

EXPERIENCIAS DOCENTES CON EL ROBOT HUMANOIDE ROBONOVA I Y CON EL MICROBOT MOWAY

C. FERNÁNDEZ, M.A. VICENTE, R. PUERTO, R.P. ÑECO
*Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales.
Escuela Politécnica Superior de Elche.
Universidad Miguel Hernández, España.
{ c.fernandez, suni, r.puerto, ramon.neco}@umh.es.*

Presentamos nuestras experiencias utilizando dos robots de bajo coste para la docencia en la asignatura Sistemas Electrónicos y Automáticos, de cuarto curso de Ingeniería Industrial. El primer robot, el humanoide Robonova I, ha permitido a los alumnos aplicar los conocimientos adquiridos en la asignatura sobre sensorización y acondicionamiento de señal, dado que se han incorporado nuevos sensores al mismo. Con el segundo robot, el microbot Moway, el trabajo se ha centrado en el software: en la programación del microcontrolador y en la utilización de sus sensores.

Palabras clave: Instrumentación, microcontroladores.

1. Introducción

El presente trabajo se enmarca dentro de la asignatura “Sistemas Electrónicos y Automáticos”, que tiene carácter troncal y que se imparte en cuarto curso de Ingeniería Industrial en la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se trata de una asignatura que engloba materias muy diversas: en un primer bloque, se estudia instrumentación (sensores y circuitos de acondicionamiento de señal); en un segundo bloque se estudian microcontroladores (hardware y programación en lenguaje ensamblador, siempre sobre microcontroladores PIC); y en un tercer bloque se estudia control en espacio de estados (este último bloque queda fuera de la temática del presente artículo).

Uno de los principales retos a los que se enfrenta el profesor de la mencionada asignatura es la motivación de sus alumnos. Esta motivación normalmente se consigue durante las sesiones prácticas. Los equipos de prácticas que se utilizan tradicionalmente son maquetas de sensores para la parte de instrumentación, como por ejemplo las proporcionadas por la compañía Edibon [1]; y equipos de desarrollo para la parte de microcontroladores, como por ejemplo el entorno EasyPIC [2]. Pero la experiencia en la docencia de esta asignatura durante varios años ha demostrado que las prácticas basadas en tales equipos no resultan del todo atractivas para los alumnos, por lo que es necesario buscar alternativas o actividades complementarias.

En base a ello, se ha optado por utilizar robots de bajo coste para que aquellos alumnos que lo deseen puedan hacer trabajos adicionales, trabajos que normalmente acaban constituyendo su proyecto fin de carrera. Actualmente, existen multitud de robots que permiten realizar desarrollos en materia de sensores, acondicionamiento de señal y programación de microcontroladores; todo ello con un precio muy contenido. Algunos de los ejemplos son: los robots vigilantes Rovio[3] o Spykee[4]; los humanoides Robonova I[5] o Kondo KHR [6]; o el microbot Moway[7]. Los robots que se han utilizado en la asignatura son el Robonova I y el Moway. En la siguiente sección se describen brevemente ambos equipos.

2. Equipos utilizados

2.1. Robot humanoide Robonova I

Se trata de un producto de la empresa *HiTec Robotics*, y forma parte de lo que se ha venido en llamar *Edutainment* o, lo que es lo mismo, equipos a medio camino entre la educación y el entretenimiento. Por una parte, permite una utilización muy simple (entre otras cosas, dispone de programación *Catch and Play*: el robot puede moverse a mano hasta cada una de las posiciones deseadas y generar automáticamente un programa que lleve al robot secuencialmente a cada una de esas posiciones) si la finalidad es únicamente el entretenimiento; pero, para usuarios expertos, las posibilidades son casi ilimitadas, tanto en programación como en posibilidades de incorporación de sensores. Por este motivo, se ha convertido en uno de los robots humanoides más populares en entornos docentes. La figura 1 muestra el aspecto del robot.



Figura 1. El robot humanoide Robonova I.

Entre sus principales características destacan sus 16 servos, 5 en cada pierna y 3 en cada brazo, que le permiten realizar todo tipo de movimientos (y que suponen un reto para el programador avanzado). Dispone de un microcontrolador MR-C3024, con CPU Atmel ATMEGA 128 de 8 bits y tecnología RISC. Posee una memoria de programa de 32KB; 24 puertos digitales de entrada y salida; 8 conversores A/D; 3 salidas de control de motores DC; control directo de sensores de ultrasonido, giroscopios y módulos LCD; altavoz piezoresistivo; y comunicación mediante puerto serie UART RS232 o mediante puerto serie I2C. Los puertos libres del microcontrolador pueden utilizarse para servos adicionales (por ejemplo, se puede añadir un servo que permite girar la cabeza del robot) o bien para incorporar sensores de todo tipo (infrarrojos, ultrasonidos, inclinación, giroscopios, etc.). La programación se realiza de modo sencillo mediante el lenguaje Robobasic (existen otras alternativas aún más sencillas, como la programación *Catch and Play* mencionada anteriormente).

2.2. Microbot Moway

El robot Moway ha sido diseñado y desarrollado por la empresa Bizintek Innova. Se trata de un robot móvil de muy pequeño tamaño (alrededor de 100 gramos de peso) y muy bajo coste (alrededor de 100 euros), y está concebido específicamente para fines educativos.

El robot se gobierna mediante un microcontrolador PIC16F876A del fabricante Microchip Technology. Sus dos motores se comandan mediante I2C, y disponen de encoders incrementales de bajo coste, con el bucle de control implementado en la propia electrónica del sistema motriz. También cuenta con sensores optorreflectivos infrarrojos para seguimiento de líneas, así como con dos sensores infrarrojos

anticolisión, y un sensor de intensidad de luz direccional (APDS-9002). Adicionalmente, un módulo de radiofrecuencia (transceptores BZI-RF2GH4) permite la comunicación inalámbrica entre robots o bien entre el robot y un ordenador. El robot se puede programar tanto en lenguaje ensamblador como en lenguaje C e incluso desde un entorno gráfico. La figura 2 muestra el aspecto y el tamaño del robot. Recientemente (diciembre de 2009) se ha lanzado una nueva versión del microbot Moway, que incorpora sensores adicionales (por ejemplo, acelerómetro) y algunas novedades como la conexión directa al ordenador a través de un puerto USB [7].



Figura 2. El microbot Moway.

3. Experiencias con el humanoide Robonova I

Dada la complejidad cinemática del Robonova I (16 grados de libertad), los alumnos que han trabajado con él no se han centrado únicamente en el aspecto electrónico (sensorización), sino que también han trabajado sobre rutinas de desplazamiento bípedo, más encuadradas en asignaturas de robótica o inteligencia artificial (estos trabajos se detallan en [8] y [9]). No obstante, en el presente artículo se muestran únicamente los desarrollos que han realizado los estudiantes en el campo de la sensorización.

3.1. Detección de caídas

El primer sensor que incorporaron nuestros estudiantes fue un sensor de inclinación. El objetivo era detectar si el robot permanecía en pie o, por el contrario, había caído al suelo. Aunque aparentemente, este dato parece imprescindible para que un robot humanoide se desplace adecuadamente, el Robonova I no incorpora de fábrica ningún sensor de este tipo, con lo cual no es capaz de reaccionar ante una caída (continúa realizando su rutina de movimientos como si estuviese en pie).

El sensor que se ha utilizado es el S300468. Se trata de un sensor analógico que proporciona una tensión de salida proporcional al grado de inclinación. El rango de medida es de $\pm 60^\circ$, la resolución de 0.1° y el tiempo de respuesta de 500 milisegundos. No es necesario ningún tipo de acondicionamiento para la señal, por lo que la conexión es directa con un puerto analógico libre del microcontrolador. Este sensor sólo toma medidas en un eje, lo que quiere decir que sólo detecta caídas en un plano. Normalmente se utilizan dos sensores, colocados con un desfase de 90° , para poder detectar todas las posibles caídas del robot (hacia delante, hacia detrás, hacia la derecha o hacia la izquierda) y activar la rutina adecuada de movimientos para que el robot se incorpore, en función del tipo de caída. No obstante, la estructura del robot hace que la caída lateral sea prácticamente imposible: el robot siempre cae hacia delante o hacia

atrás. Por esta razón, se decidió utilizar un único sensor, colocado de forma adecuada para detectar la caída en el eje transversal del robot.

Con este sensor y la programación adecuada en Robobasic, se ha conseguido un grado de autonomía mayor para el robot, que es capaz de detectar si se ha caído hacia adelante o hacia atrás, y posteriormente hacer un movimiento de recuperación para levantarse por sus propios medios y continuar caminando. En todas las pruebas del sistema se han obtenido resultados completamente fiables. La figura 3 muestra la colocación del sensor en el hueco disponible del robot (en parte superior de la espalda, muy próximo al microcontrolador).

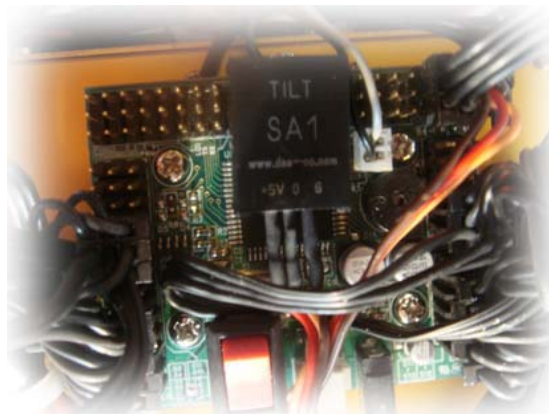


Figura 3. Colocación del sensor de inclinación en el Robonova I.

El sensor de inclinación puede considerar erróneamente que el robot se ha caído cuando lo único que ha sucedido ha sido un movimiento brusco del mismo. Para evitar este efecto, se realiza un filtrado de modo sencillo: sólo se considera que el robot realmente ha caído cuando la lectura de los sensores lo indica durante tres iteraciones seguidas. El código mostrado a continuación indica cómo conseguir este comportamiento:

```
test_tilt:

LEVANTADO = 0
A = AD(6)
IF A < 30 THEN
  CAIDO = CAIDO + 1
ELSEIF A > 200 THEN
  CAIDO = CAIDO + 1
ELSE
  CAIDO = 0
ENDIF

IF CAIDO > 2 THEN
  LEVANTADO = 1
IF A < 30 THEN
  GOTO forward_standup
ELSEIF A > 200 THEN
  GOTO backward_standup
ENDIF

RETURN
```

3.2. Detección de obstáculos

El segundo sensor que se ha incorporado al robot es un sensor de obstáculos, que permite evitar colisiones con el entorno. Para esta finalidad, existen disponibles tanto sensores basados en ultrasonidos como sensores basados en infrarrojos, adaptables al Robonova I.

Para el presente trabajo, se ha utilizado el sensor de infrarrojos Sharp GP2D12, cuyas características fundamentales son su rango de medida de 10 a 80 cm., su tiempo de respuesta de 32 ms. y su rango de tensiones de salida, entre 0 y 2.5 V., que permite una conexión directa a cualquier puerto analógico del microcontrolador. El sensor se situó en la parte frontal del robot, para permitir la detección de obstáculos mientras el robot camina hacia delante. Se desarrolló una rutina que hacía girar al robot cada vez que detectaba un obstáculo y los resultados fueron satisfactorios.

No obstante, para un mejor funcionamiento, sería adecuado añadir dos sensores adicionales que comprobasen la presencia de obstáculos en los laterales del robot; de ese modo los desplazamientos podrían ser más inteligentes. Otra alternativa sería la colocación de un único sensor sobre la cabeza del robot y la instalación de un servo adicional que permita girar la misma, de modo que el robot pueda barrer todas las orientaciones y detectar rápidamente todos los obstáculos presentes a su alrededor. La figura 4 muestra la colocación del sensor en el tronco del robot.



Figura 4. Colocación del sensor de infrarrojos en el tronco del Robonova I.

3.1. Seguimiento de líneas

El tercer sensor que se ha incorporado al robot es un sensor optorreflectivo para el seguimiento de líneas. El seguimiento de líneas resulta particularmente complicado en un robot bípedo, y más en este caso, dado que otros robots bípedos utilizan para esta tarea cámaras CCD que permiten una correcta detección de la posición y orientación de la línea a seguir. Dado que el microcontrolador del Robonova I no es capaz de trabajar con imágenes o señal de vídeo, se ha optado por situar dos sensores optorreflectivos, uno en cada pie del robot. El camino a seguir debe ser marcado con una línea suficientemente gruesa (aproximadamente 8 cm.) de modo que ambos pies detecten que están sobre la línea simultáneamente cuando el robot sigue correctamente su camino.

El sensor utilizado es el CNY70 de Vishay Telefunken, con emisor y receptor dentro del mismo encapsulado y con salida a transistor. El camino a recorrer se marcó con tinta negra sobre una superficie de papel blanco, y se comprobó que la distancia máxima a la que el sensor reconoce fiablemente la

diferencia blanco/negro es de aproximadamente 12 mm. Por tanto, se ajustaron las rutinas de desplazamiento para que al caminar el robot no elevase los pies por encima de esa altura.

En este caso, el sensor necesita un circuito de acondicionamiento adecuado. Se ha utilizado un Schmitt Trigger para discretizar la respuesta del sensor a dos niveles; además de dimensionar adecuadamente las resistencias del emisor y del receptor del sensor. Adicionalmente, se ha incorporado un led para poder comprobar en todo momento el correcto funcionamiento del sistema. La figura 5 muestra la colocación de los sensores y el circuito acondicionador desarrollado. La figura 6 muestra el esquema del circuito.



Figura 5. Colocación de los sensores optorreflectivos en los pies del Robonova I y circuito acondicionador.

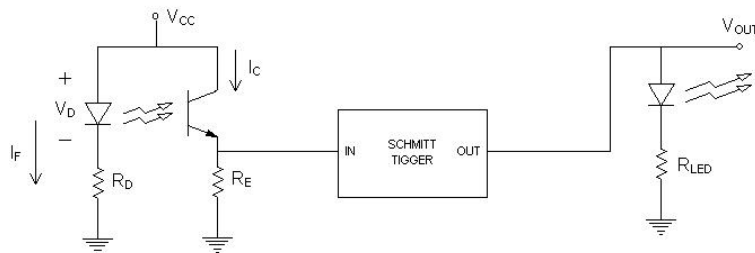


Figura 6. Esquema del circuito acondicionador desarrollado.

La programación del seguidor de líneas resultó complicada, dado que la casuística es muy elevada: cada uno de los dos pies puede detectar que se ha salido de la línea a seguir en diversos momentos de su avance. La rutina principal del algoritmo se repite continuamente durante el avance del robot. Los cuatro estados principales, ordenados, son los siguientes:

- Estado 1. Peso en pierna derecha, pierna izquierda adelantada o a la misma altura que la pierna de apoyo.
- Estado 2. Peso en pierna izquierda, pierna derecha atrasada respecto de la pierna de apoyo.
- Estado 3. Peso en pierna izquierda, pierna derecha adelantada o a la misma altura que la pierna de apoyo.
- Estado 4. Peso en pierna derecha, pierna izquierda atrasada respecto de la pierna de apoyo.

Si el robot no se sale del camino marcado, por ejemplo porque camina por una línea recta de forma perfecta, irá pasando por los cuatro estados en orden, avanzando por el circuito. Durante la ejecución de las rutinas de cada estado se comprueba si los pies están situados sobre el camino (ambos sensores

optorreflexivos deben indicar que los pies se encuentran sobre la línea negra). En el caso de que no sea así, el robot debe ejecutar una rutina de corrección adecuada para volver al camino. Esta rutina puede consistir en un giro o bien en un desplazamiento lateral. Como muestra de la complejidad del algoritmo, las figuras 7 y 8 muestran el diagrama de flujo básico, que permite ir pasando de un estado a otro cuando el robot sigue la línea o bien activar las rutinas de corrección. La figura 9 muestra como ejemplo una de las rutinas de corrección.

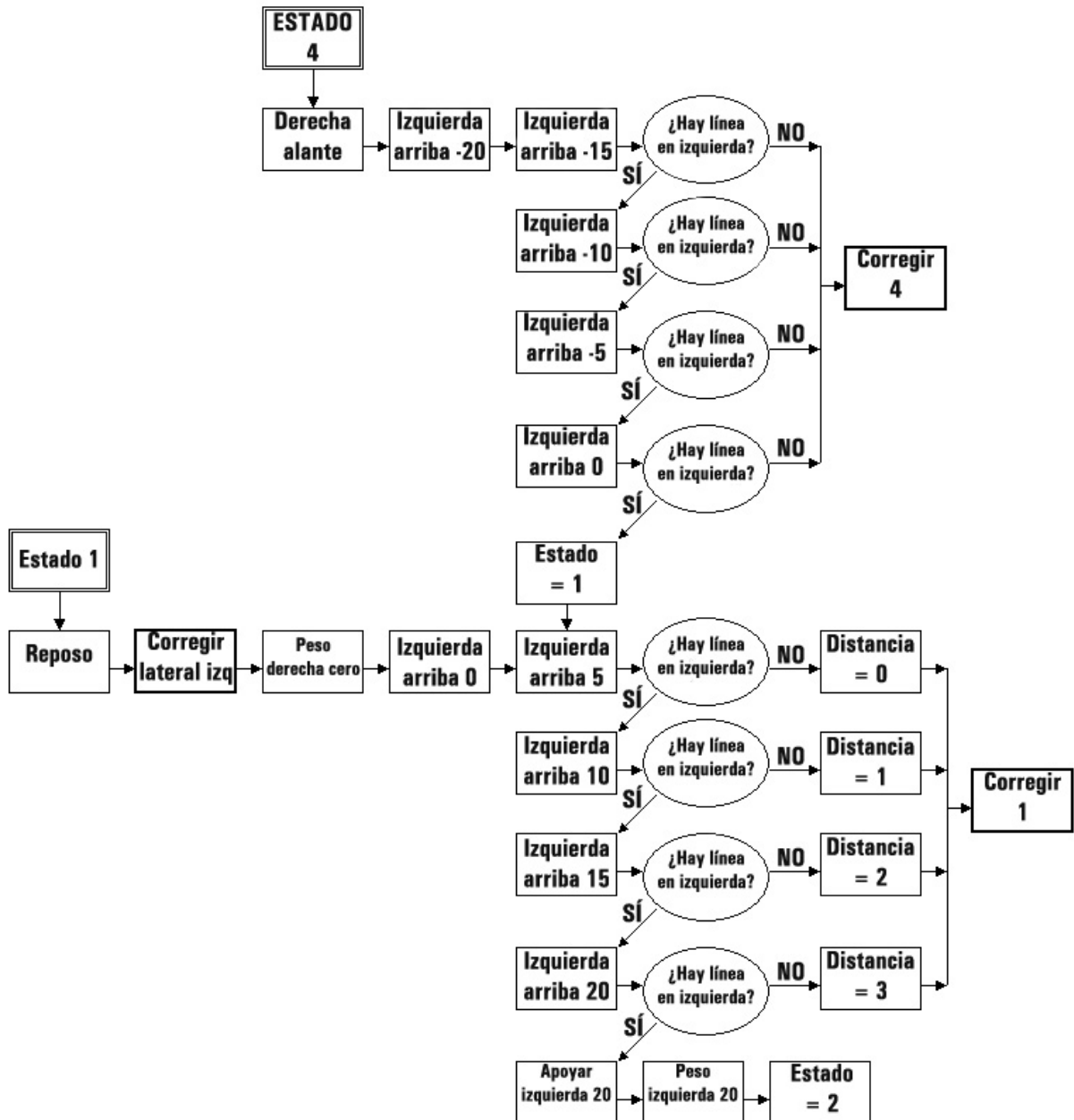


Figura 7. Diagrama de flujo básico, parte I.

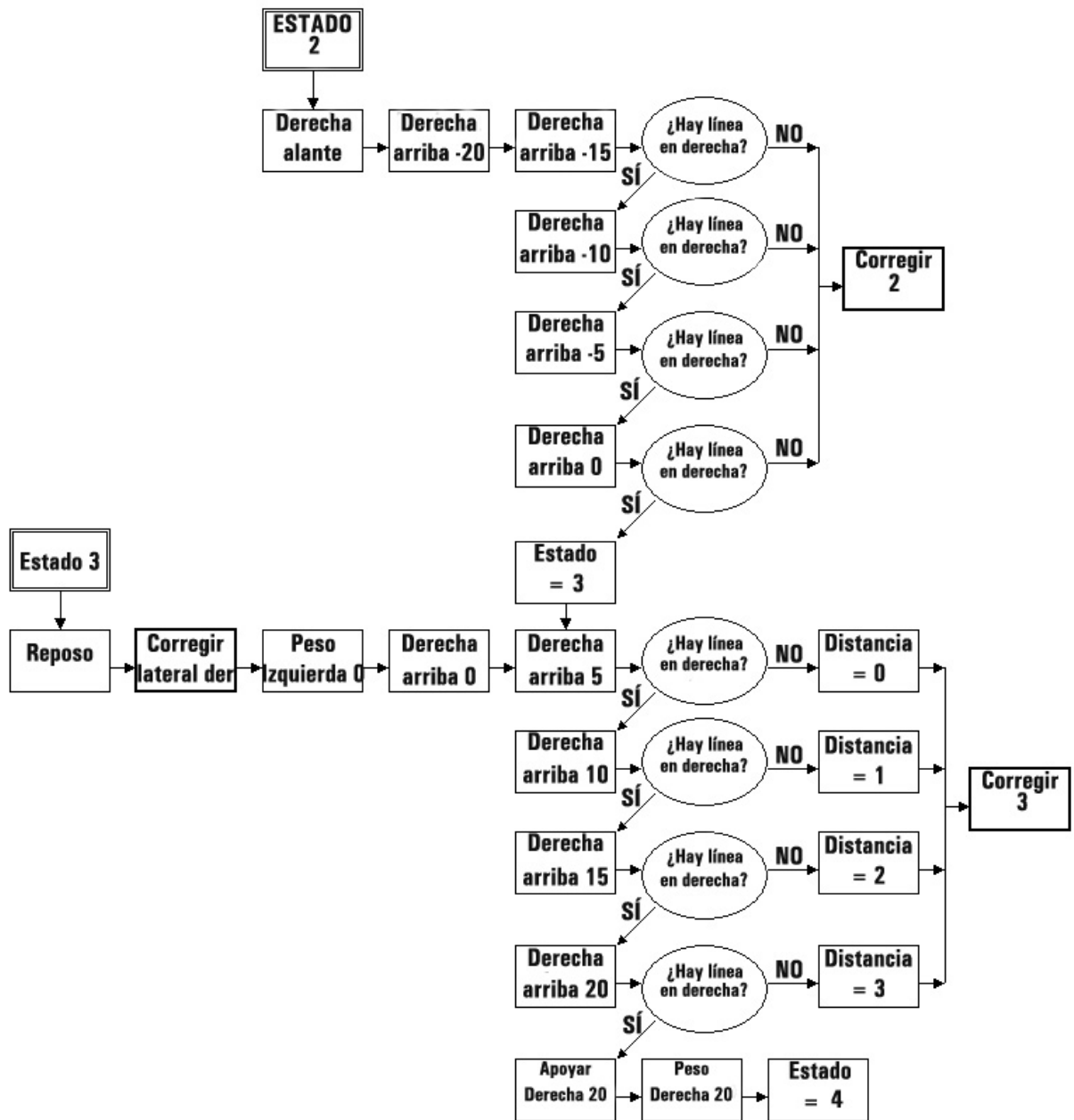


Figura 8. Diagrama de flujo básico, parte II.

En los diagramas de flujo de las figuras 7 y 8 es posible apreciar cómo la pierna que se desplaza (nunca se desplazan ambas piernas a la vez, siempre existe un pie en contacto con el suelo) debe comprobar cada 5mm. si se encuentra sobre la línea negra; en caso de no estarlo, se activa la rutina de corrección, que debe conocer el punto del desplazamiento en el que se ha dejado de detectar la línea negra (variable "Distancia").

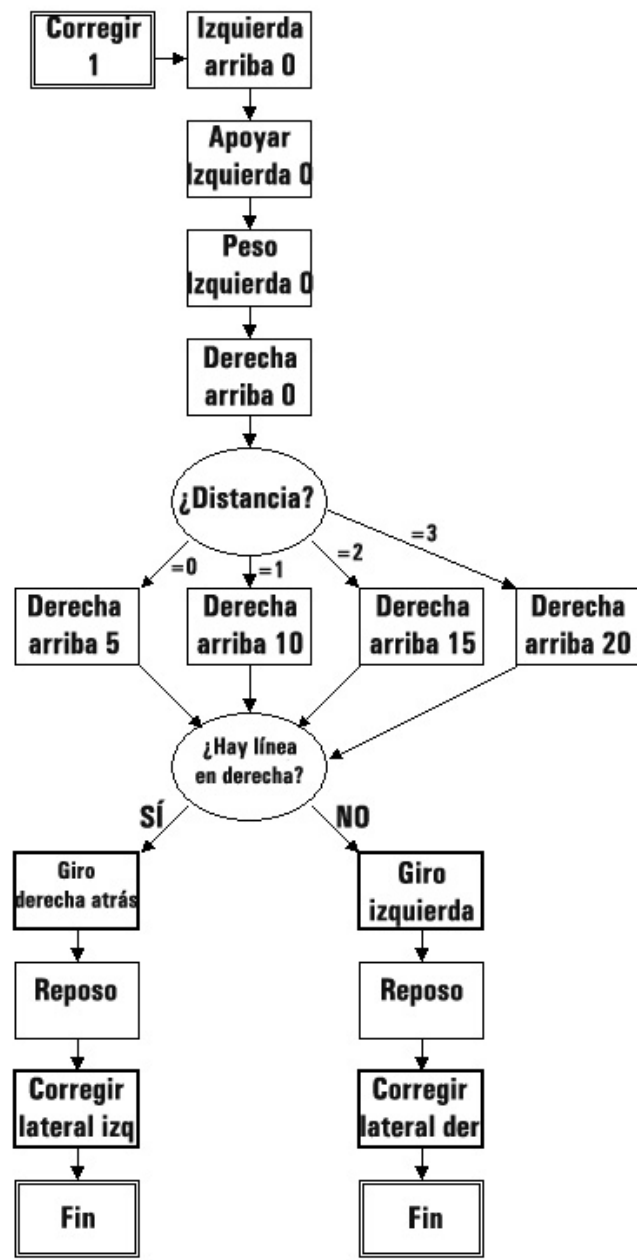


Figura 9. Ejemplo de una de las rutinas de corrección.

En el ejemplo de corrección de la figura 9 puede comprobarse cómo la pierna en movimiento (izquierda) se apoya, y a continuación se desplaza la pierna contraria (derecha) en mayor o menor medida dependiendo del punto en el que se perdió el contacto con la línea negra. La finalización del movimiento depende de nuevo de la información ofrecida por los sensores optorreflexivos.

A pesar de la complejidad del algoritmo, los resultados fueron satisfactorios y el robot es capaz de seguir líneas siempre que éstas no realicen giros excesivamente bruscos.

4. Experiencias con el microbot Moway

4.1. Odometría del robot

Los primeros experimentos que se realizaron con el Moway buscaron determinar la fiabilidad de su sistema de odometría. El robot dispone de un encoder en cada una de sus dos ruedas, con lo que en principio debería ser posible conocer en todo momento cuánto se ha desplazado y en qué dirección. No obstante, pueden existir errores debidos fundamentalmente al deslizamiento de las ruedas sobre el suelo. El objetivo de los experimentos fue cuantificar estos errores e intentar corregirlos. Se realizaron experimentos tanto en trayectorias rectilíneas como en trayectorias con giros e incluso considerando desniveles en el terreno. En todos los casos se realizaron diversas repeticiones para intentar determinar la componente sistemática y la componente aleatoria de las desviaciones. Los resultados mostraron errores muy elevados, con una gran componente aleatoria, lo cual no hace aconsejable utilizar la odometría del robot. La recomendación es utilizar balizas externas (bien balizas luminosas o bien marcas en el terreno) para orientar al robot. En función de esto, se realizaron experimentos adicionales utilizando estos tipos de balizas.

4.2. Orientación mediante seguimiento de líneas

El microbot Moway dispone de sensores optorreflectivos específicos para el seguimiento de líneas, con lo cual la tarea realizada consistió en este caso únicamente en su programación y pruebas. Los primeros experimentos se limitaron al seguimiento de líneas negras sobre fondo blanco, y resultaron altamente fiables con independencia de las condiciones de iluminación externa. Adicionalmente, dado que la señal de salida del sensor es analógica, se realizaron experimentos de detección de diferentes niveles de gris. En estos experimentos, quedó demostrado que un mismo robot es capaz de diferenciar con fiabilidad hasta 12 niveles de gris diferentes, lo cual permite extender las posibilidades de orientación del robot más allá del seguimiento de líneas. En concreto, se programó un algoritmo para que dos robots fuesen capaces de jugar al fútbol. La idea fundamental fue orientar los robots sobre el terreno de juego, gracias a una serie de franjas impresas sobre el mismo, con una variación progresiva del nivel de gris. De este modo, los robots fueron capaces de detectar hacia qué portería se estaban dirigiendo y en qué lugar del campo se encontraban en cada instante.

4.3. Orientación mediante señales luminosas

En este caso se utilizó el sensor de detección de luz del Moway para intentar guiar al robot mediante una linterna. Se realizaron multitud de experimentos, y se pudo comprobar cómo las fuentes de luz externas afectaban excesivamente a los resultados. Únicamente se consiguió guiar al robot de modo fiable cuando el lugar donde se realizaba el experimento presentaba una gran oscuridad. Por tanto, las aplicaciones de este sensor se deben considerar muy limitadas.

4.4. Utilización del módulo de radiofrecuencia

A pesar del bajo coste del microbot Moway, su módulo de radiofrecuencia permite realizar multitud de experimentos avanzados. El primero de los programas que se desarrolló buscaba determinar si dos robots podían compartir información sensorial en tiempo real. Para ello se realizó un experimento en el que un robot seguía un camino marcado en el suelo y transmitía la información de sus sensores a otro robot, que se encontraba en un entorno distinto en el que no existían marcas en el suelo. Se pudo comprobar que el segundo robot realizaba exactamente los mismos movimientos sobre multitud de circuitos, con lo cual quedó demostrado que la compartición de información sensorial es perfectamente factible.

El segundo programa que se realizó intentaba que dos robots cooperasen para desplazar una carga pesada o voluminosa. Los robots debían actuar coordinadamente para empujar al mismo tiempo y a la misma velocidad. Para realizar esta tarea se utilizó el módulo de radiofrecuencia, los sensores de proximidad (detectores de obstáculos basados en infrarrojos) y los sensores de seguimiento de líneas de los robots. Dado que los dos robots deben empujar al tiempo, cuando uno de los robots detecta que ha alcanzado el objeto que debe empujar, espera a recibir la confirmación del otro robot. Únicamente cuando los dos robots se encuentran listos, comienzan a empujar. Durante el desplazamiento de la carga, los robots comprueban continuamente que ambos siguen en contacto con el objeto y se esperan en caso necesario. La tarea concluye cuando el objeto que están desplazando atraviesa una línea marcada sobre el suelo. El programa desarrollado funcionó satisfactoriamente en todos los experimentos.

Por último, también se utilizó el módulo de radiofrecuencia para conseguir que varios robots cooperasen para realizar una cierta tarea de modo más eficiente. La tarea consistió en desplazar una serie de objetos fuera de un campo de trabajo rectangular. Cada robot por separado intentaba detectar estos objetos con su sensor de infrarrojos y arrastrarlos hasta expulsarlos fuera del campo de trabajo (esto último se detectaba mediante el sensor optorreflexivo que puede comprobar cuándo se ha atravesado la línea que delimita el campo de trabajo). Utilizando el módulo de radiofrecuencia, todos los robots se comunicaban para conocer cuántos obstáculos habían expulsado sus compañeros y por tanto, conocer cuándo se había terminado el trabajo. Los resultados de este experimento también fueron satisfactorios.

Los detalles de todos los experimentos realizados con los Moway pueden consultarse en las memorias de los proyectos fin de carrera correspondientes: [10] y [11].

4. Conclusiones

La aparición de robots de bajo coste en el mercado posibilita la realización de prácticas de laboratorio más atractivas para los alumnos. En concreto, se han realizado experiencias con el robot humanoide Robonova I y con los microbot Moway.

En cuanto al Robonova I, los alumnos pueden desarrollar multitud de competencias en materia de sensores y acondicionamiento de señal, dado que microcontrolador que gobierna el robot dispone de multitud de entradas y salidas libres para conectar sensores y actuadores externos. En el caso del presente trabajo, se han utilizado sensores de distancia mediante infrarrojos, sensores de inclinación y sensores optorreflexivos, pero existen otros muchos sensores que se pueden utilizar, como giroscopios o sensores de ultrasonidos.

En cuanto al Moway, a pesar de que se pueden incorporar sensores gracias a la tarjeta de expansión que se ofrece como opción, el trabajo realizado hasta ahora se ha centrado en la utilización de los sensores que posee, dado que viene bien equipado de fábrica. La utilización de estos sensores permite a los alumnos desarrollar competencias tanto en el campo de la instrumentación como en el campo de la programación de microcontroladores.

Como conclusión final, cabe destacar que el objetivo buscado con estas experiencias, que no es otro que la motivación de los alumnos por la asignatura, se ha logrado adecuadamente. Todos los alumnos que han participado en estas actividades han terminado por desarrollar sus proyectos fin de carrera sobre los equipos de prácticas (bien sobre el humanoide Robonova I o bien sobre los microbots Moway) y en todos los casos han obtenido la máxima calificación posible (nota de 10 con matrícula de honor). Dado que se trata de una experiencia nueva, es de esperar que en los próximos cursos el número de alumnos trabajando sobre estos equipos aumente.

Referencias

- [1] Entrenador de instrumentación de la compañía Edibon:
<http://www.edibon.com/products/catalogues/es/units/electronics/transducersensors/SAIT.pdf>
- [2] Entorno de desarrollo EasyPIC4: *<http://www.microe.com/en/tools/easypic4/>*
- [3] Robot vigilante Rovio: *<http://www.wowwee.com/en/products/tech/telepresence/rovio:rovio>*
- [4] Robot vigilante Spykee: *<http://www.spykeeworld.com/>*
- [5] Humanoide Robonova I: *<http://www.hitecrobotics.com/>*
- [6] Humanoide Kondo KHR: *<http://www.kondo-robot.com/EN/>*
- [7] Microbot Moway: *<http://www.moway-robot.com/>*
- [8] M. García, *Modelado, sensorización y programación del robot humanoide Robonova I*. Proyecto fin de carrera, Universidad Miguel Hernández (2009).
- [9] M. García, M. Asunción Vicente, C. Fernández. *Desarrollo de rutinas de desplazamiento paramétricas para el robot humanoide Robonova I*. Actas de las XXX Jornadas de Automática (2009).
- [10] C. Coll. *Estudio de la odometría en los robots Moway y desarrollo de sus capacidades móviles mediante el uso del sensor de luz*. Proyecto fin de carrera, Universidad Miguel Hernández (2009).
- [11] M.C. Vera. *Programación de microbots Moway para la realización de tareas cooperativas mediante comunicación por RF*. Proyecto fin de carrera, Universidad Miguel Hernández (2009).