

# Sensor omnidireccional

Javier de Lope Asiaín

Departamento de Inteligencia Artificial  
Facultad de Informática  
Universidad Politécnica de Madrid

<http://www.dia.fi.upm.es/~jdlope/>  
[jdlope@dia.fi.upm.es](mailto:jdlope@dia.fi.upm.es)

23 de febrero de 2002

## 1. Introducción

Los robots comerciales de medio y gran tamaño utilizados en investigación como pueden ser los de *Nomadic Technologies*<sup>1</sup> o los de *Real World Interface*<sup>2</sup> suelen incorporar unos anillos de ultrasonidos como parte de su equipación sensorial. Normalmente, el número de elementos sensoriales que componen estos anillos varía entre 16 y 24, dependiendo del tamaño del robot y de las aplicaciones que quieren ser estudiadas. En la Figura 1 se muestra la parte delantera de un Nomad-200 en la que pueden observarse algunos de los 16 sensores Polaroid que conforman su anillo de ultrasonidos.



Figura 1: Robot Nomad-200

Con semejante equipación sensorial, el robot puede tener un conocimiento de los obstáculos que le rodean en cada momento e incluso de la llegada de otros agentes móviles. Son fundamentales en trabajos de modelado del entorno en los que se construyan de forma autónoma mapas del lugar en el que opera el robot. Al estar siempre presentes y disponibles, no se tienen que realizar movimientos adicionales del robot para adquirir características de lugares del entorno que podrían interferir en la información que se dispone sobre la posición y orientación del robot. Pueden utilizarse o

---

<sup>1</sup><http://nomadic.sourceforge.net/>

<sup>2</sup><http://www.irobot.com/rwi/>

bien unos sensores concretos para cada comportamiento que se esté programando o o bien una combinación de las lecturas realizadas por varios de ellos para establecer un mecanismo simple para reducir la incertidumbre en las medidas debidas, por ejemplo, a rebotes. Esta disposición es también muy útil para aplicar métodos de navegación basados en campos de potencial artificiales.

En general, como puede verse, son muchas las ventajas que presenta este tipo de disposición sensorial. Probablemente, sólo pueda apuntarse un inconveniente aunque de importancia considerable: *su coste*, tanto económico como computacional.

En el presente documento vamos a ofrecer una alternativa a este tipo de dispositivos sensoriales basada en un único sensor para la medida de distancias como es el Sharp GP2D12 que colocaremos sobre un servo de los que se utilizan habitualmente para radio-control. Los movimientos del servo actuarán sobre la dirección en la que vamos a realizar las medidas. En la Figura 2 puede verse un detalle del montaje del sensor junto con una tarjeta CT6811 de *Microbótica*<sup>3</sup> que utilizaremos para realizar el control de la posición del servo y convertir las medidas del GP2D12.

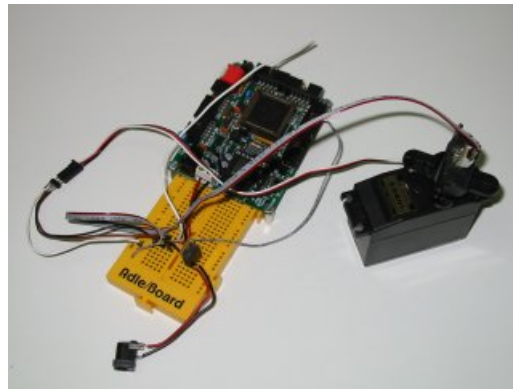


Figura 2: Montaje de un sensor omnidireccional

Al utilizar un solo sensor se reducirá el coste económico. En cambio, las prestaciones serán similares, salvando las distancias entre las tecnologías de sensores utilizados, e incluso superiores ya que podremos tomar medidas prácticamente en cualquier dirección y no en unas direcciones concretas y definidas como es el caso de los anillos de ultrasonidos. Por otro lado, al usar un único elemento estaremos recibiendo información de los que ocurre por uno de los lados del robot (por ejemplo, el delantero); con un segundo sensor colocado en sentido opuesto, podríamos tener información de todo lo que ocurre en torno al robot. Más sensores introduciría redundancia en las medidas o la posibilidad obtener información a mayor frecuencia no siendo necesario tener que operar el servo.

En lo que sigue veremos, en primer lugar, cómo conectar, leer e interpretar las medidas tomadas por el GP2D12 para continuar con los pasos a seguir para convertir las lecturas en valores de distancia. Terminaremos presentando el sensor con el servo y mostraremos una serie de registros sensoriales de diferentes lugares a modo de ejemplo.

## 2. GP2D12: Sensor de medida de distancias

La familia de sensores Sharp GP2Dxx es una de las más utilizadas tanto en lo que viene a denominarse robótica móvil casera como en el ámbito de investigación debido

<sup>3</sup><http://www.microbotica.es/>

principalmente a su facilidad de integración y su bajo coste (unos 15 Euros). En la Figura 3 puede verse una imagen de un GP2D12.



Figura 3: Sensor GP2D12

Otro dispositivo de esta familia bastante utilizado es el GP2D02. La principal diferencia entre unos y otros es que los GP2D02 ofrecen una salida serie de las medidas proporcionadas mientras que los GP2D12 dan una salida analógica entre 0 y 3 voltios dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto. La salida analógica no es lineal sino que sigue una curva como la que se muestra en la Figura 4. En aplicaciones de robótica móvil es común la utilización de un convertor analógico-digital con el que adaptar esa tensión para su tratamiento digital. Cuando además interese conocer la medida con exactitud y no un valor aproximado de la cercanía de los objetos, se debe realizar una calibración del dispositivo que permita dar una magnitud de la distancia junto con una medida del error cometido.

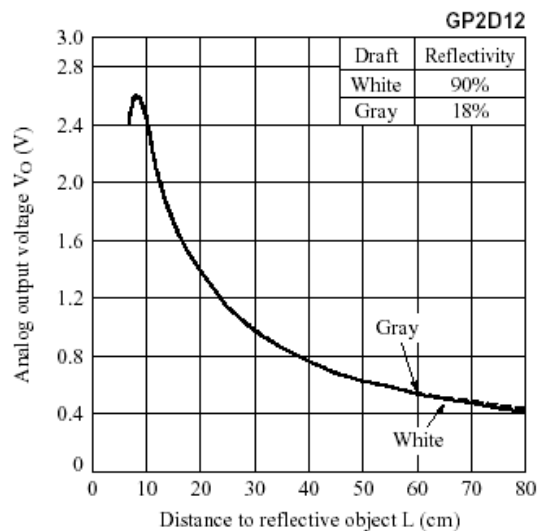


Figura 4: Curva de tensión de salida según la distancia al obstáculo

Otra diferencia entre ambos es que los GP2D02 tienen un mayor periodo de actualización de las medidas, 75 ms frente a los 40 ms de los GP2D12. Esta característica debe tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el sensor para aplicaciones concretas.

También existen modelos conocidos como GP2Dx5 que dan una salida a nivel alto cuando la medida sobrepasa determinado umbral y que funcionan como opto-

interruptores. En las páginas de Sharp<sup>4</sup> puede encontrarse información adicional sobre la familia completa de sensores que ofrece este fabricante.

Tanto unos como otros se basan en el principio de triangulación para realizar las medidas<sup>5</sup>. El elemento a la izquierda del sensor según vemos la Figura 3 es un led infrarrojo que emite un haz que será rebotado por el objeto y posteriormente recogido por el elemento situado a la derecha. Este último se conoce como PSD (*Position Sensing Device*, Dispositivo de Percepción de Posición) y puede entenderse como una lente situada sobre un array de células sensibles a la luz infrarroja. Dependiendo del ángulo de incidencia del haz rebotado en la lente, se activa una u otra célula del array lo que permite estimar la distancia a la que se encuentra el objeto.

El conexionado de los GP2D12 con un microcontrolador es sumamente sencillo requiriendo solamente una entrada del conversor analógico-digital a la que se conectará el pin de salida del sensor (el de más a la izquierda visto de frente según se muestra en la Figura 5). Los otros dos pines corresponden, respectivamente, con GND y con  $V_{cc}$ , la tensión de alimentación, que deberá ser próxima a los 5 voltios. Se recomienda el uso de una tensión regulada (por ejemplo, mediante un 7805) para no introducir ruido en las medidas debido a que la tensión caiga por debajo de su umbral de funcionamiento. Así mismo, se recomienda utilizar un condensador de  $22 \mu\text{F}$  entre  $V_{cc}$  y GND para reducir el ruido en la alimentación debida a la corriente requerida por el led emisor. También podría utilizarse un condensador entre la señal de salida  $V_o$  y  $V_{cc}$  o GND (filtro paso bajo) pero se disminuye considerablemente la dinámica del sensor.

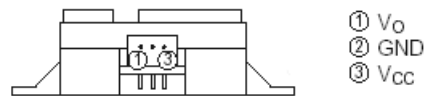


Figura 5: Conexiones del GP2D12

Antes de pasar a describir su uso desde el punto de vista de la programación, vamos a resumir algunas características de cierta importancia. En el Tabla 1 se recogen los datos principales ofrecidos por el fabricante. Vemos que el rango de medida se encuentra entre los 10 y 80 cm. Si se baja de los 10 cm la tensión de salida disminuye más rápidamente que cuando se supera este umbral (véase la figura 4) pero no se puede conocer si estamos por encima o por debajo del umbral. Dada esta característica, es bastante habitual colocar el sensor de forma que nunca puedan darse medidas menores a los 10 cm, dejando, por ejemplo, que esa distancia sea cubierta por el chasis del robot.

Otra característica menos conocida es el pico de corriente que precisa el sensor debido a la emisión del led infrarrojo. Un valor de 200 mA puede ser relativamente alto dependiendo del tipo de aplicaciones y elementos electrónicos utilizados. Concretamente, de forma empírica se ha comprobado que este hecho puede provocar ruido cuando se utilizan micrófonos como otros elementos sensoriales del robot. En tales casos, se recomienda ampliar la electrónica de conexionado para que se puedan desconectar los sensores de distancia cuando no sean necesarios o mientras que se están realizando otro tipo de medidas.

<sup>4</sup><http://www.sharp.co.jp/ecg/opto/products/osd/qr10-01.html>

<sup>5</sup><http://diwww.epfl.ch/lami/expo/zufferey.html>

Tabla 1: Resumen de las especificaciones del GP2D12

Rango	10-80 cm
Periodo de lectura	40 ms
Máximo ángulo de reflexión	> 40°
Tensión de alimentación	4.5-5.5 V
Ruido de salida	< 200 mV
Consumo medio	35 mA
Consumo de pico	200 mA

## 2.1. Integración con el sistema de control

En esta primera fase, vamos a conectar el GP2D12 a una tarjeta CT6811 de *Microbótica*. Utilizaremos el canal 2 del conversor analógico digital del 68HC11 (PE2) para realizar las conversiones de la señal de salida del sensor. Como hemos comentado con anterioridad, los valores de salida están comprendidos entre los 0 y 3 voltios, aproximadamente, con lo que tendremos unas lecturas, una vez convertidas, en el rango [0x17, 0x85].

El valor 0x17 concuerda con el menor valor devuelto por el sensor (cercano a 0 voltios), correspondiente a su máxima distancia (80 centímetros). Pueden obtenerse valores aún menores en las lecturas que corresponderán con objetos todavía más lejanos, concretamente hasta 0x0C que se corresponden con 120 centímetros. El error de medida en esta zona puede ser alto ya que estamos saliendo fuera de las especificaciones del fabricante.

Por su parte, el valor 0x85 se corresponde con el mayor valor devuelto por el sensor (unos 3 voltios) y establece la menor distancia que puede leerse con el GP2D12 que se ha utilizado para las pruebas que es de 8 cm.

Los valores intermedios no se ajustan linealmente sino que como se comentó anteriormente, siguen una curva como la que se muestra en la figura 4. En el siguiente apartado estableceremos un mecanismo para convertir valores intermedios mediante una tabla *look-up* y así conocer, con error, la distancia a la que están los obstáculos desde nuestro robot. No conocer con precisión la distancia no es problema para muchos comportamientos de evitación de obstáculos que podemos establecer en nuestro robot, podemos definir etiquetas en ciertas medidas que usadas como umbral nos permitan conocer si los obstáculos están *cerca* o *lejos*. Nótese que los humanos no utilizamos información precisa en nuestros movimientos y, normalmente, no chocamos con el mobiliario.

Hemos dicho que vamos a utilizar el canal 2 del conversor del 68HC11. Como es sabido, las entradas del conversor están disponibles a través del puerto E de dicho micro. Esto hace que sea común la utilización de la notación PE2 para referirse al pin correspondiente. Para una comprensión del funcionamiento del conversor se recomienda la consulta del propio Manual de Referencia del microcontrolador o de literatura técnica relacionada<sup>6</sup> vamos el conversor analógico-digital en modo de scan simple y único canal.

La primera tarea a realizar en nuestro programa es encender el conversor analógico-digital del 68HC11. Esta operación se realiza a través del registro `OPTION`:

<sup>6</sup>Puede consultarse el libro *Microcontrolador MC68HC11: Fundamentos, recursos y programación*, C. Doblado *et al.*, Microbótica, S.L., 1999, disponible en formato PDF en la dirección <http://www.microbotica.es/>

```

LDAA #$80          ; Enciende el conversor A/D
STAA OPTION,X

```

Recordamos que en el modo utilizado se realizan cuatro conversiones consecutivas del canal seleccionado quedando en los registros ADR1 a ADR4, en nuestro caso usaremos la primera de las conversiones, es decir, la que queda en el registro ADR1. La configuración del modo se realiza mediante el registro ADCTL según se indica a continuación.

```

bucle LDAA #$02          ; Config: Scan=0,Mult=0,PE2
      STAA ADCTL,X

```

Como decimos, los valores de las conversiones los recogeremos del registro ADR1. Esto puede realizarse con una simple instrucción de carga en un acumulador desde esa posición de memoria. Antes de que la conversión esté disponible debemos realizar una espera activa comprobando que la bandera de conversión (bit más significativo del registro ADCTL) se active. Nótese que en las líneas que se muestran a continuación y que se corresponden con las operaciones de espera y captura del valor se ha utilizado direccionamiento indexado a través del registro índice X; dicho registro debe estar convenientemente inicializado con el valor 0x1000 para acceder a las posiciones de memoria deseadas.

```

bucle2 BRCLR ADCTL,X $80 bucle2
      LDAA ADR1,X

```

El programa completo que nos va a permitir la prueba de los sensores se muestra a continuación y se deja como ejercicio que el lector efectúe un seguimiento del código para que entienda el funcionamiento. Sólo indicaremos que tras la inicialización del conversor, el programa se queda en un bucle sin fin en el que se envía cada lectura por el puerto serie asíncrono; de cada valor recibido se envían dos caracteres correspondientes a los *nibbles* alto y bajo para una mejor representación del valor usando un software de comunicación convencional en el PC.

```

* -----
* leeconv.asm
*
* Va mostrando por el SCI todos los valores de los canales del conversor
* -----

PORTA EQU $00          ; Dirección del puerto A
PORTE EQU $0A          ; Dirección del puerto E

SCSR EQU $2E           ; Registro de estado del SCI
SCDR EQU $2F           ; Registro de datos del SCI

OPTION EQU $39         ; Dirección del registro OPTION
ADCTL EQU $30          ; Dirección del registro ADCTL
ADR1 EQU $31           ; Canal Adr1 del conversor

* -----

      ORG $0000          ; Programa en RAM interna

* -----

```

```

        LDAA #$80                ; Enciende el conversor A/D
        STAA OPTION,X
        BSR f_wait

bucle   LDAA #$02                ; Config: Scan=0,Mult=0,PE2
        STAA ADCTL,X

bucle2  BRCLR ADCTL,X $80 bucle2
        LDAA ADR1,X
        BSR sendhex

        BSR f_wait
        BSR f_wait

        BRA bucle

* -----
* Envía el carácter del acumulador A por el puerto serie SCI
* -----

sendc   BRCLR SCSR,X $80 sendc  ; Espera a que termine un envío anterior
        STAA SCDR,X            ; Envía el carácter
        RTS

* -----
* Envía el dato que hay en el acumulador A como dos caracteres numéricos
* -----

sendhex TAB                          ; Guarda el dato en B
        LSRA                    ; Prepara el nibble más significativo
        LSRA
        LSRA
        LSRA
        BSR tohex                ; Lo convierte a carácter
        BSR sendc                ; Lo envía
        TBA                      ; Recupera el dato desde B
        ANDA #$0F                ; Prepara el nibble menos significativo
        BSR tohex                ; Lo convierte a carácter
        BSR sendc                ; Lo envía
        LDAA #' '                ; Envía un espacio para mayor claridad
        BSR sendc
        RTS

tohex   CMPA #$0A
        BLT tohexn
        ADDA #55
        RTS

tohexn  ADDA #'0
        RTS

* -----

        include ../wait.inc

        END

```

## 2.2. Tabla de conversión

En este caso no vamos a realizar una calibración real del sensor ya que esto implicaría comparar las lecturas devueltas por cada GP2D12 con patrones específicos para cada medida y disponer de un sistema lo suficientemente preciso y con error conocido que nos permitiese determinar a su vez los errores en las medidas del sensor que estamos calibrando. Estos sistemas suelen ser bastante caros o difíciles de conseguir y normalmente se utilizan servicios de laboratorios especializados.

Por nuestra experiencia en Robótica Móvil con sensores de medida de distancia y su integración en el sistema de control, una extrema precisión en las medidas devueltas por los sensores no excluye que se tenga que tener en cuenta la incertidumbre en el sistema completo. Al no trabajar en entornos altamente estructurados y con elementos completamente conocidos, siempre es conveniente adoptar soluciones que convivan con esa incertidumbre y no traten de eliminarla. Esto es por lo que las aproximaciones reactivas o las basadas en técnicas borrosas, por ejemplo, dan tan buenos resultados.

En el Tabla 2 ofrecemos la correspondencia entre la distancia medida de forma aproximada en milímetros y el valor devuelto por el conversor. Para la generación de los valores se ha utilizado una superficie como la recomendada por el fabricante en la hoja de datos del GP2D12, siendo el ángulo de incidencia del haz infrarrojo perpendicular a la superficie. El sistema estaba alimentado con una tensión regulada de 5 voltios. Estos valores pueden ser completados utilizando otros ángulos de incidencia o con otras superficies.

Tabla 2: Correspondencia entre los valores obtenidos y distancias aproximadas

Valor	Distancia (mm)	Valor	Distancia (mm)	Valor	Distancia (mm)
0x85	80	0x4E	160	0x2D	300
0x7D	90	0x48	170	0x26	400
0x75	100	0x46	180	0x20	500
0x6F	110	0x43	190	0x1B	600
0x64	120	0x40	200	0x19	700
0x5C	130	0x3A	210	0x17	800
0x55	140	0x36	220	0x14	900
0x54	150	0x33	230	0x0C	1200
		0x32	240		
		0x2C	250		

Podemos añadir unos cuantos comentarios a partir del análisis de los valores recogidos en la tabla. El valor mínimo dado por el fabricante es de 10 cm aunque vemos que es posible obtener lecturas que siguen haciendo crecer los valores hasta los 8 cm. A partir de ese momento, las lecturas comienzan a descender. En cualquier caso se recomienda que se sigan las directrices dadas por el fabricante ya que el error cometido en la estimación de la distancia en el propio sensor puede ser considerable (incluso de 20 mm en los extremos frente a los 2 mm correspondientes al centro del intervalo según la documentación manejada<sup>7</sup>).

En el otro extremo ocurre igual. El fabricante indica que la mínima lectura correspondiente a la máxima distancia es de 80 cm. Empíricamente se ha comprobado que la

<sup>7</sup>[http://dmtwww.epfl.ch/~jzuffere/SharpGP2D12\\_E.html](http://dmtwww.epfl.ch/~jzuffere/SharpGP2D12_E.html)



máxima distancia real que puede obtenerse es de 120 cm aunque las recomendaciones anteriores sobre el error de estimación también debe tenerse en cuenta en este caso.

Vemos que las medidas desde los 8 cm a los 25 cm se han tomado cada centímetro, a partir de ese punto las medidas se han realizado cada 10 cm ya que el cambio en los valores no permitían un mejor ajuste. Esto también deberá tenerse en cuenta durante su uso ya que el error en esa zona será mayor.

En la Figura 6 podemos ver la curva que se obtiene representando gráficamente los valores anteriores. Puede comprobarse que es similar a la que proporciona el fabricante en la hoja de datos del sensor y que fue mostrada en la Figura 4 en el intervalo de valores considerado.

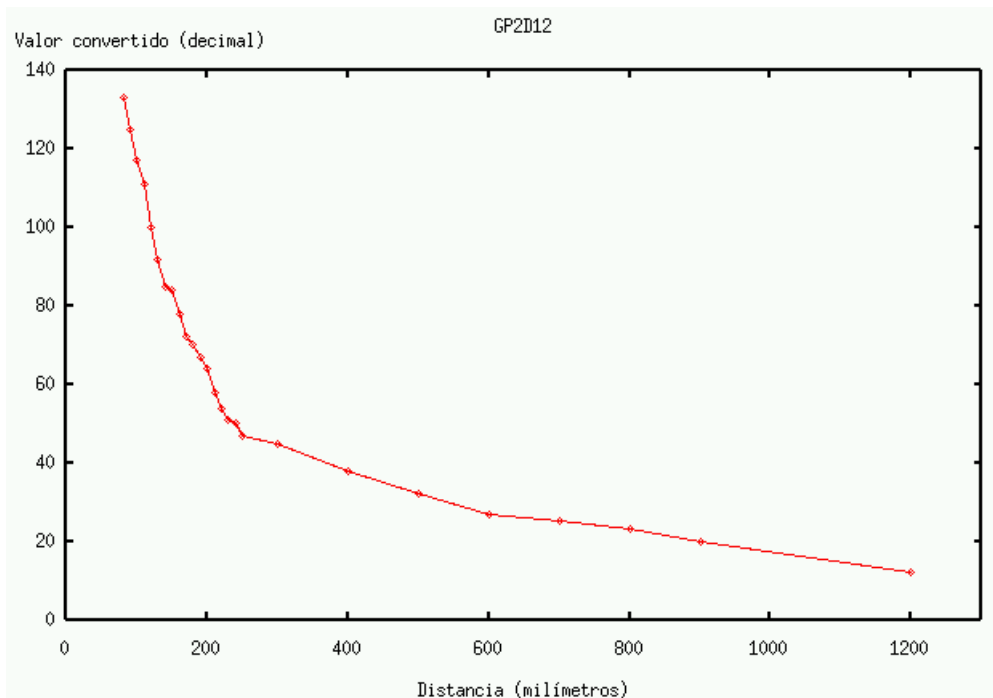


Figura 6: Reprerentación gráfica de la conversión

Como último comentario añadiremos que realmente lo que perseguimos es conocer la distancia entre el sensor y el objeto de referencia a partir del valor devuelto. El caso más habitual es que los valores no sean los que están recogidos en la tabla sino que estén dentro de algún subintervalo de los considerados. En esos casos, se realizará una estimación de la distancia correspondiente mediante interpolación lineal.

### 3. Montaje del sensor omnidireccional

Como comentamos en la introducción, para el montaje del sensor omnidireccional vamos a utilizar un servo de los que habitualmente se utilizan en radiocontrol sobre el que situaremos el sensor de distancia. La elección de un servo de estas características frente a otro tipo de motores como pueden ser los de corriente continua o los de paso a paso es más o menos clara. Frente a los primeros, los servos presentan la ventaja de incluir un sistema electrónico que hace posible que quede situado en una posición concreta y con un error aceptable. Comparándolos con los segundos, los servos son mucho más fáciles de utilizar y conectar con el controlador ya que sólo es preciso un

único hilo por el que generaremos una señal PWM que hace que el servo se situe en la posición deseada.

En nuestro caso se ha utilizado un servo Futaba S3801 pero para el caso concreto de esta aplicación se podría utilizar el clásico Futaba S3003 o cualquier otro de características similares ya que el peso del objeto a mover no pasa de unos simples gramos. En la Figura 7 puede verse una imagen del servo utilizado en el montaje.



Figura 7: Servo Futaba S3801

Tanto el conexionado y control del servo como la generación de una señal PWM se sale del ámbito de este documento. Existen numerosas referencias bibliográficas e incluso en Internet<sup>8</sup> que ofrecen soluciones a este problema. Sólo comentaremos que al estar utilizando un microcontrolador MC68HC11, la señal PWM que requiere el servo para alcanzar toda su gama de posiciones se ha generado utilizando unos de los recursos internos del mencionado micro: los comparadores.

La idea básica es utilizar las interrupciones generadas dos comparadores, en nuestro caso el OC1 y el OC5. Cuando se produce la interrupción de un comparador, concretamente el OC1, se pone a nivel alto la salida asociada al comparador OC5 y se programan los tiempos de activación de la siguiente interrupción de ambos comparadores. Para el propio OC1 se estima ese periodo a partir del periodo que precisa el servo y que suele ser de 20 ms, para el OC1 el periodo indicará la posición que quiere alcanzarse y suele encontrarse en casi todos los servos entre los 0.8 ms y 2.1 ms. La rutina de tratamiento de la interrupción generada por el OC5 simplemente pone a nivel bajo el pin de salida asociado con ese comparador.

## 4. Resultados

Vamos a presentar dos grupos de resultados de los muchos que se pueden conseguir con el montaje realizado. En el primero vamos a intentar emular el funcionamiento del anillo sensorial de un robot Nomad-200 dando las medidas en un número determinado de direcciones, concretamente se devolverán 9 medidas en un rango de 180°. En el segundo, veremos cómo pueden mejorarse estos resultados llegando a devolver hasta una medida de la distancia para cada grado de esta semicircunferencia, es decir, un total de 180 medidas.

Tanto para uno como para otro grupo de resultados se han preparado programas específicos utilizando el estándar GTK+ que nos van a permitir mostrar gráficamente los resultados de las medidas realizadas.

---

<sup>8</sup><http://www.microbotica.es/>

Además de esta parte de interfaz gráfico de usuario, los programas preparados incluyen una especie de servidor realizado en el ensamblador del MC68HC11. El servidor se carga por el programa en el micro y es el encargado de controlar la posición del servo y realizar las conversiones de las medidas realizadas por el sensor. Para generar el servidor de forma que sea posible incluirlo en el programa principal, se ha utilizado la herramienta `cts19toc` de *Microbótica* que permite convertir un programa en formato S19 de Motorola a código C.

#### 4.1. Resultados con direcciones fijas

Como acabamos de mencionar, en este primer grupo, se ha intentado emular la equipación sensorial de un Nomad-200 como el que se mostró en la Figura 1. Este robot dispone de 16 sensores de ultrasonidos en ubicados en torno al robot cada  $22,5^\circ$ .

En nuestro caso vamos a emular únicamente 9 de estos sensores ya que el servo, sin ninguna adaptación especial, sólo permite una rotación de  $180^\circ$ . Como se comentó en la introducción, la emulación del anillo completo puede conseguirse fácilmente utilizando un segundo sensor en la misma dirección pero en sentido opuesto al utilizado en el montaje. Con la implementación realizada, estaremos cubriendo, por ejemplo, toda la zona delantera de un robot. En ausencia de obstáculos, el resultado obtenido sería el que se muestra en la Figura 8. Para una mayor legibilidad del gráfico, se ha unido la medida en cada una de las 9 posiciones con la posición en la que se encuentra el eje del motor. Así mismo, se ha unido los valores de las medidas para dar una idea de espacio libre existente.

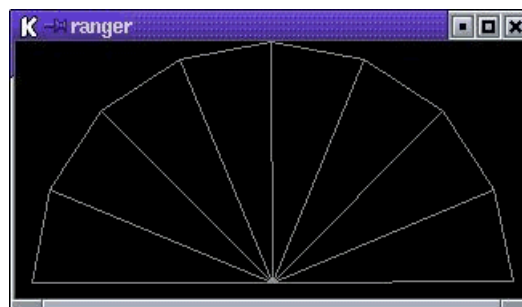


Figura 8: Registro sensorial correspondiente a la máxima distancia

En este caso, al tratarse de 9 medidas fijas, el servidor que se ejecuta en la tarjeta CT6811 recibirá un carácter desde el PC indicando una orden de movimiento a una de las posiciones predeterminadas. Una vez recibido, el programa hace que el servo se sitúe en esa posición usando los comparadores, se queda en una pausa activa para permitir que el servo alcance la posición destino y que el sensor tenga tiempo de realizar sus operaciones internas para devolver la distancia al obstáculo y estabilizar la señal de salida. En ese momento, se realiza la conversión del valor presente en el PE2, canal 2 del conversor analógico-digital, y se almacena para la posterior representación.

Como se ve, el esquema de funcionamiento es muy sencillo. La parte en la que debe prestarse más atención es en la determinación de las consignas a dar al servo para que se sitúe en cada posición. Al fin y al cabo estas posiciones numéricas se refieren al número de ciclos de reloj que deben pasar desde la activación del pin por el que se controla el servo hasta su desactivación. Por ejemplo, en el caso del servo utilizado, la posición 1550 se corresponde con lo que vamos a considerar la orientación  $-90^\circ$ ; en la posición 4510 el servo se situará en la orientación  $+90^\circ$ . Tanto estos valores como

los de las posiciones intermedias que se muestran en la Tabla 3 deberán ser ajustados para cada servo que se utilice ya que pueden variar entre diferentes modelos.

Tabla 3: Valores utilizados para el posicionamiento del servo

Orientación	Valor del comparador
$-90^\circ$	1550
$-67,5^\circ$	1920
$-45^\circ$	2290
$-22,5^\circ$	2660
$0^\circ$	3000
$+22,5^\circ$	3400
$+45^\circ$	3770
$+67,5^\circ$	4140
$+90^\circ$	4510

En la Figura 9 se muestran los registros sensoriales de tres entornos. En todos ellos, la orientación  $0^\circ$  hace que el sensor apunte a la parte de delantera del servo, considerando ésta el lado más corto de la caja en la que se encuentra el motor y que tiene más cerca el eje de rotación del servo. Según la composición presentada en las fotos, esta orientación hace que el sensor apunte, aproximadamente, a la esquina superior izquierda de cada una de ellas.

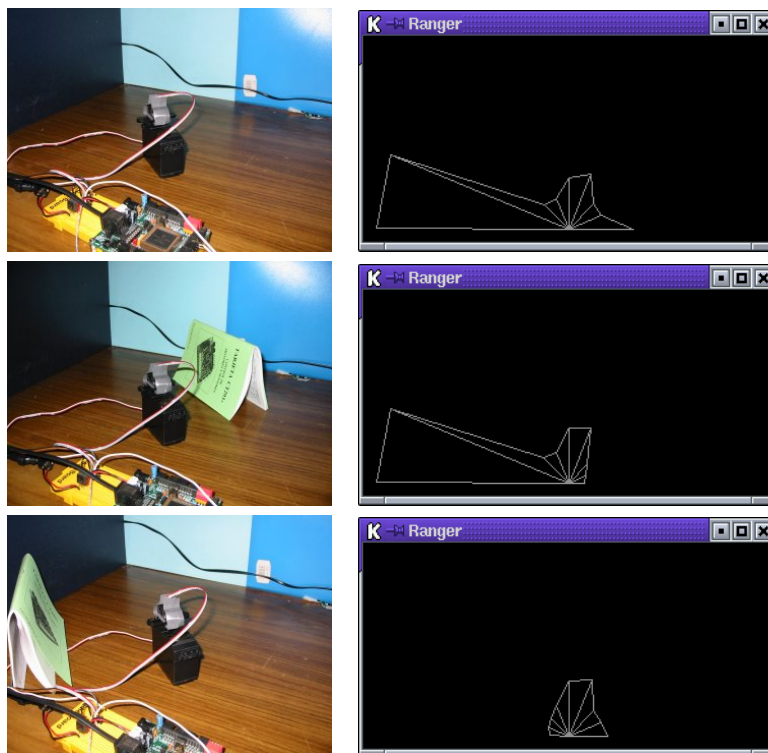


Figura 9: Entornos y registros sensoriales correspondientes

Se ha intentado conformar una especie de *rincón* en los  $0^\circ$  del sensor que se corresponde con el pico que se forma en la parte central del registro sensorial. La zona de

la izquierda del primer entorno no presenta ningún obstáculo por lo que las medidas realizadas en dicha zona son máximas. En los otros dos entornos se ha colocado un pequeño objeto para recortar el registro obtenido. Como puede verse en la imagen, en el segundo entorno el objeto está a la derecha del sensor lo que provoca un recorte en esa zona del registro sensorial. En el tercer y último entorno de este grupo de resultados, el objeto se coloca en la parte izquierda del sensor, eliminando así las máximas lecturas en esa zona en comparación con los entornos anteriores.

La baja resolución con la que se ha realizado el registro no permite distinguir claramente la forma de los objetos presentes en el entorno. Como veremos a continuación, estos resultados pueden mejorarse aumentando el número de medidas tomadas.

## 4.2. Resultados con orientaciones seleccionables

Vamos a explotar al máximo las posibilidades del sensor presentado permitiendo que se sitúe prácticamente en cualquier orientación. La limitación en este caso la introducirá el propio servo. El número máximo de medidas que van a poder realizarse vendrá impuesta por el número máximo de posiciones que puedan ser alcanzadas por el servo. Para los resultados que vamos a comentar aquí, se ha utilizado el entorno mostrado en la Figura 10. Puede verse que es similar a los considerados en el apartado anterior salvo que el objeto se ha situado en la orientación  $0^\circ$  del sensor.



Figura 10: Entorno para las pruebas con orientaciones seleccionables

Anteriormente hemos comprobado que el rango de posiciones en las que nos movemos según el comparador va desde 1550, que asociamos a los  $-90^\circ$ , hasta 4510, relativa a los  $+90^\circ$ . Según esto, podríamos seleccionar 2960 orientaciones dentro de una semicircunferencia, es decir, establecer un paso de unas pocas centésimas de grado.

Por un lado, esto no puede conseguirse ya que el controlador del propio servo no permite una resolución tan baja. Normalmente, se empieza a apreciar el movimiento del eje del servo cuando se sobrepasan los 10 ó 15 pasos del comparador. Esto puede explicarse de forma sencilla teniendo en cuenta que en el controlador del servo que se ejecuta en la CT6811 se considera que un paso del comparador se corresponde con 500 ns, variaciones tan pequeñas en el pulso del PWM no son percibidas por el controlador del servo, teniendo que pasar a pocas unidades o decenas de microsegundos para el ancho del pulso y, por tanto, el movimiento sea real.

Por otro lado, aumentar el número de lecturas de forma exagerada introduce un retardo considerable en el tiempo necesario para obtener el registro sensorial del entorno. Como se recordará, según los datos del fabricante, el tiempo necesario para que un GP2D12 realice una medida es de unos 40 ms. A este tiempo hay que añadir el que

el propio servo necesita para alcanzar la orientación solicitada que, en general, puede considerarse mucho mayor. Dado que los cambios de orientación en el servo para el modo de funcionamiento que se pretende conseguir van a ser relativamente pequeños y que el servo utilizado es relativamente rápido (unos  $0,17^\circ/s$ ), se ha optado por determinar un tiempo total para el movimiento y medida de 100 ms. A partir de esta cifra puede calcularse fácilmente el tiempo necesario para la obtención de un registro sensorial a partir del número de medidas realizadas.

Se han modificado los programas de control del servo y de representación del registro sensorial de forma que la información que se envía desde el PC a la tarjeta CT6811 ahora indica la orientación en la que quiere situarse el servo y no un valor representativo de dicha posición. En lugar de enviar un único byte, ahora son necesarios dos para cubrir todo el rango de posiciones posibles. Salvo por esto y por la forma de tratar y representar las lecturas recibidas, los programas son similares a los comentados en el apartado anterior.

En la Figura 11 se muestran los registros sensoriales del entorno considerado en los que se ha variado el número de orientaciones tenidas en cuenta, éstas han sido de 5, 9, 13, 25, 31, 45, 61, 91 y 181.



Figura 11: Registros sensoriales con múltiples orientaciones

El registro sensorial de 9 orientaciones (imagen central de la línea superior) es como el que se podría conseguir en el apartado anterior. Vemos que el de 5 orientaciones (a la izquierda del anterior) prácticamente no permite reconocer la forma del objeto añadido al entorno. Con 25 orientaciones (imagen de la izquierda de la línea central) y, quizá aún más claro, con 31 (imagen situada en el centro) ya se puede formar una idea del tamaño, forma y colocación del objeto. Aumentando en número de orientaciones hasta 181 (imagen derecha de la línea inferior), es decir, una por grado, permite distinguir claramente tanto el objeto como las paredes que forman el rincón.

Otro comentario destacable es el que puede realizarse de las máximas del sensor correspondientes con la zona izquierda de los registros sensoriales. Como se recordará, la máxima medida recomendada por el fabricante es de 80 cm. Durante la semicalibración realizada, se detectó que la máxima medida real devuelta por el sensor era de 120 cm

aunque, como ya se apuntó, el error en esta franja podía ser alto. Los resultados obtenidos concuerdan con los datos anteriores ya que, como puede verse, no siempre se consiguen las medidas máximas en esa zona aunque no existe la presencia de objetos. Se recomienda por tanto que la máxima medida a considerar sea de 80 cm.

## 5. Conclusiones

Hemos visto que con un solo sensor y un servo puede emularse la equipación sensorial de robots móviles de gama alta. Las ventajas de su utilización son principalmente económicas ya que al minimizar el número de elementos sensoriales a utilizar, el coste del sistema se reduce. Así mismo, se consigue reducir el espacio necesario a bordo del robot, característica de relativa importancia y dependiente de la aplicación que se quiera realizar. Al tratarse de un sistema móvil y no de elementos fijos, el número de medidas que pueden tomarse en torno al sensor es también superior, con lo que los registros sensoriales pueden ser mucho más detallados. Como contrapartida tenemos que el tiempo en obtener tal registro sensorial es mayor pero pueden determinarse valores idóneos para cada caso concreto.

No obstante, la idea que aquí se ha presentado no es nueva. En la bibliografía de robótica móvil pueden consultarse esquemas similares en las que la motorización de un sensor permite obtener registros como los presentados. Los casos más claros son los que se conocen como *orejas*, sensores de ultrasonidos motorizados, y los sistemas *pan-tilt*, comúnmente utilizados cuando el sensor es una cámara.

Quizá lo más importante del desarrollo propuesto sea que permite acercar a la microrrobótica técnicas que desde hace años vienen siendo aplicadas con éxito en la robótica móvil de gran tamaño. Nos estamos refiriendo, por ejemplo, a los sistemas de navegación basados en la teoría de campos de potencial artificiales. En esta teoría se asocian cargas artificiales al robot, a los obstáculos del entorno y al objetivo o meta de forma que las asociadas al robot y a los obstáculos sean del mismo signo y de signo contrario que la asociada al objetivo. Como es sabido, cargas de mismo signo se repelen y cargas de signo contrario se atraen. En este marco, el robot puede alcanzar la posición objetivo, por una fuerza de atracción, eludiendo la colisión con los obstáculos del entorno sobre los que percibirá una fuerza de repulsión.

Existen métodos basados en la teoría de campos de potencial artificiales que toman como referencia la menor distancia al objeto más próximo para bien seguir una trayectoria de repulsión perpendicular, siguiendo de la normal, a la superficie del objeto, bien paralela a dicha superficie describiendo una trayectoria tangencial apta para el seguimiento de paredes. Con este tipo de sensores, la obtención de la normal puede reallizarse directamente a partir de las medidas realizadas sin necesidad de realizar cálculos matemáticos adicionales.

Para teminar, ya que hemos mencionado la idea de *pan-tilt*, el desarrollo aquí propuesto puede ser generalizado con la introducción de un servo para obtener un registro sensorial tridimensional del entorno y así poder caracterizar geoméricamente todo espacio de trabajo del robot.