflictos, ya que las preferencias específicas tienen prioridad sobre las globales, mientras que estas se utilizan por defecto evitando así la indefinición en ausencia de información específica.

Describiremos a continuación la utilización de preferencias en la interacción persona-robot en tres actividades de la vida diaria: calzar zapatos, ayudar a vestir y dar de comer.

Muchas personas mayores tienen dificultades para ponerse los zapatos y ganarían autonomía si un mecanismo les ayudara a hacerlo. Pero cada usuario tiene sus particularidades —necesidades, limitaciones, gustos— y el mecanismo debe poder adaptarse a ellas. Con ese objetivo, hemos propuesto un método basado en la planificación simbólica adaptativa de la secuencia de acciones (tanto de movimiento como de comunicación con el usuario) para personalizar la tarea de poner zapatos mediante un brazo robótico (Figura 14). Con un sistema de inferencia difusa (*fuzzy*), se construye un modelo de usuario a partir de las respuestas que da a unas simples preguntas y después se integra en el dominio de planificación. La adaptación persigue tanto el desempeño de la tarea como la satisfacción del usuario y se realiza mediante un sistema de penalizaciones variables que se aplican a las reglas del planificador. Los resultados muestran una rápida adaptación del robot, incluso cuando cambia el comportamiento del usuario o se ha partido de una inferencia incorrecta del modelo inicial del mismo [25].

Utilizando el mismo enfoque, en el proyecto I-DRESS se desarrolló una aplicación de poner una chaqueta de modo personalizado (Figura 15). Se contemplaron preferencias tanto físicas (p.e., velocidad del robot) como comunicativas (p.e., verbosidad), así como limitaciones de movilidad del usuario [26].

La personalización también se puede realizar a nivel subsimbólico para adaptar no ya una secuencia de acciones, sino la forma en que se ejecuta una de estas acciones, sea una trayectoria, un movimiento de la pinza, o las acciones de coger, arrastrar y soltar. Desarrollamos un método de este tipo para la tarea de dar de comer [27]. Suponiendo que, a la larga, los robots vendrán de fábrica con un repertorio de habilida-

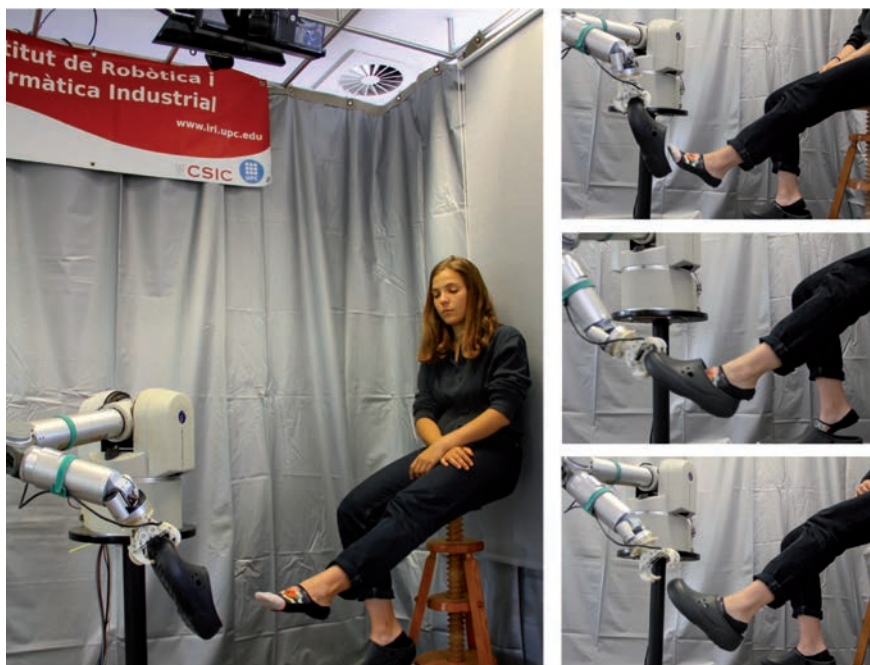


Figura 14. Un brazo robótico pone zapatos de forma personalizada, después de haber generado y refinado un modelo del usuario.

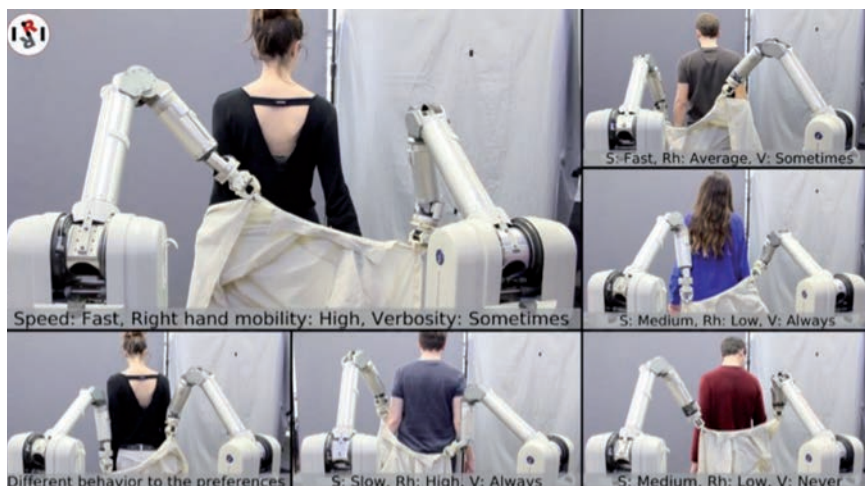
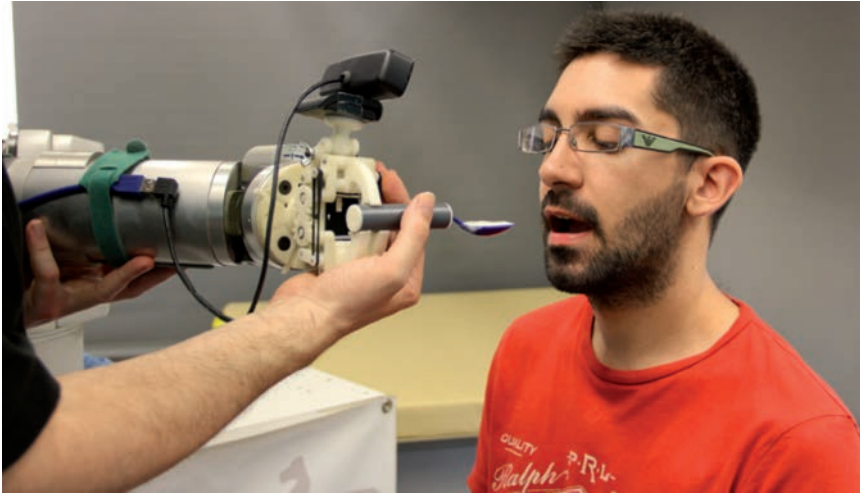


Figura 15. Personalización de la ayuda a vestir una chaqueta según las limitaciones de movilidad y preferencias de cada usuario.





**Figura 16.** Un asistente humano modifica la forma en que un brazo robótico da de comer para adaptarla a las preferencias y limitaciones de un usuario concreto [27].

des, el reto es conseguir que una persona sin formación técnica –por ejemplo, un cuidador– pueda adaptar estas habilidades a las necesidades y gustos de un usuario. Nuestro método está basado en aprendizaje por demostración y requiere que, durante la ejecución de la labor por parte del robot, el cuidador modifique la posición, velocidad y/o aceleración de la trayectoria en el sentido deseado (Figura 16). El movimiento y su varianza a lo largo del tiempo se codifica con una primitiva probabilística de movimiento (*probabilistic movement primitive – ProMP*) [28], que se ha demostrado adecuada para capturar los parámetros relevantes para una correcta realización de la tarea [29-30].

Se evaluó el uso de preferencias en un estudio experimental con 30 usuarios, que interactuaron con un prototipo de robot en las tres tareas de asistencia física arriba mencionadas: calzar zapatos, ayudar a colocarse una chaqueta, y dar de comer. Se aleatorizaron las actuaciones del robot en que se aplicaban o no las preferencias de cada usuario y el orden de ejecución de las tareas, en un diseño experimental que garantizaba la inexistencia de condicionantes que pudieran introducir sesgos en la percepción de los participantes. Los resultados cuantitativos del estudio se encuentran detallados en [26], y llevan a la conclusión que la mayoría de los usuarios captaron cuándo se estaban usando sus preferencias y coincidía con su mayor satisfacción con el desempeño del robot, pero incluso en el grupo que no acertaba

cuándo el robot estaba aplicando sus preferencias, la mayor satisfacción se producía cuando efectivamente las estaba usando.

En cuanto a la utilización de preferencias en tareas no físicas, sino cognitivas, en el marco del proyecto SOCRATES y en colaboración con la Fundación ACE, hemos personalizado la interacción con el robot en la aplicación de un test cognitivo [31]. El Syndrom Kurztest test (SKT) es utilizado en la práctica clínica para detectar, evaluar y cuantificar deficiencias cognitivas, y lo hemos adaptado para que pueda ser aplicado por un robot [32]. Se han propuesto dos circuitos de interacción. En primer lugar, el robot interactúa con el cuidador para fijar el objetivo del ejercicio y establecer el modelo inicial de deficiencias mentales y físicas del paciente. Esto configura el comportamiento del robot en base a las modalidades de interacción prefijadas para, después, en interacción con el paciente, adaptar sus acciones para motivarle y ayudarlo a completar el ejercicio. Los resultados experimentales muestran no solo que el robot es capaz de adaptarse a las variadas respuestas de los usuarios y proporcionarles soporte y asistencia en los distintos niveles de interacción, sino también que la interacción inicial con el cuidador proporciona una personalización más rápida y eficaz.

### **4.3. Seguridad en la interacción con personas**

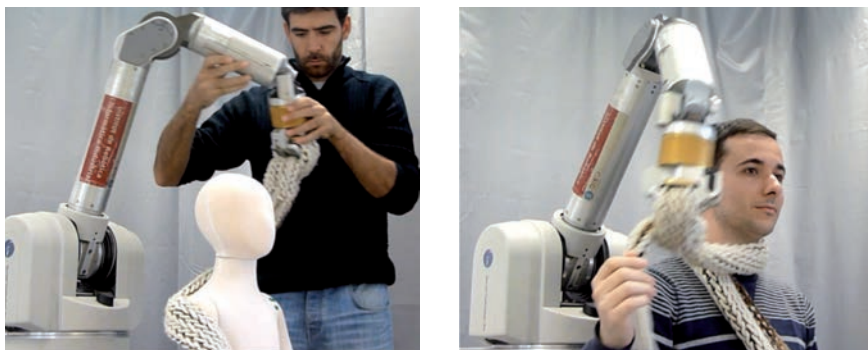
Los robots asistenciales deben operar cerca de personas o incluso en contacto físico con ellas, como en las actividades de la vida diaria descritas en el apartado precedente. Por tanto, la seguridad de las personas es un requerimiento sine qua non para tales robots. Se trata de diseñar estrategias de control de la interacción que permitan a los robots seguir, entender y predecir los movimientos humanos en tiempo real y reaccionar en consecuencia. A tal fin, se ha propuesto una arquitectura jerárquica de control estructurada en tres capas: para la colaboración activa, la coexistencia, y la seguridad [33]. En la capa superior, debe distinguirse entre una colisión accidental y un contacto intencionado de un usuario humano para instruir por guiado al robot o requerir su colaboración en la realización de una tarea conjunta. La coexistencia de humanos y robots en un mismo espacio requiere la monitorización del área de trabajo mediante sensores externos y métodos eficientes de prevención de colisiones basados en la información proporcionada por estos sen-

sores. Pese a estas medidas de control, pueden producirse contactos físicos inevitables en cualquier parte del cuerpo del robot, que deben ser detectados de forma fiable y desencadenar una reacción rápida del robot, preferiblemente basada solo en señales provenientes de los sensores propioceptivos.

En nuestro grupo desarrollamos una técnica para estimar las fuerzas externas ejercidas sobre un manipulador en movimiento que está basada solo en medidas propioceptivas, es decir, evitando el uso de sensores táctiles o de fuerza [34]. Esta técnica se ha utilizado conjuntamente con un controlador que tiene en cuenta las fuerzas de fricción para aprender, utilizando aprendizaje por reforzamiento, tareas críticas para la seguridad de las personas —como es ayudarlas a vestir— de manera que el robot se comporte dócilmente, pero sin dejar de seguir la trayectoria necesaria para desempeñar la tarea.

Programar un robot para que se comporte dócilmente requiere un equilibrio entre precisión y seguridad, ya que aumentar la precisión del robot (en general, con un término alto de compensación del error) hace que su movimiento sea más rígido y, por tanto, más peligroso para los seres humanos cercanos. Este equilibrio se logra mediante controladores de fuerza o impedancia basados en un modelo dinámico inverso del robot, que relaciona la posición, velocidad y aceleración con los pares que actúan sobre el robot. Sin embargo, la mayoría de métodos para construir un modelo de este tipo no tienen en cuenta la posibilidad de que haya histéresis en la fricción, como sucede en robots como el Whole Arm Manipulator (WAM) de Barrett Technologies de que disponemos en el Laboratorio de Percepción y Manipulación del IRI. Por esta razón, derivamos un modelo analítico de fricción para las siete articulaciones del robot, cuyos parámetros pueden ajustarse automáticamente para cada robot en particular [35]. Esto permite al robot seguir dócilmente trayectorias de referencia en todo el espacio de trabajo.

Los resultados experimentales demuestran que, utilizando este modelo dinámico que tiene en cuenta la fricción en el aprendizaje por refuerzo de los parámetros de las primitivas de movimiento (*dynamic movement primitives* – *DMP*), el robot es capaz de realizar tareas delicadas de ayuda a vestir, como poner una bufanda alrededor del cuello de una persona de forma segura, después de haberle enseñado cómo hacerlo mediante aprendizaje por demostración utilizando un maniquí (Figura 17).

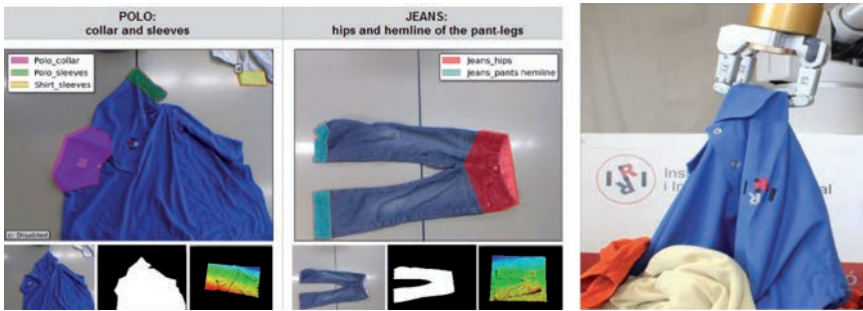


**Figura 17.** Utilización de un controlador seguro en tareas que requieren la interacción física del robot con una persona [35]. Izquierda: El maestro muestra cómo colocar una bufanda alrededor del cuello de un maniquí guiando físicamente el robot. Derecha: Después de optimizar el movimiento de manera autónoma mediante aprendizaje por refuerzo, el robot reproduce la mejor trayectoria encontrada e, incluso cuando es insistentemente perturbado por el usuario, muestra un comportamiento acomodaticio a la vez que persevera en la realización de la tarea.

#### 4.4. Percepción y manipulación de objetos deformables

En entornos asistenciales, las entidades que se perciben a menudo no son objetos rígidos, sino también cosas flexibles (por ejemplo, ropa), materiales deformables (por ejemplo, alimentos) o incluso seres animados (por ejemplo, animales o las propias personas). El estado de un objeto rígido está determinado por 6 parámetros (3 de posición y 3 de orientación), mientras que el movimiento de un objeto no rígido implica un cambio en su forma, que tiene lugar en un espacio de estados de dimensión potencialmente infinita. Este enorme salto dimensional hace que las técnicas de percepción geométrica desarrolladas para objetos rígidos sean difíciles de aplicar en este contexto. Por ejemplo, en el caso de las prendas de vestir, la extensión de estas técnicas requiere modelar la tela como una malla de elementos finitos que se deforma satisfaciendo ciertas restricciones, lo que conduce a un crecimiento exponencial del tiempo de cómputo de cualquier algoritmo con el número de nodos de la malla.

En [36] se repasan las técnicas de percepción más utilizadas para la manipulación de textiles en robótica asistencial, centradas en la visión, pero que en ocasiones involucran también tacto y fuerza. Debido a la difícil escalabilidad de los algoritmos de visión de objetos rígidos a deformables, la investigación en este campo se ha centrado en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático y, en parti-



**Figura 18.** Percepción y manipulación de ropa. Izquierda: dos elementos de la base de datos de prendas de vestir con las partes anotadas (arriba), así como las imágenes de color y profundidad junto con la plantilla para la substracción del fondo (abajo) [39]. Derecha: el robot coge un polo por el cuello para colgarlo.

cular, el aprendizaje profundo (*deep learning*) ha dominado la escena en los últimos años. En robótica, otra opción ha sido manipular objetos para facilitar su percepción. Esta estrategia ha sido la tendencia dominante en el manejo robótico de prendas [37-38], donde la ropa se agarra y se suelta repetidamente hasta conseguir una configuración que pueda reconocerse fácilmente con algoritmos de percepción simples.

Debido a que manipular un objeto para favorecer su percepción es muy lento, en nuestro grupo hemos explorado el enfoque alternativo de aplicar complejos algoritmos de visión por computador y aprendizaje automático para agarrar la prenda en el lugar correcto para realizar la tarea. Por ejemplo, a partir de una base de datos de imágenes RGB-D de prendas con partes anotadas (cuellos, puños, cinturas, dobladillos, etc.) como se muestra a la izquierda de la Figura 18, hemos desarrollado un método [39] que, durante una fase de entrenamiento, construye un código utilizando la técnica de aprendizaje *bag of words* y luego utiliza una *support vector machine* para clasificar las partes de la ropa según este código. En tiempo de ejecución se genera una distribución de probabilidad de donde se encuentra la parte deseada (por ejemplo, el cuello de una camiseta polo), y se determina la mejor forma de agarrarla para lograr una tarea (por ejemplo, colocarla en una percha, como se muestra a la derecha de la Figura 18).

Hasta ahora hemos abordado el reconocimiento de prendas de vestir y sus partes. La determinación de la configuración de la ropa es un problema mucho más complicado que requiere no sólo clasifi-

car sino determinar la forma, lo que por lo general se realiza emparejando puntos de la prenda en una pose de referencia con los de la configuración deformada actual. En [40] se propuso un descriptor invariante a deformaciones y cambios de iluminación (*Deformation and Light Invariant descriptor – DaLI*), que se demostró superior a los descriptores del estado del arte del momento, como SIFT y DAISY.

Dado que el aprendizaje profundo requiere disponer de una gran cantidad de datos etiquetados, una tendencia reciente es generarlos de forma sintética utilizando un simulador físico. En esta línea, hemos utilizado imágenes sintéticas y reales de prendas cogidas por un punto y por dos puntos para entrenar una jerarquía de tres redes neuronales convolucionales (CNN), que primero identifica la prenda, luego un punto por donde agarrarla y a continuación un segundo punto, lo que permitirá llevar la pieza a una configuración conocida [41]. Así, mediante una estrategia de búsqueda activa hemos mostrado que es posible coger una prenda de vestir directamente por unos puntos predefinidos, sin necesidad de recurrir a procesos repetitivos de agarrar y soltar hasta llegar a la configuración deseada.

Para que un robot pueda ayudar a personas a vestirse —una tarea en la que hemos trabajado en el marco de los proyectos europeos CLOTHILDE y I-DRESS— es necesario que perciba no sólo las prendas de vestir, sino también la postura de las personas, donde tienen la cabeza y las extremidades, y realizar su seguimiento. La representación más habitual de la figura humana es un esqueleto articulado [42], al que para esta aplicación hay que añadir el volumen de los alrededores. Esta caracterización volumétrica se ha realizado mediante descriptores 3D [43], obtenidos a partir de las nubes de puntos proporcionados por cámaras de profundidad [44].

La asistencia robótica para vestirse es un tema complejo de interacción persona-robot que involucra una gran variedad de aspectos: además de captar la postura del usuario, como acabamos de mencionar, requiere también reconocer sus gestos [45] o resolver la ambigüedad de los elementos décticos del habla [46]. Aunque sin duda todos estos aspectos son relevantes para la tarea, en lo que sigue nos centraremos en los aspectos relativos a la manipulación de ropa.

En la manipulación de objetos deformables encontramos un paisaje similar al de su percepción descrita anteriormente. Si bien la manipulación de objetos rígidos se puede analizar en términos de puntos de contacto y fuerzas aplicadas, estos métodos no son ex-



tensibles a la manipulación de objetos flexibles, donde pueden ocurrir deformaciones no locales basadas únicamente en interacciones locales [47]. Por tanto, los enfoques basados en modelos se suelen aplicar a objetos deformables lineales (cables, cuerdas, etc.) para los cuales existen modelos físicos analíticos, aunque todavía no tienen incorporadas la gravedad y las colisiones. Se han utilizado representaciones topológicas para codificar trayectorias [48] y características especiales de objetos, como agujeros o cuellos en prendas textiles, que pueden emplearse para una variedad de tareas de manipulación [49], pero tienen limitaciones ya que dichas características deben ser completamente invariantes bajo condiciones de deformación.

La alternativa, como en el caso de la percepción, es el enfoque basado en datos, que trata de construir una representación sucinta de la manipulación aprendida a partir de datos de entrenamiento reales o simulados, como videos o lecturas de sensores de profundidad. Estas representaciones latentes se han obtenido con una variedad de métodos, entre los que predominan los basados en aprendizaje profundo [50-51]. También se han utilizado variables latentes de procesos gaussianos [52] en el aprendizaje por refuerzo de tareas de manipulación dinámica de ropa [53].

Los enfoques de aprendizaje profundo actuales pueden generar planes para tareas simples [54-55], pero necesitan grandes cantidades de datos etiquetados y se basan en representaciones implícitas (por ejemplo, los pesos de una red neuronal), que no permiten razonar algorítmicamente para obtener una planificación rigurosa de la manipulación ni un análisis de estabilidad basado en la información latente aprendida. Así, pues, si bien los métodos basados en datos constituyen un enfoque prometedor en ausencia de modelos analíticos, el razonamiento sobre la seguridad y la solidez de las manipulaciones sintetizadas no es posible mediante estos métodos, de ahí la necesidad de desarrollar representaciones explícitas.

Un enfoque en dicha dirección es el propuesto en [56]. Del análisis pormenorizado de las secuencias de operaciones necesarias en distintas tareas de manipulación de ropa, así como de las manos robóticas utilizadas a tal fin en las aplicaciones, se desprende la importancia de considerar conjuntamente el estado de agarre (restricciones intrínsecas) y los contactos con el entorno (restriccio-

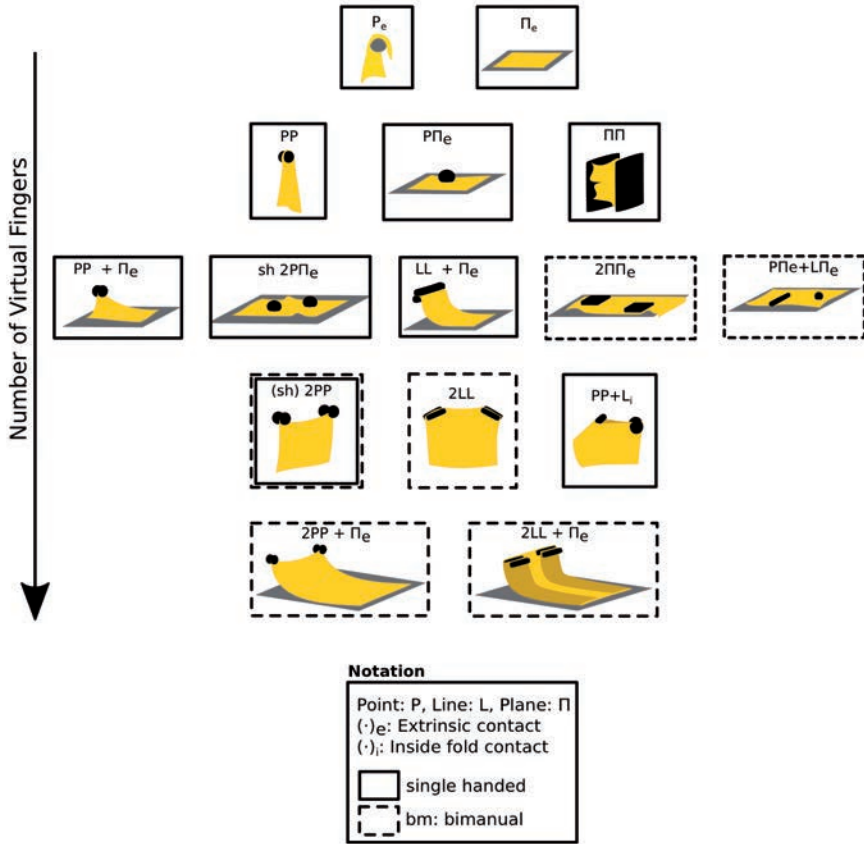


Figura 19. Taxonomía de agarres [56].

nes extrínsecas) para obtener una representación sucinta de las primitivas de manipulación que permita la planificación de dichas tareas. La taxonomía de primitivas de agarre propuesta se basa en contactos puntuales, lineales y planares, tanto intrínsecos como extrínsecos (Figura 19).

Esta taxonomía permite construir un grafo de transiciones de estado (Figura 20) que, al plasmar distintas alternativas de realización de una tarea (en este caso, el doblado de un paño), resulta muy útil en la planificación automática de tareas de manipulación de objetos textiles. Asimismo, la taxonomía también ha facilitado el diseño de manos robóticas multifuncionales, como la mostrada en la Figura 21, específicas para el manejo de ropa [57].



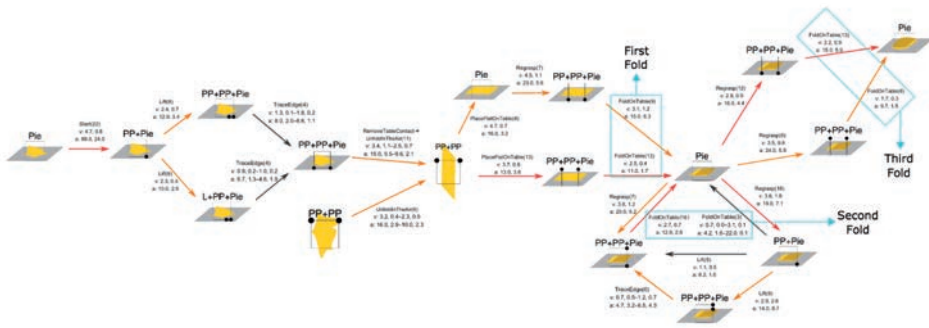


Figura 20. Grafo de transiciones de estado, utilizando la taxonomía de agarres de la Figura 19, para realizar tres dobleces en un paño.



Figura 21. Mano robótica que combina distintos tipos de agarres de la taxonomía propuesta en [56], permitiendo así realizar múltiples funciones en la manipulación de textiles [57].

La falta de bases de datos de objetos deformables y de su manipulación, en contraste con las muchas que hay de objetos rígidos, está frenando el desarrollo de algoritmos para la percepción y manipulación de este tipo de materiales (en particular, textiles). Las escasas bases de datos de doblado de prendas disponibles se han recopilado a partir de demostraciones humanas o se han generado mediante simulación. Las primeras presentan la gran dificultad de percibir tanto el estado de la prenda textil como la acción humana, así como de transferirlos al control dinámico del robot, mientras que las segundas requieren codificar el movimiento humano en el simulador en bucle abierto, es decir, sin incorporar la retroalimentación visual utilizada naturalmente por las personas, dando lugar a movimientos que distan mucho de ser realistas. Para superar estos inconvenientes, hemos propuesto un enfoque híbrido basado en realidad virtual [58], que es capaz de simular prendas realistas y al mismo tiempo permite a los

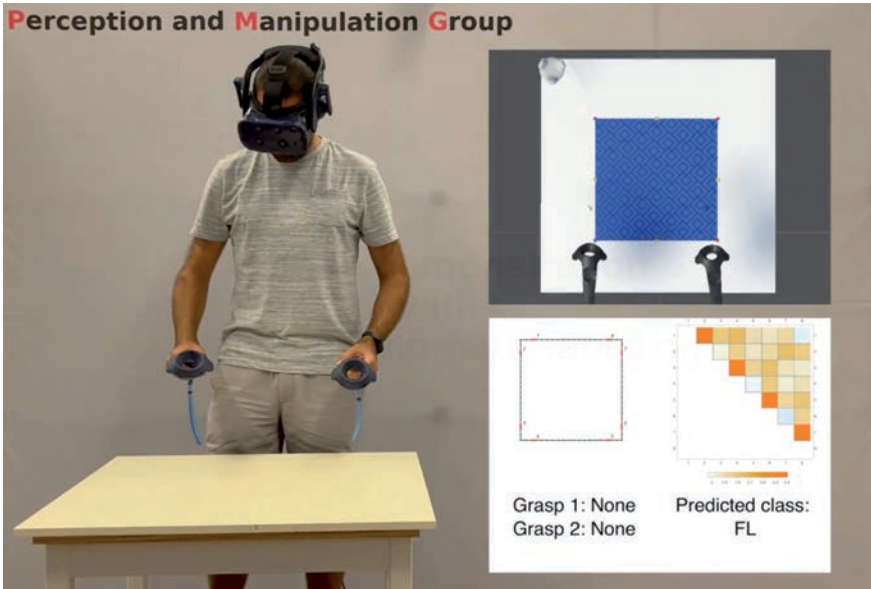


Figura 22. Sistema híbrido de adquisición de secuencias de manipulación de objetos textiles basado en realidad virtual [58].

usuarios interactuar con ellas en tiempo real a través de controladores manuales (Figura 22). Gracias a la experiencia inmersiva, este enfoque permite explotar la retroalimentación visual humana y al mismo tiempo eliminar las dificultades de captar el estado de la prenda, simplificando así la adquisición de datos y dando como resultado secuencias de manipulación más realistas.

Para que el sistema de realidad virtual pueda producir grafos de transición de estados como el de la Figura 23 a partir de las demost-

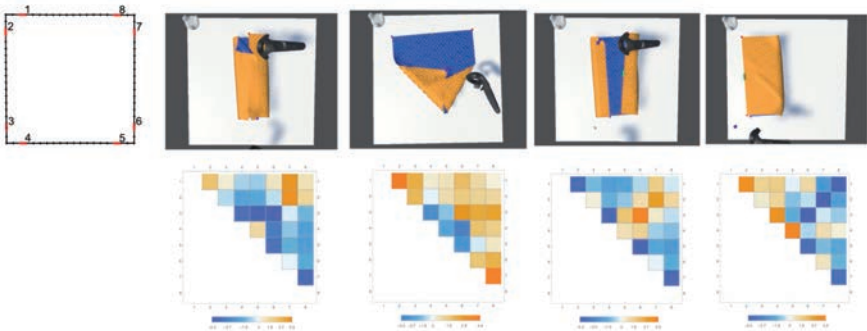
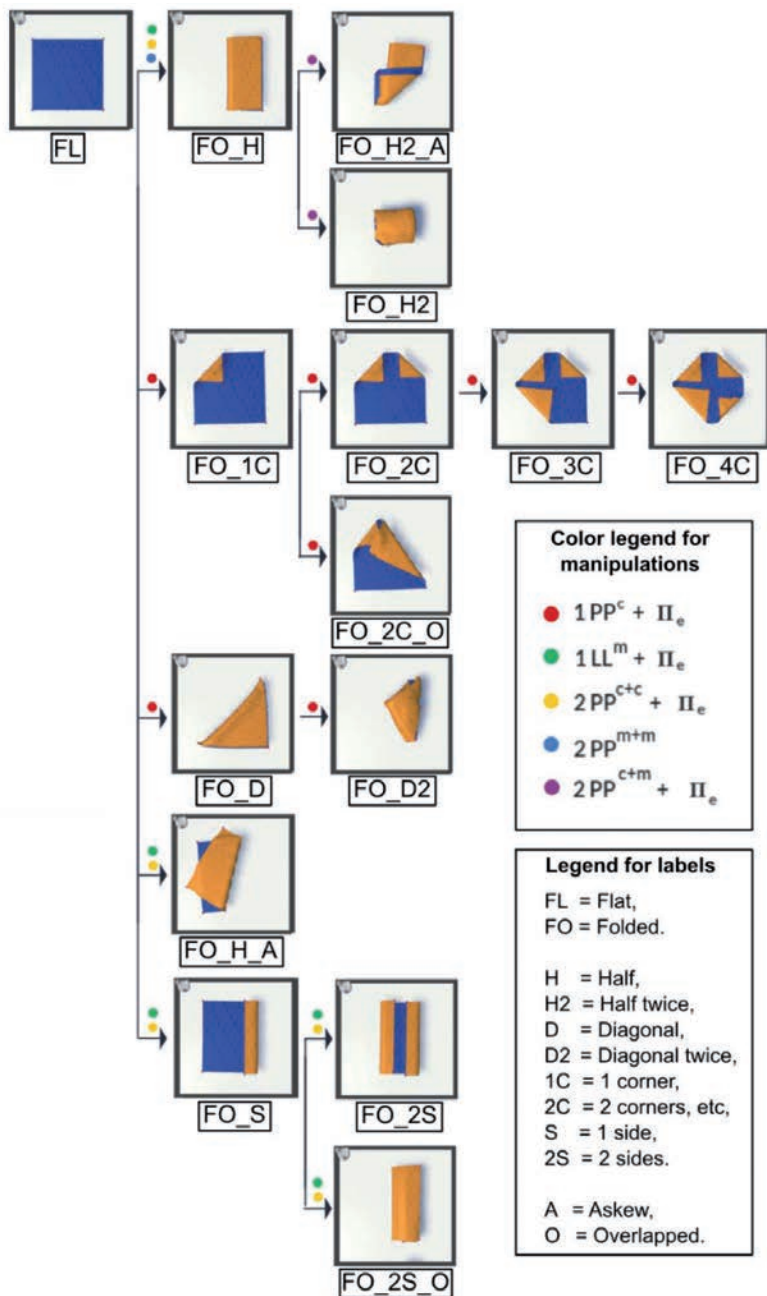


Figura 23. Caracterización de los estados de un paño mediante la matriz de derivadas de la Gauss Linking Integral entre pares de segmentos del borde del mismo [59].



**Figura 24.** Grafo de secuencias de estados y transiciones para distintas formas de doblar un paño. Los puntos de colores indican los diferentes tipos de agarre y ubicaciones de agarre que se pueden realizar para pasar del estado anterior al siguiente [58].

ciones, se requiere un procedimiento de etiquetado de los estados de la ropa, además de los agarres descritos anteriormente que conforman las transiciones. En [59] se ha propuesto un etiquetado semántico de los estados de la ropa, que puede realizarse de forma automática mediante una representación de baja dimensionalidad basada en la derivada de la *Gauss Linking Integral* entre pares de segmentos del borde de la prenda (Figura 23, izquierda) y que produce una muy buena separación entre diferentes configuraciones de la misma (Figura 23, derecha). Utilizando los dos tipos de etiquetado, de los estados de la ropa y de los agarres, se obtienen grafos como el de la Figura 24.

Los simuladores físicos tienen todavía muchas limitaciones en la modelización del comportamiento dinámico de la ropa [60]. Ello dificulta la transferencia de cualquier sistema entrenado por simulación a entornos reales (*sim-to-real transfer*), que suele requerir un costoso re-entrenamiento. En el proyecto CLOTHILDE, hemos abordado esta limitación, desarrollando un simulador de prendas textiles, basado en su modelización analítica como superficies inextensibles, pero altamente deformables [61]. La fricción y reacción a colisiones se integran en la simulación dinámica del mismo modo que la inextensibilidad como restricciones en un sistema de ecuaciones de movimiento. La discretización de dichas ecuaciones conduce naturalmente a una secuencia de problemas cuadráticos con restricciones de igualdad y desigualdad.

El simulador ha sido validado experimentalmente comparando su funcionamiento con las secuencias de mallas obtenidas mediante el *software Motive*, a partir de la captación del movimiento de marcas situadas en la ropa por medio de un sistema *Optitrack* [62]. Esperamos que la inclusión del simulador en el sistema de realidad virtual descrito anteriormente producirá secuencias precisas de manipulación de ropa que permitirán entrenar sistemas en la realización de tareas cuya transferencia a robots en entornos reales sea menos costosa.

También en el proyecto CLOTHILDE, y en colaboración con el Laboratorio de Robótica, Percepción y Aprendizaje de KTH, Instituto Real de Tecnología en Estocolmo, hemos desarrollado un conjunto de pruebas (*benchmark*) para la evaluación y comparación de diferentes enfoques en tres tareas básicas de manipulación de telas: extender un mantel sobre una mesa, doblar una toalla y vestirse. Los objetos utilizados están estandarizados, proponemos métricas para evaluar la calidad de las ejecuciones, y las aplicamos a las soluciones básicas (*baselines*) para todas las tareas que asimismo proporcionamos [63].

#### 4.5. Colaboración con el usuario en la realización de tareas

Para una eficaz y agradable colaboración persona-máquina, son necesarias interfaces humanizadas, como ya preconizaba Turing [64]. A menudo, estas interfaces son multimodales, ya que pueden combinar texto, voz, imágenes y, en el caso de los robots, también gestos, movimientos, manipulaciones y fuerzas. La interacción puede ser meramente comunicativa y producirse a distancia, o bien incluir contacto físico.

En cuanto a la interacción comunicativa, en el marco del proyecto SOCRATES, se han desarrollado dos aplicaciones de entrenamiento cognitivo, en las cuales es necesaria la colaboración entre persona y robot para la realización exitosa de un ejercicio de memoria de secuencias y de ordenación de números o letras, respectivamente. La aplicación de memorización utiliza tres modalidades de interacción (voz, imagen e intervención del manipulador) que se seleccionan adaptativamente en función de la situación y necesidades del usuario [65]. La segunda aplicación, desarrollada conjuntamente con la Fundación ACE, ya ha sido descrita brevemente en la Sección 4.2, puesto que incorpora la personalización por parte del cuidador del modo en que actuará el robot y del ejercicio que realizará el paciente adecuado a su grado de deterioro y su personalidad. La interacción con el cuidador es textual, mientras que la interacción con el paciente es multimodal, combinando gestos reactivos del robot (muecas de asentimiento o desaprobación) cuando el paciente coge una ficha del tablero, con habla para dar ánimos o pistas de cuál debe ser la siguiente ficha a mover, y por supuesto el movimiento y la manipulación de fichas por parte de ambos, paciente y robot.

En el contexto colaborativo cobra especial relevancia la interacción física entre la persona y el robot, que debe ser segura y amigable, por lo que es necesario tener garantizados los temas de seguridad y facilidad de programación tratados en los apartados precedentes. Hemos abordado la colaboración física entre persona y robot en un trabajo conjunto con el Istituto Italiano di Tecnologia [66], donde proponemos un marco general de aprendizaje por demostración de tareas que requieren la coordinación de fuerzas entre el robot y el usuario. En la fase de entrenamiento, una persona enseña al robot por guiado cinestésico cómo debe comportarse para ayudar al usuario a transportar un mueble o a montarlo, dejándose llevar o aplicando fuerza cuando sea necesario. El método combina aprendizaje

probabilístico, sistemas dinámicos y estimación de rigidez para codificar el comportamiento del robot a lo largo de su tarea. Este comportamiento incluye no sólo las trayectorias requeridas por la actividad, sino también el control de la impedancia. Los resultados muestran que el método modifica con éxito la impedancia del robot a lo largo de la ejecución de la tarea para facilitar la colaboración, y hace que los comportamientos rígido y acomodaticio se adapten en línea a las acciones del usuario.

En el proyecto I-DRESS, se ha diseñado una interfaz multimodal que combina ambos tipos de interacción, comunicativa y física, en una aplicación de poner zapatos a personas con movilidad reducida [67]. La comunicación es verbal y gestual, mientras que una cámara de color y profundidad y un sensor de fuerza en la muñeca del brazo robótico permiten captar las reacciones físicas del usuario. También se ha conseguido aunar los niveles simbólico y subsimbólico de interacción en la planificación y ejecución de tareas de asistencia robotizada a vestirse [68-69], pero bajo supuestos simplificadores, como asumir prendas preagarradas.

Un tema de colaboración persona-robot en auge es la denominada "autonomía compartida" (*shared autonomy*), esencial en contextos de teleasistencia en que el robot debe realizar determinadas acciones de forma autónoma bajo la guía de alto nivel de un cuidador. Dicha guía puede proporcionarse in-situ o de forma remota, siendo esta última de gran ayuda, por ejemplo, en contextos infecciosos. La dificultad radica en que, para completar la tarea deseada, el robot debe comprender la intención semántica de alto nivel del usuario a partir de inputs con incertidumbre o ambigüedades [70]. En otros casos, son las altas habilidades cognitivas humanas las que se transfieren al robot a través de la percepción compartida para ayudar a compensar las limitaciones de éste, por ejemplo, en el reconocimiento de objetos [71].

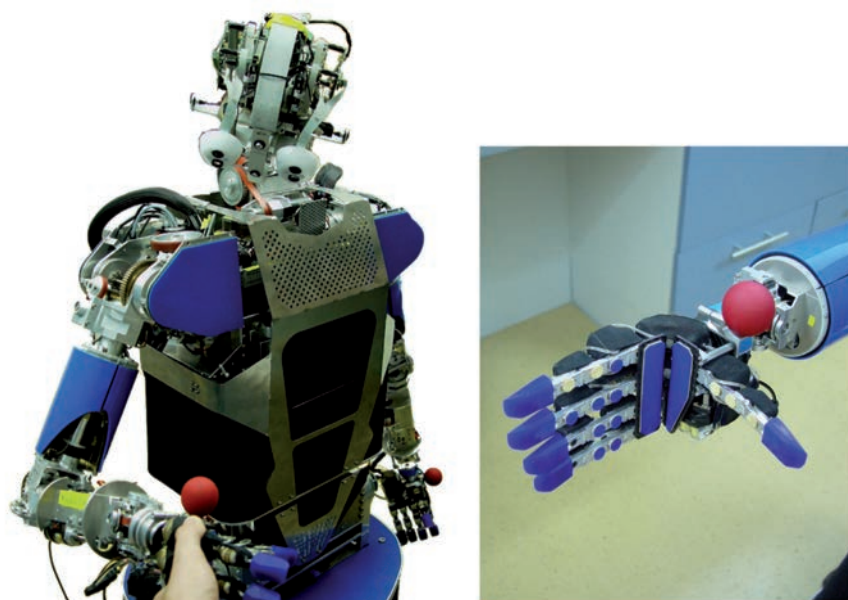
Recientemente, la disponibilidad de conjuntos de datos y el avance de las técnicas de aprendizaje automático han permitido que los robots con autonomía compartida sean cada vez más capaces de contextualizar y personalizar la asistencia, así como de adaptar su nivel de autonomía a las circunstancias [72]. Sin embargo, esta deseable tendencia plantea nuevos desafíos para la certificación de seguridad y estabilidad de este tipo de robots, lo que requiere nuevos métodos de control avanzados para implementar una división de funciones en continua evolución.



#### 4.6. Capacidad de adaptación y aprendizaje

Contrariamente a los robots industriales, que suelen realizar tareas repetitivas en entornos predefinidos y estructurados, los robots asistenciales y de servicios deben trabajar en entornos dinámicos no diseñados específicamente para ellos y a menudo en interacción con personas. Por tanto, deben tener capacidad de adaptarse a situaciones nuevas y hacer frente a acontecimientos inesperados. Esta adaptación toma dos formas muy distintas dependiendo de si se produce a nivel sensoriomotor o cognitivo [73]. La adaptación sensoriomotora produce asociaciones relevantes entre estímulos y respuestas, mientras que el aprendizaje cognitivo implica construir representaciones simbólicas para guiar la toma de decisiones.

La asociación visuomotora, que relaciona la información visual con las consignas de movimiento, permite a los robots adaptarse no solo a cambios en el entorno, sino también a cambios en su propia geometría causados por traumatismos, desgaste o reemplazo de la herramienta que llevan. Hoffmann *et al.* [74] realizan una revisión detallada de los trabajos que han abordado la adquisición por parte de los robots de un esquema corporal, un término tomado de las neurociencias para denotar la correlación de la información sensorial propioceptiva con la forma visible del cuerpo. Para los robots articulados esta representación se limita a menudo a una función cinemática/dinámica inversa que relaciona la pose (posición y orientación) y la velocidad del elemento terminal del robot con los ángulos y pares en sus articulaciones. Las redes neuronales se han utilizado para adquirir la función cinemática completa, así como para codificar solo las desviaciones respecto a la cinemática nominal programada en el controlador original del robot, lo que resulta en una significativa aceleración que posibilita la adaptación en línea del esquema corporal, una capacidad fundamental para los robots que deben funcionar mucho tiempo sin supervisión de un experto. En un trabajo conjunto con el Karlsruhe Institute of Technology (KIT), se desarrolló una técnica para que el esquema corporal del robot humanoide Armar-III se actualice en línea para incluir herramientas de longitudes diferentes y poses variables de la mano de robot [75-76] (Figura 25).



**Figura 25.** Izquierda: El robot humanoide Ammar-III usado en los experimentos para adaptar el esquema corporal a una extensión de la mano con una herramienta. Derecha: Primer plano de la bola roja unida a la mano derecha que marca el final de la herramienta [75].

Adquirir habilidades más allá de colocar la mano en una posición y orientación determinadas, requiere de aprendizajes más complejos que la construcción de asociaciones visuomotoras. La destreza manipulativa humana, especialmente en tareas en que la dinámica juega un papel importante, se suele adquirir a partir de una o más demostraciones iniciales seguidas de mucha ejercitación. Esta misma estrategia se aplica a la adquisición de habilidades por parte del robot. Se han propuesto diversos enfoques para inicializar la codificación de un movimiento robótico mediante una demostración, y a continuación explorar ligeras modificaciones de ésta en un espacio de parámetros para mejorar el movimiento mediante aprendizaje por refuerzo [77]. Esta es la estrategia que hemos utilizado para que un robot bimanual aprenda a doblar una camisa-polo al aire en un solo movimiento, sin soltarla y agarrarla repetidamente por otros puntos (Figura 26). A partir de una demostración aproximada, el robot se ejercita en la tarea mientras es monitorizado por una cámara cenital y se evalúa su ejecución mediante una función de coste que mide lo bien que queda doblada la camisa-polo. Se aplica entonces





**Figura 26.** Escenario experimental de la tarea de enseñar a un robot bimanual a doblar prendas, en este caso un polo, mediante una demostración inicial (imagen de la izquierda) seguida de aprendizaje autónomo por reforzamiento (imagen de la derecha).

un algoritmo de aprendizaje por refuerzo que busca la mejor política (*policy search algorithm*) de plegado de ropa por parte del robot [78, 53].

La dificultad radica en escalar los algoritmos de aprendizaje por refuerzo a espacios continuos de elevada dimensión como son los que caracterizan el movimiento de los robots manipuladores o, más general, de los robots humanoides. Para superar esta dificultad, se han propuesto diversas formas de parametrizar primitivas de movimiento junto con procedimientos de aprendizaje de políticas eficientes [79], así como estrategias para reducir la dimensión del espacio de parámetros donde se debe realizar la exploración [78, 80]. También se han propuesto primitivas de movimiento probabilísticas para captar los rasgos esenciales de diversas demostraciones [28, 30] y de nuevo se han desarrollado estrategias para reducir la dimensión de los espacios de búsqueda correspondientes [29].

Las tareas que involucran no ya una única habilidad, sino secuencias de acciones en entornos no predefinidos requieren capacidades de planificación. Para desarrollarlas, una arquitectura cognitiva [81] debe ser capaz de aprender progresivamente un modelo de acción a partir de experiencias y ensayar hipotéticos escenarios futuros mediante este modelo para determinar la mejor forma de actuar. Por otra parte, el modelo de acción debe ser probabilístico para tener en cuenta el ruido en las percepciones y la incertidumbre en el resultado de las acciones.

La extensión relacional del aprendizaje por refuerzo se ha desarrollado con este objetivo. Al añadir representaciones relacionales de los estados y las acciones (es decir, codificando explícitamente las

relaciones en una estructura de datos simbólica), los conocimientos adquiridos pueden generalizarse a diferentes estados y transferirse de una tarea a otras [82].

Algunas acciones del robot pueden ser irreversibles y provocar fallas irrecuperables (por ejemplo, daños en el robot, rotura de un objeto o pérdida de una herramienta). Por el contrario, un planificador siempre puede dar marcha atrás al llegar a un callejón sin salida y tratar de encontrar una secuencia alternativa de acciones para conseguir el objetivo. De esta forma las experiencias previas pueden ser muy útiles para la planificación de secuencias de movimientos que favorezcan el desempeño seguro de la tarea.

Hemos propuesto un método relacional de aprendizaje por refuerzo que permite a un robot razonar sobre los callejones sin salida y sus causas. Si detecta que un plan podría conducir a una tal situación, el robot trata de encontrar un plan seguro alternativo y, si no lo encuentra, le pregunta al usuario si debe ejecutar la acción arriesgada o si él puede proporcionarle una nueva vía. Este método permite aprender políticas seguras de actuación, así como minimizar los errores irrecuperables durante el proceso de aprendizaje, y tener en cuenta los cambios en el entorno no provocados por el propio robot, los llamados *exogenous effects* [83]. Además, cabe destacar que incluir a los humanos en el circuito acelera el aprendizaje y la ejecución [84].

## 5. CO-DISEÑO Y TRANSFERENCIA

Los robots asistenciales descritos, por mucha repercusión que hayan tenido en la comunidad investigadora y en la opinión pública, no alcanzarían su objetivo si se quedaran en meros prototipos de laboratorio. Para que realmente lleguen a ser de ayuda a cuidadores y pacientes, es esencial que, en su concepción, desarrollo y despliegue, participen todos los actores intervinientes en el sector de la asistencia y los cuidados. En este sentido, quisiera exponer nuestra experiencia en el co-diseño de dos prototipos: el de entrenamiento cognitivo y el de dar de comer [85].

El prototipo de entrenamiento cognitivo, mencionado ya en las Secciones 4.2 y 4.5 en relación a las técnicas de personalización y colaboración, se desarrolló en el marco del proyecto SOCRATES conjuntamente con la Fundación ACE, dedicada a la investigación, el

diagnóstico y el tratamiento del Alzheimer y otras demencias. Algunos ejercicios que realizan los pacientes en los centros de día de dicha Fundación están basados en un tablero con unas fichas que hay que ordenar de distintas maneras, con mayor o menor dificultad dependiendo del nivel de discapacidad cognitiva de cada uno. El terapeuta proporciona tanto el estímulo como la ayuda necesaria para que el paciente pueda resolver el ejercicio. El problema es que estos ejercicios son muy personalizados y, como cada terapeuta tiene que atender a más de una decena de pacientes, la interacción es muy limitada y el proceso muy lento. El objetivo es que cada paciente disponga de un robot que le proporcione estímulo y ayuda de manera rápida, y el terapeuta humano supervise la ejecución de los ejercicios como si estuviera jugando partidas simultáneas de ajedrez.

Las especificaciones del prototipo se generaron conjuntamente con personal de la Fundación; en concreto, una neuróloga, un terapeuta y una asistente social. Una vez completada la primera versión del prototipo se testó comparándolo con sesiones de entrenamiento realizadas por un terapeuta humano. La principal diferencia observada es que la interacción con el robot era mucho más lenta, lo que podía propiciar que los pacientes perdieran antes el interés por seguir con el ejercicio. Ello era debido a que el robot proporcionaba realimentación verbal una vez la persona había colocado una ficha. Estos pacientes dudan mucho sobre qué ficha escoger: suelen tomar una y, antes de colocarla, miran al terapeuta para ver si aprueba o rechaza la elección mediante algún gesto, aunque sea mínimo. Se decidió entonces agilizar la comunicación adoptando dos medidas: 1) cambiar la cabeza del robot original, que incorporaba únicamente dos cámaras, añadiéndole una tableta con unos ojos expresivos; y 2) sensorizar el tablero de juego y las fichas mediante un sistema de identificación RFID. Ello permite una realimentación rápida mediante la expresión de los ojos del robot en el instante mismo en que el paciente toma la pieza, puesto que el sistema RFID la identifica sin necesidad de recurrir a la complejidad de la visión, que presenta oclusiones con frecuencia y puede requerir razonamiento por exclusión (Figura 27).

Durante la pandemia, en el año 2021, se llevó a cabo un programa piloto de experimentación con más de veinte pacientes para la validación de la adaptabilidad del robot al nivel de discapacidad y las preferencias de cada uno. No solo los resultados fueron muy hala-



**Figura 27.** Prototipo de robot de entrenamiento cognitivo utilizado en el programa piloto llevado a cabo con pacientes con deterioro cognitivo leve durante la pandemia.

güenos [86], sino que la experiencia resultó más alentadora de lo esperado, ya que la aceptación por parte de los pacientes, personas de más de 70 años con cierto deterioro mental, fue total.

Junto con esta experiencia, la constatación de que en la pandemia los robots no intervenían en nada que supusiera un contacto cercano con las personas, sino que se limitaban a desinfectar, informar de la necesidad de llevar la mascarilla, recordar el mantenimiento de la distancia de seguridad entre las personas, u otras tareas que hacían siempre a distancia (Figura 28). En nuestro grupo, ya disponíamos de prototipos de ayuda a poner los zapatos, a vestir, dar de comer, manipular ropa, y habríamos querido que versiones comerciales de los mismos hubieran ayudado a los sanitarios en las tareas de proximidad que les ponían en peligro de contagio: tomar la presión arterial a los enfermos, hacer las camas, darles de comer o ayudarles a vestirse.

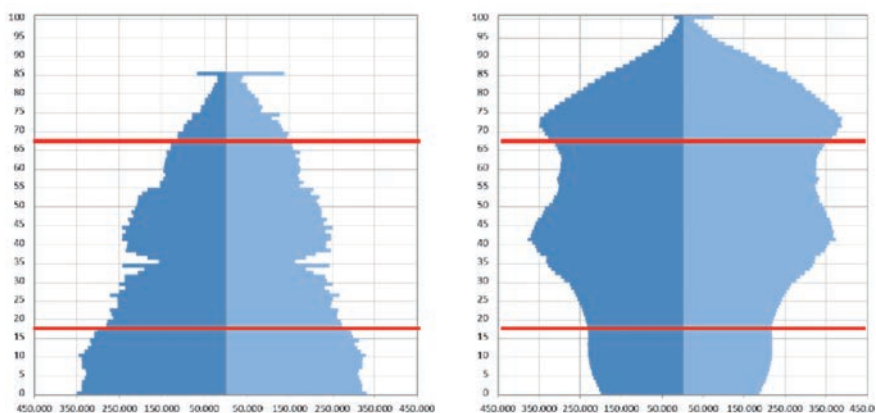
Por eso propusimos a diversos agentes involucrados en el despliegue de tecnologías asistenciales de constituir un laboratorio abierto de robótica asistencial. En la Figura 29, que muestra la estructura por edad y sexo de la población española en el año 1975 y la previsión para el año 2050, se ve cómo se invierte la pirámide durante este período y queda patente el aumento de la población envejecida, porque vivimos cada vez más. Es una tendencia a nivel mundial: en 2050 la mayoría de países tendrán más del 30% de su población con más de 60 años [87].



**Figura 28.** Diversos robots actuando a distancia durante la pandemia.

Esta evolución nos llevará a necesitar más ayuda para el cuidado de las personas, mientras que el porcentaje de población activa disminuirá, por lo cual la utilización de tecnología será fundamental [88]. Hemos llamado a esta iniciativa LaboRA (Laboratorio abierto de Robótica Asistencial) [85] y está en curso su construcción con financiación del CSIC, en el marco de la Plataforma Temática Interdisciplinar sobre Neuroenvejecimiento.

El objetivo es educar en la utilización de la tecnología, mostrarla y probarla, poniendo los prototipos al alcance de los distintos actores. Para nosotros es esencial aglutinar los esfuerzos de todos; es decir, hacer co-diseño y co-desarrollo con grupos de investigación tecnocientífica y social –las ciencias sociales tienen mucho que decir en este campo–, así como con empresas de asistencia domiciliar y sociosanitaria, el sistema público de salud, las facultades de medicina y enfermería, empresas de tecnología asistencial, administraciones y asociaciones de usuarios. Entre todos, se pueden identificar bien las necesidades, las soluciones con mejor relación coste/bene-



**Figura 29.** Estructura por edad y sexo de la población española en 1975 (izquierda) y previsión para 2050 (derecha). En azul oscuro, sexo masculino, y en azul claro, sexo femenino. Fuente - Profesor Iñaki Permanyer, Centro de Estudios Demográficos, Universidad Autónoma de Barcelona.

ficio, y desarrollar productos muy orientados. Esto permitirá a las empresas visualizar el potencial de esta área tecnológica, y ayudar a dinamizar el tejido industrial en el ámbito de la salud, de los cuidados y de la rehabilitación. El objetivo también es implicar a las administraciones de forma que promuevan la legislación ética necesaria en la asistencia sociosanitaria.

Para acompañar al LaboRA, hemos creado una asociación liderada por la Generalitat de Catalunya que reúne a catorce entidades, con las que hemos desarrollado algunos proyectos piloto. Es el caso del Parque Sociosanitario Pere Virgili, donde se presentaron algunos de nuestros prototipos y los responsables de la institución decidieron dar prioridad al prototipo que ayuda a alimentar a los pacientes y este fue el punto de partida de nuestra colaboración. El 50% de las personas allí ingresadas necesitan a alguien a la hora de las comidas. El personal sanitario no da abasto y deben recurrir a familiares que disponen de muy poco tiempo a mediodía para asistir a los pacientes. Dada su dificultad para tragar, los enfermos con disfagia sufren especialmente esta falta de tiempo y personal. Los pacientes indican en este sentido que preferirían ver a la familia en otro momento, de forma distendida.

Para trabajar en una dinámica de co-desarrollo con los interesados, cuando se puso en marcha el programa piloto, se trabajó a partir de sus observaciones y peticiones. Así, se equipó al robot con un





**Figura 30.** Programa piloto llevado a cabo en el Parque sociosanitario Pere Virgili de Barcelona para testear un brazo robótico sensorizado para dar de comer. A sugerencia del personal sanitario y de algunos pacientes, se añadió al brazo portátil un intercambiador de elementos (cuchara, tenedor, tubo de bebida y servilleta) para que, con una interfaz muy sencilla, el paciente con movilidad reducida que lo desee pueda comer de forma autónoma.

sistema que le permite cambiar de cubierto (cuchara, tenedor, etc.), dar de beber y limpiar al paciente con la servilleta. Como en otros prototipos, y a petición de los pacientes, se le añadió también una pantalla con una cara expresiva que permite una interacción fluida. El programa piloto acaba de concluir con excelentes resultados y una gran aceptación por parte de cuidadores y pacientes (Figura 30), como en el caso del prototipo anterior. Esperamos poder realizar pronto la transferencia al sector industrial para su comercialización.

También en relación con el LaboRA, están en marcha otros proyectos bilaterales con instituciones sanitarias, como un prototipo robótico para la determinación de la fragilidad en colaboración con el Instituto Oncológico o un sistema sensorico vestibular para la evaluación de la movilidad en pacientes con distrofia muscular con el Hospital Sant Joan de Déu, así como proyectos con empresas de robótica y de asistencia domiciliaria con financiación pública de programas nacionales de investigación.

## 6. DESPLIEGUE ÉTICO: REGULACIÓN Y FORMACIÓN

En el ámbito asistencial en que la relación persona-robot juega un papel esencial y los usuarios suelen pertenecer a colectivos vulnerables, el despliegue ético de esta tecnología es primordial, todavía más si cabe que en otros contextos [88]. Ello se alcanza por dos vías: la regulación y la formación. Muchas instituciones y asociaciones profesionales están desarrollando y aprobando normativas y directrices para el despliegue ético de la inteligencia artificial (IA) y la

robótica, y en particular de la robótica asistencial. Tres ejemplos son la resolución del Parlamento Europeo sobre “Normas de Derecho civil sobre robótica”, en que se establecen seis principios básicos de la robótica social y de servicios [89], las “Directrices éticas para una IA fiable” [90] del *High-level Expert group on AI de la Comisión Europea* y el informe “Diseño alineado éticamente: priorizar el bienestar humano con sistemas autónomos e inteligentes” [91] de la *Standards Association del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*.

En un artículo reciente [92], he detallado mi visión personal del panorama ético, centrado en las particularidades de la robótica social y agrupando las cuestiones principales en ocho categorías: dignidad humana, autonomía humana, transparencia de los robots, vínculos emocionales, privacidad y seguridad, justicia, libertad y responsabilidad. Las cinco primeras hacen referencia a la relación diádica persona-robot, mientras que las tres últimas derivan de una perspectiva más global de carácter social. Esta estructura surge de la experiencia en el desarrollo e impartición del curso universitario sobre ‘Ética en Robótica Social e IA’ que describiré más adelante al referirme a la formación ética en esta misma sección.

A fin de determinar cuáles de estas cuestiones están siendo contempladas en la investigación y experimentación sobre robótica asistencial, llevamos a cabo una sistemática revisión de la literatura en este ámbito [93], junto con una doctoranda en filosofía perteneciente a nuestro grupo multidisciplinar y la profesora de Facultad de Filosofía de la Universitat de Barcelona con quien co-dirigí la tesis [94]. La revisión crítica de la literatura y la tesis ponen de manifiesto algunas tendencias significativas del enfoque ético actual, así como los temas menos tratados, lo cual permite identificar líneas de investigación que es necesario abordar. En concreto, se desprende del estudio que las cuestiones relativas a la interacción diádica persona-robot, en especial las que afectan a los cuidados y el bienestar individual de los usuarios, han recibido mayor atención que los aspectos de tipo global, como los referentes a la justicia.

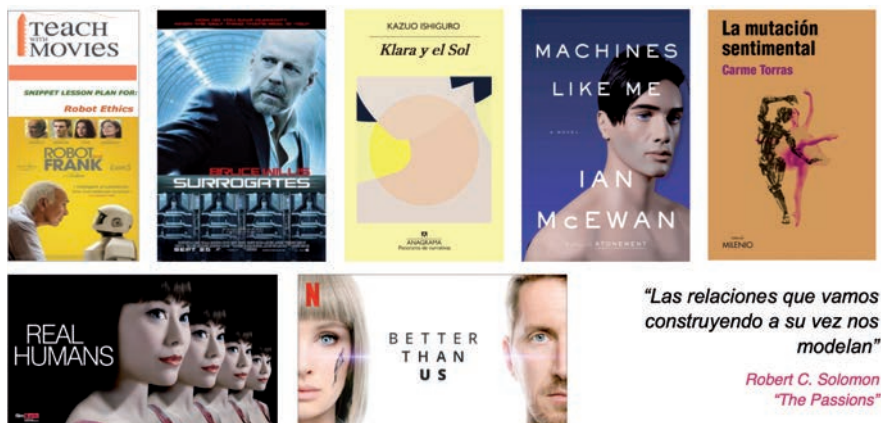
La regulación es necesaria, pero todavía lo es más la formación. Es esencial formar en los beneficios y riesgos de las tecnologías digitales no solo a la opinión pública, sino también en el ámbito escolar, ya desde primaria, secundaria, universidad y, muy especialmente, a los técnicos, ingenieros e informáticos que diseñan robots y desarrollan



software. En este sentido, personas muy reconocidas como la profesora Barbara J. Grosz de la universidad de Harvard defienden la necesidad de integrar la formación ética en los planes de estudios de las carreras técnicas: «Hacer del razonamiento ético un elemento central de los estudios hará que el alumnado no sólo aprenda a pensar sobre la tecnología que puede diseñar, sino a plantearse si debería diseñarla» [95]. Asociaciones tan prestigiosas como ACM, IEEE y AAAI incluyen 17 áreas de conocimiento en sus currículos de informática, entre las cuales se encuentra “Sociedad, Ética y Profesionalismo (SEP)”, cuya inclusión se argumenta del siguiente modo: «Dado que el trabajo de los graduados afecta a todos los aspectos de la vida cotidiana, la informática como disciplina ya no puede ignorar o tratar como incidentales, cuestiones sociales, éticas y profesionales. En reconocimiento de esta naturaleza omnipresente de la informática, todas las demás áreas de conocimiento de estas directrices curriculares incluyen ahora una unidad de conocimiento llamada SEP, donde se enumeran explícitamente los temas y resultados del aprendizaje en la intersección del área de conocimiento y la SEP.» [96].

Algunas materias de SEP se imparten basándose en textos filosóficos, que necesitan ser complementados con las indicaciones prácticas para situaciones concretas que requiere el alumnado de grados tecnológicos. Es natural que algunos docentes hayan recurrido a relatos de ciencia ficción para ejemplificar situaciones a las que los estudiantes tendrán que hacer frente en su práctica profesional, a fin de que reflexionen y debatan sobre ellos. Tras siete ediciones de impartición del curso “Ciencia ficción y ética de la computación” en las universidades de Kentucky e Illinois, Burton et al. [97] afirman que «recurrir a la ficción para enseñar ética permite al alumnado hablar y razonar con seguridad sobre cuestiones difíciles y emocionalmente connotadas sin llevar el debate al terreno personal». Además, destacan que la narrativa de ciencia ficción resulta muy atractiva para los estudiantes, y dan cuenta de descubrimientos muy interesantes hechos a lo largo de los años que merecen una atenta lectura.

La ciencia ficción contemporánea trata muchos de los temas éticos abordados en el área SEP. La Figura 31 muestra algunas series, películas y novelas, específicamente centradas en los asistentes robóticos. La película *Robot and Frank* muestra la relación entre un Frank envejecido y su cuidador artificial, y merece especial mención por su realismo y valor educativo: en ella se basa un curso en línea



**Figura 31.** Obras de ciencia ficción para promover el debate ético sobre asistentes robóticos entre la ciudadanía y en el ámbito educativo.

sobre ética y robótica de la plataforma ‘Teach with Movies’ [98]. Destacan también las series *Real Humans*, en que robots casi-humanos coexisten con humanos y a menudo compiten con ellos; *Better than us*, una reflexión sobre si incrustar reglas y valores en los robots puede hacerlos más éticos que las personas; y la película *Surrogates*, donde cada ciudadano tiene un avatar que controla desde casa y que le permite circular por la ciudad e interactuar con las personas por telepresencia. Hay también novelas que suscitan reflexiones interesantes en este ámbito como *Klara y el Sol*, de Kazuo Ishiguro, en que una asistente robótica es adquirida por una familia para hacer compañía y cuidar a la hija enferma; y *Machines like me*, de Ian McEwan, cuyo título dejo en inglés por su delicada ambigüedad, que ilustra lo que sucede cuando un robot doméstico entra en el domicilio de una pareja.

En mi novela *La mutación sentimental* [99] exploré cómo ser criado por niñeras artificiales, tener maestros robóticos o compartir trabajo y ocio con programas de IA, afectaría los hábitos intelectuales, emocionales y sociales de las generaciones futuras. El leitmotiv de la novela es una cita de Robert C. Solomon: «Las relaciones que vamos construyendo a su vez nos modelan» [100]. El filósofo se refería a las relaciones humanas con nuestros padres, maestros y amigos, pero la frase se puede aplicar también a los asistentes artificiales y a todo tipo de dispositivos interactivos tan presentes actualmente en nuestras vidas.

## 5. Interacción persona-robot y dignidad humana

### 5.2. Preguntas

5.A - ¿Cuándo la **toma de decisiones automática** interfiere con la **libertad/dignidad** humanas?

5.B - ¿Es lícito diseñar dispositivos que **creen adicción y dependencia**?

5.C - ¿Hay que excluir por diseño la posibilidad de que los robots sean **tomados por seres vivos**?

5.D - ¿Cómo evitar las brechas por razón de edad o formación, y el **aislamiento social** que puede derivarse del cuidado mecánico?




Figura 32. Ejemplo de preguntas de los materiales didácticos sobre “Ética en Robótica Social e IA”.

La novela fue traducida al inglés con el título *The Vestigial Heart* [101] y posteriormente al chino. Siguiendo una sugerencia de la editora de MIT Press Marie L. Lee, incluí en el libro un apéndice con 24 preguntas de contenido ético y apuntes para generar debate sobre las situaciones que aparecen en la novela. Se publicó conjuntamente con una guía en línea para el profesor y una presentación de 100 diapositivas para impartir un curso sobre “Ética en robótica social e inteligencia artificial”. Se tratan seis temas: cómo diseñar el asistente ‘perfecto’, la importancia del aspecto y la simulación de emociones en los robots para su aceptación, la función de los asistentes robóticos en el lugar de trabajo y en el entorno educativo, la interacción persona-robot y la dignidad humana, y la responsabilidad implícita de alojar cierto sentido moral en los robots. A modo de ejemplo, en el apartado 5 dedicado a la interacción persona-robot en contextos asistenciales [102], además de proporcionar una panorámica de las cuestiones éticas a tener en cuenta y ejemplos de situaciones concretas donde surgen, se plantean las cuatro preguntas mostradas en la Figura 32 y algunas indicaciones de cómo suscitar debate sobre ellas, así como referencias para profundizar en las distintas problemáticas presentadas.

La guía y la presentación se pueden obtener sin coste tanto en inglés [101], como una versión reducida en castellano [103] y, junto con el libro, están siendo utilizados no sólo en grados de Informática e Ingeniería, sino también en los estudios de Filosofía y Administración de empresas de varias universidades en EEUU, Australia y Europa. La

transcripción del curso que impartí en la Escuela de Verano de la Asociación Europea de Inteligencia Artificial, así como de las sesiones posteriores de preguntas y respuestas, se encuentran disponibles en [104].

## 7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En nuestro país ya se están utilizando robots asistenciales en algunas residencias e incluso en pruebas en domicilios, pero con una funcionalidad todavía muy limitada. En general son robots de pequeño tamaño y la interacción con las personas (cuidadores y pacientes) suele ser verbal, textual o gestual. Pueden recordar al paciente cuándo le toca tomar la medicación, ponerle en contacto con un familiar o proponerle ejercicios físicos que la persona debe imitar, pero no tienen capacidad de manipular objetos deformables ni de actuar en contacto físico con las personas. Es la misma limitación que hemos observado a nivel internacional durante la pandemia, en que los robots hacían tareas de desinfección, tomaban la temperatura y recordaban la obligatoriedad de llevar mascarilla o de mantener la distancia, pero sin ningún tipo de contacto ni de interacción más estrecha.

Quisiéramos en los próximos años ver robots ayudando a vestirse, afeitarse, comer, ponerse de pie, trasladarse, ducharse, así como a hacer rehabilitación, entrenamiento cognitivo o facilitar la comunicación con familiares y amigos, entre otras actividades. De todos modos, hay que tener siempre presente que los robots asistenciales deben ser un instrumento de ayuda a los cuidadores, que les libere de realizar tareas rutinarias y poco agradables, y les permita dedicar tiempo de calidad a los pacientes. Podríamos equiparlos a electrodomésticos móviles y versátiles de ayuda a las personas con alguna dificultad física o cognitiva, pero nunca han de sustituir el cuidado, la calidez y el afecto humanos; es decir, en ningún caso han de actuar como sustitutos emocionales.

A lo largo de la exposición, hemos constatado que los robots asistenciales, al tener que interactuar con las personas en estas actividades de la vida diaria, plantean importantes desafíos, tanto de investigación tecnocientífica como de humanidades y ciencias sociales, que constituyen temas candentes, de gran actualidad y con un elevado potencial para marcar el futuro.

En cuanto a la investigación tecnocientífica, además del progreso incremental en los diferentes ámbitos descritos en la Sección 4, pre-

vemos dos avances fundamentales que mejorarán no solo la comunicación persona-robot, sino también la colaboración entre ambos en el mundo físico. En primer lugar, la comprensión semántica de las situaciones permitirá un nivel de razonamiento y explicación argumentada de los motivos subyacentes a las decisiones automáticas, que actualmente está fuera del alcance y limita la aplicabilidad de técnicas como, por ejemplo, *deep learning*. El segundo avance que preveemos es la modelización por parte del robot de sus propias capacidades físicas y cognitivas, que permitirá no solo aumentar significativamente su grado de autonomía, sino también colaborar más eficazmente con las personas utilizando estrategias de control de autonomía compartida (*shared autonomy*) que hoy son objeto de intensa investigación.

Estos avances sin duda darán lugar a asistentes robóticos más versátiles, pero a su vez comportarán nuevos desafíos y, en particular, intensificarán el debate social y ético. Una de las cuestiones más relevantes en este sentido es qué grado de autonomía hay que permitirles en la toma de decisiones, especialmente en contextos sensibles como el de la salud. Otro aspecto clave en el ámbito de la asistencia y los cuidados es cómo evitar el aislamiento social que podría producirse por delegación de funciones afectivas en el robot, tanto por parte del entorno como incluso del propio usuario. Más allá de esta relación diádica humano-robot, aflora la necesidad de abordar cuestiones globales relacionadas con la justicia, que más allá de la certificación ética de un producto, consideren y regulen su utilización y las consecuencias de su despliegue.

Volvemos a la cita del filósofo R. Solomon, al bucle de que los robots que construimos a su vez nos modelan. Tenemos un gran poder que comporta una gran responsabilidad, ya que indirectamente modelaremos a las generaciones futuras por la vía de la tecnología que desarrollamos en el presente. Nunca las tecnologías disponibles eran tan disruptivas como ahora. Pero... ¿por qué tipo de robots nos dejaremos modelar los seres humanos?

Isaac Asimov ya intuyó esta problemática más global y trató de darle solución ampliando sus tres leyes de la robótica con una ley 0:

0. Un robot no puede hacer daño a la humanidad o, por inacción, permitir que la humanidad sufra daño.

Es una abstracción que necesitamos concretar en tipos de robots y escenarios futuros plausibles [105]. Aunque las distopías son útiles para hacer aflorar los riesgos de un despliegue de la robótica sin control social [106], la ciencia ficción tal vez se ha centrado en exceso en ellas, presentándonos un futuro inevitablemente oscuro y descartando cualquier utopía. Tanta distopía puede que termine en una profecía auto-cumplida, así que mejor que produzcamos utopías... ¡por si acaso!

### **Agradecimientos**

Gran parte de la investigación descrita, así como su recopilación en esta memoria, se enmarca en el proyecto CLOTHILDE, financiado por el European Research Council (ERC) en el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (ERC Advanced Grant n.º 741930), así como en la Plataforma Temática del CSIC (PTI+ Neuro-Aging: Entender el envejecimiento desde la I+D+I), financiado por la Comisión Europea en el programa Next-GenerationEU.

## REFERENCIAS

- [1] G. Ferraté, J. Amat, J. Ayza, L. Basañez, F. Ferrer, R. Huber, C. Torras (1986) *Robótica Industrial*. Barcelona: Marcombo.
- [2] C. Torras (2019) Assistive robotics: Research challenges and ethics education initiatives. *DILEMATA: International Journal of Applied Ethics*, 30: 63-77.
- [3] L.D. Riek (2017) Healthcare Robotics. *Communications of the ACM*, 60(11): 68-78.
- [4] P. Caleb-Solly (2016) A brief introduction to... Assistive robotics for independent living. *Perspectives in Public Health*, 136(2): 70-72.
- [5] Geriatric: A Lighthouse initiative of Munich Institute of Robotics and Machine Intelligence (MIRMI), Technische Universität München (TUM). <https://geriatric-robotics.mirmi.tum.de/en/>
- [6] E. Aibar (2022) Imaginación tecnológica e ideología de la innovación. En: «Ecología de la imaginación», coordinado por M. Garcés. *Artnodes*, 29. UOC. <https://doi.org/10.7238/artnodes.v0i29.393017>
- [7] F. Thomas (2008) A Short Account of Leonardo Torres' Endless Spindle. *Mechanism and Machine Theory*, 43(8): 1055-1063.
- [8] C. Torras (2016) Service robots for citizens of the future. *European Review*, 24(1): 17-30.
- [9] C.C. Kemp, A. Edsinger, E. Torres-Jara (2007) Challenges for robot manipulation in human environments. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(1): 20-29.
- [10] C. Smith, Y. Karayiannidis, L. Nalpantidis, X. Gratal, P. Qi, D.V. Dimarogonas, D. Kragic (2012) Dual arm manipulation—A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(10): 1340-1353.
- [11] M. Ersen, E. Oztop, S. Sariel (2017) Cognition-enabled robot manipulation in human environments: requirements, recent work, and open problems. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 24(3): 108-122.
- [12] J. Sanchez, J.A. Corrales, B.C. Bouzgarrou, Y. Mezouar (2018) Robotic manipulation and sensing of deformable objects in domestic and industrial applications: a survey. *The International Journal of Robotics Research*, 37(7): 688-716.
- [13] O. Kroemer, S. Niekum, G. Konidaris (2021) A review of robot learning for manipulation: Challenges, representations, and algorithms. *The Journal of Machine Learning Research*, 22(1): 1395-1476.
- [14] H. Ravichandar, A.S. Polydoros, S. Chernova, A. Billard (2020) Recent advances in robot learning from demonstration. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 3: 297-330.



- [15] M. Arduengo, A. Arduengo, A. Colomé, J. Lobo, C. Torras (2021) Human to robot whole-body motion transfer. *IEEE-RAS Intl. Conf. on Humanoid Robots*, Munich, Germany (Virtual), pp. 299-305.
- [16] F. Amadio, A. Colomé, C. Torras (2019) Exploiting symmetries in reinforcement learning of bimanual robotic tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2): 1838-1845.
- [17] A. Colomé, C. Torras (2018) Dimensionality reduction in learning Gaussian mixture models of movement primitives for contextualized action selection and adaptation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4): 3922-3929.
- [18] L. Rozo, P. Jiménez, C. Torras (2013) A robot learning from demonstration framework to perform force-based manipulation tasks. *Intelligent Service Robotics*, 6 (1): 33-51.
- [19] M. Arduengo, C. Torras, L. Sentis (2021) Robust and adaptive door operation with a mobile robot. *Intelligent Service Robotics*, 14(3): 409-425.
- [20] E. Caldarelli, A. Colomé, C. Torras (2022) Perturbation-Based stiffness inference in variable impedance control. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4): 8823-8830.
- [21] A. Andriella, A. Suárez, J. Segovia, C. Torras, G. Alenyà (2019) Natural teaching of robot-assisted rearranging exercises for cognitive training. *11th Intl. Conf. on Social Robotics (ICSR)*, Madrid, *Lecture Notes in Computer Science*, 11876: 611-621.
- [22] A. Suárez, A. Andriella, A. Taranović, J. Segovia, C. Torras, G. Alenyà (2021) Automatic learning of cognitive exercises for socially assistive robotics. *30th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Vancouver, Canada, pp. 139-146.
- [23] A. Suárez, A. Andriella, C. Torras, G. Alenyà (2023) User interactions and negative examples to improve the learning of semantic rules in a cognitive exercise scenario. *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Detroit, MI, USA, pp. 7953-7960.
- [24] G. Canal, G. Alenyà, C. Torras (2017) A taxonomy of preferences for physically assistive robots. *26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Lisbon, Portugal, pp. 292-297.
- [25] G. Canal, G. Alenyà, C. Torras (2019) Adapting robot task planning to user preferences: An assistive shoe dressing example. *Autonomous Robots*, 43(6): 1343-1356.
- [26] G. Canal, C. Torras, G. Alenyà (2021) Are preferences useful for better assistance?: A physically assistive robotics user study. *ACM Trans. on Human-Robot Interaction*, 10(4): 1-19.
- [27] G. Canal, G. Alenyà, C. Torras (2016) Personalization framework for adaptive robotic feeding assistance. *8th Intl. Conf. on Social Robotics (ICSR)*, Kansas City, MO, USA, Vol. 8, pp. 22-31.
- [28] A. Paraschos, C. Daniel, J. Peters, G. Neumann (2013) Probabilistic movement primitives. *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, pp. 2616-2624.



- [29] A. Colomé, G. Neumann, J. Peters, C. Torras (2014) Dimensionality reduction for probabilistic movement primitives. *IEEE-RAS Intl. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 794-800.
- [30] A. Paraschos, C. Daniel, J. Peters, G. Neumann (2018) Using probabilistic movement primitives in robotics. *Autonomous Robots*, 42, 529-551.
- [31] A. Andriella, C. Torras, G. Alenyà (2020) Cognitive system framework for brain-training exercise based on human-robot interaction. *Cognitive Computation*, 12: 793-810.
- [32] A. Andriella, G. Alenyà, J. Hernández-Farigola, C. Torras (2018) Deciding the different robot roles for patient cognitive training. *International Journal of Human-Computer Studies*, 117: 20-29.
- [33] A. De Luca, F. Flacco (2012) Integrated control for pHRI: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. *4th IEEE Intl. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, Rome, Italy, pp. 288-295.
- [34] A. Colomé, D. Pardo, G. Alenyà, C. Torras (2013) External force estimation during compliant robot manipulation. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Karlsruhe, Germany, pp. 3535-3540.
- [35] A. Colomé, A. Planells, C. Torras (2015) A friction-model-based framework for reinforcement learning of robotic tasks in non-rigid environments. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, pp. 5649-5654.
- [36] P. Jiménez, C. Torras (2020) Perception of cloth in assistive robotic manipulation tasks. *Natural Computing*, 19(2): 409-431.
- [37] M. Cusumano-Towner, A. Singh, S. Miller, J.F. O'Brien, P. Abbeel (2011) Bringing clothing into desired configurations with limited perception. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, pp. 3893-3900.
- [38] A. Doumanoglou, A. Kargakos, T-K. Kim, S. Malassiotis (2014) Autonomous active recognition and unfolding of clothes using random decision forests and probabilistic planning. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong-Kong, pp. 987-993.
- [39] A. Ramisa, G. Alenyà, F. Moreno-Noguer, C. Torras (2014) Learning RGB-D descriptors of garment parts for informed robot grasping. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 35: 246-258.
- [40] E. Simó-Serra, C. Torras, F. Moreno-Noguer (2015) DaLI: deformation and light invariant descriptor. *International Journal of Computer Vision*, 115(2): 136-154.
- [41] E. Corona, G. Alenyà, A. Gabás, C. Torras (2018) Active garment recognition and target grasping point detection using deep learning. *Pattern Recognition*, 74: 629-641.
- [42] E. Simó-Serra, C. Torras, F. Moreno-Noguer (2017) 3D human pose tracking priors using geodesic mixture models. *International Journal of Computer Vision*, 122(2): 388-408.

- [43] A. Ramisa, G. Alenyà, F. Moreno-Noguer, C. Torras (2016) A 3D descriptor to detect task-oriented grasping points in clothing. *Pattern Recognition*, 60: 936-948.
- [44] G. Alenyà, S. Foix, C. Torras (2014) Using ToF and RGBD cameras for 3D robot perception and manipulation in human environments. *Intelligent Service Robotics*, 7(4): 211-220.
- [45] G. Chance, A. Jevtić, P. Caleb-Solly, G. Alenya, C. Torras, S. Dogramadzi (2018) “Elbows out”—Predictive tracking of partially occluded pose for robot-assisted dressing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4), 3598-3605.
- [46] A. Jevtić, A. Colomé, G. Alenya, C. Torras (2018) Robot motion adaptation through user intervention and reinforcement learning. *Pattern Recognition Letters*, 105: 67-75.
- [47] H. Yin, A. Varava, D. Kragic (2021) Modeling, learning, perception, and control methods for deformable object manipulation. *Science Robotics*, 6.54.
- [48] A. Colomé, C. Torras (2021) A topological extension of movement primitives for curvature modulation and sampling of robot motion. *Autonomous Robots*, 45(5), 725-735.
- [49] A. Varava, D. Kragic, F.T. Pokorny (2016) Caging Grasps of Rigid and Partially Deformable 3D Objects with Double Fork and Neck Features. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1479-1497.
- [50] B. Ichter, M. Pavone (2019) Robot motion planning in learned latent spaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(3), 2407-2414.
- [51] Ch. Finn, S. Levine (2017) Deep visual foresight for planning robot motion. *Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2786-2793.
- [52] J.A. Delgado-Guerrero, A. Colomé, C. Torras (2020) Sample-efficient robot motion learning using Gaussian process latent variable models. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, pp. 314-320.
- [53] A. Colomé, C. Torras (2020) *Reinforcement Learning of Bimanual Robot Skills*. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR Series), vol. 134.
- [54] D. Tanaka, S. Arnold, K. Yamazaki (2018) “Emd net: An encode–manipulate–decode network for cloth manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3): 1771–1778.
- [55] M. Lippi, P. Poklukar, M.C. Welle, A. Varava, H. Yin, A. Marino, D. Kragic. Latent Space Roadmap for Visual Action Planning of Deformable and Rigid Object Manipulation. *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5619-5626.
- [56] J. Borràs, G. Alenyà, C. Torras (2020) A grasping-centered analysis for cloth manipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(3): 924-936.
- [57] S. Donaire, J. Borràs, G. Alenyà, C. Torras (2020) A versatile gripper for cloth manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4): 6520-6527.

- [58] J. Borràs, A. Boix, S. Foix, C. Torras (2023) A virtual reality framework for fast dataset creation applied to cloth manipulation with automatic semantic labelling. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, London, UK, pp. 11605-11611.
- [59] F. Coltraro, J. Fontana, J. Amorós, M. Alberich-Carramiñana, J. Borràs, C. Torras (2023) A representation of cloth states based on a derivative of the Gauss Linking Integral. *Applied Mathematics and Computation*, 457: 128165.
- [60] D. Blanco-Mulero, O. Barbany, G. Alcan, A. Colomé, C. Torras, V. Kyrki (2023) Benchmarking the Sim-to-Real Gap in Cloth Manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, to appear. ArXiv preprint arXiv:2310.09543.
- [61] F. Coltraro, J. Amorós, M. Alberich-Carramiñana, C. Torras (2022) An inextensible model for the robotic manipulation of textiles. *Applied Mathematical Modelling*, 101: 832-858.
- [62] F. Coltraro, J. Amorós, M. Alberich-Carramiñana, C. Torras (2023) A novel collision model for inextensible textiles and its experimental validation. *Applied Mathematical Modelling*, to appear. ArXiv preprint arXiv:2303.14437.
- [63] I. Garcia-Camacho, M. Lippi, M.C. Welle, H. Yin, R. Antanova, A. Varava, J. Borràs, C. Torras, A. Marino, G. Alenyà, D. Kragic (2020) Benchmarking bimanual cloth manipulation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2): 1111-1118.
- [64] A. Turing (1950) Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236): 433-460.
- [65] A. Taranović, A. Jevtić, C. Torras (2018) Adaptive modality selection algorithm in robot-assisted cognitive training. *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Madrid, Spain, pp. 4456-4461.
- [66] L. Rozo, S. Calinon, D.G. Caldwell, P. Jiménez, C. Torras (2016) Learning physical collaborative robot behaviors from human demonstrations. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(3): 513-527.
- [67] A. Jevtić, A. Flores, G. Alenyà, G. Chance, P. Caleb-Solly, S. Dogramadzi, C. Torras (2019) Personalized robot assistant for support in dressing. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 11(3): 363-374.
- [68] G. Canal, E. Pignat, G. Alenyà, S. Calinon, C. Torras (2018) Joining high-level symbolic planning with low-level motion primitives in adaptive HRI: application to dressing assistance. *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3273-3278.
- [69] A. Kapusta, Z. Erickson, H.M. Clever, W. Yu, C.K. Liu, G. Turk, C.C. Kemp (2019) Personalized collaborative plans for robot-assisted dressing via optimization and simulation. *Autonomous Robots*, 43(8): 2183-2207.
- [70] S. Javdani, S. Srnivasa, J.A. Bagnell (2015) Shared autonomy via hindsight optimization. *Intl. Conf. Robotics: Science and Systems (RSS)*, Rome, Italy, online proceedings: <https://www.roboticsproceedings.org/rss11/p32.pdf>

- [71] H. Admoni, S. Srivasa (2016) Predicting user intent through eye gaze for shared autonomy. *AAAI Fall Symposium on Shared Autonomy in Research and Practice*. <https://cdn.aaai.org/ocs/14137/14137-62071-1-PB.pdf>
- [72] ICRA Workshop on 'Shared Autonomy: Learning and Control' (2020) Presentaciones de O. Khatib y P.R. Giorno. <https://members.loria.fr/Sivaldi/icra-2020-workshop/>
- [73] C. Torras (1995) Robot adaptivity. *Robotics and Autonomous Systems*, 15(1): 11-23.
- [74] M. Hoffmann, H. Gravato, A. Hernandez, H. Sumioka, M. Lungarella, R. Pfeifer (2010) Body schema in robotics: A review. *IEEE Trans. on Autonomous Mental Development*, 2(4): 304-324.
- [75] S. Ulbrich, V. Ruiz de Angulo, T. Asfour, C. Torras, R. Dillman (2012) Kinematic Bézier maps. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B*, 42(4): 1215-1230.
- [76] S. Ulbrich, V. Ruiz de Angulo, T. Asfour, C. Torras, R. Dillman (2012) General robot kinematics decomposition without intermediate markers. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 23(4): 620-630.
- [77] R.S. Sutton, A.G. Barto (1998) *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT, Cambridge. (2nd edition at <https://www.dropbox.com/s/f4tnuhipchpkgoj/book2012.pdf>)
- [78] A. Colomé, C. Torras (2018) Dimensionality reduction for dynamic movement primitives and application to bimanual manipulation of clothes. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(3): 602-61.
- [79] J. Peters, S. Schaal (2008) Reinforcement learning of motor skills with policy gradients. *Neural Networks*, 21 (4): 682-697.
- [80] J.A. Delgado-Guerrero, A. Colomé, C. Torras (2020) Contextual policy search for micro-data robot motion learning through covariate Gaussian process latent variable models. *IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, pp. 5511-5517.
- [81] D. Vernon, G. Metta, G. Sandini (2007) A survey of artificial cognitive systems: Implications for the autonomous development of mental capabilities in computational agents. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 11 (2): 151-180.
- [82] D. Martínez, G. Alenyà, C. Torras (2017) Relational reinforcement learning with guided demonstrations. *Artificial Intelligence Journal*, Special Issue 'AI and Robotics', 247: 295-312.
- [83] D. Martínez, G. Alenyà, T. Ribeiro, K. Inoue, C. Torras (2017) Relational reinforcement learning for planning with exogenous effects. *Journal of Machine Learning Research*, 18 (78): 1-44.
- [84] A. Agostini, C. Torras, F. Wörgötter (2017) A general strategy for interactive decision-making in robotic platforms. *Artificial Intelligence Journal*, Special Issue 'AI and Robotics', 247: 187-212.

- [85] C. Torras (2023) Robótica asistencial: Retos éticos en la ayuda y acompañamiento a cuidadores y pacientes. En *'Soledad no deseada en la era digital'*, pp. 38-46. Fundació Víctor Grífols i Lucas.
- [86] A. Andriella, C. Torras, C. Abdelnour, G. Alenyà (2023) Introducing CARESSER: A framework for in-situ learning robot social assistance from expert knowledge and demonstrations. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 33: 441-496.
- [87] B. Dubois (2023) Pour une approche moderne de la maladie d'Alzheimer. En *"La medicina en el siglo xxi, avances y límites"*, Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, pp. 26-34. [https://www.universitatestiutardor.ad/images/stories/2023/UNIV\\_ESTIU\\_TARDOR\\_AND\\_2023\\_PUBLICACI%C3%93.pdf](https://www.universitatestiutardor.ad/images/stories/2023/UNIV_ESTIU_TARDOR_AND_2023_PUBLICACI%C3%93.pdf)
- [88] C. Torras (2023) Desplegament ètic de la robòtica assistencial per a un envelliment saludable i sostenible En *'La medicina en el siglo xxi, avances y límites'*, Universitat d'Estiu i Tardor d'Andorra, pp. 35-44. [https://www.universitatestiutardor.ad/images/stories/2023/UNIV\\_ESTIU\\_TARDOR\\_AND\\_2023\\_PUBLICACI%C3%93.pdf](https://www.universitatestiutardor.ad/images/stories/2023/UNIV_ESTIU_TARDOR_AND_2023_PUBLICACI%C3%93.pdf)
- [89] Parlamento Europeo (2017) *Normas de Derecho civil sobre robótica*. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051\\_ES.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-8-2017-0051_ES.html)
- [90] High-level Expert Group on AI (2018) *Directrices éticas para una IA fiable*. [https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc\\_id=60423](https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=60423)
- [91] IEEE Standards Association (2019) *Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems*. [https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/other/ead\\_v2.pdf](https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/other/ead_v2.pdf)
- [92] C. Torras (2024) Ethics of social robotics: Individual and societal concerns and opportunities. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 7: Preprint: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-control-062023-082238>
- [93] J. Pareto, B. Román, C. Torras (2021) The ethical issues of social assistive robotics: A critical literature review. *Technology in Society*, 67: 101726.
- [94] J. Pareto (2024) *Ètica de les tecnologies: Coordenades teòrico-pràctiques per a la robòtica social*. Tesi Doctoral, Universitat de Barcelona.
- [95] B.J. Grosz, D.G. Grant, K. Vredenburg, J. Behrends, L. Hu, A. Simmons, J. Waldo (2019) Embedded EthiCS: integrating ethics across CS education. *Communications of the ACM*, 62(8): 54-61.
- [96] ACM, IEEE, AAAI (2023) *Computer Science Curricula*. <https://csed.acm.org/wp-content/uploads/2023/03/Version-Beta-v2.pdf>
- [97] E. Burton, J. Goldsmith, N. Mattei (2018) How to teach computer ethics through science fiction. *Communications of the ACM*, 61(8): 54-64.
- [98] Teach with Movies (2012) *Robot Ethics using clips from Robot and Frank*. <https://teachwithmovies.org/robot-and-frank/>

- [99] C. Torras (2012) *La mutación sentimental*. Editorial Milenio. Original en catalán (Pagès Editors, 2008).
- [100] R.C. Solomon (1977) *The Passions*. Nueva York: Anchor Press / Doubleday.
- [101] C. Torras (2018) *The Vestigial Heart: A Novel of the Robot Age*. MIT Press. (Instructor Resources available: <https://mitpress.mit.edu/books/vestigial-heart>)
- [102] C. Torras (2018) *Human-robot interaction and human dignity*. Section 5 in the teacher's guide of [101] <http://www.iri.upc.edu/people/torras/vestigial.html>
- [103] EduCaixa Talks (2021) Robótica, Ética y Literatura: una actividad transversal en Secundaria. *Material didáctico de la novela La mutación sentimental - CarmeTorras* <https://educaixa.org/es/-/robotica-etica-y-literatura-una-actividad-transversal-en-secundaria>
- [104] C. Torras, L.G. Ludescher (2023) Writing science fiction as an inspiration for AI research and ethics dissemination. En *Human-Centered Artificial Intelligence: Advanced Lectures*, editado por M. Chetouani, V. Dignum, P. Lukowicz, C. Sierra, pp. 322-344. Cham: Springer International Publishing.
- [105] C. Torras (2023) Robótica asistencial: una apuesta por el envejecimiento saludable y sostenible. En *'Bioética: una mirada hacia el futuro'*, pp. 222-231. Fundació Víctor Grífols i Lucas.
- [106] C. Torras (2022) La ciencia ficción como estímulo del debate ético en robótica. En *'Robótica, ética y política. El impacto de la superinteligencia en el mundo de las personas'*, editado por N. Bilbeny, pp. 139-167. Icaria Editorial.





CONTESTACIÓN

EXCMO. SR. D. PERE BRUNET CROSA



Señor Presidente, autoridades, miembros de la Real Academia de Ingeniería, señoras y señores:

Es para mí un verdadero placer contestar el discurso de entrada de la Académica electa Carme Torras Genís.

Y lo es por diversos motivos que iré introduciendo durante esta mi exposición. Carme es matemática, científica y experta en robótica e inteligencia artificial, algo que comparte con una visión siempre basada en la aplicabilidad de sus trabajos y con la propuesta de soluciones tecnológicas desde una mirada ingenieril. Coincido con ella en el goce por todo aquello que resulta del maridaje entre geometría e informática, y compartí, hace ya décadas, su interés por la robótica. No puedo más que admirar sus resultados en robótica asistencial y los resultados prácticos que sus sistemas robóticos están teniendo en el cuidado de las personas mayores y dependientes. Me siento maravillado por su capacidad literaria y quedo atrapado por unos relatos que conectan ciencia, divulgación y ficción. Coincido con ella en la reivindicación de la centralidad de la ética y de su carácter esencial en todos los desarrollos tecnológicos.

La medalla que recibirá Carme Torras es la número XXIX, que estuvo antes asignada a nuestro apreciado compañero Adriano García-Loygorri, profesor de profesores en geología general, geología estructural y cartografía geológica, experto en la prospección y estudio de diversos depósitos minerales y en las cuencas carboníferas españolas, director general de minas entre 1980 y 1982, persona polifacética en la universidad y la empresa, en nuestro país y en Europa.

La geología se nutre de modelos que representan el subsuelo, caracterizándolo y facilitando su estudio. Y ellos son uno de los puentes que conectan los trabajos de Adriano y Carme, viaductos que nos conducen desde los sondeos y exploraciones de las últimas décadas

del siglo pasado a los actuales trabajos de nuestra nueva compañera. Las matemáticas trabajan con modelos, de tal modo que tras cualquiera de ellos descubren estructuras calculables. Mientras los modelos de Adriano facilitaban la explotación minera, los de Carme, no lineales y de auto-aprendizaje, permiten la fabricación de robots adaptables.

Matemática y con un doctorado en informática realizado entre la Universidad de Massachusetts y la UPC, Carme Torras es Profesora de Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas desde el año 1991. Sus intereses de investigación, que siempre han ido conectando la geometría y la informática con la robótica y las personas, se han ido ampliando desde el razonamiento espacial y el análisis de las restricciones geométricas a las redes neuronales, la neuro-computación y el aprendizaje robótico basado en demostraciones manipulativas.

Con Carme coincidimos hace ya cuarenta años en el Instituto de Cibernética de la UPC, donde ambos trabajábamos bajo la dirección de nuestro compañero y maestro Gabriel Ferraté. Compartíamos intereses en campos que iban desde la detección geométrica de posibles colisiones hasta los sistemas de visión artificial.

El actual Instituto de Robótica e Informática Industrial, IRII, centro de titularidad mixta entre el CSIC y la UPC, empezó a gestarse una década más tarde, en 1993. Fue en las reuniones previas a su creación, organizadas por el entonces vicerrector de investigación de la UPC Antoni Giró, cuando nuestra relación se consolidó. Nuestras reuniones mensuales iban configurando el IRII mientras las cinco personas involucradas creábamos vínculos tanto a nivel académico y profesional como humano.

Su trabajo sobre el posicionamiento visual de robots, patentado en 1995 por Thomson CSF, se basaba ya en un sistema de redes neuronales. Una estructura pionera en aquellos años, que también encontramos en el software para la recalibración automática de robots espaciales que se instaló en el modelo de la Estación Espacial Internacional que Daimler-Benz Aerospace tiene en Bremen. Sus investigaciones en visión artificial se aplicaron al vehículo NICOLAS-VTCU y a la aplicación Robstar de la empresa francesa ROBOSOFT. Y la aplicación de sistemas robóticos basados en técnicas cognitivas llegó incluso a la jardinería, con una patente de ámbito mundial en el marco del proyecto europeo GARNICS.

En todos estos ámbitos y en otros muchos, Carme Torras consiguió conectar las necesidades de los usuarios finales con las más avanzadas técnicas matemáticas y con todo tipo de condicionantes y restricciones tecnológicas hasta llegar a resultados ciertamente pioneros. Ha trabajado en visión artificial y cámaras de tiempo de vuelo, en redes neuronales primigenias, en sistemas de aprendizaje por demostración, en el posicionamiento robótico mediante visión artificial y redes neuronales, en sistemas de aprendizaje por refuerzo. Carme creó modelos geométricos de entornos con restricciones, adaptó los mecanismos del control neuromotor para utilizarlos en el aprendizaje y en la planificación del movimiento de los robots, estudió la percepción y actuación robótica en entornos inciertos.

La profesora Carme Torras es un referente en el área de la ingeniería robótica a nivel internacional. Hasta diciembre de 2017 y durante 5 años, fue editora de la revista más prestigiosa a nivel mundial en el área: *IEEE Transactions on Robotics*. Es editora asociada de otras cuatro revistas internacionales, y ha desempeñado diversos cargos en la asociación de Robótica y Automatización de IEEE (*Robotics and Automation Society, RAS*), siendo su vicepresidenta asociada para las publicaciones en 2011 y 2012.

Ha creado y dirige un prestigioso grupo de investigadores con perfiles complementarios (ingenieros industriales, mecánicos y de telecomunicaciones, expertos en inteligencia artificial e ingeniería de software y matemáticos) que le ha permitido abordar problemas de largo alcance combinando la robótica asistencial con las redes neuronales y con la geometría y topología computacionales. Ha realizado importantes contribuciones en su campo, siendo coautora de 8 libros, de más de 150 artículos en revistas internacionales de elevado prestigio y de más de 250 presentaciones en congresos y capítulos de libros. Ha sabido escalar los algoritmos de aprendizaje por refuerzo a espacios continuos de elevada dimensión, usando primitivas de movimiento probabilísticas.

Ha dirigido 21 tesis doctorales. Algunos de sus estudiantes de doctorado son ahora investigadores de gran reconocimiento que ocupan puestos académicos en universidades y diversas empresas. Entre sus aportaciones pioneras en el área de la robótica inteligente a nivel nacional e internacional cabe destacar las que ha realizado y continúa desarrollando en el campo de la robótica social, un área central en el panorama actual de la ingeniería. En este sentido, reci-

bió una subvención avanzada del prestigioso *European Research Council* (ERC) para su proyecto CLOTHILDE, que se plantea el diseño de robots para la manipulación versátil de telas y prendas de vestir.

Actualmente trabaja, entre otros, en el proyecto europeo *SoftEnable* con el objetivo de diseñar nuevas herramientas robóticas seguras para aplicaciones asistenciales, de salud y alimentación con elementos blandos, y en la iniciativa LaboRA, Laboratorio abierto de Robótica Asistencial, con proyectos piloto de aplicación inmediata en diversos hospitales.

Su investigación se centra en encontrar soluciones concretas y útiles para las personas, yendo desde el aumento de la autonomía de la gente mayor y discapacitada, al mantenimiento y la logística hospitalaria. Como indica en su discurso, su interés se ha ido desplazando y concretando desde los robots industriales a los asistentes robóticos, algo que conlleva un buen número de desafíos tecno-científicos que centran su actual actividad investigadora. Entre ellos, la dificultad que conlleva la manipulación robótica de objetos no rígidos y elementos de forma variable, la necesaria personalización según las preferencias de las personas usuarias, la colaboración con ellas en la instrucción de los robots y durante la realización de las tareas o los múltiples aspectos éticos y de seguridad.

La década que transcurrió entre 1995 y 2006 fue la de consolidación del IRII, primero en el edificio Nexus del campus norte de la UPC y luego en su ubicación actual. Fueron años que recuerdo con especial cariño, tiempos de reuniones frecuentes del grupo que denominábamos "IRI-4" y que compartí con el director Rafael Huber, con Carme y con Josep Amat. Nuestro grupo trabajaba en modelos geométricos y visualización, el de Carme en geometría, redes neuronales y robótica. Desde la proximidad temática planteábamos nuevos proyectos mientras el Instituto iba creciendo y tomando forma. Luego hemos ido compartiendo intereses y preocupaciones, hemos hablado de inteligencia artificial, geometría y robótica, hemos debatido sobre literatura y ética, hemos ido intercambiando inquietudes frente a los retos globales que nos llegan como humanidad.

Y es que Carme es un claro ejemplo de confluencia entre ciencia y humanidades, en la línea de la concurrencia de las dos culturas de Charles Percy Snow. Debo destacar tanto la centralidad de la ética en los trabajos de Carme Torras como su faceta literaria. Su interés por disseminar las implicaciones sociales de la robótica a un público am-

plio, la ha llevado a escribir cuatro novelas y a participar en seis volúmenes colectivos, en los que los problemas éticos en la tecnología son claves. Su novela *La mutación sentimental* fue traducida al inglés con el título de *The Vestigial Heart*, siendo publicada por MIT Press.

Su interés por la ética en ingeniería la ha llevado a preparar un curso universitario sobre “Ética en robótica social e inteligencia artificial”, cuyos materiales se encuentran a disposición en el web de MIT Press, y a impartir múltiples conferencias invitadas con el fin de promover el uso ético de la robótica, con temáticas que incluyen desde su análisis en los planos individual / social hasta los retos tecno-científicos y éticos de la robótica asistencial. Conectando literatura y ética, Carme defiende la importancia de la ciencia ficción en la configuración social de una opinión ética que deberíamos priorizar. Una ética que, en palabras suyas, “debe anteceder a la máquina” y que por tanto debería impregnar el desarrollo de la ingeniería. Una ética de las personas y para las personas, inclusiva, respetuosa y garante de dignidad y derechos, una ética que garantice las justicias intra-generacional, inter-generacional e inter-especies. Una ética, en definitiva, que nos ha de permitir el diseño y construcción de un mundo mejor, como concluían en 2016 las jornadas “*Engineering a better World*” de la Real Academia Inglesa de Ingeniería.

Carme Torras es co-coordinadora de AIHub-CSIC, y miembro del Panel Asesor del Centro Nacional Suizo de Excelencia (NCCR) en Robótica (2016-2022), del Consejo Asesor Valenciano en IA (ValgrAI) (2021-pres.), y del Consejo Asesor en Inteligencia Artificial del Gobierno de España (2020-pres.), entre otros.

Forma parte de la Academia Europaea (2010) y es miembro de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona (2013). Es *Fellow* de la Asociación Europea de Inteligencia Artificial (EurAI, desde 2007), del IEEE (2019), del Laboratorio Europeo de Aprendizaje y Sistemas Inteligentes (ELLIS, 2019) y *Senior Member* de la Sociedad Internacional de Redes Neuronales INNS. En 2020 recibió el Premio Nacional de Investigación de la Generalitat de Catalunya.

El 17 de mayo de 2021, sus Majestades los Reyes le hicieron entrega del Premio Nacional de Investigación Julio Rey Pastor 2020 en Matemáticas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. El premio le fue concedido por sus aportaciones pioneras en el área de la robótica inteligente a nivel nacional e internacional y en especial, en el campo de la robótica social. El jurado destacó tanto su tra-



yectoria de investigación como la contribución que su actividad científica ha supuesto para el progreso de la tecnología y la sociedad.

La experiencia de la profesora Carme Torras abarca de la ciencia a la sociedad, de la matemática a la transferencia tecnológica, de la literatura a la ética. Sólo me queda darle la bienvenida a esta Real Academia y pedirle que siga transmitiendo, dentro y fuera de la Academia, su conocimiento, sus valores y ese entusiasmo por la ciencia, la ingeniería, la cultura y la ética que siempre ha demostrado.

Doctora Carme Torras Genís, sé bienvenida a la Real Academia de Ingeniería.



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA, INNOVACIÓN  
Y UNIVERSIDADES