



José Cortés Arena

Consultor de Ingeniería y Calidad del Software en Sopra Group; Coordinador de la sección técnica "Robótica" de Novática

<joscorare@gmail.com>

# Arquitecturas de control de robots

## 1. Introducción

En sistemas robóticos suele ser necesario uno de los requisitos más exigentes en sistemas informáticos: funcionamiento en tiempo real. Este, a su vez, suele implicar programación concurrente, con lo cual nos encontramos ante dos de los retos más importantes que existen tanto en desarrollo de software como en sistemas hardware-software (*embedded systems*).

Otra característica inherente a la robótica que implica una considerable complejidad es la de percibir su entorno físico y actuar en él, que en algunos casos es desconocido a priori.

Pero esta interacción física con el entorno afecta a todas las disciplinas que participan en la robótica, desde los sensores electrónicos a los distintos mecanismos que se utilizan para desplazarse o manipularlo, incluyendo los materiales utilizados para la construcción de las partes que entran en contacto con el terreno o los objetos a manipular.

Estas características convierten la realización de arquitecturas de robots en uno de los ámbitos de la tecnología más apasionantes.

### 1.1. ¿Una arquitectura de robot o una integración de arquitecturas?

Los elementos principales que integran la arquitectura de un robot son:

- Elementos mecánicos.
- Componentes hardware, electrónicos, neumáticos, o de otros tipos.
- Componentes software.
- Sistema de control.

Cada uno de estos tipos de componentes tiene una arquitectura propia. Pero, aunque las arquitecturas de los componentes hardware y software están especialmente relacionadas, la integración ha de ser total: el sistema de control ha de conseguir alcanzar los objetivos definidos utilizando el software y soporte hardware adecuado. Mediante el hardware, además, no sólo se percibirá el entorno físico sino que también se actuará sobre él, utilizando los elementos mecánicos necesarios.

Finalmente, todo el robot está soportado físicamente sobre una estructura mecánica, que condiciona y está condicionada por los otros elementos físicos del robot. Un par de casos claros son el peso y potencia de motores y baterías.

**Resumen:** Una parte fundamental de un sistema robótico es su sistema de control. Las arquitecturas de control de robots basadas en comportamientos permiten dotar a los robots que han de operar en entornos difícilmente predecibles de una gran diversidad de funciones, de forma que sean capaces de actuar adecuada y rápidamente ante diferentes situaciones.

**Palabras clave:** Robot, arquitectura, sistemas robóticos, sistemas de control, control por comportamientos, concurrencia, tiempo real.

Aunque se han producido grandes avances, una mayor potencia en los actuadores suele conllevar un mayor peso y tamaño, tanto en baterías como en estos actuadores, lo cual suele empeorar el rendimiento y complicar su ubicación. Cualquier cambio en uno de estos elementos puede tener un impacto considerable en el resto del sistema si la arquitectura no es modular.

Este artículo presenta una breve introducción a las arquitecturas de control basadas en comportamientos, una de las arquitecturas modulares de control más útiles para robots móviles en entornos poco predecibles y cambiantes. Se muestran también tres ejemplos de robots tan diferentes como la astronave Cassini-Huygens, el automóvil robotizado Stanley, ganador del concurso *DARPA Grand Challenge*, y el robot humanoide Darwin-OP dirigido a la educación y la investigación.

## 2. Arquitecturas deliberativas, reactivas e híbridas

El control basado en comportamientos, o reactivo, utiliza diferentes módulos interactivos distribuidos llamados comportamientos (*behaviors*), que combinados alcanzan el comportamiento deseado para todo el sistema. Los comportamientos son patrones de actividad resultantes de la interacción entre el robot y su entorno.

Pero la primera arquitectura robótica era deliberativa, no reactiva, aunque finalmente ambas se acabaron combinando en las denominadas arquitecturas híbridas.

### 2.1. Arquitecturas deliberativas: sentir, planear y actuar

A finales de los años 60 se desarrollan las primeras arquitecturas de robots en la Universidad de Standford. La primera arquitectura se utiliza con el robot Shakey y la componían tres etapas principales: sentir, planear y actuar (SPA, Sense-Plan-Act). Mediante los datos

obtenidos por los sensores y un modelo preestablecido del entorno se creaba un plan que finalmente se ejecutaba durante la actuación para conseguir alcanzar los objetivos deseados.

Es un modelo jerárquico en el cual el modelo del entorno ha de ser fiel a la realidad y oportunamente actualizado, lo cual es bastante costoso o imposible en algunas situaciones. Otro problema era el excesivo tiempo que requiere la creación de planes, lo cual afecta negativamente a los tiempos de respuesta.

### 2.2. Arquitecturas reactivas: "Subsumption"

En 1985 Rodney Brooks publica "*A robust layered control system for a mobile robot*" donde aparece por primera vez el concepto de comportamiento de robots con la arquitectura "Subsumption", un nuevo enfoque en el cual no existe razonamiento o plan, sino una rápida reacción.

"Subsumption" es una arquitectura multinivel de máquinas de estados finitos, llamados comportamientos, que a partir de la información obtenida por los sensores determina el comportamiento a ejecutar por los actuadores. Los niveles superiores obtienen información de niveles inferiores y, mediante un sistema de arbitraje, pueden obtener el control de la ejecución. Cada nivel superior implica mayores competencias. Un ejemplo de niveles sería:

- 3 Crear un mapa del entorno y planear rutas de un punto a otro.
- 2 Explorar el entorno detectando objetos distantes pero alcanzables y dirigirse hacia ellos.
- 1 Desplazarse sin colisionar.
- 0 Evitar el contacto con obstáculos.

La principal ventaja de los sistemas reactivos es su capacidad de responder rápidamente en

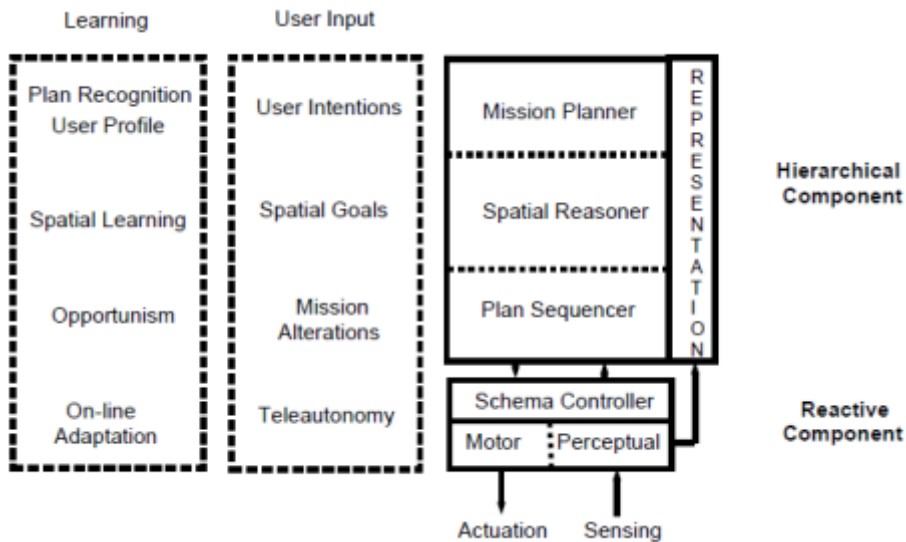


Figura 1. Estructura general de AuRA.

entornos no conocidos y cambiantes. Pero presentan algunas dificultades, como organizar comportamientos que alcancen objetivos complejos y su optimización.

**2.3. Híbridas**

Las arquitecturas híbridas intentan combinar los mejores aspectos de las arquitecturas deliberativas o jerárquicas y las reactivas. AuRA (*Autonomus Robot Architecture*) fue

la primera arquitectura en combinar ambos enfoques. Desarrollada hacia la mitad de los años 80 por Ronald C. Arkin y Tucker Balch como un sistema de navegación para robots. En la **figura 1** podemos ver un diagrama con su estructura general.

El componente jerárquico de AuRA está compuesto por un planificador de misiones (*Mission Planner*) responsable de establecer

los objetivos principales del robot y las restricciones que deber respetar. El razonador espacial (*Spatial Reasoner*) utiliza información cartográfica para construir una secuencia de tramos que el robot debe ejecutar para completar la misión. Finalmente, el secuenciador de planes (*Plan Sequencer*) transforma cada uno de los tramos generados en un conjunto de comportamientos a ejecutar.

El componente reactivo está compuesto por el controlador de esquemas, responsable de controlar y monitorizar los procesos de comportamientos durante la ejecución. Cada esquema de motor está asociado a un esquema de percepción capaz de proporcionar los estímulos necesarios para cada comportamiento.

**3. Tres ejemplos de sistemas robóticos**

Los sistemas robóticos complejos, como los siguientes tres ejemplos, utilizan métodos combinados de control, aunque la nave Cassini-Huygens sigue principalmente una arquitectura predefinida similar a las deliberativas, y el vehículo "Stanley" y el robot humanoide siguen arquitecturas híbridas.

**3.1. Cassini-Huygens**

Cassini-Huygens es una astronave robótica creada entre la NASA, la ESA y ASI. Lanzada en 1997 con el objetivo de estudiar Saturno,

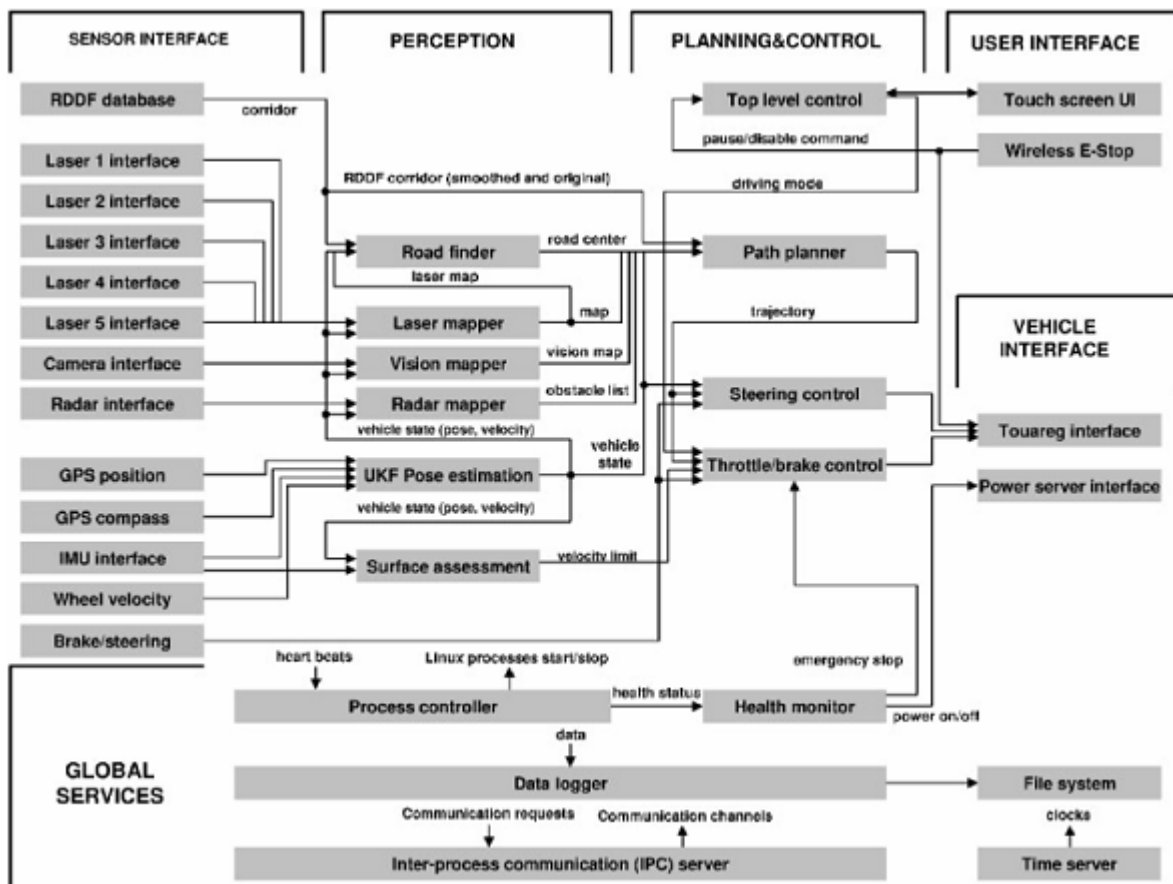


Figura 2. Arquitectura del sistema de software de "Stanley".

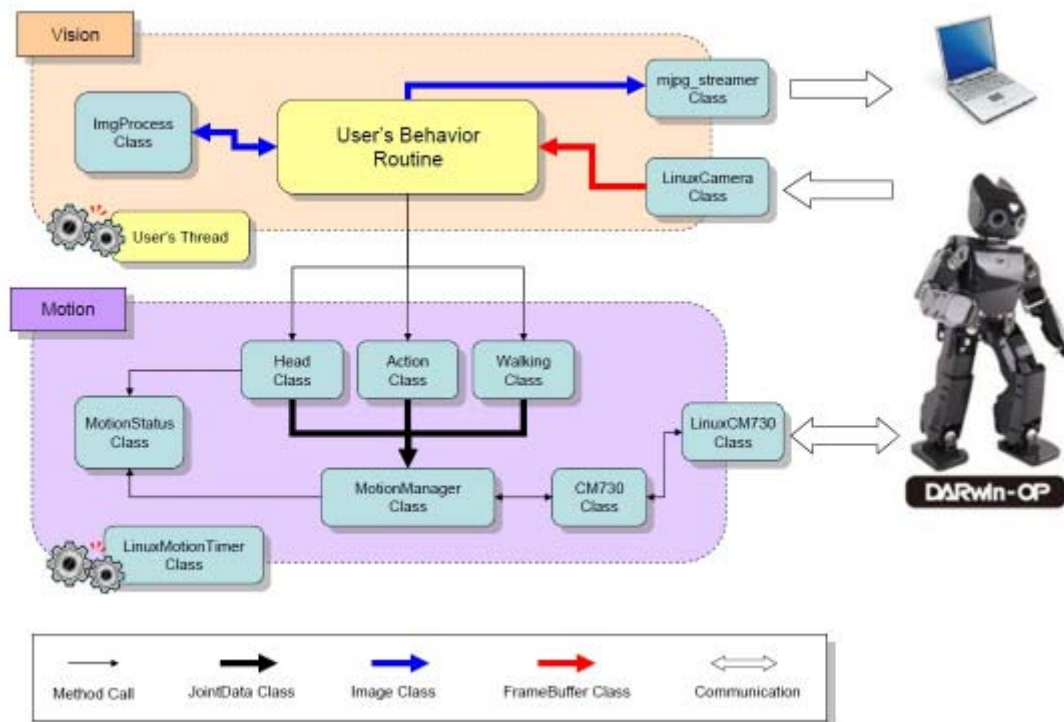


Figura 3. Flujos de datos entre componentes principales de Darwin-OP.

sus anillos y satélites. De este proyecto se han publicado algunos documentos realmente interesantes, en los cuales se explica la arquitectura del software de vuelo, basada en un sistema hardware multiprocesador de tareas distribuidas en tres procesadores, el proceso de desarrollo utilizado, así como algunas tensiones que se produjeron en la definición del proceso de desarrollo.

### 3.2. Vehículos autónomos

Actualmente existen vehículos no tripulados aéreos, terrestres y marinos. Excepto algunos submarinos no tripulados que desarrollan tareas científicas, como Scarlet Knight, la mayoría de ellos se crean con finalidades militares. Para competir en los concursos DARPA Grand Challenge y Urban Challenge, distintas empresas y universidades han creado numerosos y sofisticados vehículos robot. Uno de ellos es "Stanley", un Volkswagen Tuareg convertido en robot y ganador del DARPA Grand Challenge en 2005. La arquitectura del sistema de software de "Stanley" la podemos ver en la figura 2.

### 3.3. Robots humanoides educativos

"Darwin-OP" es un proyecto Open Source desarrollado entre Robotis y RoMeLa como plataforma orientada a la investigación y la educación (ver figura 3).

Aparte de captar rápidamente nuestra atención e interés, conseguir que un robot humanoide camine es bastante difícil. Especialmente si la superficie por la cual se desplaza no es totalmente plana y lisa, que requiere un complejo control

dinámico del equilibrio en lugar de una secuencia fija de movimientos.

Para mantener el equilibrio durante la ejecución de la secuencia de movimientos que forman cada paso es necesario ir desplazando el centro de gravedad. También se han de detectar potenciales caídas y realizar las correcciones oportunas para evitarlas. Esto requiere un considerable conocimiento y aplicación práctica de distintas ciencias y tecnologías, convirtiéndose la robótica en un medio educativo ideal.

## Referencias

### Sistemas de control

- Wikipedia.** *Teoría de control*. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Control_theory)>
- Wikipedia.** *Behavior based robotics*. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Behavior-based\\_robotics](http://en.wikipedia.org/wiki/Behavior-based_robotics)>
- Rodney Brooks.** *A robust layered control system for a mobile robot*. Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, 1985. <<http://people.csail.mit.edu/brooks/papers/AIM-864.pdf>>
- Ronald C. Arkin, Tucker Balch.** *AuRA Principles and Practice in Review*. College of Computing, Georgia Institute of Technology, 1997. <<http://robotics.usc.edu/~maja/teaching/cs584/papers/jetai-final.pdf>>
- David Kortenkamp, Reid Simmons.** *Robotics Systems Architectures and Programming*, En Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.): *Handbook of Robotics*, pp. 187-206, 2008.
- Maja J. Mataric, François Michaud.** *Behaviour based systems*. En Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.): *Handbook of Robotics*, pp. 891-909, 2008.

- Joe Jones, Daniel Roth.** *Robot Programming: A practical guide to Behavior-Based Robotics*. McGraw-Hill, 2003. ISBN-10: 9780071427784.
- Ronald C. Arkin.** *Behavior-Based Robotics*. The MIT Press, 1998. ISBN-10: 9780262011655.

### Astronaves

- Wikipedia.** *Cassini-Huygens*, <<http://en.wikipedia.org/wiki/Cassini%E2%80%93Huygens>>
- J. Hackney, D. Bernard, R. Rasmussen.** *Cassini Spacecraft: Object Oriented Flight Control Software*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1993. <<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/34861/1/93-0279.pdf>>
- Southwest Research Institute.** *Cassini/Caps CPU 1 Flight Software Functional Document*, agosto 2003. <[http://caps.space.swri.edu/caps/documentation/FSFD1\\_5a.pdf](http://caps.space.swri.edu/caps/documentation/FSFD1_5a.pdf)>
- Gregory A. Carr.** *Solid State Power Switching For Nasa's Deep Space Missions*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2003. <<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/7835/1/03-2181.pdf>>

### Vehículos no tripulados

- Wikipedia.** *DARPA Grand Challenge*, <[http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA\\_Grand\\_Challenge](http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge)>
- Sebastian Thrun et al.** *Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge*. *Journal of Field Robotics*, Vol. 23, No. 9, June, 2006, pp. 661-692. <<http://robots.stanford.edu/papers/thrun.stanley05.pdf>>
- Scarlet Knight.** *Underwater robot*. <<http://rucool.marine.rutgers.edu/atlanctic/>>

### Humanoide Darwin-OP

- Sourceforge.** *Darwin-OP*, <<http://sourceforge.net/projects/darwinop/>>
- RoMeLa.** <<http://www.romela.org>>
- Robotis.** <<http://www.robotis.com/xe/>>