

) ϕ ϕ > Σ ( | ϕ > ϕ ] | ϕ ϕ | ϕ ϕ [ ϕ > ) Σ ) ϕ ) || ϕ Σ (

# ROBOTS HUMANOIDES

---

Por **CARLOS BALAGUER BERNALDO DE QUIRÓS**

Laboratorio de Robótica  
de la Universidad Carlos III de Madrid

En la actualidad, estamos empezando a vislumbrar un futuro en el que la humanidad estará rodeada de máquinas con niveles de movilidad, percepción e inteligencia práctica que pueden superar, en ciertas circunstancias, a la de los seres humanos. Estos sistemas robóticos están ya cambiando la sociedad moderna, pero aún el margen de transformación es difícil de imaginar con los nuevos desarrollos en Robótica e Inteligencia Artificial que se avecinan en el futuro próximo. Carlos Balaguer participó, junto a Carme Torras, en la mesa redonda *Matemáticas en los nuevos avances en Robótica* organizada junto con la Real Sociedad Matemática Española.



## UNA DE LAS MAYORES DIFICULTADES DE LA ROBÓTICA ACTUAL SON LOS ROBOTS HUMANOIDES

**LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL** tiene que ir unida de manera clara a la robótica. Estamos en una transición. La interdisciplinariedad no es un hecho y hay que trabajar con muchas áreas y en la frontera. RoboticsLab (<http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab>), mi laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid, es un grupo internacional de investigación en el que trabajan más de 80 personas a tiempo completo y 40 becarios. Es un laboratorio interdisciplinar que cuenta con ingenieros, matemáticos, físicos y colabora con médicos, sociólogos, economistas, etc. Nuestras principales líneas de trabajo están relacionadas con la robótica asistencial, personal, médica y de rehabilitación. Colaboramos con muchas empresas y hospitales en Madrid, Toledo y Barcelona, así como con el hospital infantil de Lisboa de asistencia a niños y familiares con cáncer.

Últimamente también estamos trabajando en *soft robotics*, robots blandos bioinspirados que a la vez son duros, pueden soportar mucho peso y son blandos y amigables. Estamos en este campo en la frontera de muchas disciplinas y muchas aplicaciones.

Una de las mayores dificultades de la robótica actual son los robots humanoides. La complejidad de cómo se mueve un cuerpo humano, cómo razona un cuerpo humano, es enorme. Un robot humanoide tiene entre 20 y 30 Grados de Libertad. La locomoción debe ser, preferentemente, bípeda porque tiene indudables ventajas, sobre todo de uti-

lizar nuestro propio hábitat. Si el espacio es grande, las ruedas son mejores; pero un sistema con ruedas no te permite pasar entre los asientos, pasillos. El robot ha de ser bípedo, de alguna manera parecido a nuestro cuerpo humano. Es decir, bioinspirado. También tienen que poder manipular objetos con dos brazos (bimanipulación), como nosotros y tener un avanzado sistema de percepción e inteligencia. En este contexto de complejidad, los investigadores del RoboticsLab no podríamos desarrollar este tipo de sistemas sin la ayuda de los matemáticos.

Desde hace más de ocho años estamos desarrollando, en nuestro laboratorio, un robot humanoide de tamaño natural al que hemos llamado "TEO". Ha sido diseñado con el propósito de ayudar a la investigación y a conseguir nuevos logros y descubrimientos dentro del área de la robótica. Sus piezas están construidas, principalmente, de aluminio aeronáutico y fibra de carbono. Cuenta con 28 Grados de Libertad, lo que le permite moverse con soltura, siendo capaz de hacer tareas tan humanas como andar, manipular objetos, realizar tareas del hogar, planchar o servir de camarero. El robot TEO es, en realidad, una plataforma para desarrollar tecnologías muy avanzadas que nos permite trabajar en muchas áreas muy diferentes.

La formulación clásica de las plataformas de humanoides está basada en un sistema matricial compuesto por sistemas de coordenadas, rotaciones, desplazamientos, etc. Si estas matrices se multiplican en un orden adecuado, y se resuelven problemas cinemáticos directos e inversos, se puede controlar adecuadamente los robots. Pero esto funciona bien para un número limitado de Grado de Libertad. Si tenemos mayores Grados de Libertad, como en el caso de los robots humanoides, necesitamos disponer de nuevos paradigmas matemáticos debido a que las plataformas de



humanoides son extremadamente complejas en el control.

Para que estos controles sean computacionalmente abordables y se calculen en un tiempo razonable, bucles de pocos milisegundos, se deben utilizar nuevas herramientas matemáticas como POE (Product of Exponential) que modelan los movimientos utilizando exponentes; en vez de con matrices. También utilizamos la Screw Theory y la Lógica Lie para tener modelos de rotación y traslación más eficientes. De la Screw Theory podemos llegar a los *Twists*, manera de modelar el movimiento de los robots con Screw y aplicar después la *Algebra Lie*. En definitiva, todas estas herramientas matemáticas nos han permitido tener algoritmos mucho más eficientes y rápidos, y poder controlar robots en la frontera de la ciencia.

### Los tres problemas fundamentales en la robótica humanoide

El problema de locomoción no es andar

bien o mal, sino no caerse. Hay que desarrollar algoritmos que aporten estabilidad al cuerpo. Para solucionar este problema los ingenieros preferimos soluciones sencillas y que se ejecuten de manera eficiente. El control para caminar es mediante el modelo aproximado de péndulo invertido. Con ello, tendremos un andar armónico, aunque limitado. El paso no es muy grande, el robot no anda excesivamente rápido; pero, desde luego, es un gran paso... De hecho, nosotros mismos, los humanos, tardamos entre diez y doce meses en aprender a andar. No es algo innato, sino un aprendizaje. Si los humanos tardamos todo ese tiempo, los robots tardan años en aprender a andar.

El segundo problema es la manipulación de objetos. En este caso controlar el equilibrio de todo el cuerpo del robot humanoide es tan importante como la manipulación. En la unimanipulación, manipulación con un solo brazo, también aplicamos un modelo de péndulo invertido; pero lo aplicamos tanto al robot como a la pieza que estamos transportando. Cuando un camarero está llevando una bebida en un bar, está controlando no caerse

él y la bebida. Hacemos exactamente lo mismo, control del robot y control del objeto que estamos transportando. Pero si ya tenemos bimanipulación, manipular a la vez con dos brazos, la cosa se complica mucho más. No solo tenemos que no caernos, también tenemos que conseguir que la bebida que estamos transportando no se caiga sin romper la bandeja. Si apretamos mucho, rompemos la bandeja. Si apretamos poco, la bandeja con la bebida puede caerse. Esto lleva a un nuevo modelo que se llama *Dynamic Linear Inverted Pendulum*. Un péndulo invertido dinámico cuyos parámetros se ajustan en tiempo real a lo que está pasando.

El tercer problema, es la percepción y la inteligencia, dos aspectos que van muy unidos. ¿Cómo sabemos dónde está el objeto y cómo llevamos a cabo la manipulación de objetos? Normalmente controlando la fuerza en las muñecas y tomando imágenes con las cámaras en

rios tutoriales de YouTube, hemos aprendido las letras del alfabeto de signos y se las hemos enseñado al robot.

### Las aplicaciones de los robots humanoides

Los robots humanoides pueden tener muchas aplicaciones: de asistencia, médicas, de rescate, de ensamblado, de educación, etcétera. Incluso manipular la ropa y doblar prendas que salen arrugadas de una lavadora. Para ello tenemos que utilizar cámaras de profundidad, escanear el estado de la prenda para extraer partes y computar cuál es la manera de agarrar esa parte de la prenda que está oculta y extenderla.

Lo de planchar es otra aplicación complicada. Es necesario controlar la fuerza de la plancha y la velocidad de la plancha para no

## ¿CUÁL ES NUESTRA META EN UN FUTURO? QUE LOS ROBOTS APRENDAN A HACER TAREAS POR SÍ SOLOS. ENSEÑARLES UNA SERIE DE PATRONES QUE LUEGO PUEDAN UTILIZAR PARA RAZONAR Y APRENDER OTRAS COSAS NUEVAS. ESTE ES NUESTRO FUTURO Y NUESTRO SUEÑO

la cabeza del humanoide. Exactamente igual a lo que haríamos nosotros mismos. Además, tenemos que “razonar”, normalmente parecido a nosotros mismos, utilizando técnicas de IA. En el último proyecto en el que hemos trabajado, queríamos comunicarnos con el robot humanoide a través del lenguaje de signos. Para ello hemos desarrollado diferentes manos robóticas con cinco dedos y la palma para imitar la comunicación por signos. ¿Qué es lo que tenemos que hacer? Pues aprender, aprender de nosotros mismos, *learning from demonstration*. Es decir: hemos cogido va-

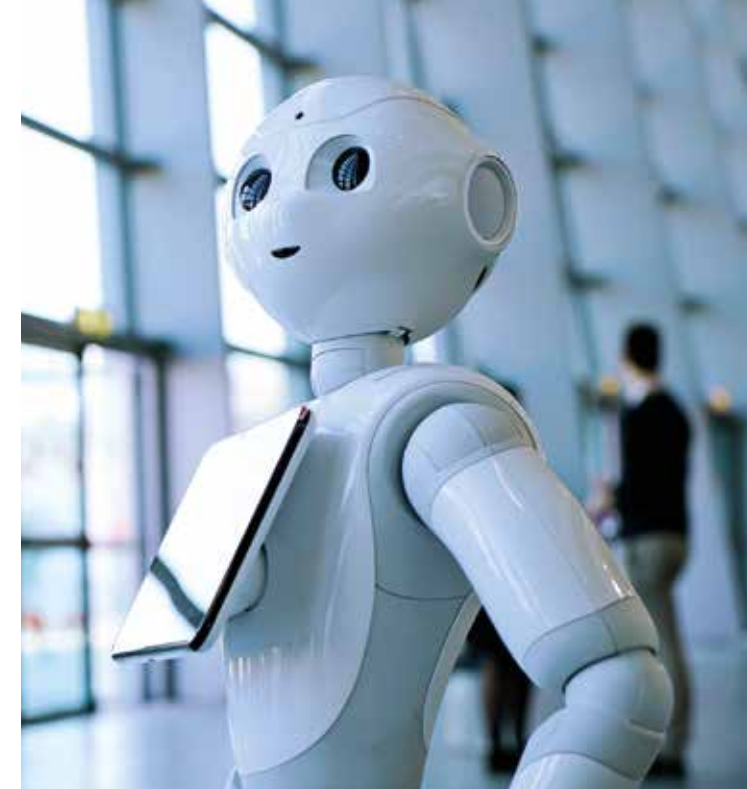
quemar nada. Hay que modelar matemáticamente la arruga en la ropa. Algo que parece muy sencillo, pero muy complicado tecnológicamente. Primero debemos tener una imagen de la prenda, desarrollar algoritmos de movimiento de la plancha y extraer la arruga. Una vez que hemos aprendido tenemos ya una serie de conocimientos para poder planchar cualquier tipo de ropa.

Una vez que el robot es capaz de manipular objetos podemos intentar hacer robots que sean, por ejemplo, camareros. Un robot cama-

rero transporta objetos de manera eficaz y estable. Tenemos que controlar las fuerzas de los brazos y necesitamos un sistema de predicción. Si vemos que algo se está cayendo, podemos predecir que se va a caer, y podemos decir cómo se va a actuar. De alguna manera se trata de un control predictivo. Todo esto lleva a una configuración de dos brazos y dos manos adaptable; esto significa que podemos mover las bandejas y las cosas en cualquier dirección sin que se caiga el robot o lo que transporta.

También podemos enseñar al robot funciones de ensamblado. En un proyecto de la Universidad de Montpellier, en el que hemos colaborado, se ha estado investigando en Airbus cómo ensamblar piezas con robots humanoides, accediendo a ellas en entornos muy complejos. La única solución posible es tener varios puntos de contacto para no caerse en el fuselaje del avión. Es decir, la estabilidad solo con las piernas no es suficiente, sino que hay que hacer algo que los propios operarios hacen: apoyarse en la estructura de lo que estás ensamblando. Por tanto, tenemos múltiples puntos de contacto, un *tracking* visual en tiempo real, y una reconstrucción en 3D de qué es lo que está viendo.

Cuando experimentamos con el robot en la fábrica de Airbus en Saint-Nazaire, al noroeste de Francia, primero localizamos el punto de apoyo. Una vez el robot puede apoyarse, tenemos que enfocar el punto de apoyo y utilizar la mano para ensamblar la pieza. Cuando ya está colocada, hay que retirar el robot. Esto quiere decir que inclusive en entornos tan complejos, como puede ser la construcción de aeronaves, los robots humanoides tienen su hueco. ¿Esto es rentable? Probablemente hoy en día no. Pero la calidad



de la posición de las piezas es mucho mejor a la hecha por humanos; es decir, las piezas se ponen siempre en la misma posición, siempre de la misma manera. Y esto lo que implica es que el control de calidad, de una cosa hecha por robots, puede ser menor que el control de calidad hecho con un operario humano. Quiere decir que, aunque la tarea en sí no sea rentable, en el conjunto de toda la construcción sí lo es. El problema es que estos robots son muy caros. Estamos hablando de máquinas de medio millón o un millón de euros. Esto se irá solucionando con el tiempo y la madurez tecnológica de los humanoides.

Mucho más complejo es el *whole-body stability* cuando además de no caernos y adaptarnos a lo que nos está pidiendo el usuario humano, tenemos una interacción de fuerzas exteriores y estemos, por ejemplo, moviendo la plataforma en la que se encuentra el robot o haciendo que el robot se mueva sobre piedras y tenga que utilizar los brazos y las piernas para no caerse.

¿CÓMO VAMOS A CONVIVIR CON ESTOS ROBOTS? SI NOS DAÑAN ¿QUIÉN ES EL RESPONSABLE? ¿CUÁL VA A SER SU LUGAR EN LA SOCIEDAD? ¿CÓMO VAN A SER LOS SEGUROS DE ESTOS ROBOTS? TODO ESTO ES BASTANTE COMPLEJO, PERO ESTAMOS EN ELLO.

### El futuro

El futuro es prometedor, sobre todo para los jóvenes investigadores. Debemos centrarnos en mejorar la interacción con los humanos, entre ellos mismos -entre los propios robots-, con el entorno, conseguir que los robots tengan sensibilidad; es decir, sensaciones corporales como el frío o el calor. Tener un aprendizaje mucho más ágil y mayor eficiencia energética. La autonomía de estos robots es 20, 30 minutos como mucho; después hay que recargarlos. Tenemos que introducir *bioelementos* en los robots como pieles artificiales en las manos de estos robots. Y sobre todo hay que desarrollar una *roboética* y establecer regulaciones. ¿Cómo vamos a convivir con estos robots? Si nos dañan ¿quién es el responsable? ¿Cuál va a ser su lugar en la sociedad? ¿Cómo van a ser los seguros de estos robots? Todo esto es bastante complejo, pero estamos en ello.

Nuestra meta es que los robots aprendan por sí solos. Enseñarles una serie de patrones que luego puedan utilizar para razonar y aprender otras cosas. Este es nuestro futuro y nuestro sueño.

## Bio



### CARLOS BALAGUER

Es Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en 1983. Desde 1996 es Catedrático del Laboratorio de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid, y fue vicerrector de investigación de dicha universidad (2007- 2015).

Sus líneas de investigación incluyen el diseño y desarrollo de robots, el control de cinemática y dinámico de robot, planificación de trayectorias y tareas, control fuerza/par, robots asistenciales y de servicio, robots escaladores, robots bípedos y humanoides e interacción humano-robot.

Ha participado en numerosos proyectos de la Unión Europea desde 1989. Es coordinador de la Red Nacional de Robótica y del programa de macrogrupos de la Comunidad de Madrid, que agrupa a seis universidades, denominado RoboCity2030, y también es el representante español en la plataforma europea EUROP. Es director de la Asociación europea de robótica euRobotics. Ha publicado más de 200 artículos, en revistas y conferencias internacionales, y varios libros en el campo de la robótica.



CONVERSACIONES ONLINE  
DESDE LA FUNDACIÓN RAMÓN ARECES