



Acercándonos a la robótica: algunas aplicaciones y el diseño de robots con patas

Sonia Martínez

Mechanical and Aerospace Engineering
University of California, San Diego
e-mail: soniamd@ucsd.edu
página web: <http://flyingv.ucsd.edu/sonia>

Introducción

Podemos decir que la robótica ha experimentado un crecimiento espectacular en las últimas décadas y constituye una herramienta básica en distintos escenarios de la industria, la medicina y la exploración espacial, por nombrar algunos campos. Además, debido en parte a su mitificación por la industria del cine, los robots son una tecnología de gran popularidad e impacto social. De hecho, el origen de la palabra “robot” se remonta a la obra teatral de Capek *Rossum’s Universal Robot (R.U.R.)*, donde robots humanoides trabajaban sin descanso para liberar a sus creadores humanos de las tareas más duras. Desde entonces, la idea de los robots como herramienta de posibilidades ilimitadas ha excitado nuestras mentes y dado lugar a una nueva tecnología de máquinas de gran especialización.

Los robots pueden clasificarse en base a distintos criterios, siendo uno de ellos el de su movilidad. Por ejemplo, los robots fijos son el tipo más común de robot industrial que podemos encontrar, y consisten normalmente en un brazo mecánico programable con varios grados de libertad o articulaciones. Estos robots son capaces de tareas muy complejas que requieren gran precisión, como son el montaje de circuitos y motores, la soldadura y pintura de coches u otras tareas de la industria automovilística. En otras aplicaciones, como la manipulación de elementos radiactivos en plantas nucleares, estos brazos mecánicos requieren la intervención de una persona que les guía a través de un mando especial (el sistema llamado de *máster-esclavo*). En este caso el brazo mecánico es parcialmente tele-operado y posee una capacidad de autonomía menor para realizar su tarea.



Figura 1. Mars Explorer, de la NASA.
[Fotografía obtenida de <http://marsrovers.jpl.nasa.gov>].

Por otro lado, los robots móviles se conciben con la intención de obtener máquinas que sean capaces de operar en regiones remotas y/o peligrosas. Así, hay toda una variedad de vehículos autónomos que incluyen coches con distintos tipos de ruedas o submarinos que a su vez disponen de brazos robóticos para operar en el fondo del mar. El *Spirit* y el *Opportunity* son ejemplos de robots autónomos utilizados por la NASA para la exploración de Marte y que, entre otros logros, han hecho posible la comprobación de la existencia de agua en el planeta rojo; ver la Figura 1.

aplicaciones. Así, recientemente se han creado sistemas tele-operados para su utilización en intervenciones quirúrgicas. Es el caso del sistema *DaVinci Robotic Surgical System*, desarrollado en los EE.UU. y diseñado para las operaciones de próstata. Este robot consta básicamente de un brazo mecánico dirigido por el cirujano mientras observa por ordenador la zona operada con un aumento de hasta treinta y cinco veces la imagen real. Los robots se han puesto en práctica ya en operaciones reales y el método ofrece múltiples ventajas con respecto a sistemas tradicionales, lo que se traduce por ejemplo en una recuperación más rápida y con menores complicaciones en los pacientes. Desafortunadamente, debido al alto coste de este sistema, desarrollado y producido en el extranjero, en este momento en España sólo hay un robot DaVinci disponible, que está siendo puesto a prueba en el servicio de urología de la Fundación Puigvert en Barcelona.

El desarrollo tanto de robots fijos como de robots móviles está en continua evolución para hacer posibles nuevos tipos de sistemas tele-operados para su utilización en intervenciones quirúrgicas. Es el caso del sistema *DaVinci Robotic Surgical System*, desarrollado en los EE.UU. y diseñado para las operaciones de próstata. Este robot consta básicamente de un brazo mecánico dirigido por el cirujano mientras observa por ordenador la zona operada con un aumento de hasta treinta y cinco veces la imagen real. Los robots se han puesto en práctica ya en operaciones reales y el método ofrece múltiples ventajas con respecto a sistemas tradicionales, lo que se traduce por ejemplo en una recuperación más rápida y con menores complicaciones en los pacientes. Desafortunadamente, debido al alto coste de este sistema, desarrollado y producido en el extranjero, en este momento en España sólo hay un robot DaVinci disponible, que está siendo puesto a prueba en el servicio de urología de la Fundación Puigvert en Barcelona.

Como ejemplo de la investigación reciente en vehículos autónomos podemos citar el *DARPA Grand Challenge*, que se ha llevado a cabo en los dos últimos años. Este desafío, propuesto por la Agencia norteamericana de Defensa para Proyectos de Investigación Avanzados (DARPA por sus siglas en inglés) ofrecía, en su segunda edición, dos millones

de dólares al equipo que fuese capaz de construir un vehículo totalmente autónomo que pudiese recorrer un camino de 175 millas trazado en el desierto de Mojave (desde California a Nevada) en 10 horas. Por supuesto, se daban una serie de restricciones sobre los medios que el sistema podía utilizar. Así por ejemplo, el vehículo no podía recurrir a sistemas de localización por satélite (GPS por sus siglas en inglés) para estimar su posición. Los vehículos disponían únicamente de la información procesada a través de sensores implementados en el vehículo (cámaras, radares, etc.). El “camino” a seguir es conocido con sólo dos horas de antelación a la salida y está descrito mediante una serie de hitos o marcas. Además, éste está repleto de obstáculos naturales y artificiales que los vehículos tienen que identificar, tales como zanjas, piedras, balsas de agua, etc. En la primera edición no hubo ganadores (ningún equipo completó el recorrido), y en 2005 el premio se lo ha llevado el equipo de la Universidad de Stanford, superando al equipo de la Universidad de Carnegie Mellon, que quedó en segundo puesto. Como anécdota, hay que mencionar que el dinero del premio sólo cubre una parte de los gastos necesarios para construir un sistema autónomo de este tipo. Para más información ver la página web <http://www.darpa.mil/grandchallenge>.

Otro tipo de robots móviles al que se presta mucha atención son los robots *biomiméticos* o *biomorfos*. Lo que se persigue en este caso es reproducir sistemas capaces de imitar la apariencia y autonomía de los seres vivos. La motivación proviene de distintos intereses que oscilan desde la búsqueda y el entendimiento de formas más eficientes de locomoción, y el interés meramente comercial (producción de juguetes o usos publicitarios), hasta el interés médico por la fabricación de prótesis (reproducción de partes del cuerpo humano). En la siguiente sección nos centraremos en los robots que caminan con varias patas, y desvelaremos algunas cuestiones matemáticas que surgen en la concepción del control de los mismos.

El problema del control de los movimientos de los robots con patas

La fabricación de un robot que camina implica desafíos no sólo en cuestiones de hardware e implementación de algoritmos, sino también en la concepción razonable del método de control que define el movimiento del sistema. Lo cierto es que actualmente la tecnología está muy por delante del trabajo conceptual necesario para el diseño inteligente de los sistemas robóticos, que en muchos casos se construyen a partir de heurísticas y conceptos matemáticos sencillos. Es necesario un esfuerzo interdisciplinar para producir robots eficientes capaces de imitar a los seres vivos. En este empeño se sitúa una parte de la investigación en robótica actual, que necesariamente ha de recurrir a técnicas matemáticas más avanzadas como son la Teoría de Sistemas Dinámicos y la Teoría Matemática del Control, dando lugar a problemas matemáticamente interesantes.

Desde un punto de vista matemático, un sistema robótico es equivalente a un conjunto de ecuaciones diferenciales de segundo orden con una cierta estructura (*ecuaciones de Euler-Lagrange*) sobre las que podemos afectar ciertos parámetros. Estos parámetros son los llamados *controles* del sistema, y mediante su variación podemos influir el comportamiento de sus trayectorias. Normalmente se quiere que las trayectorias sean asintóticamente estables y que se aproximen a cierta trayectoria de referencia.

Los modelos matemáticos de los robots que caminan tienen características especiales que añaden dificultad extra para el análisis de los mismos. En primer lugar, el número de ecuaciones diferenciales es muy grande debido a los muchos grados de libertad del sistema, dados por el gran número de articulaciones del robot, su posición y velocidad en el espacio. La naturaleza intermitente de los contactos de las patas con el suelo impone ligaduras o relaciones algebraicas que el robot ha de satisfacer alternadamente. El sistema mecánico está, pues, sujeto a impactos que de alguna forma hay que modelizar.

Por otro lado, el control del robot involucra dos aspectos clave. En primer lugar, deseamos controlar su posición y velocidad (*i.e.* la de su centro de masas) en el espacio, pero además necesitamos garantizar que el robot permanezca en pie y no se caiga. Para lograr esto, sólo contamos con un control directo sobre las trayectorias de un subconjunto de articulaciones del robot (que podemos afectar mediante motores) y que nos ayudan en parte a especificar la postura del robot. La tarea, pues, no es nada fácil. Por ejemplo, el movimiento de un robot bípedo requiere posturas en las que al menos una de las piernas está en el aire (cuando el robot camina) o incluso las dos piernas están en el aire (cuando el robot corre), lo que puede conducir potencialmente a inestabilidad. En principio no es obvio cómo el control limitado de las articulaciones puede ser suficiente para generar velocidad hacia delante y las trayectorias estables deseadas.

Dos heurísticas que se han utilizado en robótica para solucionar estos problemas son las siguientes. En robots con muchas patas, como son los clásicos hexápodos robóticos, se han definido algoritmos que mueven algunas de las patas dejando las otras fijas en una posición que evita que el robot se caiga. Así, un robot de seis patas puede mover tres de ellas dejando las otras tres fijas en trípede para no caerse. Para robots de cuatro patas, siempre se pueden definir movimientos sucesivos por los que una pata se mueve a la vez que las otras tres se fijan para dar estabilidad. Esta es ciertamente una solución que, sin embargo, no se aproxima a la imagen que tenemos de un caballo cuando trota.

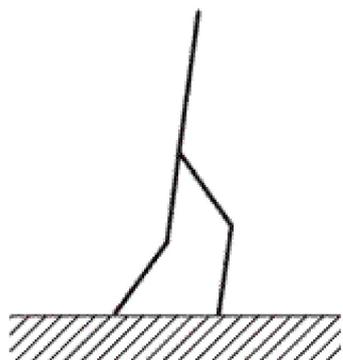
Otra heurística que simplifica mucho el problema de control de los robots bípedos y que se pone en práctica en robots populares como el *Asimo* de Honda y el *SDR-4X* de Sony es la siguiente. Utilizando pies con articulación en el tobillo, es más fácil controlar la postura global del robot cuando el pie está totalmente plano en el suelo –lo que ayuda a estabilizar el robot– y, por otro lado, el par de fuerzas aplicado en el tobillo ayuda a impulsar a estos robots hacia delante –lo que facilita el control de la trayectoria de su posición en el espacio–. Pero, de nuevo, esto no es

exactamente lo que las personas hacemos al caminar. En primer lugar, no necesitamos apoyar totalmente el pie en el suelo para lograr un movimiento estable y, además, está comprobado que la fuerza en el tobillo no es determinante para impulsarnos hacia adelante. En realidad, la estrategia empleada por *Asimo* tiene dos desventajas: mediante este tipo de control el robot no puede correr (sólo puede moverse a base de “pasitos” que no son lo suficientemente rápidos) y la energía consumida para realizar el movimiento es grande (la “pila” que mueve a *Asimo* es la “mochila” enorme que podemos observar en la foto de la [Figura 2](#)).



Figura 2. Robot *Asimo* de Honda. [Fotografía obtenida de <http://world.honda.com/ASIMO>].

Por lo tanto, la simplificación que se realiza cambiando adecuadamente el diseño del robot *Asimo* nos conduce a una solución que no es eficiente. Con el objetivo de mejorar esta aproximación y de entender realmente la mecánica que explica el caminar de las personas, diversos investigadores se han dedicado al estudio de mecanismos tipo “compás” ([Figura 3](#)), con un número mínimo de articulaciones y sin pies, que representarían las piernas de un robot andador plano. De esta manera no se puede recurrir al truco del tobillo y se puede investigar el papel de los pies al caminar.



Así, mediante la ley clásica de la conservación del momento angular, se puede ver que los pares de fuerzas aplicados a las articulaciones no contribuyen realmente a la generación de velocidad hacia adelante del robot, sino que es únicamente la gravedad la fuerza que contribuye a la misma. Se puede obtener una fórmula como la siguiente:

$$v = M \cdot g \cdot x,$$

donde M es la masa del robot, g es la constante de aceleración de la gravedad, y x es la diferencia entre la coordenada horizontal del centro de masas y la del extremo de la pierna adelantada para caminar. El papel de las articulaciones se reduce al control de la forma o la postura del robot que cambia el eje de inercia sobre el que la gravedad actúa para mover el robot. Además, la postura del robot tiene un efecto directo sobre la energía que se pierde en cada impacto de una pierna con el suelo. El desafío está en utilizar toda esta información para generar

Figura 3. Modelo plano de robot bípedo. [Figura obtenida de [1]].

trayectorias periódicas del movimiento que sean asintóticamente estables. Esta es la filosofía de trabajos recientes sobre “bípedos pasivos”, es decir, compases que son capaces de caminar al bajar una rampa sin más energía que la potencial, y de robots más sofisticados como *RABBIT* (ver [Figura 4](#)), desarrollado en colaboración entre diversos grupos franceses y norteamericanos. En particular, *RABBIT* se inició bajo el proyecto nacional francés ROBEA del CNRS, y actualmente incluye hasta siete laboratorios distintos de automática y robótica franceses, la Universidad de Michigan y Ohio State University. Para más información, se recomienda visitar la página web <http://robot-rabbit.lag.ensieg.inpg.fr>. El prototipo de *RABBIT* de la [Figura 4](#) se encuentra en el Laboratorio de Automática de Grenoble, Francia, <http://www.lag.ensieg.inpg.fr/fr/index.php>.

En el caso de *RABBIT*, las trayectorias de las articulaciones se diseñan para imponer asintóticamente “ligaduras virtuales” que hacen que cierta órbita periódica de su trayectoria sea asintóticamente estable. La idea es que los controles garanticen la estabilidad del movimiento a pesar de las posibles perturbaciones que el robot pueda sufrir (e.g. empujones, un fuerte viento, cambios en la masa del robot, etc.). El control se realiza mediante *feedback* y hace posible que el robot adquiera la postura necesaria para caminar a distintas velocidades.

Matemáticamente, esto se traduce en lo siguiente. Imponer ciertas ligaduras virtuales es equivalente a imponer que ciertas ecuaciones algebraicas de los estados del sistema se verifiquen. La dinámica del sistema que es compatible con que las ligaduras se satisfagan se llama la *dinámica cero*, y no es más que la restricción del sistema dinámico a cierto subconjunto del espacio de estados. Pues bien, lo que hace el control por *feedback* es garantizar que las trayectorias converjan a dicho subconjunto asintóticamente. En todo esto hay un importante detalle: un robot que camina es equivalente a un sistema mecánico sujeto a impactos. Estos impactos dan lugar a nuevas condiciones iniciales para el sistema de forma periódica, y hay que probar la existencia y estabilidad de ciclos límite a pesar de las re-inicializaciones. Lo interesante es que la descripción del sistema dinámico de *RABBIT* se puede simplificar gracias a la formulación sencilla de este subconjunto de “dinámica cero” al que queremos converger, lo que hace posible un análisis de estabilidad completo y el diseño de secuencias aceptables del movimiento.

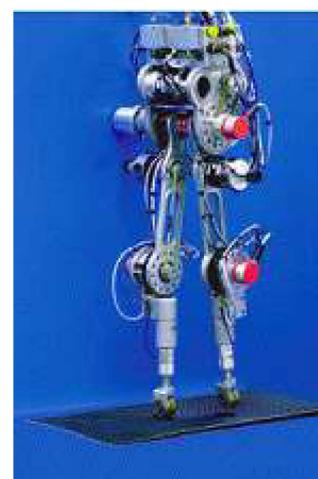


Figura 4. *RABBIT*. [Fotografía obtenida de [1]].

Para más detalles referimos al lector a [1] y a los artículos que allí se citan. Y para demostraciones físicas del robot caminando recomendamos visitar las páginas

<http://www.eecs.umich.edu/~grizzle/papers/robotics.html>

de las que enlazamos el **Video 5**:



Video 5. RABBIT da su primera carrera de seis pasos (24 de septiembre de 2004).

Aunque las demostraciones son espectaculares, todavía hay mucho “camino por andar” para crear robots capaces de correr o de trotar como lo hacen los seres vivos. Para ello, es necesaria una mayor sinergia entre los aspectos teóricos de los sistemas dinámicos que describen los sistemas mecánicos de los robots y los aspectos prácticos de implementación. Esta es, ciertamente, una oportunidad que está al alcance de la mano de los matemáticos y de aquellos interesados en la aplicación de los conceptos teóricos a una tecnología muy tangible.

Referencias

- [1] C. Chevallereau, G. Abba, Y. Aoustin, F. Plestan, E.R. Westerveld, C. Canudas-de-Wit, J.W. Grizzle: RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory. *IEEE Control Systems Magazine*, junio 2003.
- [2] A. Isidori: *Nonlinear control systems*. Springer-Verlag, 1995.
- [3] J.J. Craig: *Introduction to robotics*. Prentice-Hall, 2003.
- [4] R.M. Murray, Z.X. Li, S.S. Sastry: *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC Press, 1994.
- [5] H. Choset, K.M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L.E. Kavraki, S. Thrun: *Principles of robot motion: theory, algorithms and implementations*. MIT Press, 2005.

Sobre la autora



Sonia Martínez se doctoró en el programa de Ingeniería Matemática de la Universidad Carlos III de Madrid (España) en mayo de 2002. Después de pasar un año como Profesora Titular de Escuela Universitaria Interina en el departamento de Matemática Aplicada IV de la Universitat Politècnica de Catalunya, obtuvo una beca posdoctoral Fulbright para visitar el Coordinated Science Laboratory de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y el Center for Control, Dynamical Systems and Computation de la Universidad de California en Santa Barbara. Desde noviembre de 2005 se encuentra incorporada al Mechanical and Aerospace Engineering Department de la Universidad de California en San Diego como Assistant Professor. Sus intereses de investigación pertenecen al campo de la Teoría de Sistemas Dinámicos, Teoría de Control No lineal, Mecánica Geométrica y Robótica. En particular, su trabajo reciente se ha centrado en el modelado y control de redes de sensores robóticas, el desarrollo de algoritmos de coordinación de grupos de vehículos autónomos y el control geométrico de los sistemas mecánicos. Por su trabajo sobre el control de sistemas mecánicos infractuados recibió el Best Student Paper Award en la IEEE Conference on Decision and Control de 2002.