

This document is published in:

Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (2010), 7 (4), 5–16.

DOI: 10.1016/S1697-7912(10)70055-8

© 2010 Comité Español de Automática (CEA)

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid (S2009/DPI-1559/
ROBOCITY2030 II), desarrollado por el Laboratorio de Robótica (Robotics Lab) de la
Universidad Carlos III de Madrid.

Toma de Decisiones en Robótica

Miguel A. Salichs, María Malfaz, Javi F. Gorostiza

Robotics Lab, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Avenida de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid, España (e-mail: salichs@ing.uc3m.es; mmalfaz@ing.uc3m.es; jgorosti@ing.uc3m.es)

Resumen: En este artículo se presenta, en forma de *tutorial*, una visión de conjunto de la situación actual del problema de la toma de decisiones en robótica. El estudio se plantea de forma amplia e integradora y, por tanto, intentando no entrar en detallar soluciones concretas para problemas también concretos. El artículo está centrado sobre todo en las decisiones de alto nivel que debe tomar un robot, y no en problemas de más bajo nivel, que se solucionan empleando técnicas tradicionales de control o mediante algoritmos muy específicos. Nos referimos a “toma de decisiones” de un robot en el sentido amplio de determinar las actividades a realizar por el robot. Es decir, sin hacer ninguna exclusión a priori, basada en cuestiones tales como la estrategia de toma de decisiones empleada, el tipo de robot, las tareas que puede realizar, etc. El artículo está estructurado en una serie de secciones, en las que se tratan diversos temas de interés en robótica, desde la perspectiva de la toma de decisiones: autonomía, inteligencia, objetivos, decisiones de alto nivel, estrategias de toma de decisiones, arquitecturas de control, percepción, interacción humano-robot, aprendizaje y emociones.

Palabras Clave: Robótica, toma de decisiones, arquitecturas de control, autonomía, inteligencia, interacción humano-robot, aprendizaje, emociones.

1. INTRODUCCIÓN

Una característica esencial de cualquier robot es su capacidad de actuación. Dicho de otra forma, todos los robots son capaces de hacer diversas cosas, pero entonces surge la pregunta, ¿qué debe hacer el robot en cada instante? La respuesta es simple y, de hecho, normalmente ni se plantea la pregunta si nos encontramos con robots con poca o nula autonomía. Robots que reciben órdenes de un operador o que su actuación consiste en la realización de movimientos repetitivos y preprogramados, como suele ser corriente, por ejemplo, en los robots industriales. Sin embargo, según aumenta la autonomía de los robots, la variedad y complejidad de tareas realizables, y la variabilidad de los entornos de trabajo, la respuesta a la pregunta no es obvia.

El problema de la toma de decisiones está presente en muchas áreas de la robótica, desde el control de movimientos de robots hasta la robótica cognitiva, pero su tratamiento casi nunca se aborda de forma integrada. El estudio y, por tanto, las soluciones, suelen particularizarse para situaciones muy concretas. Por ejemplo, el tratamiento que se da al problema de cómo un robot móvil puede evitar obstáculos, típicamente no tiene nada que ver con el de cómo un robot recepcionista debe comportarse en presencia de un visitante. En este artículo se presenta, de forma resumida, una visión de conjunto de la situación actual del problema de la toma de decisiones en robótica. El estudio se plantea de forma amplia e integradora y, por tanto, intentando no entrar en detallar soluciones concretas para problemas también concretos.

Nos centraremos sobre todo en las decisiones de alto nivel que debe tomar un robot, y no en problemas de más bajo nivel que se solucionan empleando técnicas tradicionales de control o mediante algoritmos muy específicos (p. ej. el control del paso de un robot humanoide).

En ciencias de la naturaleza suele plantearse una cuestión semejante a la que hemos planteado respecto a los robots: ¿Por qué en cada momento un ser vivo hace lo que hace y por qué no hace algo distinto? La respuesta a esta pregunta ha recibido múltiples respuestas y ha dado lugar a multitud de estudios por parte de diversas disciplinas científicas. Según nos encontramos con organismos más evolucionados, la respuesta a esta pregunta se hace cada vez más difícil. Esta pregunta guarda relación con el problema técnico de la toma de decisiones en robótica. Aunque el problema científico es muy diferente del problema técnico, un mejor conocimiento de las soluciones que ha encontrado la naturaleza puede sernos de gran ayuda a la hora de resolver el problema técnico. En este artículo, cuando sea posible, intentaremos establecer analogías con la forma en que la naturaleza ha resuelto el problema de toma de decisiones, a fin de que nos pueda servir de referencia e inspiración para el desarrollo en sistemas artificiales, como los robots.

Nos referiremos a “toma de decisiones” de un robot en el sentido amplio de determinar las actividades a realizar por el robot. Es decir, sin hacer ninguna exclusión a priori, basada en cuestiones tales como la estrategia de toma de decisiones empleada, el tipo de robot, las tareas que puede realizar, etc.

El artículo está estructurado en una serie de secciones, en las que se tratan aspectos específicos del problema de toma de decisiones en robótica. La sección II está dedicada a estudiar quién es el sujeto que toma en última instancia las decisiones, y cuál es el grado de autonomía con que cuenta un robot para tomar sus propias decisiones. En la sección III se analiza qué se entiende por inteligencia de un robot, desde el punto de vista de la toma de decisiones. La sección IV está dedicada a analizar cuáles son las metas hacia las que van orientadas las decisiones de un robot y cómo se establecen dichas metas. En las secciones V y VI se detalla cómo se toman las decisiones. En la primera se

profundiza en los mecanismos empleados y, en la segunda, en cómo se organizan dentro de las arquitecturas de control. El comportamiento general del robot viene fijado por las decisiones de más alto nivel, que se comentan en la sección VII. En la sección VIII se describe la influencia de los sistemas de percepción del robot en sus decisiones, y como las carencias en la percepción afectan a la toma de decisiones. En los robots en los que hay una interacción bidireccional de alto nivel existe también un problema de toma de decisiones ligado a esa interacción, ya que el robot debe decidir en todo momento que actos comunicativos debe realizar. Este problema se estudia en la sección IX. En la sección X se comenta como los sistemas de decisión del robot pueden evolucionar y mejorar mediante aprendizaje. Finalmente en la sección XI se trata un tema que despierta un interés creciente en los sistemas bioinspirados: tratar de emular en los robots el papel que juegan las emociones en los animales.

2. AUTONOMÍA Y TOMA DE DECISIONES

Un aspecto esencial a la hora de estudiar la toma de decisiones en un robot es analizar quién es el que toma las decisiones. En la actualidad, los robots comerciales que realizan tareas relativamente sencillas, como por ejemplo los robots industriales o los robots aspiradora, son capaces de trabajar durante largos periodos de tiempo sin requerir la presencia de un operador. Es decir, podemos considerarlos como robots con un alto grado de autonomía. Sin embargo, no cabe decir lo mismo de robots más avanzados que, normalmente, no están comercializados y que en muchos casos tan sólo existen a nivel de prototipo en laboratorios de investigación. Muchos de estos robots reciben órdenes de alto nivel por parte de operadores humanos, mientras que las decisiones que toman ellos mismos son de más bajo nivel. Esto no quiere decir que las decisiones que toma el robot sean sencillas, quiere decir tan sólo que se requiere la presencia de un operador externo y que, por tanto, la autonomía del robot es limitada. Por ejemplo, muchos de los robots humanoides actuales, cuando se mueven en entornos complejos, lo hacen de forma teleoperada. El operador tan sólo indica hacia donde debe desplazarse el robot, mientras que es el propio robot el que se encarga de controlar el movimiento de sus articulaciones para conseguir andar manteniendo el equilibrio, algo ya de por sí muy complejo y difícil. Además, no hay que pensar tan sólo en robots teleoperados, muchos robots móviles, capaces de elegir su camino y evitar obstáculos de forma autónoma, dependen de un operador humano para que les indique a donde tienen que ir. En algunos casos, podemos encontrar también robots muy avanzados capaces de trabajar de forma totalmente autónoma, pero, normalmente, sólo en entornos controlados o únicamente durante breves periodos de tiempo.

La palabra autonomía debe usarse con cuidado, ya que puede dársele distintos significados en función del contexto o la disciplina académica en que se utilice. Por ejemplo, en filosofía el concepto autonomía se suele ligar a libertad para elegir objetivos, mientras que en robótica la autonomía se relaciona con la capacidad de actuar de forma independiente, es decir, no supervisada. (Haselager, 2005).

Conseguir robots capaces de operar en situaciones complejas, de forma desatendida y durante largos periodos de tiempo es uno de los retos a los que se enfrenta la robótica actual. No sólo por razones técnicas, sino también por razones económicas -el coste de un operador ayudando al robot no es asumible en muchas

ocasiones-, o razones operativas, como sucede en algunas aplicaciones militares.

Hay que tener cuidado en no vincular el hecho de que el robot interactúe con seres humanos a su grado de autonomía. Si la relación de los humanos con el robot es de tipo maestro esclavo, y el papel de los humanos es dar órdenes y el del robot obedecerlas, entonces sí cabe hablar de una limitación de la autonomía del robot. Pero si la interacción de los humanos con el robot es de igual a igual, entonces su presencia no tiene por qué estar asociada a restricciones para que el robot pueda tomar sus propias decisiones. Pensemos por ejemplo en un robot recepcionista o un robot guía de museo. En este caso, los humanos están vinculados a la tarea que realiza el robot. En caso de que un humano le dé una orden directa al robot, es factible que este no la obedezca, porque el robot haya decidido hacer algo distinto. Este planteamiento diferente del papel del ser humano suele afectar también a la arquitectura de control del robot. Cuando el humano realiza el papel de maestro y el robot el de esclavo, la interfaz del humano con el sistema de control del robot se realiza normalmente en los niveles superiores de la arquitectura de control; mientras que cuando la interacción es de igual a igual la interfaz puede efectuarse en los niveles inferiores de control.

Un ejemplo en el que se asume que la relación humano robot se basa en un esquema maestro esclavo lo encontramos en (Huang *et al*, 2004). En este artículo, los autores presentan una métrica para medir la autonomía de un robot. La métrica depende de tres factores: complejidad de la misión, dificultad del entorno e interacción humano-robot. Se considera que cuanto mayores sean las dos primeras, mayor es la autonomía del robot; mientras que la tercera actúa en sentido inverso. Es decir, cuanto mayor es la interacción humano-robot, menor es la autonomía del robot. Como ya hemos indicado, esto es cierto cuando el papel del operador es tan sólo el de ayudar al robot a que realice su misión, pero no es así cuando, por ejemplo, el ser humano pasa a ser parte de la misión, estableciéndose una relación de igual a igual.

Otra cuestión importante que se plantea cuando se rompe la relación maestro esclavo es la siguiente: en ese caso ¿qué debe hacer el robot cuando recibe una orden? Si el robot es realmente autónomo, todo dependerá de cómo se haya diseñado el sistema de toma de decisiones de nivel superior del robot. Supongamos que el robot funciona con un sistema de toma de decisiones orientado a la consecución de unos objetivos prefijados. En ese caso, lo más prioritario para el robot será cumplir los objetivos señalados, y puede suceder que las órdenes recibidas entren en conflicto con esos objetivos. Imaginemos un robot que tiene un nivel bajo de batería y que recibe una orden cuyo cumplimiento puede hacer que el robot no tenga energía suficiente para llegar a la estación de carga. ¿Qué debe hacer en ese caso? Si el objetivo prioritario es mantenerse activo -es decir, con las baterías cargadas- entonces no obedecerá la orden recibida, pero si el objetivo prioritario es obedecer, entonces hará lo que se le diga, aun a riesgo de agotar la energía de que dispone.

En algunos robots, el hecho de que el robot no obedezca algunas órdenes puede incluso llegar a considerarse como algo positivo. Supongamos que el robot debe mostrar un comportamiento semejante al de un animal (ej. robot mascota). En ese caso puede asumirse como algo natural el hecho de que el robot desobedezca ciertas órdenes, en la misma forma que lo haría un

animal real.

3. INTELIGENCIA Y TOMA DE DECISIONES

Hay múltiples definiciones de inteligencia. De hecho, hay multitud de libros y artículos dedicados a estudiar qué se entiende por inteligencia. Muchas de estas definiciones se focalizan en los procesos cognitivos asociados a la inteligencia: memoria, aprendizaje, pensamiento abstracto, etc. Sin embargo, desde la perspectiva de la toma de las decisiones, vamos a centrarnos en el resultado de la inteligencia en los seres vivos, que es la consecución de objetivos, siguiendo la orientación de (Sternberg y Salter, 1982), que definen la inteligencia como “comportamiento adaptativo orientado a objetivos”.

Cuando un robot toma una decisión, esa decisión puede ser más o menos acertada. De acuerdo con lo que hemos indicado antes, en lo que sigue, vincularemos la inteligencia del robot al grado de acierto en sus decisiones. Lo normal es que el grado de acierto varíe según cuál sea el problema al que se enfrenta el robot, y puede ser muy alto para ciertos problemas y serlo muy bajo para otros. Así pues, al igual que en psicología (Gardner, 1993), también en robótica podemos hablar de inteligencias múltiples. Un robot, como una persona, puede ser muy inteligente en un determinado tipo de problemas y, sin embargo, ser incapaz de dar respuestas acertadas en otro tipo de problemas. Esto es particularmente aplicable a casi todos los robots actuales, ya que han sido normalmente diseñados para cubrir sólo aplicaciones muy concretas. El acierto en las respuestas también dependerá, como es lógico, de la dificultad de los problemas planteados. No es raro encontrarnos, por ejemplo, con robots que toman decisiones adecuadas cuando se encuentran en el entorno controlado y simplificado de un laboratorio, pero son incapaces de hacer lo mismo en un entorno real mucho más complejo.

El concepto de inteligencia que estamos usando aquí es independiente de los mecanismos empleados en la toma de decisiones. Esto no siempre ha sido considerado así. En algunas escuelas, desde una perspectiva antropocéntrica, la inteligencia se ha considerado íntimamente ligada a los procesos mentales deliberativos que permiten el razonamiento en los seres humanos, algo que no existe en otros seres vivos menos evolucionados que nosotros. Hoy en día, esta visión está bastante superada (Brooks, 1991), y se reconoce que, incluso en los seres humanos, una gran parte de las decisiones “inteligentes” no están necesariamente asociadas a procesos de análisis racional.

Hemos vinculado inteligencia al grado de acierto en las decisiones del robot, pero ¿qué se entiende por acierto? La respuesta dependerá de cuales sean los objetivos del robot. Si se trata de un robot aspiradora, podemos considerar que el acierto está relacionado con el grado de limpieza que logre el robot y con el tiempo que tarde en hacer la limpieza. En este caso, el hecho de que el robot choque con los objetos del entorno no tiene porqué considerarse como algo negativo -siempre y cuando no rompa nada-, mientras que para otros robots el evitar obstáculos puede considerarse como un fin y, por tanto, consideraremos como decisiones incorrectas del robot aquellas que lo lleven a colisionar con otros objetos.

En robots que realizan tareas sencillas no plantea grandes dificultades determinar si las decisiones del robot son más o menos correctas, pero en la medida que evolucionan los robots y

se enfrentan a situaciones más complejas no es siempre sencillo determinar el grado de acierto de sus decisiones. En la actualidad, un tema de gran interés entre los investigadores en robótica es el establecimiento de métricas que permitan cuantificar los avances en este campo y poder comparar las capacidades de robots diferentes (Steinfeld *et al*, 2006). No es nada fácil conseguirlo, entre otras cosas, porque una de las cuestiones que más hay que valorar es la capacidad del robot para hacer frente a situaciones inesperadas. Esto hace que las medidas no puedan realizarse en unas condiciones de prueba totalmente definidas a priori, ya que en ese caso el robot podría diseñarse para comportarse perfectamente en esas condiciones y obtener unos resultados excelentes, que no necesariamente se repetirían si las condiciones de prueba se modificaran. Por esta razón, algunos investigadores son partidarios de medidas basadas en los resultados de competiciones entre robots, como ocurre por ejemplo en el mundo del ajedrez, donde el índice que mide la calidad de un ajedrecista, el Elo (Elo, 1978), se establece a partir de los resultados en las competiciones. Esto es posible hacerlo también en algunos robots, como por ejemplo los robots que participan en competiciones de fútbol robótico, pero no es extensible a todos los robots.

4. OBJETIVO DE LAS DECISIONES

Tal como hemos indicado, la inteligencia de un robot puede considerarse como una medida del grado en que sus decisiones son acertadas, en el sentido de que le lleven a conseguir unos determinados objetivos. Ahora bien ¿cuáles son los objetivos de un robot? Lo habitual es que nos encontremos con robots diseñados para realizar tareas específicas y, por tanto, el objetivo es simplemente la correcta realización de dichas tareas. Asimismo, si nos encontramos con un robot que actúa siguiendo en todo momento las ordenes de un operador, la respuesta es también simple: el objetivo del robot es obedecer. Pero en la medida en que los robots evolucionen y sean cada vez más autónomos y capaces de realizar múltiples actividades, no será tan fácil fijar cual es el objetivo u objetivos que debe cumplir un robot; y lo que es todavía más complicado: si el robot debe compaginar múltiples objetivos, qué debe hacer en situaciones en las que esos objetivos entran en conflicto.

En muchas ocasiones, los robots no trabajan con unos objetivos explícitos. Los objetivos puede que existieran en la mente del diseñador o del programador del robot, pero no se explicitan en el propio robot. Por ejemplo, el objetivo de un determinado robot industrial puede ser unir con puntos de soldadura dos piezas de la carrocería de un coche; pero esa información no es relevante para el robot, que lo único que tiene que hacer es ejecutar de forma repetitiva un programa establecido a priori. Esto puede hacerse si el programador puede predecir todas las circunstancias a las que va a enfrentarse el robot y preprogramar que es lo que debe hacer el robot en cada caso. Cuando esto no es así, será el robot el que deba tomar las decisiones en cada situación y, para ello, es útil explicitar los objetivos en el propio robot. Por ejemplo, si queremos que un robot móvil vaya de un lugar a otro podemos abordar el problema de dos formas muy diferentes. La primera sería dar a priori al robot las indicaciones de los movimientos que debe hacer para llegar al punto de destino. La segunda sería dar al robot el punto de destino, y que él directamente determine la ruta a seguir para llegar hasta allí. En el primer caso, el objetivo -el punto al que debe llegar el robot- sólo lo conoce el programador, mientras que en el segundo se le especifica explícitamente al robot, y es él quien

debe escoger la estrategia adecuada para conseguirlo.

Cuando existen objetivos explícitos, es importante tener en cuenta quién fija dichos objetivos. Es bastante corriente que en sistemas de control jerárquicos los objetivos de un nivel los fije un nivel superior, pero ¿quién fija los objetivos del nivel de mayor rango? Como ya hemos indicado al hablar de autonomía, una opción es que esos objetivos los fije el operador. Por ejemplo, un robot móvil cuya principal actividad es ir de un sitio a otro, puede recibir de un operador los lugares a los que debe ir. Otra opción es que los objetivos de mayor nivel sean fijos y no se puedan cambiar.

Si el robot ha sido diseñado para realizar una tarea concreta, los objetivos de alto nivel estarán vinculados a dicha tarea, aunque insistimos en que lo más común en la actualidad es que no se hayan explicitado en el robot. Por ejemplo, en la mayoría de robots aspiradora la estrategia que debe seguir el robot para conseguir limpiar adecuadamente está preprogramada. No es normal encontrar robots en que esté definido claramente el objetivo de limpiar, y que el robot cuente con un cierto grado de autonomía a la hora de establecer la estrategia adecuada para lograr ese objetivo.

Una solución alternativa y novedosa, inspirada en la naturaleza, es dotar al robot de un sistema motivacional en el que se establezcan a priori las necesidades del robot, y el objetivo sea satisfacer dichas necesidades. El cambio, respecto a fijar objetivos relacionados con las tareas a realizar, es muy grande. En un caso, el objetivo se concreta en términos de actividades o estado del mundo exterior al robot, mientras que en el otro se establece en función del estado del propio robot. Ambas perspectivas pueden estar relacionadas y en ciertos casos pueden llevar al mismo resultado, pero son muy diferentes. Imaginemos un robot que juega al fútbol, en ese caso puede establecerse directamente que el objetivo es ganar el partido. Otra opción sería establecer en el robot una necesidad vinculada a un estado interno, que podríamos llamar por ejemplo “autoestima”. Si la autoestima se satisface ganando partidos, entonces los dos planteamientos nos llevarán a los mismos resultados. En ese caso, establecer un sistema motivacional basado en necesidades internas, como la autoestima, puede parecer muy rebuscado, ya que se obtiene el mismo resultado estableciendo directamente que el objetivo es ganar partidos. Eso es cierto si el robot lo único que hace es jugar al fútbol, como sucede con los robots que actualmente participan en las competiciones de fútbol robótico. Pero pensemos en un robot que fuera capaz de hacer más cosas, además de jugar al fútbol. En esa situación, hay que fusionar el objetivo de ganar partidos con otros objetivos ligados al resto de actividades del robot, y se puede plantear el problema de compaginar objetivos muy diversos. Supongamos que para intentar ganar un determinado partido, que se va perdiendo, el robot debe de hacer un gasto extra de energía, y eso implica estar inmovilizado en la estación de carga durante más tiempo, sin poder realizar ninguna otra actividad mientras tanto. En ese caso ¿vale la pena intentar ganar el partido o es mejor darlo por perdido y ahorrar energía? Estos planteamientos pueden sonar a ciencia ficción, dado el estado actual de la robótica, pero en la medida en que se desarrollen robots cada vez más autónomos y versátiles, las situaciones en las que se produzcan este tipo de conflictos pueden ser habituales.

En (Malfaz y Salichs, 2009) se presenta un sistema de toma de decisiones inspirado en la naturaleza, basado en necesidades y

motivaciones internas del robot. En este caso, lo que se establece a priori son las necesidades del robot y su dinámica; es decir, cómo crecen y se satisfacen dichas necesidades. Por ejemplo, dado que los autores estaban interesados en aplicar su sistema a un robot social, y deseaban que el robot se viera impulsado a interactuar con seres humanos, definieron entre otras una necesidad “social”. Esta necesidad se satisfacía, es decir se reducía, cuando el robot realizaba alguna actividad en cooperación con seres humanos, y aumentaba cuando el robot estaba sólo o cuando la interacción con los seres humanos tenía un carácter negativo (ej. el robot era penalizado por un persona).

En el sistema propuesto, las necesidades, cuando exceden un determinado límite, dan lugar a motivaciones, que son las que impulsan al robot a realizar acciones que permitan disminuir de nuevo las necesidades. Es decir, el sistema motivacional actúa como un sistema de control, en el que las necesidades hacen el papel de señal de error. En los seres vivos, las motivaciones no sólo están vinculadas a las necesidades, sino que pueden activarse también como consecuencia de un estímulo externo. Pensemos en una persona que en un momento dado no tiene necesidad de comida y, por tanto, su motivación ligada a satisfacer esa necesidad –hambre- no está activa. Sin embargo, si en ese momento le mostramos una bandeja con unos apetitosos dulces, es muy posible que se sienta motivado a comer.

De acuerdo con lo anterior, las motivaciones se calculan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Si } D_i < L_d \text{ entonces } M_i &= 0 \\ \text{Si } D_i \geq L_d \text{ entonces } M_i &= D_i + w_i \end{aligned} \quad (1)$$

En donde D_i representa el valor de la necesidad (*drive*) i , M_i el valor de la motivación i , w_i el valor del estímulo adicional sobre la motivación i -en caso de que el estímulo este presente-, y L_d el umbral de la necesidad que activa la motivación correspondiente. En el sistema propuesto, las decisiones se toman en función del entorno del robot, lo que se denomina estado externo, y de la motivación dominante en el robot, lo que se denomina estado interno:

$$\text{Decisión} = f(\text{Estado_int}, \text{Estado_ext}) \quad (2)$$

Las decisiones a tomar para satisfacer diversas necesidades pueden ser contradictorias. Para solucionarlo, se establece una competición entre motivaciones y se considera de forma prioritaria la motivación dominante. Pero esto no es suficiente. Se propone también ajustar la función f , usando técnicas de aprendizaje por refuerzo, en aras de conseguir un objetivo global en el que se ponderen las diversas necesidades. Para ello se define como objetivo global el valor de “bienestar” Wb , de la siguiente forma:

$$Wb = Wb_{ideal} - \sum_i \alpha_i \cdot D_i \quad (3)$$

En donde Wb_{ideal} representa el máximo valor del bienestar. Como puede verse, según esta definición, el bienestar va asociado a la satisfacción de necesidades, y se considera que toma un valor máximo cuando el valor de todas las necesidades es cero. Los pesos α_i sirven para ponderar el valor que se da a cada una de las diferentes necesidades.

5. ESTRATEGIAS DE TOMA DE DECISIONES

En la naturaleza nos encontramos dos procedimientos muy diferentes a la hora de tomar decisiones (Shiffrin y Schneider, 1997). En prácticamente todos los seres vivos las acciones a realizar se determinan automáticamente, a partir tan sólo de información relacionada con el estado del individuo y del mundo exterior. Esto es aplicable tanto a los seres vivos más sencillos (ej. fototropismo en las plantas), como a animales más evolucionados (ej. comportamiento condicionado de un animal). Pero en los seres humanos existe un procedimiento adicional para tomar decisiones: la deliberación. Los seres humanos podemos, por ejemplo, evaluar mentalmente cuál sería el resultado previsible de distintas acciones y decidir qué hacer en función de esas previsiones. Este mecanismo no existe en otros animales y es el gran avance evolutivo de los seres humanos. Es un mecanismo cognitivo que permite introducir un horizonte temporal en el proceso de decisión -un perro no se plantea que es lo que va a hacer mañana-.

Aunque es muy potente, la toma de decisiones de forma deliberativa tiene, sin embargo, un gran inconveniente: es lenta. Por esta razón, incluso en los seres humanos, casi todas las decisiones se toman de forma automática. Pensemos por ejemplo en las acciones que, para mantener el equilibrio, ejecuta una persona mientras va montada en bicicleta. Si tuviera que decidir estas acciones en forma deliberativa, evaluando los pros y contras de las distintas acciones que puede realizar, es posible que decidiera la acción correcta, pero cuando ya esté rodando por el suelo, porque la decisión se ha tomado demasiado tarde. En este caso, los movimientos a realizar para mantener el equilibrio deben decidirse en décimas de segundo, algo que es incompatible con nuestro sistema de toma de decisiones deliberativo.

Otra diferencia entre procesos automáticos y procesos deliberativos es el grado de paralelismo en su ejecución. Varios procesos automáticos pueden ejecutarse simultáneamente. Nosotros, si estamos dando un paseo acompañados de otra persona, podemos, por ejemplo, mover nuestras piernas, al mismo tiempo que fumamos un cigarrillo y que verbalizamos lo que estamos diciendo a nuestro acompañante. Todos estos procesos automáticos se realizan sin ningún problema de forma concurrente.

Sin embargo, no ocurre lo mismo con los procesos deliberativos. Nosotros no somos capaces de pensar en dos cosas simultáneamente. En los humanos, los procesos mentales deliberativos se ejecutan de forma secuencial. No está claro si este hecho es algo que viene impuesto por algún tipo de limitación en nuestro cerebro, y no aporta ningún beneficio al individuo; o si es consecuencia de un desarrollo evolutivo, y aporta claras ventajas (ej. mantener la consciencia de un único yo). Al no estar claro si este carácter secuencial de los procesos deliberativos en los seres humanos es algo positivo, tampoco está claro si es algo que debe ser imitado en los robots. Lo normal es que los diseñadores de arquitecturas de control para robots no impongan ningún tipo de limitación a la posible concurrencia en la ejecución de procesos deliberativos. Aunque, en otros casos, sí se ha mantenido esta restricción, tratando de copiar a la naturaleza (Barber y Salichs, 2002).

Una dificultad, a la hora de desarrollar procesos deliberativos en un robot, es la necesidad de contar con modelos adecuados del

mundo, ya que son un elemento esencial para que puedan llevarse a cabo las actividades deliberativas. Por ejemplo, para planificar acciones futuras, es imprescindible contar con algún modelo sobre el que poder predecir el resultado de tomar distintas decisiones. Si no se tiene ningún modelo sobre el que predecir los pros y contras de las decisiones, no es factible planificar las acciones futuras. El problema radica en que, en general, la obtención de esos modelos no es nada sencilla. De hecho, como comentaremos en el siguiente epígrafe, en algunos periodos de la evolución de la robótica se ha intentado prescindir de los procesos deliberativos, sobre todo por la dificultad de obtener unos modelos suficientemente precisos. En la actualidad, no hay grandes problemas para obtener modelos que permitan evaluar algunas acciones concretas. Por ejemplo, no hay grandes problemas para obtener mapas del entorno, que puedan ser usados como modelos para planificar las trayectorias del robot. Pero no ocurre lo mismo en otros ámbitos de decisión de los robots. En la interacción humano robot, por ejemplo, no resulta fácil obtener un modelo que pueda ser utilizado por el robot para decidir qué acciones llevar a cabo en relación a dicha interacción.

Aunque pueda parecer que los procesos de toma de decisiones automáticos y deliberativos se basan en principios muy distintos, y que por tanto no pueden mezclarse, esto no es así. Hemos dicho que en la planificación se evalúan los pros y contras de las diferentes alternativas y que, para su valoración, se emplean modelos. Pero la toma en consideración de todas las posibles alternativas es algo computacionalmente muy costoso. Para evitarlo, normalmente los humanos cuando planificamos empezamos por preseleccionar unos pocos candidatos de entre todos los posibles, haciendo uso de procesos de decisión automáticos; y la evaluación deliberativa se hace sobre un conjunto restringido de alternativas, en lugar de hacerlo sobre todas las posibles. Es decir, usamos procesos automáticos para podar el árbol de búsqueda. Además, para valorar de forma rápida las situaciones a las que nos llevan las distintas alternativas, podemos emplear también procesos automáticos, que, aunque normalmente menos precisos que los deliberativos, son, sin embargo, mucho más rápidos. Pensemos en un jugador de ajedrez. A la hora de evaluar las posibles jugadas, no toma en consideración todas las alternativas técnicamente posibles, sino tan sólo evalúa aquellas alternativas que intuye que son las adecuadas. Esa "intuición" es precisamente el proceso automático a que nos referíamos antes, y que consiguen desarrollar los grandes maestros con miles de horas de entrenamiento. Además, esa intuición le permite, no sólo preseleccionar automáticamente las mejores jugadas, sino que le permite también valorar automáticamente una posición del tablero.

En robótica también se usan ambos procedimientos de toma de decisiones -automáticos y deliberativos-, pero no hay un consenso en cómo y cuándo debe emplearse cada uno de ellos. De hecho, esto es algo que ha sufrido grandes cambios en la corta historia de la robótica, como comentaremos a continuación.

6. ARQUITECTURAS DE CONTROL

Normalmente, las decisiones que controlan la actividad de un robot se toman en varios niveles. En el nivel inferior se toman las decisiones vinculadas directamente al control de los elementos físicos del robot: ruedas, articulaciones, luces, voz, etc. Los sistemas de control que actúan en este nivel trabajan con

tiempos de ciclo bajos y con información muy concreta. Según se van añadiendo más niveles, estos trabajan con tiempos de ciclo cada vez más elevados y con un mayor grado de abstracción en la información que manejan (Albus *et al.*, 1985). La organización por niveles ha existido desde el comienzo de la robótica. Sin embargo, la forma en que se estructuran los niveles y cómo debe trabajar cada uno de ellos es algo que ha suscitado bastantes controversias. Como consecuencia, las soluciones adoptadas han ido evolucionando con el tiempo, y en la corta historia de la robótica ha habido importantes cambios en la visión mayoritariamente aceptada sobre cómo debe ser la arquitectura de control de un robot.

Una opción, empleada en algunos robots, es que los sistemas de control de bajo nivel trabajen tan sólo con información interna del robot (ej. posición de las articulaciones) y no manejen ninguna información externa al propio robot. En este caso, la información del entorno o es directamente inexistente o, cuando se emplea, es solo para crear modelos del entorno (ej. mapas), con los que se toman decisiones (ej. planificación de trayectorias) que más tarde se ejecutan en bucle abierto respecto al entorno.

La falta de información del entorno no presenta problemas para llevar a cabo algunas tareas, como por ejemplo las que suelen realizar muchos robots industriales. Aquí no es necesaria ninguna información del entorno, porque este no cambia. Esto sucede, por ejemplo, con las piezas de un coche que debe soldar un robot. Típicamente están posicionadas siempre en el mismo sitio y, por tanto, el robot puede hacer perfectamente su trabajo sin ninguna realimentación exterior.

Esta forma de trabajo, en la que se prima la planificación como forma de adaptarse al entorno, era dominante en los primeros años de desarrollo de la robótica. Sin embargo, hay muchas aplicaciones de los robots en las que los resultados obtenidos con esta estrategia no son admisibles. Por ejemplo, imaginemos un robot móvil que, para ir de un lugar a otro, primero planifica en detalle una trayectoria libre de obstáculos -usando un mapa del entorno obtenido por el propio robot-, y que luego trata de seguir fielmente esa trayectoria, ya sin ninguna información del entorno. No sería nada raro que el robot acabe colisionando con algún obstáculo, debido a que:

- El mapa del entorno no es totalmente exacto, por la imprecisión de los sistemas de percepción del robot.
- El mapa puede estar obsoleto, porque en el entorno hay elementos que pueden cambiar de ubicación (ej. personas en movimiento).
- El robot no puede seguir con precisión la trayectoria planificada, por errores de localización.

Los malos resultados con este tipo de arquitecturas llevaron a un cambio radical a mediados de los años 80: el desarrollo de los sistemas reactivos (Brooks, 1986). Los problemas de la estrategia anterior se achacaron a que las decisiones se tomaban sobre modelos y, para evitarlos, se optó por prescindir de dichos modelos. Como consecuencia, en la práctica también se prescindió de la planificación. En los sistemas reactivos se prima la toma de decisiones basada en información obtenida por los sensores exteroceptivos del robot, por lo que los sistemas de control, incluso los de muy bajo nivel, pasan a trabajar con realimentación del exterior. Esto dio como consecuencia

resultados muy positivos, ya que los comportamientos obtenidos en el robot se adaptaban con mucha facilidad al entorno. Sin embargo, los sistemas totalmente reactivos no están ausentes de problemas. Dado que con ellos las decisiones de los robots están basadas tan sólo en la información obtenida instantáneamente por los sensores, es decir información local, es complicado tomar decisiones globales.

En los años 90 comenzaron a aparecer las denominadas arquitecturas de control híbridas, en las que se conjugaban la toma de decisiones reactivas y las decisiones planificadas (Gat, 1998). Como hemos indicado, en las arquitecturas primitivas la información del entorno sólo se emplea para hacer modelos, sobre los que hacer planes; y en las arquitecturas reactivas sólo se usa para realimentar los sistemas de control. Sin embargo, en las arquitecturas híbridas se usa de las dos formas.

Tanto en las arquitecturas híbridas, como en las arquitecturas primitivas coexisten actividades automáticas y actividades deliberativas de toma de decisiones. Pero las decisiones que se toman con cada uno de los dos procedimientos son muy diferentes. En las arquitecturas primitivas las decisiones deliberativas contenían un gran nivel de detalle y dejaban muy poca libertad a los sistemas de control de bajo nivel para su ejecución. Sin embargo, en las arquitecturas híbridas las decisiones deliberativas no tienen por qué ser muy detalladas, ya que se deja bastante más libertad a los niveles reactivos inferiores para su cumplimiento. Por ejemplo, un planificador de trayectorias tradicional debe calcular con detalle las coordenadas que ha de seguir el robot, mientras que un planificador de trayectorias de un sistema híbrido es suficiente con que indique las zonas por las que debe ir el robot. En este último caso, la trayectoria concreta se decidirá más tarde de forma reactiva, mientras el robot se va moviendo.

7. DECISIONES DE ALTO NIVEL

Como hemos visto antes, lo habitual en los robots actuales es tener varios niveles de toma de decisiones. En los niveles inferiores se toman decisiones más específicas y detalladas, mientras que en los superiores se usa un mayor grado de abstracción y se toman decisiones que no necesariamente implican un alto grado de detalle. Pero, ¿cómo deben tomarse las decisiones de más alto nivel? Ya hemos comentado que, en bastantes robots, incluso en robots que no se consideran teleoperados, estas decisiones las toma un operador humano. Por ejemplo, un robot dedicado al transporte de objetos dentro de un hospital, lo normal es que reciba órdenes de un operador humano, indicándole a donde debe llevar las mercancías en cada caso.

En robots con más autonomía, lo más habitual es que las decisiones de mayor nivel vengan fijadas por un programa, que actúa como un guión que debe seguir el robot. El guión puede ser fijo y haberse establecido por el fabricante del robot, o puede ser modificable por parte del usuario del robot. Un ejemplo de lo primero son los robots aspiradora actuales, que funcionan con un programa fijo, mientras que un ejemplo de lo segundo podría ser un robot industrial, en el que el programa lo introduce el usuario. Independientemente de si el guión lo ha establecido el fabricante o el usuario, el guión debe tener en cuenta todas las posibles circunstancias que vayan a acontecer al robot y predeterminar qué es lo que debe hacer el robot en cada caso. Esto no tiene que hacerse especificando en detalle las acciones del robot.

Recordemos que los niveles superiores trabajan con un alto grado de abstracción, y de los detalles pueden encargarse los niveles más inferiores. Si, por ejemplo, un robot bípedo debe moverse, es suficiente con que en el guión se indique a donde debe ir. Los detalles de por dónde debe ir, qué debe hacer si encuentra algún obstáculo o cómo debe articular el movimiento de las piernas son asuntos que se pueden encargar de resolver otros sistemas de toma de decisiones, ubicados en niveles inferiores de la arquitectura de control. La opción de dotar al robot de un guión preestablecido es factible cuando las circunstancias que pueden acontecer al robot son predecibles, y por tanto, puede anticiparse, en dicho guión, qué es lo que hay que hacer en cada situación. En la práctica totalidad de robots actuales esto es así, porque realizan tareas relativamente simples, el repertorio de actividades que pueden llevar a cabo es bastante limitado, y trabajan en entornos bastante controlados y poco variables. Pero en la medida en que esto vaya cambiando, y las actividades de los robots y sus entornos de trabajo sean cada vez más complejos, no será fácil predecir todo lo que le puede llegar a ocurrir al robot.

En algunos robots existe otra razón que hace que no sea deseable un sistema de toma de decisiones de alto nivel basado en un guión. Es cuando queremos que el comportamiento del robot se asemeje al de un ser vivo. Esto sucede en muchas aplicaciones de los robots sociales, es decir, robots cuyo fin principal es la relación con seres humanos. La semejanza del comportamiento del robot con el de un ser vivo hace más fácil la relación con el robot, ya que facilita el establecimiento de vínculos afectivos. Pensemos, por ejemplo, en robots para entretenimiento y educación de niños. Los sistemas de toma de decisiones basados en un guión generan comportamientos repetitivos y por tanto poco naturales. Esto es algo positivo en determinados robots, como por ejemplo los robots industriales, pero no sucede lo mismo en un robot que tiene que mantener la atención de un niño. En este caso, es deseable que el comportamiento no sea siempre predecible, y que el niño pueda verse incluso sorprendido en algunas ocasiones por el comportamiento del robot. Una de las razones del poco éxito comercial de los robots mascota, que han aparecido hasta la fecha, es que su comportamiento se aleja mucho del comportamiento del animal al que pretenden imitar.

Una alternativa para tomar las decisiones de más alto nivel es establecer únicamente objetivos de alto nivel, y dejar que el robot tome las decisiones que estime oportunas para lograr esos objetivos. Como hemos indicado antes, los objetivos pueden ir ligados directamente a las tareas que debe realizar el robot o pueden ir ligados a estados internos del robot. Los mecanismos que utilice el robot para decidir las acciones más adecuadas para conseguir esos objetivos pueden ser muy variados, y dependerán, entre otras cosas, de la naturaleza de tales objetivos. Las posibilidades van desde la utilización de un sistema reactivo sencillo, hasta mecanismos de toma de decisiones deliberativos.

Las diferencias entre las dos formas de plantear la toma de decisiones de alto nivel de un robot autónomo –guiones y objetivos- son conceptualmente muy significativas. Cuando se opta por fijar tan solo los objetivos, se le está indicando al robot “qué” es lo que debe conseguir, mientras que, cuando se le fija un guión preestablecido, se le está indicando al robot “cómo” debe conseguirlo. Cabe también la posibilidad de unir ambas opciones. Es decir, que ciertas decisiones estén preprogramadas, mientras que otras se dejen abiertas para que sea el propio robot

quien elija cómo actuar, a fin de alcanzar sus objetivos.

8. PERCEPCIÓN Y TOMA DE DECISIONES

Alguien ajeno al mundo de la robótica puede pensar que las limitaciones en las decisiones que toman los robots actuales están esencialmente vinculadas a los algoritmos empleados en la propia toma de decisiones. Sin embargo, esto no es cierto. Hay que recordar que, salvo en algunos casos excepcionales, las decisiones se toman en bucle cerrado, es decir las decisiones se toman a partir de la información obtenida por los sistemas de percepción del robot. De nada sirve tener complejos sistemas de toma de decisiones, si la información con que trabajan es manifiestamente insuficiente. Uno de los principales obstáculos en el desarrollo de la robótica se encuentra precisamente ahí. La información que tienen los robots actuales del mundo que les rodea es muy limitada. Eso es particularmente cierto cuando los robots trabajan en entornos reales, y que no han sido simplificados artificialmente para facilitar la actuación del robot, como ocurre con bastante frecuencia en experimentos de laboratorio.

En bastantes robots actuales, la información del entorno se limita a un mapa de distancias a los objetos que rodean el robot y, en la mayoría de los casos, este mapa es tan sólo un mapa bidimensional y no tridimensional. Comparemos eso con la riqueza de información sobre el entorno que nos rodea, que tenemos los seres humanos. Nosotros somos capaces, por ejemplo, de identificar que objetos hay en torno nuestro y saber cuál es su ubicación. Además, si estamos junto a otros seres humanos, somos también capaces de percibir que están haciendo. Es decir, la información que recibimos tiene también un carácter dinámico.

Estas carencias afectan al robot de dos formas. Cuando está ejecutando una actividad, de forma reactiva, la percepción del entorno es necesaria como realimentación de los sistemas de control. Además hemos comentado que los sistemas de toma de decisiones deliberativos hacen uso de modelos y esos modelos, salvo que vengan dados a priori, deben ser construidos por el robot en base a la información que es capaz de obtener con sus sistemas de percepción. Las limitaciones en los sistemas de percepción afectan, por tanto, tanto a las actividades reactivas como a las deliberativas.

Para limitar el efecto de estas carencias, las estrategias que se adoptan en los robots actuales para tratar algunos problemas son muy diferentes de las soluciones naturales. Por ejemplo, actualmente la mayoría de robots abordan los problemas de navegación en base a información métrica; mientras que en la naturaleza los mismos problemas de navegación se abordan usando esencialmente información relativa a objetos del entorno –una persona puede estar perfectamente localizada, y sin embargo no tener ni idea de cuáles son sus coordenadas-. Para reducir el problema derivado de la falta de información sobre el entorno, se han desarrollado también otras soluciones artificiales, como, por ejemplo, incorporar tarjetas RFID a los objetos, para facilitar su reconocimiento.

En resumen, hay que ser conscientes de las serias limitaciones que conllevan los sistemas de percepción que actualmente se utilizan en los robots. En la medida que avancen estos sistemas de percepción, veremos también avances muy importantes en otros campos de la robótica.

9. INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT Y TOMA DE DECISIONES

La interacción humano-robot se ha planteado típicamente en robótica de forma unidireccional –el operador da instrucciones al robot-, y si se plantea de forma bidireccional suele usarse tan sólo una realimentación de señales de bajo nivel, como por ejemplo en los controles hápticos. En estos casos, en el robot no hay ningún tipo de toma de decisiones ligado directamente a la interacción humano-robot, ya que el único que tiene que tomar decisiones en el proceso de interacción es el operador.

Sin embargo, en robótica cada vez adquiere más interés la posibilidad de establecer una comunicación bidireccional entre humano y robot, que se parezca lo más posible a la interacción natural entre humanos. La interacción en estos casos toma la forma de diálogos, en los que humano y robot intercambian información, que puede ser multimodal, implicando voz, gestos, tacto, etc. Además, puede interesar que la iniciativa la puedan tomar ambas partes, e incluso que la intervención de ambos participantes en el diálogo no mantenga necesariamente un orden riguroso, y que quepa la posibilidad de introducir interrupciones.

El problema de las decisiones vinculadas a la interacción natural entre un humano y un robot puede establecerse mediante tres sencillas preguntas: qué comunicar, cuándo comunicarlo y cómo. De este modo, el acto comunicativo queda dividido en tres niveles. El primero establece su contenido, el segundo está relacionado con su articulación en el tiempo, y el tercero con su forma.

Asimismo, en todo acto comunicativo, los participantes establecen una relación: se presentan a sí mismos hacia los demás, y proponen un rol. A la vez pueden aceptar, o no, la presentación que los demás hacen de sí mismos y sus roles propuestos (Watzlawick *et al.*, 1993). Una comunicación eficiente debe poner a los participantes de acuerdo, tanto a nivel de contenido -el relacionado con la información propiamente dicha-, como a nivel relacional.

En estos casos, el robot debe decidir en todo momento que actos comunicativos realizar. El control de los diálogos suele llevarse a cabo en un módulo denominado gestor de diálogos. En la actualidad, no hay todavía grandes desarrollos en la gestión de diálogos aplicada a robótica, y tampoco hay muchos robots capaces de mantener diálogos de propósito general. Sin embargo, la técnica de diálogos verbales se ha desarrollado mucho para una aplicación muy concreta: los sistemas de atención telefónica automatizados. Son sistemas que permiten realizar hoy en día, de forma totalmente automática, multitud de gestiones telefónicas: desde la reserva de un billete de avión, hasta solicitar información sobre la maleta que nos han perdido más tarde en el viaje.

La mayoría de los sistemas de gestión de diálogos actuales corresponden a uno de los siguientes tipos:

- Sistemas que ejecutan un guión.
- Sistemas orientados a rellenar huecos de información.
- Sistemas planificados.

Un ejemplo del primero es el robot Robovie (Ishiguro *et al.*, 2001), que realiza diálogos preprogramados. En este caso, la toma de decisiones comunicativas está incorporada a los

sistemas que controlan otras decisiones de alto nivel del robot. Es decir, hay un sistema único de control en el que todas las decisiones de alto nivel están preprogramadas, incluidas las comunicativas.

Estos sistemas, al tener un guión preprogramado, tienen el inconveniente que ya hemos mencionado antes cuando nos hemos referido a esta técnica de toma de decisiones: el programador que ha desarrollado el guión debe prever todas las alternativas que puedan acontecer en el diálogo. Esto no suele ser nada fácil ya que en un diálogo pueden intercambiarse multitud de mensajes y producirse multitud de situaciones diferentes.

Además, hay que tener en cuenta que la información que transmiten los humanos al robot no siempre se expresa de la misma forma. En muchas ocasiones la información se transmite de forma incompleta y, por si lo anterior fuera poco, la información puede recibirse de forma inexacta.

Imaginemos, por ejemplo, que alguien quiere pedir a un robot humanoide que levante el brazo derecho. Puede hacerlo de múltiples formas:

- “Sube el brazo derecho”
- “Alza la mano”
- “Haz esto” (al mismo tiempo que el operador sube su propio brazo derecho)

La información puede ser incompleta:

- “Sube el brazo” (no se sabe si el derecho o el izquierdo)

Y, debido sobre todo a problemas en el sistema de reconocimiento de voz, la información puede recibirse de forma inexacta:

- “Sube el mazo derecho”

Por tanto, en un proceso de comunicación natural es habitual que aparezcan malentendidos. Por ende, el enunciado verbal natural suele ser incompleto, llevar repeticiones, falsos comienzos, sonidos de relleno, referencias cruzadas o a gestos no verbales - uso de pronombres implícitos o explícitos, elipsis, deixis, etc.-, todo ello en un entorno con ruido o varias voces simultáneas.

Una solución adoptada para facilitar que robot y usuario puedan intercambiar información mediante interacción, es la utilizada en sistemas gestores basados en huecos de información. En un sistema de este tipo, se establecen a priori ciertos huecos de información que están directamente relacionados con la información concreta que es relevante para el robot, y que debe ser completada mediante interacción. De este modo, en el ejemplo anterior -levantar el brazo derecho- la información relevante se resume en dos huecos de información: qué acción se realiza -levantar- y qué parte del cuerpo está involucrada -brazo derecho-.

Cada hueco de información está asociado a ciertos actos comunicativos que el robot debe expresar para provocar en el usuario una respuesta que le permita completar el hueco. El usuario con un solo acto comunicativo puede completar más de un hueco de información simultáneamente. Estos huecos se suelen establecer en cierto orden, de modo que un algoritmo los

va recorriendo uno por uno y va comprobando cuáles quedan por completar. Por ejemplo, si el hueco de información que el robot necesita rellenar se refiere a la parte del cuerpo involucrada en la acción “levantar”, el robot podrá preguntar simplemente “¿Qué parte del cuerpo quieres que levante?”.

Una vez que un hueco de información ha sido completado, el sistema ejecuta ciertas operaciones relacionadas con el valor concreto obtenido: movimientos en el diálogo, asignaciones a otros huecos de información, operaciones de comunicación con otras partes de la arquitectura de control del robot, etc. Así, por ejemplo, el sistema puede pasar a un subdiálogo de confirmación ante un malentendido o ante un resultado en el reconocimiento de voz con un bajo valor de confianza. Todo esto permite que el diálogo no sea del todo determinista, aumentando su naturalidad.

Por ejemplo, en (Dominey *et al*, 2007) se presenta un sistema de gestión del diálogo basado en huecos de información denominado RAD (Rapid Application Development), mediante el cual el robot humanoide HRP-2 aprende ciertas tareas a partir de las instrucciones verbales del usuario. Pero quizás, los sistemas de gestión de este tipo más usados son los basados en el estándar voiceXML. Una descripción en etiquetas permite al robot decidir qué comunicar, cuándo y cómo en función de la información relevante obtenida y/o por obtener.

El aspecto del diálogo relacionado con el cuándo comunicar, no sólo implica realizar preguntas relacionadas con los huecos de información no completados. El sistema ha de gestionar también el intercambio de turnos y las interrupciones que el usuario pueda realizar. El diálogo es de iniciativa mixta, es decir, que a veces es el usuario quien realiza las preguntas al robot y otras es el robot quien toma la iniciativa.

El cómo comunicar implica decidir qué modo comunicativo va a utilizarse, ya que un mismo mensaje puede articularse de diversas formas. Por ejemplo, una negación puede expresarse diciendo “no”, con un movimiento de la cabeza, con un movimiento del dedo índice, etc.

Esto requiere una extensión del sistema gestor del diálogo hacia la multimodalidad. En (Gorostiza y Salichs, 2010) se presenta un sistema de gestión del diálogo con dicha ampliación, lo cual permite gestionar la información comunicacional de distintos modos, tanto para percepción como para expresión. Así por ejemplo, el usuario puede decir por igual “levanta el brazo derecho” o “levanta este brazo” y tocar el brazo derecho del robot. Los huecos de información en este sistema pueden ser completados por otros modos aparte de la voz.

Los sistemas que usan planificación suelen estar basados en procesos de decisión de Markov (MDP). Es decir, el diálogo se modela como una red de Markov, normalmente preprogramada, y se establecen una serie de recompensas, típicamente asociadas a que el robot adquiera correctamente y en el menor tiempo la información adecuada. A partir de ahí, se utilizan técnicas de decisión sobre redes de Markov, como planificación o aprendizaje por refuerzo, para establecer la política de acciones que maximiza el retorno (Lemon *et al*, 2001). Para gestionar mejor la incertidumbre asociada a la comunicación, hay autores que han propuesto sustituir los MDP por procesos de decisión de Markov parcialmente observables (POMDP) u otras alternativas semejantes, en las que se considere también la incertidumbre en las observaciones (Roy *et al*, 2000).

10. APRENDIZAJE Y TOMA DE DECISIONES

Hasta ahora hemos considerado que los sistemas de toma de decisiones del robot responden siempre de igual forma ante las mismas circunstancias, pero cabe la posibilidad de que el robot sea capaz de aprender y, por tanto, sea capaz de ir mejorando sus decisiones. Es posible aplicar técnicas de aprendizaje en muy diversos campos de la robótica. Por ejemplo, pueden aplicarse en percepción, y hacer que el robot aprenda a reconocer personas. En lo que sigue nos limitaremos tan sólo a describir sucintamente como puede usarse aprendizaje en la toma de decisiones.

Existen muchos tipos de aprendizaje, pero podemos dividirlos en dos grandes grupos, en función de cuál sea el objeto del aprendizaje: aprendizaje de cómo actuar en cada circunstancia – conocimiento procedimental- y aprendizaje de información – conocimiento declarativo-. El primero está vinculado directamente a la toma de decisiones reactivas. El segundo es necesario en los procesos deliberativos, cuando lo que se aprende es el modelo del sistema. Aunque los dos pueden usarse en la toma de decisiones, son sin embargo muy diferentes. Un ejemplo del primero sería que un robot aprenda a coordinar el movimiento de sus patas, y un ejemplo del segundo sería aprender el mapa del entorno en que se mueve el robot.

En el proceso de aprendizaje, pueden intervenir seres humanos o el robot puede aprender por sí sólo. Esto último es relativamente fácil cuando se trata de adquirir un conocimiento declarativo –p. ej., un robot puede aprender por sí solo un mapa del entorno-, pero no es tan sencillo si debe adquirir un conocimiento procedimental. Por ello, hay muchos desarrollos dirigidos a facilitar el aprendizaje procedimental con intervención de agentes externos. Esto incluye aprendizaje por interacción, imitación y demostración.

Una técnica, empleada para que los robots adquieran habilidades procedimentales por sí solos, es la de aprendizaje por refuerzo (Sutton y Barto, 1998). En este caso, el aprendizaje se logra por prueba y error. El robot sólo recibe como información premios y castigos, lo que se denominan refuerzos, que le indican si sus acciones son positivas o negativas. Si los refuerzos correspondieran a la valoración de la última acción realizada, el aprendizaje sería relativamente sencillo, pero normalmente los premios y castigos se deben no sólo a la última acción, sino también a las anteriores. Por ejemplo, un robot que juega al fútbol, puede recibir un premio -refuerzo positivo- cada vez que su equipo marca un gol, y un castigo -refuerzo negativo- cada vez que lo hace el equipo contrario. Evidentemente, en ese caso el mérito o el demérito no es achacable tan sólo a la última decisión del robot, sino también a todas las anteriores; y lo que complica todavía más el problema: el resultado no depende sólo de las propias acciones, sino también de las acciones de los otros jugadores. El gran problema de este método es que requiere que el robot pase por un gran número de experiencias, para poder aprender qué debe hacer en cada circunstancia. Esto no es una dificultad si se trabaja con un robot simulado, que puede someterse a miles de experiencias en poco tiempo, pero hace que sea muy difícil aplicarlo directamente en un robot real.

Una alternativa es no abordar directamente el problema del aprendizaje procedimental. En lugar de aprender directamente a actuar, el robot puede empezar por aprender cual es el efecto de sus acciones. Desde una perspectiva de control, esto sería

equivalente a aprender un modelo del sistema a controlar. A partir de esta información, es posible calcular posteriormente una política adecuada de toma de decisiones.

11. EMOCIONES Y TOMA DE DECISIONES

Durante muchos años se ha creído que las emociones eran una mera "distracción" a la hora de tomar buenas decisiones. Sin embargo, en los últimos años han surgido muchas voces que destacan el papel positivo de las emociones en la toma de decisiones en los seres humanos. De hecho, existen múltiples estudios que ponen en evidencia que las emociones influyen en muchos mecanismos cognitivos como la memoria, la atención, la percepción y el razonamiento (Damasio, 1994), (Lewis, 2004), (Rolls, 2005). Entre estos estudios, cabe destacar los realizados por Antonio Damasio, quien encontró evidencias de que el daño producido sobre el sistema emocional del cerebro causaba que la persona tomase decisiones incorrectas a pesar de tener intactas las habilidades del razonamiento lógico. Damasio demostró que personas cuyos centros emocionales estaban dañados podrían tener las facultades del razonamiento tradicional intactos, pero que no podían tomar decisiones apropiadas (Damasio, 1994). Esta prueba convenció a un gran número de investigadores de la robótica e inteligencia artificial para explorar el posible papel de las emociones en sus sistemas de toma de decisiones.

Existen varios puntos de vista en relación a la función de las emociones en los sistemas de toma de decisiones, ¿Qué papel deben tener? ¿Cómo influyen en la toma de decisiones? En los sistemas en los que las emociones están implementadas hoy en día, esta es, quizás, la gran diferencia entre ellas.

En algunos casos, las emociones implementadas trabajan como mecanismos de monitorización para enfrentarse con situaciones importantes relacionadas con la supervivencia. Este es el caso, por ejemplo, de los trabajos realizados por Lola Cañamero (Cañamero, 1997), (Cañamero, 2003), donde la toma de decisiones se basa en un sistema motivacional. Aquí las motivaciones tienen un valor que será función del valor de la necesidad que deben satisfacer y un estímulo incentivo. Una vez calculados todos los valores, la motivación más alta se activa y organiza el comportamiento de manera que se satisfaga la necesidad más urgente -comportamiento motivacional-. Las emociones influyen en la toma de decisiones de dos formas. Primero, pueden modificar la intensidad de la motivación actual, y como consecuencia, la intensidad del comportamiento. Incluso, en casos extremos pueden evitar la ejecución de un comportamiento. Segundo, modifican la lectura de los sensores que monitorizan las variables que las emociones pueden afectar, por lo que alteran la percepción del estado corporal.

Por lo tanto, en este caso se considera a las emociones como un controlador de comportamiento de "segundo nivel". Este controlador corre en paralelo, y por encima del control de las motivaciones permitiendo continuamente a las emociones monitorizar el entorno -tanto interno como externo-, en situaciones en las que la relación del robot con el entorno tiene alguna importancia relacionada con los objetivos del robot. Las emociones afectan a la selección de comportamientos de forma indirecta, mediante la modificación de los efectos del sistema motivacional.

Otras aproximaciones aprovechan algunas funciones atribuidas a las emociones en el comportamiento humano y las tratan de

implementar en sus sistemas, con el fin de mejorar el comportamiento de un robot autónomo. Este es el caso de Gadanho (Gadanho, 1999), (Gadanho y Hallam, 2001) donde las emociones influyen de dos formas distintas en su proceso de toma de decisiones. De manera resumida, el robot se adapta a su entorno utilizando un algoritmo de aprendizaje por refuerzo. Según los autores, ya que se asume frecuentemente que la toma de decisiones humanas consiste en la maximización de emociones positivas y la minimización de las negativas, la función de refuerzo fue ideada de manera que extrae el valor de juicio del sistema emocional considerando la intensidad de la emoción dominante, y si es positiva o negativa.

Por otro lado, las emociones tienen un papel asociado a procesos de interrupción de comportamientos para tratar nuevas e inesperadas situaciones que necesitan ser atendidas. Gadanho toma como inspiración este papel para explorar su utilidad en determinar las transiciones de estado en el sistema de aprendizaje por refuerzo. De esta manera, el controlador sólo toma una nueva decisión si existe un cambio de emoción dominante, si la intensidad de dicha emoción dominante sufre un cambio brusco, o si se llega a un límite de tiempo. Si esto ocurre, el controlador hace una evaluación del comportamiento previo basado en el estado emocional actual y se seleccionará un nuevo comportamiento acorde con la nueva situación. Si no, el comportamiento actual se seguirá ejecutando.

Como se ha comentado previamente, fueron los trabajos de Damasio los que inspiraron a varios investigadores a introducir emociones en sus sistemas. Damasio sugiere que el cerebro tiene "marcas somáticas", que son cambios fisiológicos producidos por una emoción, que asocian ciertas decisiones con sentimientos positivos o negativos. Estos sentimientos recortarían la búsqueda mental dirigiendo a la persona lejos de las alternativas asociadas a los malos sentimientos. Estas marcas son lo que llamamos pensamientos subjetivos, corazonadas o intuición. Basándose en esta teoría, Velásquez (Velasquez, 1997), (Velasquez, 1998) introdujo en su modelo memorias emocionales. Estas memorias forman parte del proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, si el agente/robot se encuentra con un estímulo "marcado", como por ejemplo una comida que no le gustó, la memoria asociada será revivida reproduciendo el estado emocional que se experimentó previamente, influyendo así en la toma de decisiones. En el modelo de Velásquez, se vuelven a utilizar los conceptos de *drives* y motivaciones, sin embargo, es el sistema emocional el que constituye la principal motivación del agente. El sistema de *drives* incluso explota la influencia de las emociones para seleccionar un comportamiento específico. Por ejemplo, el Hambre y el Sufrimiento causado por ello motiva al agente/robot a obtener comida.

Por otro lado, también existen otros mecanismos de toma de decisiones los cuales están basados exclusivamente en el estado emocional. Es decir, no existen comportamientos no emocionales. Este es el caso, por ejemplo, de Hollinger *et al* (Hollinger *et al*, 2007). En sus trabajos se presentan unos mecanismos basados en la escala Mehrabian PAD, que determina las emociones usando un espacio emocional de tres dimensiones con los ejes representando placer, emergencia, y dominancia. El estado del robot en este estado emocional es traducido a un conjunto particular de respuestas de movimientos y sonidos. El estado emocional del robot varía de acuerdo con su interacción con la gente. De hecho, en este caso, se modifica cuando el robot ve diferentes colores de camisas.

Finalmente, otra aproximación distinta a las anteriores es utilizada en (Malfaz y Salichs, 2009). Tal y como se presentó brevemente en la sección IV, este sistema de toma de decisiones está basado en *drives* y motivaciones, pero también en emociones y auto-aprendizaje. El objetivo del agente es aprender a comportarse a través de la interacción con el entorno, utilizando aprendizaje por refuerzo, y maximizando su bienestar. La diferencia con los trabajos anteriores, es que el papel de las emociones en este sistema no está definido de manera global sino que cada emoción implementada tiene un papel distinto. De esta manera, hay emociones -la felicidad y tristeza- que son utilizadas como función de refuerzo, positivo y negativo respectivamente, en el proceso de aprendizaje. Por lo tanto, el comportamiento no se verá influido directamente por estas emociones. Por otro lado, la emoción del miedo se implementa en este sistema como una motivación más. Por lo que, en el caso de que esta resulte la motivación dominante, será la que determine el estado interno del agente. Esto va a provocar que el comportamiento esté orientado a enfrentarse con la situación que ha provocado dicha emoción, por lo que tendríamos un comportamiento emocional.

12. CONCLUSIÓN

El problema de la toma de decisiones despierta un interés creciente en robótica, ya que previsiblemente los robots serán cada vez más autónomos y se enfrentarán a situaciones cada vez más complejas. Este problema se puede abordar desde muy diversos puntos de vista. Tradicionalmente, lo normal es estudiarlo tan solo desde una perspectiva concreta. Sin embargo en este artículo hemos tratado de dar una visión de conjunto, ya que las diversas perspectivas están claramente relacionadas. También hemos intentado transmitir la idea de que hay todavía muchas cuestiones pendientes de solución, y que por tanto este es un tema que requiere todavía un gran esfuerzo de investigación.

En nuestra opinión, la tendencia es desarrollar robots que

- sean más autónomos,
- cuenten con una elevada inteligencia,
- tengan sus propios objetivos,
- puedan aprender de los seres humanos y de sus propias experiencias,
- puedan relacionarse de forma natural con los seres humanos,
- imiten algunas soluciones naturales, como por ejemplo los sistemas motivacionales y las emociones.

Todas estas cuestiones están claramente relacionadas con los sistemas de toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo económico del Gobierno de España a través del proyecto “Interacción igual a igual humano-robot (R2H)”, del Ministerio de Educación y Ciencia, y del proyecto “Una nueva aproximación a los robots sociales (AROS)”, del Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

Albus, S., McLean, C.R., Barbera, A.J. and Fitzgerald, M.L. (1985) Hierarchical control for robots and teleoperators. *Proceedings of the Workshop on Intelligent Control*.

- Barber, R. and Salichs, M.A. (2002). A new human based architecture for intelligent autonomous robots. *IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles*. Sapporo. Japan.
- Brooks, R.A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **2**, N1, 14–23.
- Brooks, R.A. (1991). Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, **47**(1-3), 139-159.
- Cañamero, L. (1997). Modeling motivations and emotions as a basis for intelligent behavior. In *First International Symposium on Autonomous Agents (Agents '97)*, 148-155. New York, NY: The ACM Press.
- Cañamero, L. (2003). Emotions in Humans and Artifacts. *ch. Designing emotions for activity selection in autonomous agents*. MIT Press
- Damasio, A. (1994). *Descartes' Error - Emotion, reason and human brain*. Picador, London.
- Dominey, P.F., Mallet, A. and Yoshida E. (2007). Progress in Programming the HRP-2 Humanoid Using Spoken Language. International Conference on Robotics and Automation (ICRA07). Roma. Italia.
- Elo, A.E. (1978). *The rating of chessplayers, past and present*. BT Batsford Limited.
- Gadano, S. (1999). Reinforcement learning in autonomous robots: An empirical investigation of the role of emotions. *Ph.D. dissertation*. University of Edinburgh.
- Gadano, S and Hallam, J. (2001). Emotion- triggered learning in autonomous robot control, *Cybernetics and Systems*, vol. **32**(5), pp. 531–59.
- Gardner, H. (1993). *Frames of mind: The theory of multiple intelligences*. Basic books.
- Gat, E. (1998). *Artificial intelligence and mobile robots: case studies of successful robot systems, chapter Three-layer architectures*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Gorostiza, J. F. y Salichs, M. A. (2010) Natural Programming of a Social Robot by Dialogs. Dialog with Robots AAAI 2010 Fall Symposium. Virginia. USA.
- Haselager, W.F.G. (2005). Robotics, philosophy and the problems of autonomy. *Pragmatics & Cognition*, **13**(3), 515-532.
- Hirth, J., Braun, T. and Berns, K. (2007). KI 2007: Advances in Artificial Intelligence. *ch. Emotion Based Control Architecture for Robotics Applications*, pp. 464–467.
- Hollinger, G., Georgiev, Y., Manfredi, A., Maxwell, B., Pezzementi, Z. and Mitchell, B. (2006). Design of a social mobile robot using emotion-based decision mechanisms. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Huang, H., Messina, E., Wade, R., English, R., Novak, B. and Albus, J. (2004). Autonomy measures for robots. *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress*, Anaheim, California.
- Ishiguro, H. Ono, T. Imai M. Maeda, T. Kanda, T Nakatsu, R. (2001) Robovie: an interactive humanoid robot. *Industrial Robotics*, **28**, 498–503.
- Lemon, O., Bracy, A., Gruenstein, A., and Peters, S. (2001). Information states in a multimodal dialogue system for human-robot conversation. *5th Workshop on Formal Semantics and Pragmatics of Dialogue (Bi-Dialog 2001)*, 57–67.
- Lewis, S. C. (2004). *Computational Models of Emotion and Affect*. PhD thesis, University of Hull

- Lisetti, C.L. and Marpaung, A. (2007). KI 2006: Advances in Artificial Intelligence. *ch. Affective Cognitive Modeling for Autonomous Agents Based on Scherer's Emotion Theory*, pp. 19–32.
- Malfaz, M., and Salichs, M.A. (2009). The Use of Emotions in an Autonomous Agent's Decision Making Process. *Ninth International Conference on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*. Venice. Italy.
- Rolls, E. (2005). *Emotion Explained*. Oxford University Press.
- Roy, N., Pineau, J., and Thrun, S. (2000). Spoken dialog management for robots. *Proceedings of the Association for Computational Linguistics*.
- Shiffrin, R.M. and Schneider, W. (1997). Controlled and automatic human information processing: In perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 127–190.
- Steinfeld, A., Fong, T., Kaber, D., Lewis, M., Scholtz, J., Schultz, A., *et al.* (2006). Common metrics for human-robot interaction. *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction*.
- Sternberg, R.J., y Salter, W. (1982). Chapter 1: Conceptions of intelligence. *Handbook of Human Intelligence*, Cambridge Univ Press.
- Sutton, S. and Barto, A.G. (1998) *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Velásquez, J. (1997). Modeling emotions and other motivations in synthetic agents. *in Fourteenth National Conf. Artificial Intelligence*.
- Velásquez, J. (1998). Modelling emotion-based decision-making. *In 1998 AAAI Fall Symposium Emotional and Intelligent: The Tangled Knot of Cognition*.
- Watzlawick, P., Beavin, J.H. and Jackson, D.D. (1993). *Pragmatics of Human Communication. A study of Interactional patterns, pathologies and paradoxes*. W. W. Norton & Co.