

# ARQUITECTURA DE CONTROL PARA ROBOT HUMANOIDE

Manuel Muñoz, José Simó, J.Francisco Blanes, Javier Coronel, Miguel Albero.

Instituto de Automática e Informática Industrial  
Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n. 46022  
Valencia, España  
{mmunoz, jsimo, pblanes, jacopa, mialgil}@ai2.upv.es

## Resumen

La robótica humanoide es uno de los campos en los que se viene trabajando en los últimos años desde un amplio abanico de áreas de conocimiento. Esto viene dado por los fundamentos multidisciplinarios sobre los que se asienta esta disciplina. Por ello estas plataformas son utilizadas para validar un gran número de sistemas de diferente naturaleza, desde mecánicos, a la inteligencia artificial, pasando por sistemas de tiempo real y control de sistemas complejos.

El presente trabajo presenta el desarrollo de una arquitectura de control que permite ejecutar de forma estructurada el control en tiempo real de los numerosos lazos de control de un robot humanoide. Adicionalmente se presenta el desarrollo de un conjunto de sistemas empotrados que se han implementado a modo de sensores modulares para realimentar el estado del sistema.

## 1. INTRODUCCIÓN

El punto de partida de este trabajo es el prototipo mecánico de un robot humanoide, en concreto microBII<sup>1</sup> [4][5], desarrollado y construido en el Instituto de Automática e Informática industrial (AI2), de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Se trata de un Robot Bípedo de alta movilidad, con 21 grados de libertad activos, lo que implica que pueda realizar gran variedad de movimientos. Otra de las características que se

puede destacar es la alta capacidad de cómputo, proporcionada por el microprocesador empotrado de control, que le permite ejecutar algoritmos de control complejos, así como la interconexión a través de diferentes canales de comunicación. Finalmente su elevada autonomía y la escalabilidad conforman sus características principales.

Este documento describe los trabajos realizados en torno al diseño, desarrollo, implementación y evaluación de un sistema de control en tiempo real para el bípedo previamente citado.

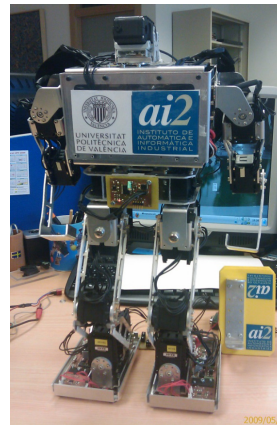


Figura 1. Robot Humanoide microBII.

Uno de los objetivos a corto plazo, es que el robot participe en las competiciones entre robots organizadas en el marco de la RoboCup [7]. Estas competiciones son un buen modo de medir las prestaciones y capacidades de los robots, constituidos por sistemas complejos en los que se integran partes mecánicas, eléctricas y software.

---

<sup>1</sup> Este trabajo a sido desarrollado en el marco del proyecto SIDIRELI (Sistemas Distribuidos con Recursos Limitados) DPI2008-06737-C02-01/02 del Ministerio de Educación y Ciencia.

En concreto se pretende que el robot participe en la liga estándar de fútbol. Por ello, el sistema de control debe ser capaz de realizar un amplio conjunto de tareas como son: la locomoción bípeda, auto localización en el entorno, toma de decisiones y coordinación con otros robots, entre otras [1]. De la correcta ejecución y coordinación de estas actividades soportadas en el sistema por un conjunto de tareas, depende el correcto movimiento del robot, y por tanto se considera este un sistema de tiempo real, puesto que de no cumplirse los requisitos temporales del sistema, la estabilidad del mismo puede verse comprometida abocando al robot a una más que posible pérdida de control que conlleve una caída.

El contenido de este, se organiza de la siguiente forma: En la sección 2 se realiza la descripción del robot humanoide microBIRO sobre el que se ha realizado el trabajo; El apartado 3 describe los diferentes sistemas empotrados implementados para realimentar los bucles de control. El diseño de la arquitectura de control se describe en la 4ª sección. Y finalmente en las secciones 5 y 6 se presentan los resultados de los experimentos y las conclusiones.

## **2. ROBOT HUMANOIDE microBIROII**

El punto de partida de este trabajo es la plataforma mecánica que constituye el robot humanoide microBIROII. Esta estructura está formada por un total de 21 motores y alrededor de 30 piezas de materiales como acero y aluminio mecanizado. Estas piezas han sido diseñadas con el fin de lograr una estructura lo más ligera posible obteniendo la mejores prestaciones mecánicas.

Se han adoptado las dimensiones y proporciones que se utilizan en la liga de robots humanoides del evento internacional de robótica RoboCUP, esto ha propiciado la semejanza entre el humanoide y las personas. Dicho pliego establece diferentes restricciones en tamaño y relación entre las diferentes dimensiones del cuerpo del robot, a fin de mantener unas proporciones adecuadas. Adicionalmente establece el tipo de sensorización que pueden poseer los robots a fin de que estas no disten en mucho de las que el ser humano dispone, salvando las diferencias entre un sistema biológico y uno de componente electromecánica.

La capacidad de cómputo viene dada por un sistema empotrado que utiliza una placa de desarrollo Protea en la que se incluye un módulo Toradex que soporta el procesador XScale-PXA320. Como sistema operativo se utiliza un núcleo Linux, sobre el que se tiene un amplio conocimiento. Se ha considerado el utilizar un sistema operativo Linux por tratarse de software libre, y ofrecer ventajas tales como: múltiples entornos de desarrollo, fácil acceso al núcleo del operativo, facilidad en el desarrollo de drivers para el manejo de dispositivos, posibilidad de realizar depuración de las aplicaciones, posibilidad de ejecutar el mismo código sobre otros empotrados, y estándar de programación POSIX que facilita la utilización de tareas, mutex, reloj global, programación a nivel de usuario, etc.

Se conoce que un sistema de control de estas características, en condiciones reales de ejecución, debe ser ejecutado sobre un Sistema Operativo de Tiempo Real (SORT). Actualmente, y conociendo el incremento en la complejidad del desarrollo que esto produce, se ha optado por utilizar un Sistema Operativo de Propósito General, utilizando una planificación de tareas FIFO basada en prioridades estáticas, asumiendo que es adecuado para las pruebas que se van a realizar. Queda pues como trabajo futuro el portar la aplicación para uno de los conocidos SOTR.

Los actuadores utilizados para lograr el movimiento del robot, pertenecen a la serie RX de la comercial Robotis. Se ha de tener en cuenta que estos servomotores forman parte estructural del robot, adicionalmente a la función motriz que desempeñan. Los servomotores están conectados a través de un BUS de comunicaciones RS-485. Las comunicaciones se establecen a través del protocolo maestro-esclavo Dynamixel-Protocol. Este protocolo permite enviar las acciones de control a los servomotores así como los parámetros de configuración de los mismos. Los actuadores disponen de un bucle de control interno que permite el posicionamiento adecuado del eje de los mismos. Este lazo de control puede ser parcialmente parametrizado, obteniendo una variación en la respuesta temporal del motor. Este bucle se incluye como un subsistema dentro de la estructura de control principal. Adicionalmente parámetros como la temperatura, carga, etcétera, pueden ser utilizados en la monitorización de los actuadores a fin de evitar otros problemas, o como

información complementaria para los bucles de control.

### 3. SENSORES, BUCLES DE CONTROL

Tras realizar el pertinente estudio del estado del arte, queda patente que un sistema articulado de alta movilidad como el que se pretende controlar en este desarrollo, necesita de diferentes sistemas de percepción que realimenten la información de estado del sistema a fin de realizar control en bucle cerrado[2][3][8]. Adicionalmente para lograr la interacción del robot con el entorno, se debe disponer de sensores que obtengan información de entorno, útil tanto para el posicionamiento del robot, como para la relación con el entorno, etc.

Partiendo de estas consignas y evaluando las variables que pueden interesar a la hora de mejorar el control, se ha dotado al robot de tres sensores. Los sistemas propioceptivos están integrados en los bucles de control fuertemente acoplados a los actuadores, mientras que el sistema de visión se utiliza en bucles de control de alto nivel.

Se debe considerar que los servomotores ofrecen la posibilidad de obtener las variables de estado del robot, en concreto permite obtener la posición y la velocidad actual, estos pueden ser utilizados en los reguladores que controlan la posición del robot. Lamentablemente, el bus de comunicaciones que utiliza los motores actuadores, permite una única lectura cada 2.5ms, por lo que no se podrá obtener la posición de todos los servomotores en un único periodo de control.

#### 3.1. Control reactivo de estabilidad

A fin de realimentar los bucles de control de estabilidad del sistema, se ha desarrollado un sistema de percepción que sea capaz de proporcionar información respecto a la inclinación a la que se ve sometido el torso del robot (Figura 2 izquierda). Este módulo sensorial se ha implementado mediante un sistema empotrado capaz de realizar las funciones de sensorización y procesamiento de señales, comunicaciones, y gestión de energía. El dispositivo ofrece al usuario la obtención de información referente a la inclinación a la que se somete al módulo, así

como información relativa a las aceleraciones medidas por los diferentes sensores de los que dispone.

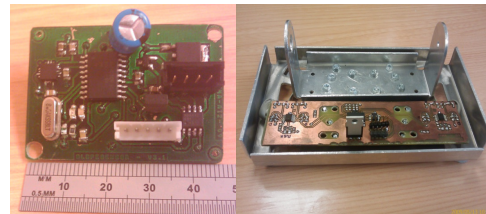


Figura 2. Módulos de sensorización.

El error mecánico producido por las holguras de la plataforma mecánica, puede producir grandes errores de posicionamiento en aquellos ejes que están sometidos a grandes cargas, como los de las caderas o los tobillos. Estos errores de posicionamiento se harán patentes en la inclinación del robot, y por lo tanto, podrán ser compensados mediante la información procedente de estos sensores, sin necesidad de realizar medidas de posición en todos los actuadores, y con ello reduciendo drásticamente el tráfico en el bus de comunicaciones.

#### 3.2. Control reactivo del apoyo del pie

En el momento en que el robot se encuentra apoyado sobre un único pie, el correcto apoyo del mismo sobre el suelo, es tan importante como el mantener el equilibrio sobre el mismo (Figura 2 derecha). Por ello se ha desarrollado un sistema de percepción que sea capaz de proporcionar información respecto a la distribución de las cargas sobre el pie del robot. El módulo sensor se ha implementado sobre un sistema empotrado de características similares a las del módulo de inclinación.

El sistema de percepción implementado, ofrece al usuario la obtención de información referente a la distribución de cargas en el pie de forma discreta en el pie del robot, así como información relativa a las presiones medidas por los sensores de planta.

Esta información puede ser utilizada por los bucles de control para realimentar la distribución de cargas en el pie del robot y con ello mejorar el apoyo del mismo y estabilidad del sistema. Los reguladores pueden compensar las pequeñas tensiones producidas por pequeñas irregularidades

en el terreno o por errores de posicionamiento del robot.

El sensor permite realizar una aproximación sobre la posición del CoP (centro de presiones), que fusionada con la información procedente del módulo de inclinación, puede ser utilizada en los reguladores que controlan la estabilidad del robot.

### 3.3. Relación con el medio, sensor de Visión.

Para obtener la información que será utilizada por el robot para interactuar con el medio, se ha dotado al robot de un sistema de visión artificial. Dicho módulo se encuentra situado a modo de cabeza, de modo que permita visualizar el entorno del robot y procesar la información necesaria para la interacción con el mismo.



Figura 3. Módulo de Visión.

El sistema está formado por una cámara junto al sistema de procesamiento de imagen. Esto permite tomar imágenes del entorno del robot y mediante el microcontrolador analizarlas para extraer la información que contengan y liberar al empotrado principal de esta tarea. Para la detección de los objetos de interés, se utilizan una serie de algoritmos basados en comparación de color y forma. Con esta información se deberá lograr la autolocalización en un entorno conocido y el posicionado de objetos en el mismo.

## 4. ARQUITECTURA DE CONTROL

Se puede definir el concepto de arquitectura de control como el conjunto abstracto de actividades y componentes estructurales de un sistema de control, así como su interconexión y la información que manejan. A la hora de caracterizar una arquitectura, se debería especificar, los comportamientos de cada uno de

los componentes, las interfaces de los mismos y la conexión entre estos [6][7].

Tras un análisis de las necesidades observadas en el sistema, y con la visión de extrapolarlo a un diseño genérico, no dependiente de la plataforma robótica, se ha desarrollado la arquitectura que permite desarrollar el conjunto de actividades de tiempo real que el robot necesita para poder realizar su funcionamiento normal, sin tener problemas de estabilidad causados por un control inadecuado debido a la pérdida de periodos de control.

Para realizar la descripción de la arquitectura de control, se ha estructurado la arquitectura de control en torno a la matriz de información, indicando los flujos de datos (FD) y los Componentes Activos (CA) que intervienen en la evolución de la información. Se ha dividido el conjunto de la información en cuatro grupos diferenciados atendiendo al nivel de abstracción en el que la información se ve representada en ellos. La información contenida en cada uno de los niveles puede proceder de los estímulos que sufre el sistema (sensores y usuario), o del estado interno del propio sistema. El manejo de la información lo realizan los diferentes componentes activos. Estos pueden ser de tres tipos: los que modifican la información dentro del mismo nivel; los que realizan la transformación del nivel de abstracción entre capas; y los que sirven de interfaz con los recursos y con el usuario. La Tabla 2, muestra una visión general del sistema y de la información contenida en él.

Descripción	Periodo	Prioridad
Misión	96ms	96
Táctica	48ms	97
Reactivo	12ms	98
Adquisición Actuación	12ms	max, 99

Tabla 1. Parámetros de las Tareas.

Cada uno de los niveles de abstracción ha sido implementado por un hilo de ejecución con las características que se muestran en la Tabla 1, la prioridad máxima del planificador FIFO es 99. Como se puede apreciar un hilo adicional realiza la adquisición de la información sensorial y la actuación sobre el robot.

La sincronización entre los diferentes hilos se realiza mediante los correspondiente mutex, que adicionalmente son utilizados para gestionar los recursos compartidos.

	Descripción de la información		Ejemplo	Contenido
Misión	Una misión viene definida por un comportamiento, que está formado por varias habilidades básicas.		Busca Pelota	Localiza la pelota Calcula Distancia Ve a por la pelota
Táctica	Una táctica viene definida por una habilidad básica, que está formada por varias trayectorias.		Camina	Paso inicial Der. Paso normal Izq. Paso final Der.
Reactivo	Subnivel Trayectoria	Una trayectoria es un conjunto de poses. Una pose, está definida por las 21 restricciones que definen la posición del robot en espacio cartesiano.	Trayectoria de un paso. Pose sentado	Pie I. XYZ $\theta_{1,2,3}$ Pie D. XYZ $\theta_{1,2,3}$ Mano I. XYZ Cabeza $\theta_2, \theta_3$
	Subnivel Articulaciones	Un gait, define la posición del robot en espacio de articulaciones, mediante la posición angular de los 21 ejes.	Gait Sentado	$q_1,$ $q_2,$ ..... $q_{21}$
Recursos	A este nivel se trabaja con la representación que utiliza cada uno de los recursos		Posición angular del eje del servo	$\theta_1,$ ..... $\theta_{21}$

Tabla 2. Estructura de información.

## 5. EXPERIMENTOS

Se ha diseñado un experimento a fin de evaluar las prestaciones y el funcionamiento adecuado de la arquitectura de control. En este, el robot utilizando la arquitectura de control que se ha diseñado, debe ser capaz de utilizar la información sensorial procedente de los sensores de planta y de inclinación para mantener la posición vertical sobre una superficie de inclinación variable. De este modo quedará cómo la información fluye a través de las diferentes capas de control y que los reguladores necesarios para mantener la estabilidad del sistema se ejecutan cumpliendo los requisitos temporales establecidos en el diseño del sistema.

Los bucles de control que se han establecido para mantener el equilibrio, utilizan el módulo de inclinación para detectar la variación de inclinación respecto de la vertical del torso del robot. Por otra parte los módulos de planta corrigen los pequeños errores en el apoyo de los pies sobre la superficie.

A continuación se describen cada uno de los reguladores que se han implementado. Se podría haber obtenido una solución que utilizará menos elementos activos y con ello menos recursos del sistema, pero se ha optado por utilizar la que aquí

se describe a fin de que se vieran claramente las posibilidades del sistema. Se han utilizado reguladores PID, para la implementación de los diferentes controladores, en el nivel reactivo.

El primer regulador PID, toma como error la medida de inclinación respecto de la vertical, mediante el módulo de inclinación. La salida de este regulador, es la acción de control a aplicar como desplazamientos en los ejes Y y Z de los pies del robot. Estas acciones de control se aplicarán en el subnivel de trayectorias, de este modo mediante el proceso cinemático inverso, se obtendrán el conjunto de ángulos a aplicar en los niveles inferiores.

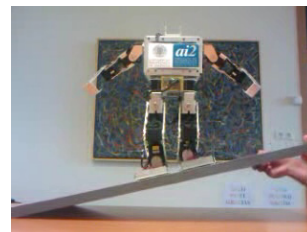


Figura 4. Experimento de Equilibrio.

El segundo regulador actuará directamente a nivel de articulación, se trata de un regulador PI que utiliza la misma entrada que el anterior, y cuya salida se aplica directamente sobre la articulación

del tobillo sobre el eje “X”, a fin de compensar el ángulo de la superficie de apoyo.

El tercer regulador es exactamente el mismo que el anterior pero en este caso actúa en el espacio de trayectorias modificando el ángulo del pie en el espacio cartesiano. Este regulador corrige el ángulo  $\beta$  que es girado sobre el eje “Y”.

Un cuarto regulador se ha implementado a fin de corregir las pequeñas tensiones generadas en el apoyo del pie sobre la plataforma debidas a los errores en los modelos y simplificaciones en el cálculo. Como realimentación utiliza la señal procedente del módulo de inclinación. Esta señal es integrada y aplicada sobre los ejes “X” e “Y” del tobillo.

En la Figura 4, se puede observar cómo el robot compensa las perturbaciones introducidas en la superficie de apoyo.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio de las diferentes problemáticas presentes en las diferentes aplicaciones de la robótica humanoide, ha motivado el desarrollo de un sistema de control para el robot humanoide microBII.

La realización de movimientos de forma adecuada por parte de los bípedos, está fuertemente ligada a los sistemas de control de tiempo real que dirigen sus actuadores. Por ello, tanto los sistemas de percepción, la arquitectura de control del robot, y las estrategias de control y reguladores, son objeto de continuo estudio, a fin de mejorar las prestaciones de los mismos.

En este trabajo se han analizado las posibilidades de cada uno de estos elementos y se ha propuesto un prototipo que rija el funcionamiento del bípedo microBII. Tras la evaluación de los diferentes desarrollos, y de los resultados de los experimentos realizados, se puede concluir que:

- Los sistemas de percepción que se han implementado proporcionan información suficiente a los bucles de control para realizar algunos movimientos con la estabilidad necesaria.
- La arquitectura organiza en diferentes niveles de abstracción la información para su uso entre los diferentes elementos del sistema. Esto permite el control de un sistema complejo como es el caso de un robot bípedo,

con un número elevado de reguladores, mediante una organización jerárquica de los mismos.

- Los controladores reactivos proporcionan al robot la capacidad de reacción frente a perturbaciones producidas por el entorno utilizando la información sensorial procedente de los sistemas de percepción.

## Referencias

- [1] Ching-Chang Wong, Chi-Tai Cheng, Kai-Hsiang Huang, and Yu-Ting Yang. *Humanoid Soccer Robot Design* by TKU Team for Humanoid League of RoboCup 2008. 2008.
- [2] D. Kaynov, A. Aceña Hernandez and C. Balaguer. *Joint Control of a Humanoid Robot*. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (HUMANOIDS 2007). 2007.
- [3] Lingyun Hu, Changjiu Zhou, and Zengqi Sun. *Estimating Biped Gait Using Spline-Based Probability Distribution Function With Q-Learning*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. March 2008.
- [4] Manuel Muñoz, J. Francisco Blanes, Miguel Albero, Javier O. Coronel, José E. Simó, Alfons Crespo, and Salvador Peiró. *Real Time control of 20 DoF humanoid robot*. 30th IFAC Workshop on Real-Time Programming and 4th International Workshop on Real-Time Software. Sept 2009
- [5] Manuel Muñoz, Jordi Arjona, Javier O. Coronel, J. Francisco Blanes, José Simó, Miguel Albero. *Arquitectura y desarrollo del robot humanoide microBII-II*. XXX Jornadas de Automática. 2009
- [6] P. Pirjanian, T. L. Huntsberger, A. Trebi-Ollennu, H. Aghazarian, H. Das, S. S. Joshi, P. S. Schenker. *CAMPOUT: A Control Architecture for Multi-robot Planetary Outposts*. 2003
- [7] *RoboCUP Official site*. [www.robocup.org/](http://www.robocup.org/)
- [8] G. Spampinato, G. Muscato. *Control Architecture and Walking Strategy for a Pneumatic Biped Robot*. Climbing and Walking Robots, Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005). 2005