

Sensores en Robótica

Índice

1.	Introducción a los sensores.....	3
1.1.	Lectura e interpretación de las señales	3
1.2.	Diseño de la sensorización de un robot	4
2.	Clasificación de los sensores	4
2.1.	Sensores propioceptivos y esteroceptivos	5
2.2.	Sensores pasivos y activos.....	5
3.	Características de los sensores.....	5
3.1.	Rangos de entrada y salida	5
3.2.	Rango dinámico.....	6
3.3.	Resolución	6
3.4.	Sensibilidad	6
3.5.	Linealidad	7
3.6.	Distribución lineal/no-lineal de la sensibilidad en todo el rango	7
3.7.	Histéresis	8
3.8.	Frecuencia.....	9
3.9.	Tiempos de respuesta y de recuperación	9
3.10.	Offset o desviación de cero	9
3.11.	Error absoluto	9
3.12.	Error relativo	9
3.13.	Exactitud.....	10
3.14.	Precisión	10
3.15.	Deriva	10
3.16.	Resumen de las características de los sensores	11
4.	Acondicionamiento de señales	12
5.	Calibración de sensores	14
5.1.	Obtención de la recta de calibración por mínimos cuadrados	15
5.2.	Ejemplo:	17
6.	Sensores más utilizados	20
6.1.	Interruptores (<i>Switches</i>).....	20
6.2.	Sensores analógicos simples.....	20
6.3.	Sensores para odometría.....	21
6.4.	Encoders ópticos.....	21
6.5.	Sensores de encabezamiento	22
6.6.	Giróscopos.....	22

6.7.	Sensores magnéticos.....	23
6.8.	Inclinómetros.....	23
6.9.	Sensores basados en el terreno	24
6.10.	Global Positioning System GPS	24
6.11.	Medición activa de la distancia (active ranging).....	25
6.12.	Tiempo de vuelo (time of flight active ranging).....	25
6.13.	El sensor ultrasónico.....	25
6.14.	Luz láser (Laser rangefinder, electromagnético).....	27
6.15.	Medición en base al desplazamiento de la fase	27
6.16.	Medición activa de la distancia en base a la triangulación.....	28
6.17.	Triangulación óptica (sensor de 1 dimensión).....	28
6.18.	Sensores de movimiento y de velocidad	28
6.19.	Sensores basados en el efecto Doppler (radar o sonido)	29
6.20.	Algunos sensores comerciales	29
6.21.	Sensores de contacto.....	29
6.22.	Acelerómetros, sensores de vibración	30
6.23.	Sensores reflexivos y por intercepción (de ranura)	31
6.24.	Medidores de distancia ultrasónicos (Rangers).....	32
6.25.	Sensores de Radiofrecuencia	33
6.26.	ROBOTIS Gyro Sensor GS-12	35
6.27.	CMPS03 - Compass Module	35
6.28.	LCP-45: Dual Axis Inclinometer, $\pm 45^\circ$ range, RS232 Output.....	37

1. Introducción a los sensores

Una de las tareas de los sistemas autónomos es obtener, procesar y almacenar información sobre su entorno. La capacidad de percepción del sistema autónomo con respecto del contexto que le rodea condiciona el funcionamiento del sistema completo. Además, la utilización de diferentes tipos de sensores permite extraer información complementaria, por lo que es necesario ajustar la capacidad de percepción en función de las necesidades del sistema y de la disponibilidad de dispositivos.

Definiciones:

- Un sensor es *un dispositivo que responde a un estímulo o entrada mediante la generación de salidas procesables*. Las salidas están relacionadas funcionalmente con los estímulos de entrada (llamados valores de medida o *mesurandos*).
- Un *transductor* es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.

Un sensor suele estar integrado por dos componentes principales: un elemento sensible y un transductor. El elemento sensible interactúa con un *mesurando* objetivo y causa un cambio en el funcionamiento del transductor. El transductor produce una señal que se traduce en información legible por un sistema de adquisición de datos.

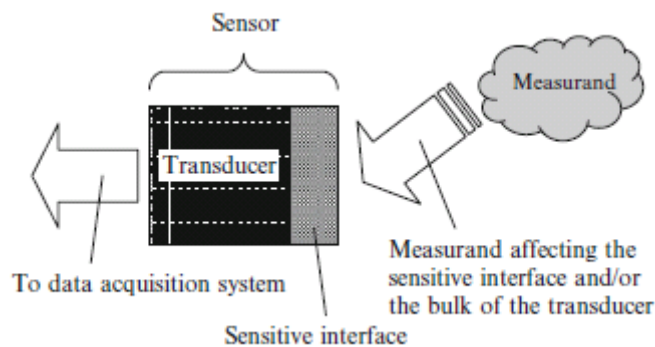


Figura 1 Esquema de un sistema sensor-transductor

1.1. Lectura e interpretación de las señales

Los sensores convierten magnitudes físicas en señales eléctricas, proporcionando medidas expresadas como niveles discretos o continuos de tensión. En el caso de señales analógicas, antes de procesarlas tienen que ser digitalizadas para que puedan ser leídas por un procesador (desde un puerto de entrada/salida, por encuesta o usando una interrupción externa). La transformación se hace mediante un convertidor analógico/digital que puede estar situado en el sensor, en el procesador o ser externo a ambos.

El objetivo es que el robot sea autónomo y, por tanto, que reconozca el entorno a partir de la información que recibe de los sensores. Sin embargo, los sensores no suelen proporcionar una interpretación directa de la magnitud medida. Por ejemplo, si se usa un sensor de ultrasonidos para medir distancias, el sensor suministra un valor de tensión

proporcional al tiempo entre la emisión de una señal y la recepción de su eco al rebotar contra un objeto. Para interpretar este valor como una distancia **d** es necesario aplicar la fórmula:

$$2d = V \cdot t$$

dónde V es la velocidad de los ultrasonidos y t es el tiempo medido. Según se van haciendo más sofisticados los sensores, la interpretación de lo que miden se va haciendo más compleja.

Las posibilidades del robot están condicionadas por la cantidad y calidad de sus sensores y de los programas que los controlan. Los sensores tienen diferentes niveles de exactitud y de sensibilidad al ruido. En muchos casos es necesario utilizar varios sensores (frecuentemente de diversos tipos) que midan la misma magnitud para tener suficiente certeza. A los resultados se les aplican técnicas de eliminación del ruido y de fusión sensorial. De este modo se pasa de la sensorización a la percepción. Cuantos más sensores diferentes hay disponibles, más completo puede ser el conocimiento que se obtiene del entorno, siempre que se haga el procesamiento adecuado.

Vamos a ver diversos tipos de sensores y cómo acondicionar las señales para que puedan ser conectados al procesador, lo que requerirá circuitos electrónicos (para la interfaz física) y drivers para su control¹.

1.2. Diseño de la sensorización de un robot

Usualmente, el diseñador de robots no crea nuevos sensores sino que integra algunos de los existentes en el mercado, teniendo en cuenta los objetivos, aplicaciones, medio de trabajo, etc., del robot que está diseñando. Por ejemplo, para medir distancias se pueden emitir ultrasonidos y medir el tiempo de viaje de la onda y su eco, o emitir radiación infrarroja y medir la intensidad de la onda reflejada. También es posible usar sistemas más sofisticados como visión estereoscópica mediante dos cámaras de vídeo, mediante láser, etc. Para detectar la presencia de personas, podría utilizar un sensor de temperatura, si el resto del entorno no produce calor, o de movimiento si el resto es estático, o usar cámaras de video que sean capaces de detectar el perfil humano. La decisión dependerá de la precisión que se requiera y del presupuesto del que se disponga.

Los robots tienden a tener gran cantidad de sensores cuyas medidas permiten obtener información que es necesario compatibilizar ya que, a veces, los datos pueden ser incompatibles o contradictorios. Sin embargo, en general, la redundancia de datos permite mejorar la precisión de los mismos, a costa de un mayor esfuerzo de procesamiento.

2. Clasificación de los sensores

Por un lado distinguiremos entre sensores *propioceptivos* y *exteroceptivos* y por otro entre sensores pasivos y activos.

¹ Los drivers son programas que aportan una interfaz bien definida entre el hardware del dispositivo y el programa que lo usa.

2.1. Sensores propioceptivos y esteroceptivos

Los sensores propioceptivos miden valores internos del sistema, por ejemplo, la velocidad de los motores, el voltaje de la batería, etc. Esto permite al robot conocer su propio estado (por ejemplo para calcular el inicio de la operación) y su capacidad para completarla.

Los sensores exteroceptivos obtienen información sobre el entorno del robot; por ejemplo, distancias, intensidad de la luz, etc. El robot utiliza la información obtenida por los sensores exteroceptivos para determinar las características del entorno, lo que le permitirá navegar por él.

2.2. Sensores pasivos y activos

Los *sensores pasivos* reaccionan a la energía que les llega en forma, por ejemplo, de calor, iluminación, humedad, etc. Los sensores pasivos no producen energía y requieren poca capacidad de cálculo, aunque pueden necesitar acondicionamiento electrónico para conectarlos a los puertos o realizar la conversión analógica-digital.

Los *sensores activos* emiten algún tipo de energía y miden la reacción que se produce en el entorno. Por ejemplo, los sensores de distancia por ultrasonidos o láser envían una señal y miden la señal reflejada. Este tipo de sensores permite manejar y controlar más interacciones con el contexto.

3. Características de los sensores

Sólo vamos a estudiar las características estáticas, que son las que se pueden medir cuando todos los efectos transitorios se han estabilizado a sus valores estacionarios o finales. Tienen en cuenta factores tales como cómo el cambio de salida de un sensor en respuesta a un cambio de entrada, la selectividad del sensor, su sensibilidad a interferencias, o su estabilidad.

3.1. Rangos de entrada y salida

Un sensor dispone de un transductor que produce una salida r que es función f de la entrada x .

$$r = f(x)$$

Llamamos rango de entrada¹ al espectro de valores del mesurando (parámetro de entrada) que puede detectar un sensor. Por ejemplo, el rango de entrada de un sensor de temperatura que es capaz de reaccionar entre 0 y 100 °C será $[0,100]$ °C. Todos los sistemas de detección están diseñados para funcionar en un rango de entrada especificado dentro del cual obtienen salidas significativas y precisas. Las señales fuera de este rango pueden ser ininteligibles, causar errores inaceptables, e incluso pueden dar lugar a daños irreversibles en el sensor.

¹ Las definiciones matemáticas de rango y dominio de una función son diferentes. En matemáticas lo que hemos llamado rango de entrada es el “dominio” y lo denominado rango de salida es el “rango” de la función $r = f(x)$.

Análogamente el rango de salida es el conjunto (continuo o discreto) de valores que el sensor es capaz de producir a la salida, como reacción a la entrada. Por ejemplo, si un sensor produce una señal de entre 0 y 12 V, decimos que su rango de salida es [0,12] V.

3.2. Rango dinámico

El rango dinámico se usa para medir la extensión entre los valores extremos de entrada cuando éste mantiene su operatividad normal. Formalmente el rango dinámico es el cociente del valor máximo de entrada respecto al mínimo valor de entrada (no nulo) medible. Normalmente se mide en decibelios, esto es diez veces el logaritmo del cociente.

$$R_d = 10 * \log [x_{\max} / x_{\min}]$$

Supongamos que un sensor detecta la corriente del motor y puede registrar valores entre 0 y 20A, pero el mínimo valor no nulo medible es 10mA. Entonces el rango dinámico del sensor viene dado por:

$$R_d = 10 * \log [20 / 0.01] = 33 \text{ dB}$$

Veamos otros valores para comparar:

x_{\max}	$x_{\min(\text{no nulo})}$	R dinámico	x_{\min}	Rango de entrada
20A	0,01A	33 dB	0A	20 A
20A	1A	13 dB	0 A	20 A
40A	0,01A	46 dB	0 A	40 A
40A	1A	16 dB	0 A	40 A
10A	0,001A	4 dB	0 A	10 A

Tabla 2 Diversos valores de rango dinámico

La idea intuitiva es que el rango dinámico mide la capacidad de un sensor para discriminar los valores intermedios. Así, por ejemplo, un sensor con $E_{\max} = 20 \text{ A}$ y $E_{\min(\text{no nulo})} = 0,01 \text{ A}$ provee mayor discriminación (33 dB) que uno con $E_{\max} = 40 \text{ A}$ y $E_{\min(\text{no nulo})} = 1 \text{ A}$ (16 dB).

3.3. Resolución

La resolución es la diferencia mínima entre dos valores de salida sucesivos del sensor.

3.4. Sensibilidad

La sensibilidad es la mínima variación que es capaz de detectar un sensor. Es decir, el incremento mínimo de señal que produce una modificación detectable a la salida del sensor. Cuando el incremento se evalúa a partir de cero se le suele denominar umbral o límite de detección.

Mesurando (g)	Salida (g)
45	45
46	45
47	45
48	50
49	50
50	50

Resolución: 5g;

Sensibilidad: 3g

3.5. Linealidad

La linealidad viene dada por la variación del cociente entre la señal de salida y la de la entrada. Si la variación es cero, el sensor es lineal.

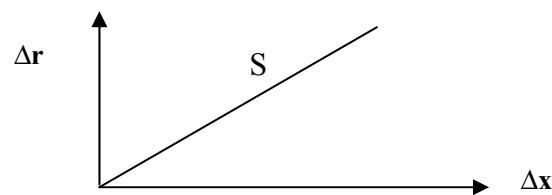


Figura 4. Rango lineal

S no tienen por qué ser una constante. Podría ser una función de la entrada x , como por ejemplo, $r = k/x$, o $r = k \ln x$.

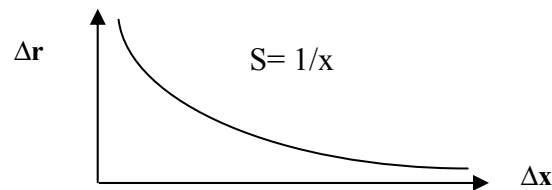


Figura 5. Rango no-lineal

3.6. Distribución lineal/no-lineal de la sensibilidad en todo el rango

Es muy importante diseñar cómo se convierten los valores de la magnitud física en un valor digital. Por ejemplo, supongamos que el brazo de un robot se puede mover un ángulo entre 0 y 90° . Queremos saber la posición del robot con igual sensibilidad en todo el rango. En este caso un potenciómetro proporciona una asignación lineal entre el ángulo girado por la junta angular (que puede variar de 0 a 90°) con los 255 valores del convertidor, tal como se puede ver en la figura 6.

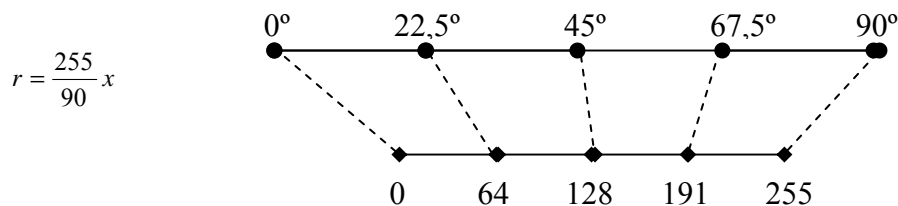


Figura 6. Distribución de la sensibilidad en un rango lineal

La medición de otras magnitudes, como la iluminación, es más complicada, porque el rango es no lineal. Por ejemplo, supongamos que una habitación oscura varía entre 0,1 y 10 unidades y una luminosa varía de 10 a 1000 unidades de iluminación. Si se hace corresponder linealmente la iluminación detectada, desde 0,1 hasta 1000 unidades, a los 256 niveles, el robot tendrá buena sensibilidad en una habitación luminosa pero no en una oscura: de hecho, todos los valores por debajo de 3,9 unidades los traduce a 0.

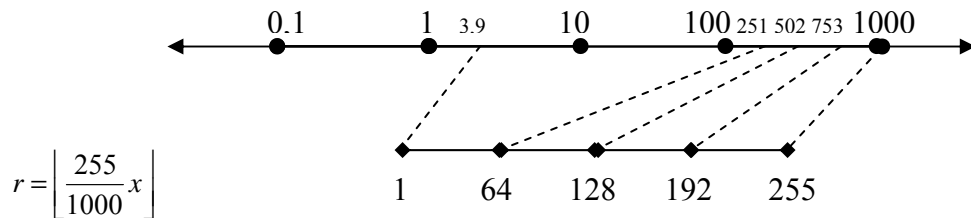


Figura 7. Distribución lineal de la sensibilidad en un rango no-lineal

En este caso una asignación logarítmica da un mayor rango dinámico.

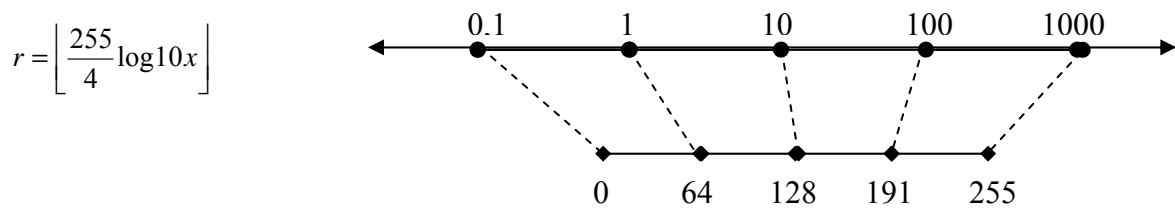


Figura 8. Distribución logarítmica de la sensibilidad en un rango no-lineal

3.7. Histéresis

La *histéresis* es la diferencia entre las lecturas de salida, dependiendo de que la medida se haga con valores crecientes o decrecientes del mesurando.

La histéresis puede causar lecturas falsas e inexactas. La figura 9 representa la relación entre la salida y la entrada de un sistema con histéresis. Como se puede ver, para la misma entrada el sistema de detección produce dos salidas diferentes en función de si se toma camino 1 o 2.

Por ejemplo, los valores de inducción magnética de los materiales ferromagnéticos presentan ciclos de histéresis.

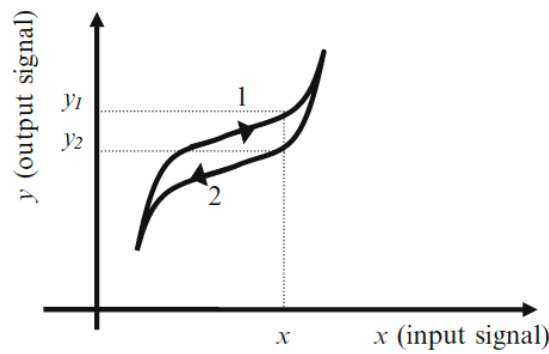


Figura 9. Un ejemplo de una curva de histéresis

3.8. Frecuencia

La frecuencia viene dada por el número de lecturas que el sensor puede realizar por unidad de tiempo se mide en hertzios. Suele depender del tiempo de procesamiento y del tiempo de recuperación del sensor.

3.9. Tiempos de respuesta y de recuperación

El tiempo de respuesta es el tiempo que se requiere para alcanzar un valor estable cuando un sistema de detección se expone a un mensurando. Se expresa generalmente como el momento en el que la salida alcanza un cierto porcentaje (por ejemplo, 95%) de su valor final en respuesta a un cambio escalón de la entrada.

Inversamente, el tiempo de recuperación es el tiempo necesario para que el sensor vuelva a un estado en el que puede medir de nuevo.

3.10. Offset o desviación de cero

Es el valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, se suele establecer otro punto de referencia para hacer que el *offset* sea cero.

3.11. Error absoluto

Error Absoluto (E_a) es la diferencia entre la medición obtenida m y el valor verdadero v :

$$E_a = |m - v|$$

3.12. Error relativo

Error relativo (E_r) es el Error Absoluto dividido por el valor verdadero v :

$$E_r = \frac{|m - v|}{v}$$

Es decir, es el error cometido por unidad del valor medido.

3.13. Exactitud

La *exactitud* es el grado de conformidad entre la medición de los sensores y el valor verdadero y normalmente se expresa en porcentaje. Una tasa baja de errores proporciona una alta exactitud y viceversa.

$$E_x = 100(1 - E_r)$$

3.14. Precisión

Precisión (para algunos autores *repetibilidad*) representa la capacidad de un sistema de detección de dar la misma lectura al medir repetidamente el mismo mesurando en las mismas condiciones. La precisión es un parámetro estadístico y se puede evaluar por la desviación estándar (o la varianza) de un conjunto de lecturas del sistema para entradas similares.

Por ejemplo, un sistema de detección de temperatura es preciso si, cuando la temperatura ambiente es 21,0 °C y muestra 22.0, 22.1, o 21.9 °C en tres mediciones consecutivas diferentes. No se considera preciso si muestra 21.5, 21.0, y 20.5 °C aunque, en este caso, los valores medidos están más cerca de la temperatura real.

No todos los autores distinguen entre precisión y exactitud. En general, la exactitud depende del máximo error de medida, mientras que la precisión depende de la consistencia de sucesivas mediciones dentro del mismo entorno y en las mismas condiciones.

3.15. Deriva

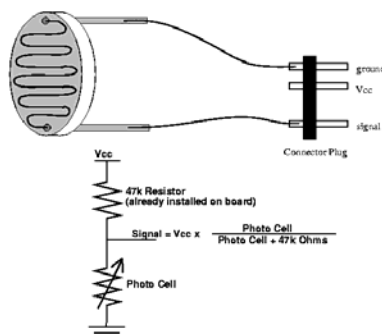
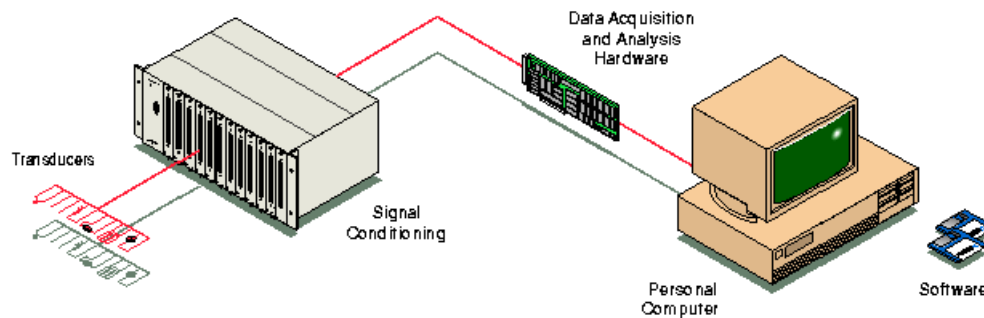
Se observa deriva cuando se ve un cambio gradual en la salida del sistema de detección mientras que el mensurando se mantiene constante. Es decir, la deriva es un cambio no deseado que no está relacionada con el mensurando. Se considera un error sistemático que puede atribuirse a parámetros que interfieren, tales como inestabilidad mecánica e inestabilidad de la temperatura, contaminación, y degradación de los materiales del sensor. Es muy común evaluar la deriva con respecto a la referencia del sensor. La referencia es el valor de salida del sensor cuando no está expuesto a un estímulo. Lógicamente para un sensor sin deriva, la referencia debe mantenerse constante.

3.16. Resumen de las características de los sensores

Deriva	Cambio gradual en la salida del sistema de detección mientras que el mensurando se mantiene constante
Error absoluto	Valor absoluto de la diferencia entre la medición obtenida y el valor verdadero. $E_a = m - v $
Error relativo	Error absoluto dividido por el valor verdadero. $E_r = m - v / v$
Exactitud	Grado de conformidad entre la medición de los sensores y el valor verdadero $E_x = 100(1 - E_r)$
Frecuencia	Número de lecturas que el sensor puede realizar por unidad de tiempo (Hz)
Histéresis	Diferencia entre las lecturas de salida, dependiendo de que la medida se haga con valores crecientes o decrecientes del mesurando.
Linealidad	Cercanía a cero de la variación del cociente entre la señal de salida y la de la entrada.
Mínima señal detectable	Incremento mínimo de señal que produce una modificación detectable a la salida del sensor.
Offset (desviación de cero)	Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula.
Precisión	Capacidad de un sistema de detección de dar la misma lectura al medir repetidamente el mismo mesurando en las mismas condiciones
Rango de entrada	Espectro de valores del parámetro de entrada que puede detectar un sensor $[x_{max}, x_{min}]$
Rango dinámico	Cociente del valor máximo de entrada respecto al mínimo valor de entrada (no nulo) medible $R_d = 10 \cdot \log[x_{max} / x_{min}]$ dB
Resolución	La diferencia entre dos valores sucesivos que devuelve el sensor
Tiempo de recuperación	Tiempo necesario para que el sensor vuelva a un estado en el que puede medir de nuevo
Tiempo de respuesta	Tiempo que se requiere para alcanzar un valor estable cuando un sistema de detección se expone a un mesurando

4. Acondicionamiento de señales

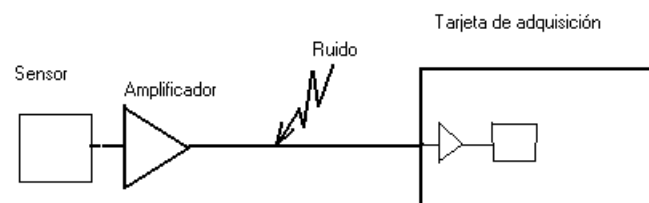
Usualmente la obtención de datos se realiza mediante algún tipo de tarjeta de adquisición de datos conectada a un PC. Los componentes usuales de un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) son: sensores (y posiblemente actuadores), acondicionadores de señal, hardware y software de adquisición de datos y PC.



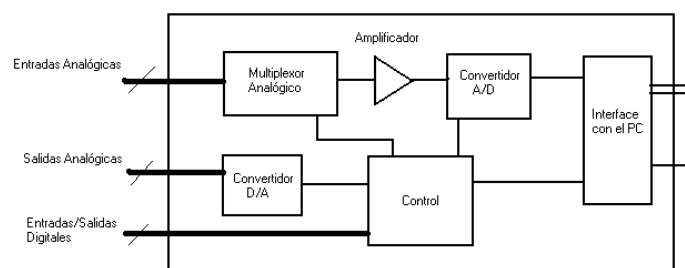
Como hemos visto, los sensores convierten una magnitud física en una señal eléctrica. Posteriormente veremos que los actuadores transforman una señal eléctrica en una magnitud física.

Hay que adecuar la señal entregada por los sensores a los rangos de medida de la tarjeta de adquisición de datos, lo que se realiza mediante el acondicionamiento de señal, que consta de Amplificación, Filtrado, Aislamiento, Multiplexado.

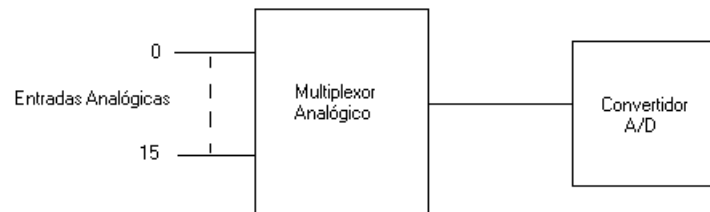
Amplificación. Existen dos opciones para elegir dónde se debe hacer la amplificación de la señal: a la salida de los sensores o dentro de la tarjeta de adquisición de datos. La mejor opción es hacer la amplificación lo más cerca posible de los sensores para evitar el ruido.



Tarjetas de Adquisición de Datos

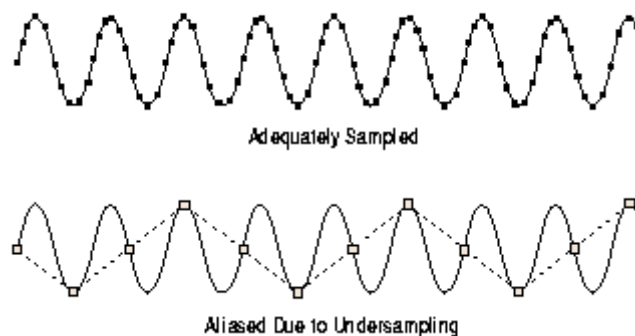


Por ejemplo, la tarjeta NI PCI6024E tiene 16 entradas analógicas con una frecuencia de muestreo de 200ks/s, que es la frecuencia máxima a la que puede convertir una señal el conversor analógico/digital.



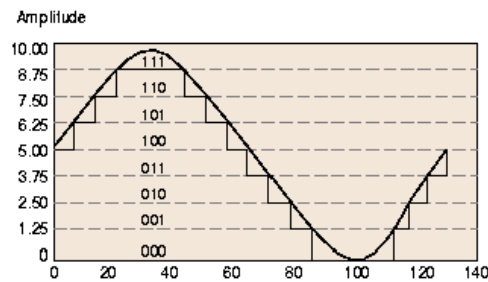
Si adquiere datos mediante un solo canal permite 200ks/s, con dos canales: 100ks/s, con tres canales: 66ks/s, etc.

Muestreo: Dada una señal periódica de una frecuencia f , dicha señal no puede ser muestreada a una frecuencia inferior a $2f$.



Las señales se pueden medir mediante un canal referenciado a tierra (single ended) lo que proporciona poca inmunidad al ruido y plantea la necesidad de que todas las señales tengan la misma referencia. También se pueden medir en un canal con respecto a otro (modo diferencial). En este caso se obtiene alta inmunidad al ruido (elimina el modo común) y permite que las señales tengan distintas referencias. Sin embargo, al utilizar 2 canales por señal se utilizan más recursos y la frecuencia de muestreo máxima posible es menor.

Hay que tener en cuenta que cuantos más bits tenga el convertidos analógico digital, mayor resolución tendrá



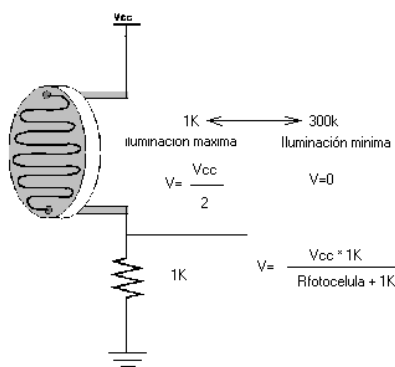
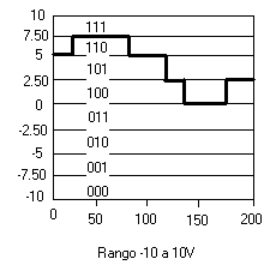
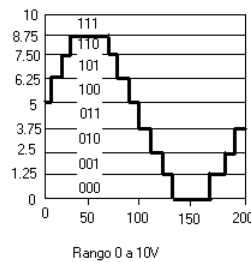
El rango de una señal es el espacio entre los niveles de tensión máximo y mínimo que un CA/D puede manejar. Usualmente, las TAD tienen el rango ajustable en función de la señal a medir. Por ejemplo, un CA/D de 3bits permite distinguir 8 niveles. Si el rango va de 0 a 10V,

$$10/8 = 1,25 \text{ V/div}$$

será capaz de distinguir una variación de 1,25V. Si el rango va de -10 a 10V

$$20/8 = 2,5 \text{ V/div}$$

será capaz de distinguir una variación de 2,5V. Si tenemos una señal que varía entre 0 y 9V será mejor escoger el rango de 0 a 10V que el de -10V a 10V



Un sensor reacciona a diferentes niveles del estímulo de entrada produciendo, usualmente, un voltaje característico. Normalmente el circuito asociado al se modifica el voltaje para acondicionarlo a la entrada del procesador. Por ejemplo, la entrada al procesador podría ser un conversor A/D que admitiera de 0 a 5 V y convirtiera ese voltaje a 256 niveles discretos.

5. Calibración de sensores

Para calibrar un sensor se miden las salidas y_i para un conjunto de entradas específicas x_i . Los sensores se calibran con mensurandos x_i conocidos para asegurar que los

resultados de detección producen salidas correctas. Con estos datos se construye la tabla de calibración que contendrá un número finito de pares (x_i, y_i) . De este modo, cuando un sensor devuelve una lectura x_i buscamos en la tabla su interpretación y_i . Sin embargo, también tenemos que ser capaces de interpretar las lecturas del sensor x_n que no estén en la tabla. Esto se puede hacer de dos maneras:

1. Interpolando el par (x_n, y_n) a partir de los pares (x_{n-1}, y_{n-1}) , y (x_{n+1}, y_{n+1}) más cercanos.

Si suponemos que los valores (x, y) forman una recta, la interpolación lineal de (x_n, y_n) es:

$$y_n = y_{n-1} + (x_n - x_{n-1}) (y_{n+1} - y_{n-1}) / (x_{n+1} - x_{n-1})$$

De este modo obtenemos la y_n que correspondería a x_n en la recta que une los puntos (x_{n-1}, y_{n-1}) , y (x_{n+1}, y_{n+1}) , lo que no deja de ser una aproximación.

2. Obteniendo la ecuación $y = f(x)$ que representa el comportamiento del sensor.

En algunos casos es posible modelar el sensor mediante una ecuación matemática

$$y = f(x)$$

cuya representación gráfica es la curva característica del sensor o curva de calibración, como se muestra en la Figura 2.

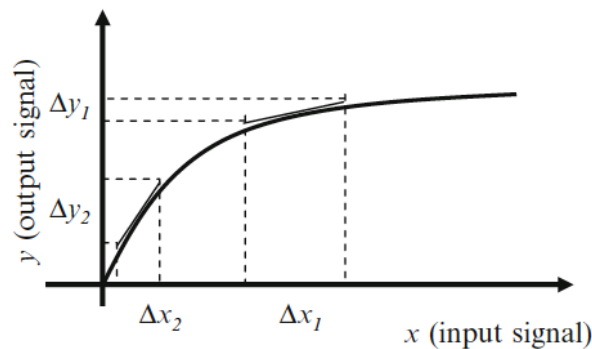


Figura 2. Curva de calibración

Para obtener la y_n correspondiente a una lectura x_n basta con buscar el par en la curva de calibración. Para que el robot haga los cálculos es mejor darle la ecuación característica del sensor $y = f(x)$. De este modo, puede calcular y_n para cada x_n .

5.1. Obtención de la recta de calibración por mínimos cuadrados

Si representamos los pares (x,y) contenidos en la tabla de calibración, tendremos una nube de puntos. Para obtener una ecuación que se ajuste lo mejor posible a la nube de puntos disponibles se suele usar el ajuste por mínimos cuadrados¹.

El ajuste por mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico en la que, dados un conjunto de pares ordenados (x, y) y una familia de funciones (lineales, cuadráticas o de mayor grado), se intenta encontrar la función continua que mejor se aproxime a los

¹ Antes de hacer el ajuste por mínimos cuadrados se suelen eliminar a mano aquellos pares que están muy alejados de la nube de puntos, ya que se considera que son errores transitorios.

datos según el criterio de mínimo error cuadrático. Un requisito implícito es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria.

Cuando se sabe que x e y tienen una relación lineal, la curva de ajuste es una recta. Como en la mayoría de los sensores la relación entre las variables x e y , suele ser prácticamente lineal, se trata de encontrar la expresión de la *recta de regresión*,

$$y = ax + b$$

que mejor se ajusta a los datos experimentales.

Como la recta ajustada por mínimos cuadrados debe satisfacer la condición de que la suma de los cuadrados de las distancias de cada punto experimental a la recta sea mínima midiendo las distancias verticalmente (regresión de y sobre x) la condición es que

$$S = \sum (y_i - ax_i - b)^2$$

sea mínima. Lo que implica que la derivada de S respecto de a y de b sea nula. Imponiendo estas condiciones se llega a que el valor de a (pendiente de la recta) que satisface la condición es

$$a = \frac{N \sum_1^N x_i \cdot y_i - \sum_1^N x_i \cdot \sum_1^n y_i}{N \sum_1^N x_i^2 - (\sum_1^N x_i)^2}$$

y el de b (ordenada en el origen):

$$b = \frac{\sum_1^N y_i - a \sum_1^N x_i}{N}$$

o bien:

$$b = \frac{\sum_1^N x_i^2 \cdot \sum_1^N y_i - \sum_1^N x_i \sum_1^N x_i y_i}{N \sum_1^N x_i^2 - (\sum_1^N x_i)^2}$$

Para saber la calidad del ajuste obtenido usamos el coeficiente de correlación lineal, r , que indica el grado de dependencia lineal entre las variables x e y . Este coeficiente viene dado por

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x \cdot S_y}$$

donde

$$S_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N} - \bar{x} \cdot \bar{y}$$

y

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} - (\bar{x})^2} \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N} - (\bar{y})^2}$$

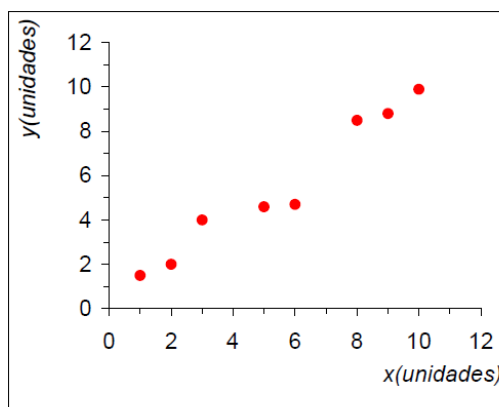
r varía entre: $-1 \leq r \leq +1$

- Si $r = 1$ la correlación es perfecta y positiva y está representada por una recta de pendiente positiva.
- Si $r = -1$ la correlación es perfecta negativa, representada por una recta de pendiente negativa.
- Si $r = 0$ la correlación es nula
- Si r toma valores muy lejanos a ± 1 , indica que el ajuste no es muy bueno

5.2. Ejemplo:

Sean los pares (x,y) de la tabla de la izquierda, representados en la gráfica de la derecha¹.

x_i	y_i
1	1.5
2	2.0
3	4.0
5	4.6
6	4.7
8	8.5
9	8.8
10	9.9



Queremos encontrar la recta que mejor se ajusta a estos datos.

¹ Ajuste de una recta por mínimos cuadrados.
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1593/course/section/2045/Ajuste por minimos cuadrados.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1593/course/section/2045/Ajuste%20por%20minimos%20cuadrados.pdf)

i	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2	$(n+mx_i-y_i)^2$
1	1	1.5	1.5	1.0	2.25	0.042
2	2	2.0	4.0	4.0	4.00	0.052
3	3	4.0	12.0	9.0	16.00	0.699
4	5	4.6	23.0	25.0	21.16	0.187
5	6	4.7	28.2	36.0	22.09	1.606
6	8	8.5	68.0	64.0	72.25	0.440
7	9	8.8	79.2	81.0	77.44	0.000
8	10	9.9	99.0	100.0	98.01	0.037
$N=8$	$S_x=44$	$S_y=44$	$S_{xy}=314.9$	$S_{xx}=320$	$S_{yy}=313.2$	$\chi^2=3.066$

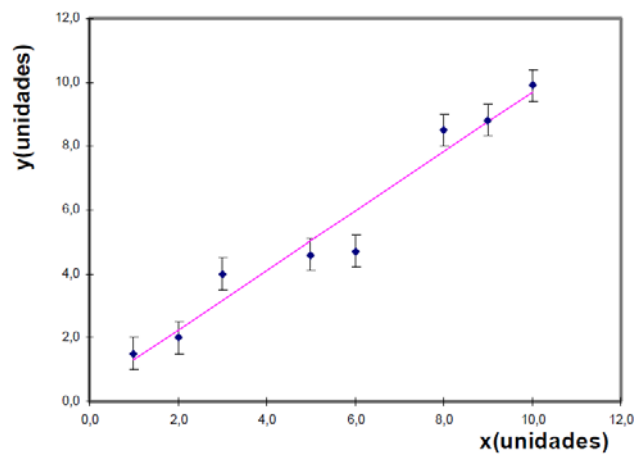
Parámetros del ajuste:

$$m = \frac{NS_{xy} - S_x S_y}{NS_{xx} - S_x^2} = 0.935 \quad \varepsilon(m) = \sqrt{\frac{N}{NS_{xx} - S_x^2} \frac{\chi^2(n, m)}{N-2}} = 0.081$$

$$n = \frac{S_{xx} S_y - S_x S_{xy}}{NS_{xx} - S_x^2} = 0.36 \quad \varepsilon(n) = \sqrt{\frac{S_{xx}}{NS_{xx} - S_x^2} \frac{\chi^2(n, m)}{N-2}} = 0.512$$

$$r = \frac{NS_{xy} - S_x S_y}{\sqrt{NS_{xx} - S_x^2} \sqrt{NS_{yy} - S_y^2}} = 0.978$$

Recta de ajuste:



La recta de ajuste es:

$$y = 0,94 x + 0,4$$

Si tenemos en cuenta la precisión:

$$y = (0,94 \pm 0,08) x + (0,4 \pm 0,5)$$

Como $r = 0,978$, podemos afirmar que la correlación es buena.

Cálculo de la recta de ajuste mediante gráficas de excel

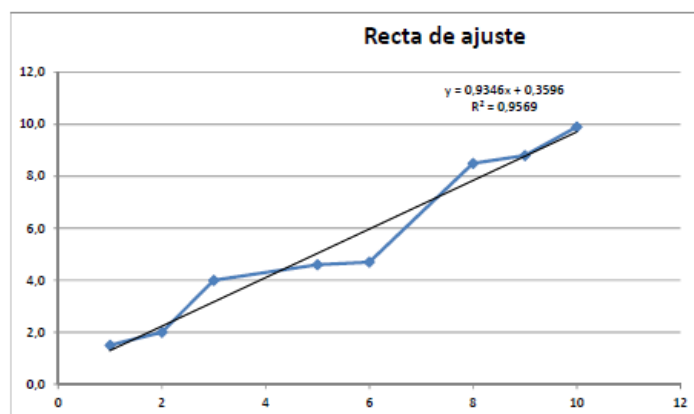
1. Meter los datos en una hoja Excel. Por ejemplo en la columna a los valores x_i y en la columna b los valores y_i
2. Seleccionar la tabla y clickar en “Insertar gráficos”. Elegir el tipo “XY (dispersión, con puntos de datos conectados por líneas)”
3. En la gráfica que se ha creado clickar en la línea que une los datos y seleccionar “Agregar línea de tendencia”. Ésta es precisamente la recta ajustada por mínimos cuadrados.
4. Clickar sobre la línea de tendencia y seleccionar “Presentar ecuación en el gráfico” y “Presentar el valor de R cuadrado en el gráfico”.

No es necesario dibujar la recta de ajuste para obtener los valores que necesitamos.

1. Para obtener el valor de la pendiente (a) se escribe en una celda vacía:
=PENDIENTE(B1:Bn;A1:An)
2. Para obtener la ordenada en el origen (b) se escribe en otra celda:
=INTERSECCION.EJE(B1:Bn;A1:An)
3. Para obtener el coeficiente de correlación se escribe:
=COEF.DE.CORREL(B1:Bn;A1:An)

donde B_1 es el primer valor y B_n es el último valor de la columna “y” de la tabla; y A_1 es el primer valor y A_n el último valor de la columna “x” de la tabla (conviene escoger como primero y último pares “centrados”, es decir que se encuentren sobre la recta de regresión).

x_i	y_i
1	1,5
2	2,0
3	4,0
5	4,6
6	4,7
8	8,5
9	8,8
10	9,9



PENDIENTE(y1:x1)	0,935
INTERSECCION EJE(y1:x1)	0,360
COEF.DE.CORREL(y1:x1)	0,978

y	=	0,935	x	+	0,360
---	---	-------	---	---	-------

6. Sensores más utilizados

Los sensores varían considerablemente en sus funciones.

Tabla 1: Clasificación de los sensores más utilizados en aplicaciones de robots

Clasificación general (uso típico)	Tipo de Sensor	P/E	A/P
Sensores táctiles (detección de contacto físico o proximidad; interruptores de seguridad)	Interruptores de contacto, parachoques (bumper).	EC	P
	Barreras ópticas.	EC	A
	Sensores de proximidad sin contacto	EC	A
Sensores de motor/ rueda (velocidad y posición de motor/rueda)	Encoders de escobillas	PC	P
	Potenciómetros	PC	P
	Resolvers (E. analógicos)	PC	P
Sensores de orientación (respecto a un sistema de referencia fijo)	Encoders magnéticos, inductivos y capacitivos	PC	A
	Brújulas	EC	P
	Giroscopios	PC	P
Basados en el terreno (localización en un sistema de referencia fijo)	Inclinómetros	EC	A/P
	GPS	EC	A
	Faros ópticos o RF activos	EC	A
Alcance activo (ecos, tiempo de vuelo, triangulación geométrica)	Faros ultrasónicos activos	EC	A
	Faros reflectantes	EC	A
	Sensores reflectores	EC	A
Sensores de movimiento/velocidad (velocidad relativa a objetos fijos o móviles)	Sensores ultrasónicos	EC	A
	Láser	EC	A
	Triangulación óptica	EC	A
Sensores basados en visión (alcance visual, análisis de imágenes, segmentación, reconocimiento de objetos)	Radares Doppler	EC	A
	Sonido Doppler	EC	A
Sensores basados en visión (alcance visual, análisis de imágenes, segmentación, reconocimiento de objetos)	Cámaras CCD/CMOS	EC	P

EC/PC: Exteroceptivo/propioceptivo. A/P: Activo/Pasivo

6.1. Interruptores (*Switches*)

Los interruptores son los sensores más sencillos. Su principio básico es un circuito abierto o cerrado por el que pasa o no pasa corriente. Prácticamente no necesitan acondicionamiento. Pueden ser usados para múltiples propósitos: detector de contacto (choques), fin de carrera (cuando un dispositivo ha alcanzado su máximo desplazamiento), para alimentar a contadores, etc. Su estado normal será abierto o cerrado dependiendo de la aplicación.

6.2. Sensores analógicos simples

Los sensores de luz miden la cantidad de luz que llega a una célula fotoeléctrica (usualmente una fotorresistencia). La resistencia depende de la iluminación: es baja con luz y aumenta cuando disminuye la iluminación. La situación del sensor tiene gran influencia sobre la medida. También la tienen las variaciones de iluminación

natural/artificial del entorno en el que trabaja el robot.

Existen muchos otros tipos de sensores simples, tales como sensores de luz polarizada (células fotoeléctricas), sensores de resistencia, potenciómetros (usados en robótica para detectar posición de dispositivos mecánicos), etc.

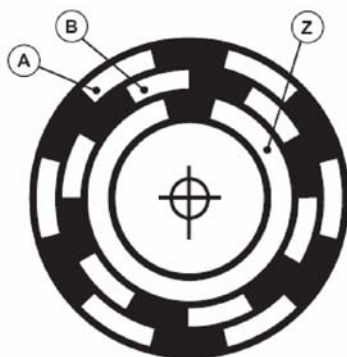
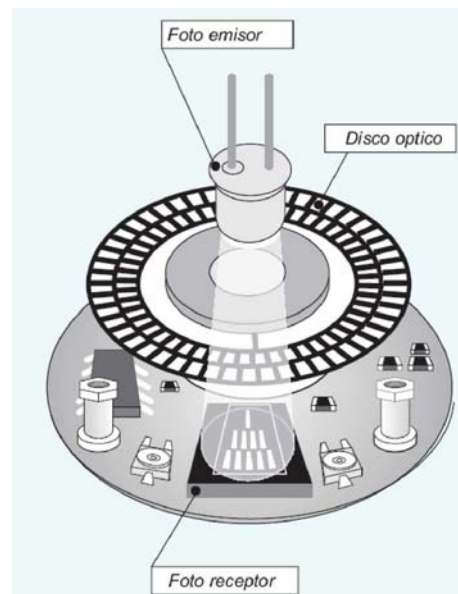
6.3. Sensores para odometría

Los sensores de rueda/ motor se utilizan para medir el estado interno y la dinámica del robot. Tienen diversas aplicaciones fuera de los robots y ofrecen excelentes prestaciones, bajo coste sencillez y precisión.

6.4. Encoders ópticos

Un codificador incremental de rotación está formado por un disco con ranuras radiales ubicadas por lo general muy juntas en toda su circunferencia, o sino con líneas alternadas en color claro y oscuro, que giran frente a un fotosensor (o un conjunto de éstos, para más precisión), generando un pulso por cada ranura o cambio de color.

El encoder incremental proporciona normalmente dos formas de onda cuadradas y desfasadas entre sí en 90 grados eléctricos, denominados en general “canal A” y “canal B”. Con la lectura de un solo canal se dispone de la información correspondiente a la velocidad de rotación, mientras que si capta también la señal B es posible discriminar el sentido de rotación en base a la secuencia de datos que producen ambas señales. Si además está disponible otra señal llamada canal Z (cero), que proporciona la posición absoluta de cero del eje del encoder. Esta marca de referencia sobre el disco indica que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. También sirve para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.



Representación de las señales incrementales A, B y Z en disco óptico.

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar la resolución es contabilizar tanto los flancos de subida de los trenes de pulsos como los de bajada. De esta manera se multiplica la resolución de captador. Esto permite llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

El funcionamiento básico de los codificadores o encoders absolutos es similar al de los incrementales. Se tiene una

fuelle de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente. Así no es necesario ningún contador adicional para detectar el sentido de giro pues la posición (sector) es codificada de forma absoluta. Su resolución es fija y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. La resoluciones habituales van de 8 a 19 bits (es decir, de $2^8 = 256$ a $2^{19} = 24.288$ posiciones distintas).

Los encoders pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones, estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

Codificación absoluta para la medida de la posición

La forma más sencilla para determinar una posición angular en un codificador giratorio es dividir el disco en segmentos y cada segmento de imprimir con un patrón único. Cuantos más segmentos más precisión se obtiene. Pero al aumentar el número de segmentos aumenta el tamaño del código. Si dividimos el disco en s segmentos, necesitaremos un código binario de c bits, donde c es el número de canales: $c = \log_2(s)$. Por ejemplo, un disco con 8 segmentos tiene una resolución de $360^\circ / 8 = 45^\circ$ por segmento, y requiere $\log_2(8) = 3$ canales separados.

Confiabilidad

Uno de los problemas con el uso de un esquema de codificación binaria es la detección de errores. Si la sección del disco que pasa por un detector está en la transición de un segmento a la siguiente, durante el tiempo de transición el decodificador puede producir un código incorrecto. Los errores de transiciones de múltiples bits pueden ser catastróficos. Para evitarlos se usa el Código Gray

El código Gray es un tipo de código binario que sólo cambia un único bit en la transición de un elemento al siguiente. Así el error máximo en la posición detectada es de 1 segmento.

Código Gray de 4 bits

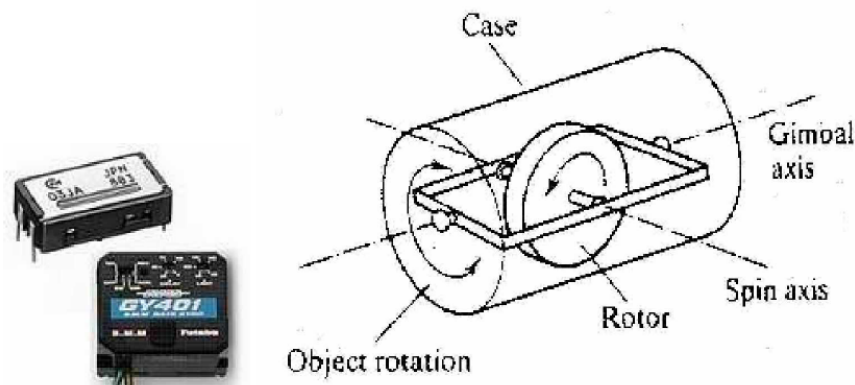
Binario	Gray	Binario	Gray	Binario	Gray	Binario	Gray
0000	0000	0100	0110	1000	1100	1100	1010
0001	0001	0101	0111	1001	1011	1101	1011
0010	0011	0110	0101	1010	1111	1110	1001
0011	0010	0111	0100	1011	1110	1111	1000

6.5. Sensores de encabezamiento

6.6. Giróscopos

El giróscopo está basado en un fenómeno físico conocido hace mucho tiempo: una rueda girando se resiste a que se le cambie el plano de giro (o lo que es lo mismo, la dirección del eje de rotación). Esto se debe a lo que en física se llama "principio de

conservación del momento angular". En la siguiente sección puede verse la descripción de giroscopo digital comercial ROBOTIS Gyro Sensor GS-12



6.7. Sensores magnéticos



En robótica, algunas situaciones de medición del entorno pueden requerir del uso de elementos de detección sensibles a los campos magnéticos. Si el robot debe moverse en ambientes externos a un laboratorio, una aplicación de estos sensores es una brújula que forme parte de un sistema de orientación. Otra aplicación es la medición directa de campos magnéticos presentes en las inmediaciones, que podrían volverse peligrosos para el robot si su intensidad es importante. Una tercera

aplicación es la medición de corrientes en la parte motriz (detectando la intensidad del campo magnético que genera un conductor en la fuente de alimentación). También se podrán encontrar sensores magnéticos en la medición de movimientos, como el uso de detectores de "movimiento cero" y tacómetros basados en sensores por efecto Hall¹.



6.8. Inclinómetros

Los inclinómetros sirven para medir la inclinación, el ángulo de un objeto con respecto a un eje horizontal. Están formados por un electrolito (liquido conductor) situado en un recipiente en el cual hay introducidos dos electrodos enfrentados y ambos con una parte fuera del electrolito. Cuando el sensor se inclina, uno de los electrodos entra más en contacto con el electrolito y el otro menos. Si se miden las corrientes de salida de los electrodos, y así es posible determinar el ángulo de inclinación. En la siguiente sección puede verse la especificación del inclinómetro digital comercial LCP-45.

¹ En el interior de un conductor por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, se produce un campo eléctrico, perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado, que se denomina *efecto Hall*.

6.9. Sensores basados en el terreno

Una aplicación para resolver el problema de la localización en la robótica móvil es la de utilizar “faros” activos o pasivos. Utilizando dispositivos receptores que interaccionan con ellos, el robot puede calcular e identificar su posición en el espacio y también la de los objetos que tiene alrededor. La idea es la misma que utilizan los humanos cuando se orientan por las estrellas, montañas u otros puntos de referencia. Hoy en día, estos sensores son capaces de detectar obstáculos tanto a kilómetros como a centímetros, según el tipo y el uso que se le vaya a dar.

6.10. Global Positioning System GPS

Fue diseñado, desarrollado e instalado para uso militar por el departamento de defensa de los EEUU. Hoy en día este sistema de localización precisa de objetos, personas, vehículos, etc., tanto de uso militar como civil.

El GPS funciona con 24 satélites (21 operativos y 3 de respaldo) en órbita sobre la tierra, cada 12 horas a 20.192 km, con trayectorias sincronizadas. Estos satélites transmiten información sobre la posición en la que están y su propio reloj. Cuando se quiere determinar una posición, el aparato receptor localiza como mínimo cuatro satélites de la red de los que recibe la posición en la que están y su reloj. El receptor sincroniza el reloj y calcula el retraso de las señales, es decir, la distancia a los satélites. Conocidas las distancias a los satélites se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a estos. A esto se le denomina triangulación, y aunque se supone que con tres satélites sería suficiente para determinar la posición de un objeto en la tierra hoy en día se utilizan 4 para corregir errores.

Estos receptores, tienen que ser capaces de recibir 4 transmisiones simultáneas de los satélites. La señal de transmisión de los satélites GPS tiene poca intensidad por lo que el receptor tiene que estar lo más alineado posible con el receptor. En ciudades densas y en zonas boscosas es normal que los localizadores fallen. También fallan en interiores y cuando el cielo está nublado. Esta es la razón por la que aunque el GPS sea un sensor muy utilizado en Robótica, sólo se utilice para robots móviles de exterior.

Hay muchos factores que influyen en la precisión de la localización por medio de GPS que se deben de tener en cuenta. En primer lugar, ni las orbitas de los satélites ni la tierra son uniformes. También hay que tener en cuenta que se pueden definir diferentes precisiones a la hora de localizar (lo que hemos denominado resolución). Hoy en día el sistema más usado tiene una resolución de $\pm 15\text{m}$. Si se desea más resolución se puede utilizar una extensión de este sistema que se denomina Diferencial GPS (DGPS) que utiliza un segundo receptor estático en tierra para corregir posibles errores. Así se consigue una resolución de 1m o menos.

Al utilizar este tipo de sensores hay que tener en cuenta el ancho de banda puesto que el GPS ofrece una latencia de 200-300 ms, por lo que la frecuencia de actualización no es mayor de 5 Hz. Esto quiere decir que al utilizar un GPS para gobernar un robot de movimientos rápido el sistema debe de tener en cuenta estas latencias y limitaciones.

6.11. Medición activa de la distancia (active ranging)

Los sensores que miden activamente la distancia son los más comunes en la robótica móvil. El bajo precio de estos sensores y la facilidad de interpretación de las salidas hace que sean muy usados. Son capaces de calcular la distancia a la que están los objetos alrededor del robot. La mayoría de los procedimientos para esquivar obstáculos de los robots móviles se basa en estos sensores.

6.12. Tiempo de vuelo (time of flight active ranging)

Este tipo de sensor se basa en medir la velocidad de propagación del sonido o de una onda electromagnética. Es decir, mide el tiempo que requiere un pulso de energía para viajar hasta un objeto reflector y volver al receptor.

En general, la distancia de recorrido de un sonido o de una onda electromagnética es:

$$D = c \cdot t$$

D = distancia recorrida

c = velocidad de propagación de la onda

t = tiempo de vuelo

Conviene recordar que la velocidad de propagación del sonido es aproximadamente de 0.3 m/ms. Por otro lado, la de las ondas electromagnéticas es de 300.000 m/ms que es un millón de veces más rápida que la del sonido. Esta es la razón por la que para algunas aplicaciones los sensores de ondas electromagnéticas sean más adecuados..

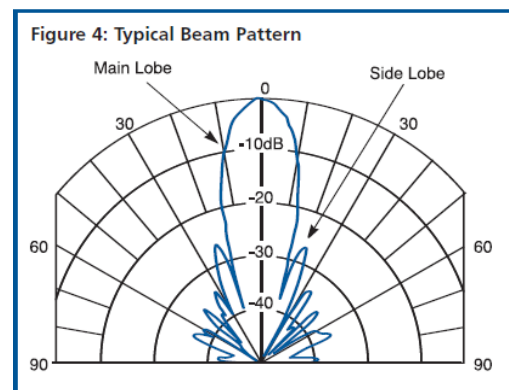
La calidad de los sensores de “tiempo de vuelo” depende de:

- Las imprecisiones en la determinar el tiempo exacto de llegada la señal reflectada.
- Las imprecisiones en cálculos (particularmente en los láseres).
- La dispersión del cono de la señal transmitida (particularmente en los ultrasónicos).
- La interacción con el obstáculo (superficies reflectantes, absorbentes...).
- La variación de la velocidad de propagación.
- La velocidad del robot y del obstáculo (en el caso de que el obstáculo sea dinámico).

Cada tipo de sensor es sensible a alguna de estas características.

6.13. El sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico se basa en el envío de un paquete de ondas ultrasónicas y de la recepción de las ondas reflejadas. La distancia se calcula a partir del tiempo que tarda el paquete en llegar al obstáculo y volver al receptor después de reflejarse.



$$D=c*t/2$$

D = distancia

C = velocidad del sonido

T = tiempo de vuelo

La velocidad del sonido c en el aire viene dada por:

$$C= (y*R*T)^{1/2}$$

Donde:

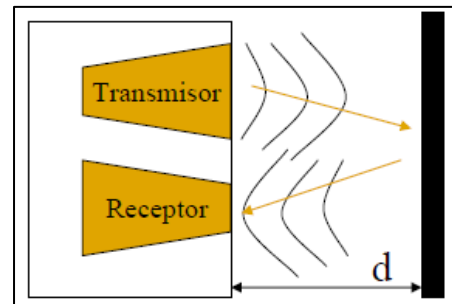
y = Proporción de calor específico

R = Constante gaseosa

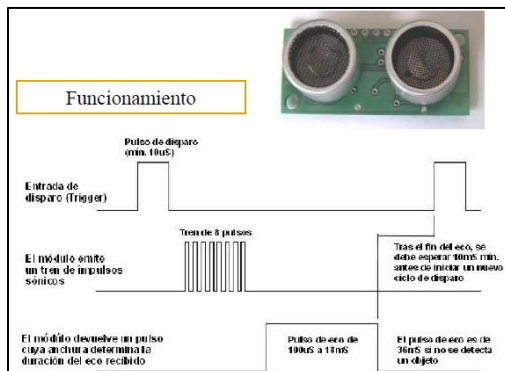
T = Temperatura en grados Kelvin

En el aire la presión estándar es de 20°C y la velocidad del sonido es aproximadamente $c = 343 \text{ m/s}$.

El sensor emite series de pulsos de sonido componiendo paquetes de ondas emitidas mediante un transductor ultrasónico. El sensor suele tener un emisor y un receptor integrados en un único circuito eléctrico. Hay que tener en cuenta que la dispersión de estas ondas es mayor cuando la distancia es más larga.



La frecuencia típica de estos sensores es de 40 a 180 KHz. Hoy en día los sónares pueden alcanzar hasta 35 metros (este valor es modificable por software) aunque el alcance máximo de los sensores que se usan comúnmente ronda los 4 metros.

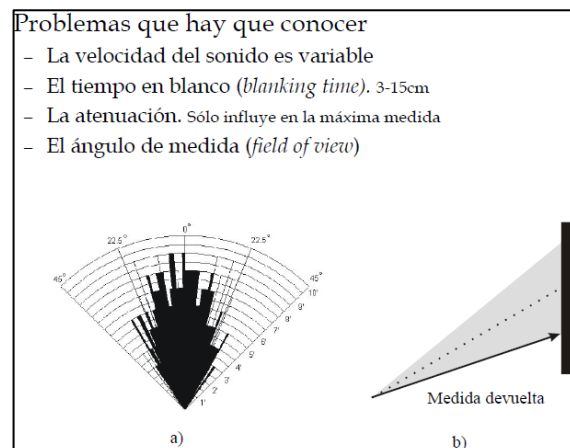


Este tipo de sensores se suelen utilizar de manera eficaz para evitar colisiones con los obstáculos que están a una distancia media. Esto se debe a que se emite y se recibe la señal desde el mismo dispositivo. Esto obliga al sensor a desactivar el receptor mientras manda la señal de origen para que no detecte la señal que está enviando.

Los sensores son cuatro (Everett, 1995):

1. Variaciones en la velocidad de propagación de la señal. Los cambios de temperatura y humedad afectan a los sistemas acústicos.
2. Incertidumbre en la detección: la señal devuelta es recibida en un rango dinámico debido a la variación en la capacidad reflectora de las superficies.

Las fuentes potenciales de error de este tipo de



No hay manera de que el sónar sepa exactamente donde se encuentra el obstáculo dentro de su cono de detección.

3. La falta de precisión del circuito eléctrico en la medición del tiempo.
4. Interacción de la superficie: cuando las ondas acústicas chocan contra un objeto, el eco que se recibe representa únicamente una porción de la señal original. El resto se refleja en direcciones dispersas y puede ser absorbido o pasar a través del objeto, dependiendo de las características reflectoras de la superficie y el ángulo de incidencia de la señal.
5. Blanking zone: Distancia de la superficie activa de un transductor hasta el rango mínimo de detección se llama a menudo zona muerta. Dentro de esta zona no se pueden recibir señales de eco.

La resolución en los sensores que se utilizan en la robótica móvil es de unos 2 cm, pero en este tipo de sensores suele rondar los 35 cm. Por lo tanto, hay que tener en cuenta las limitaciones que tienen estos tipos de sensores a la hora de detectar y esquivar los obstáculos para determinar una velocidad adecuada.

6.14. Luz láser (Laser rangefinder, electromagnético)

Este tipo de sensor introduce mejoras significativas respecto al anterior gracias al uso de la luz láser en vez del sonido. El funcionamiento de este tipo de sensores también consiste en enviar una señal y después recibirla y luego estimar la distancia a la que está el obstáculo. Estos sensores suelen tener un mecanismo con un espejo para recibir el rayo reflejado y dirigirlo al receptor.

En este caso, en vez de ondas de sonido se utiliza la luz láser que tiene un tiempo de propagación más rápido. Se puede utilizar del mismo modo que el sonar, esto es, esperar a la señal reflejada y calcular directamente la distancia a la que se encuentra el obstáculo a partir del tiempo que tarda la señal en ir y volver. Pero el modo más fácil es el de medir el desplazamiento de la fase de la luz reflectada.

6.15. Medición en base al desplazamiento de la fase

Este sistema de medición se basa en medir el desplazamiento de la fase entre la luz emitida y recibida.

$$c = f \cdot \mu$$

c = velocidad de la luz

f = frecuencia de modelado

$$D' = L + 2D = L + \theta\mu/2\pi$$

D' = distancia total recorrida por la luz emitida

Donde D y L son los valores del dibujo anterior

$$D = \mu \theta / 4 \pi$$

θ = La diferencia de fase entre el rayo transmitido y recibido.

La exactitud del cálculo de la distancia depende mucho de la amplitud de la señal reflejada recibida y no se suele utilizar cuando lo que se requiere es gran precisión. Hay que tener en cuenta la polución del entorno en el que se pretende utilizar este tipo de sensores (por ejemplo, humo) y que traspasa superficies transparentes como cristales.

6.16. Medición activa de la distancia en base a la triangulación

Este tipo de sensores utiliza la geometría para calcular la distancia a la que están los objetos de alrededor. La clase más simple de este tipo de sensores proyecta un haz de luz sobre el entorno y recibe el reflejo mediante un receptor. Sabidos los parámetros geométricos, el sistema utiliza una simple triangulación para hacer las mediciones. Si el receptor mide los valores reflejados sobre un eje, se dice que el sensor óptico de triangulación es de 1D. En cambio si mide los valores reflectados en dos ejes ortogonales, se dice que el sensor es de 2D.

6.17. Triangulación óptica (sensor de 1 dimensión)

El emisor lanza un rayo de luz y recoge su reflejo mediante un receptor especial (sensible a la posición, o una cámara lineal).

$$D = f \cdot L/x$$

D=distancia

Este tipo de sensores funciona mejor con objetos que se encuentra a una distancia relativamente corta y presenta más inconvenientes cuando los objetos se encuentran a largas distancias. La resolución que puede llegar a tener en su aplicación industrial es de 1 μm .

Los sensores basados en la triangulación óptica pueden conseguir una exactitud relativamente alta con unas resoluciones muy buenas (para objetos cercanos). Aún así hay que tener en cuenta la limitación geométrica que tienen este tipo dispositivos. Por otro lado, aunque este más limitado que el sónar, el sensor de triangulación tiene un ancho de banda muy amplio y al contrario que el sonido es difícil que se den cruces de señales.

6.18. Sensores de movimiento y de velocidad

Muchos sensores miden directamente el movimiento relativo entre el robot y su entorno. Si se detectan las posiciones entre los movimientos podemos calcular fácilmente la velocidad.

Aunque también puede usarse otras tecnologías para detectar movimiento. Por ejemplo, los sensores piroeléctricos que se encargan de medir los cambios en la temperatura del ambiente se activan cuando una persona pasa andando por al lado de uno de estos.

6.19. Sensores basados en el efecto Doppler (radar o sonido)

Cuando la fuente de ondas y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio material en el que se propaga la onda, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Doppler en honor a su descubridor.

Las formulas que se utilizan en este tipo de sensores:

Si se mueve el transmisor:

$$f_r = f_t / (1 + v/c)$$

Si se mueve el receptor:

$$f_r = f_t (1 + v/c)$$

El efecto doppler se aplica al sonido y a las ondas electromagnéticas. En el caso del sonido sirve para control industrial de procesos, pesca, etc. Con ondas electromagnéticas, para sistemas de radar, etc.

6.20. Algunos sensores comerciales

6.21. Sensores de contacto

Los microinterruptores (llamados "microswitch" en inglés), muy comunes en la industria y muy utilizados en equipos electrónicos y en automatización. Se utilizan para fin de carrear y en parachoques.

Uno de los detectores que más comúnmente se instalan en un robot es algún tipo de parachoques. Es el método más básico para implementar la detección de obstáculos en un robot. Hoy en día se usan en combinación con detectores de distancia, como los detectores infrarrojos. Sin embargo, el parachoques resulta necesario aún teniendo otros métodos de detección, pues constituye la última línea de defensa. Cuando los demás sistemas no han detectado un obstáculo, para que el robot no reciba golpes en partes delicadas de su estructura, o se quede haciendo fuerza con sus motores y gastando sus baterías en una trampa mecánica, es bueno que posea el más primitivo pero seguro y eficaz sistema de detección¹.

¹ Más información para navegar con parachoques: http://robots-argentina.com.ar/Sensores_parachoques.htm



Para detectar contacto físico del robot con un obstáculo se suelen utilizar interruptores que se accionan por medio de actuadores físicos. Un ejemplo muy clásico serían unos alambres elásticos que cumplen una función similar a la de las antenas de los insectos, trasladando hasta el interruptor, para accionarlo, el desplazamiento mecánico que se produce por el choque o contacto. En inglés les llaman "whiskers" (bigotes), relacionándolos con los bigotes sensibles de los animales como los gatos.



También existen los sensores "sandwich". Éstos son contruidos básicamente con dos láminas de material metálico más o menos flexible, puestas en paralelo y separadas por un espacio libre con algún tipo de material elástico en los bordes y en ciertas áreas interiores. El aislante es ubicado de tal modo que se pueda aplastar fácilmente para hacer que las membranas metálicas se toquen. Al presionar este sandwich, las placas metálicas hacen contacto y se produce la detección. (En cierto modo, es igual al sistema que usan hoy muchos teclados de computadora.)

6.22. Acelerómetros, sensores de vibración¹

Un acelerómetro es un dispositivo que permite medir el movimiento y las vibraciones a las que está sometido un robot (o una parte de él), en su modo de medición dinámico, y la inclinación (con respecto a la gravedad), en su modo estático.

¹ http://robots-argentina.com.ar/Sensores_acelerometros.htm

Uno de los acelerómetros integrados más conocidos es el **ADXL202**, muy pequeño, versátil y de costo accesible.

El **ADXL202** es un acelerómetro de dos ejes de bajo consumo y salida digital, integrado en un chip monolítico. Mide aceleraciones hasta una escala máxima de $\pm 2 \text{ g}$. Soporta golpes de hasta 1000 g . Puede medir aceleración dinámica (como por ejemplo una vibración) y también aceleración estática, como por ejemplo la atracción de la gravedad.

Este circuito integrado tiene salidas digitales, en forma de pulsos repetidos cuyo ancho varía en relación con la medición. Estas salidas en forma de pulsos se pueden medir con microcontroladores sin necesidad de contar con una entrada para la conversión Analógica/Digital. El ritmo de repetición del pulso es ajustable de 0,5 a 10 ms por medio de un resistor. Un ciclo de relación 50% significa una aceleración de 9 g .

El ruido de la señal es muy bajo, lo que permite realizar mediciones menores a 2 mg a una frecuencia de 60 hertzios. El ancho de banda de respuesta se puede determinar por medio de condensadores de filtro conectables en ambos circuitos, X e Y.

LDR (Light-Dependent Resistor, resistor dependiente de la luz)

Un LDR es una resistencia variable cuyo valor varía dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él. Se le llama también fotorresistencia. El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (por ejemplo, 50 Ohmios) y muy alto cuando está a oscuras (puede ser de varios $\text{M}\Omega$).

Los LDR se fabrican con un cristal semiconductor fotosensible como el sulfuro de cadmio (CdS). Estas celdas son sensibles a un rango amplio de frecuencias lumínicas, desde la luz infrarroja, pasando por la luz visible, y hasta la ultravioleta.

La variación de valor resistivo de un LDR tiene cierto retardo, que es diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Por esta razón los LDR no se pueden utilizar para algunas aplicaciones, en especial en aquellas en que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo. La lentitud relativa del cambio es una ventaja en algunos casos, porque así se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (por ejemplo cuando está iluminado por un tubo fluorescente alimentado por corriente alterna). En otras aplicaciones (como la detección de luminosidad para saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante.

6.23. Sensores reflexivos y por intercepción (de ranura)

Los sensores de objetos por reflexión están basados en el empleo



ADXL202xE



de una fuente de señal luminosa (lámparas, diodos LED, diodos láser, etc.) y una célula receptora del reflejo de esta señal, que puede ser un fotodiodo, un fototransistor, LDR, incluso chips especializados, como los receptores de control remoto. Los hay de diversas sensibilidades, desde los que detectan un objeto a 5 mm de distancia hasta los que, usando haces de infrarrojo modulados, pueden hacerlo a más de un metro.

Para detección a corta distancia se suele utilizar en robótica el sensor de reflexión **CNY70**, de Telefunken, especificado en su hoja de datos para detección a 0,3 mm (ya que fue pensado para usarlo en la detección en discos de encoders en los que el dibujo de ranuras está muy cerca del sensor), pero se usa en robots para detectar objetos a 10 ó 20 mm. Consta de un diodo emisor de infrarrojos y un fototransistor como elemento sensible. Tiene la ventaja de ser pequeño, compacto y de precio muy accesible.



Para distancias mayores existe una serie de detectores de Sharp, entre los que menciono al **GP2D02**, uno de los más conocidos, capaz de detectar objetos a 80 cm de distancia. Tiene interesantes prestaciones integradas, ya que entrega un valor ya digitalizado en 8 bits, a través de una salida serie. El **GP2D12**, se diferencia en que su salida de datos es

analógica¹.

Con elementos ópticos similares, es decir emisor-receptor, existen los sensores "de ranura", donde se establece un haz directo entre el emisor y el receptor, con un espacio entre ellos que puede ser ocupado por un objeto. Al interceptar el haz se activa la detección.. Existen además módulos para control industrial con una apertura mucho mayor.

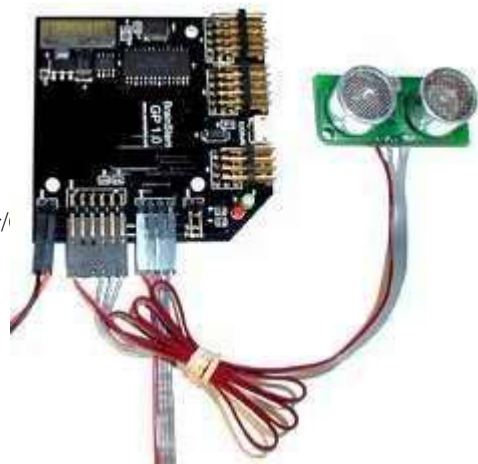
6.24. Medidores de distancia ultrasónicos (Rangers)

Los medidores ultrasónicos de distancia y sensores de ultrasonidos que se utilizan en los robots son básicamente un sistema de sonar.

En el módulo de medición, un emisor lanza un tren de pulsos ultrasónicos —con una frecuencia en el orden de los 38 a 50 KHz— y el receptor espera el reflejo. Se mide el tiempo entre la emisión y el retorno, lo que da como resultado la distancia entre el emisor y el objeto donde se produjo el eco. Esta medición se calcula teniendo en cuenta la velocidad del sonido en el aire, que si bien varía según algunos parámetros ambientales, como la presión atmosférica, permite una medición bastante precisa.

Se pueden señalar dos clases de medidores, los que tienen un emisor y un receptor separados, y los que alternan la función, por medio de un circuito de conmutación, sobre un mismo emisor/receptor piezoeléctrico. Ejemplos característicos de sensores que se utilizan en robots:

Los módulos SRF de Devantech (SRF04, SRF05,



¹ Más información: <http://www.info-ab.uclm.es/labeledc/Solar/>

SRF08, SRF10, etc.), que son capaces de detectar objetos a una distancia de hasta 6 metros, además de conectarse al microcontrolador mediante un bus I2C. El SRF08, por ejemplo, permite programar la dirección del dispositivo sobre el I2C, por lo que se pueden instalar varios sensores sobre el mismo bus.

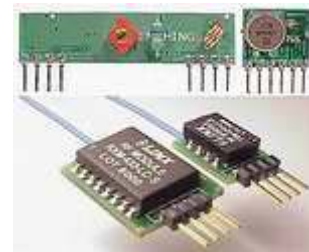
El medidor de distancia ultrasónico SRF08, posee una alimentación única de 5V, sólo requiere un consumo de 15 mA en el momento de funcionamiento y 3 mA mientras está en reposo. Este nivel de consumo representa una gran ventaja para robots alimentados por pilas. El módulo SRF08 incluye, además, un sensor de luz, que permite conocer el nivel de luminosidad. La medición de este sensor luminoso también se transmite usando el bus I2C, sin necesidad de recursos adicionales. La comunicación con el sensor ultrasónico SRF08 se realiza a través de un bus I2C. Este bus está disponible en la mayoría de los controladores del mercado, como BasicX-24, OOPic y Basic Stamp 2P, así como en una amplia gama de microcontroladores.

6.25. Sensores de Radiofrecuencia

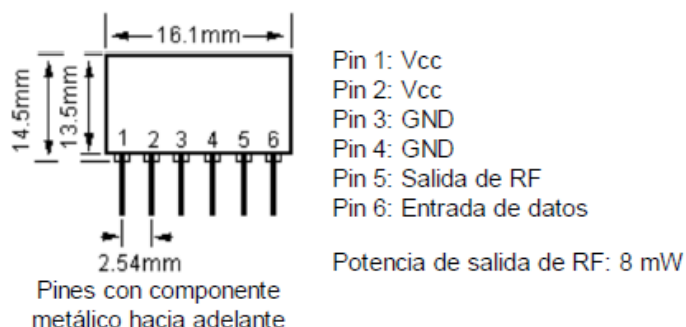
Permiten utilizar radiobalizas para la navegación. Por medio de un grupo de emisores de radiofrecuencia codificados, ubicados en lugares conocidos por el sistema, es posible establecer con precisión la posición de un robot, con sólo hacer una triangulación. Al efecto el robot debe poseer una



antena de recepción direccional (con reflector parabólico, o similar) que pueda girar 360°, y así determine la posición de las radiobalizas. En el robot es posible usar receptores integrados muy pequeños y de bajo costo, como el RWS-433, o el RXLC-434, y otros similares, que trabajan en frecuencias de entre 303 y 433 MHz. La elección de los transmisores dependerá de la distancia a que se ubiquen las radiobalizas, pero si se trata de áreas acotadas es posible utilizar módulos transmisores tales como el TWS-433 y el TXLC-434.



Transmisor y Receptor TWS-# y RWS-#

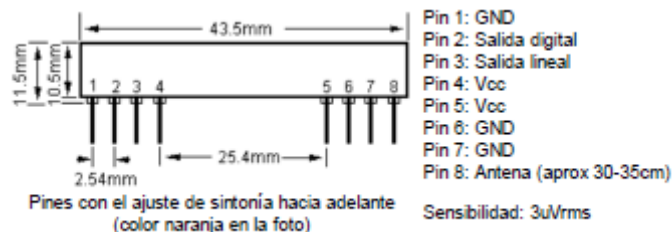


El módulo transmisor viene ya ajustado en una frecuencia, que puede ser de 303,875 MHz (TWS-303), 315 MHz (TWS-315), 418 MHz (TWS-418) y 433,92 MHz (TWS-433). Está listo para su uso. Sólo se debe colocar una antena, conectarle la alimentación y comenzar a enviarle datos. Para facilitar la transmisión de datos codificados, existe un codificador que hace juego, que es el Holtek HT12E.

ESPECIFICACIONES

Símbolo	Características	Condiciones	Mín.	Tip.	Máx.	Unidad
V_{cc}	Voltaje de alimentación		1,5	-	12	V
I_{cc}	Corriente máxima		-	5	9	mA
V_{ih}	Voltaje máximo entrada	$I_{dato}=100\mu A$ (alto)	$V_{cc}-0,5$	-	V_{cc}	V
V_{il}	Voltaje mínimo entrada	$I_{dato}=0\mu A$ (bajo)	-	-	0,3	V
P_{out}	Potencia RF sobre 50 ohm		-3	0	+2	dBm
T_{bw}	Ancho banda modulación	Codificación externa	-	5	-	kHz
T_r	Flanco subida modulación		-	-	100	μS
T_f	Flanco bajada modulación		-	-	100	μS
	Alcance			20		m

Los transmisores listados hacen juego con receptores de la misma frecuencia, que también vienen en un valor predeterminado entre 300 MHz a 434 MHz. Puede ser de 303,875 MHz (RWS-303), 315 MHz (RWS-315), 418 MHz (RWS-418) y 433,92 MHz (RWS-433). Posee en diseño pasivo de alta sensibilidad, que no requiere componentes externos. Para decodificar las señales que llegan a este receptor se puede utilizar el decodificador asociado Holtek HT12D.



ESPECIFICACIONES

Símbolo	Características	Condiciones	Mín.	Tip.	Máx.	Unidad
V_{cc}	Voltaje de alimentación		4,9	5	5,1	V
I_{tot}	Corriente de operación			4,5		mA
V_{dato}	Salida datos	$I_{dato}=+200\mu A$ (alto)	$V_{cc}-0,5$	-	V_{cc}	V
		$I_{dato}=-10\mu A$ (bajo)	-	-	0,3	V
F_c	Frecuencia operación		300		434	MHz
P_{ref}	Sensibilidad				-106	dBm
	Ancho de canal		± 500			kHz
NEB	Ancho banda equival ruido		-	5	4	kHz
	Velocidad transferencia datos				3	kb/s
	Tiempo de encendido		-	-	5	mS

6.26. ROBOTIS Gyro Sensor GS-12¹

Overview

The **ROBOTIS Gyro Sensor GS-12** measures sensor's angular velocity. It can be used to calculate how much the robot is tilted/inclined or which direction the force is from. It can also be used to balance the robot or program applied movements.



Features:

- Can be used to balance the robot or program applied movements
- Compatible with ROBOTIS BIOLOID CM-510 Controller and ROBOTIS BIOLOID CM-700 Controller
- Two 3P-DMS-5P cables included
- Weight: 2.8g
- Dimension: 23mm x 23mm x 10mm
- Operating temperature: -40°C - 85°C
- Angular velocity measurement range: -300 $^{\circ}$ /s - 300 $^{\circ}$ /s
- Recommended voltage: 4.5V - 5.5V

Analog Signal Output in Regards to Sensor's Environment

Output Value	455	←	250	→	45
Angular Velocity	+300 $^{\circ}$ /s		0 $^{\circ}$ /s		-300 $^{\circ}$ /s
Voltage Value	2.23 V		1.23 V		0.23 V

- When the angular velocity is 0 (when still), the output value is approximately 250. When it suddenly turns to one axis, the max value output is 455 and the minimum 45, showing a 300 $^{\circ}$ /s angular velocity. Here the mark or sign represents direction.
- Depending on the temperature, there may be 1% difference.
- There may be a difference in value depending on the standard VCC voltage value and circuit noise (Standard VCC Voltage Value is 5V). Thus, we recommend to average several values before use.
- When sampling, the robot must not be moving.

6.27. CMPS03 - Compass Module²

Overview

This compass module has been specifically designed for use in robots as an aid to navigation. The aim was to produce a unique number to represent the direction the robot is facing.



- Pin 9 - 0v Ground
- Pin 8 - No Connect
- Pin 7 - No Connect
- Pin 6 - Calibrate
- Pin 5 - Calibrating
- Pin 4 - PWM
- Pin 3 - SDA
- Pin 2 - SCL
- Pin 1 - +5v

¹ <http://www.robotshop.com/en>

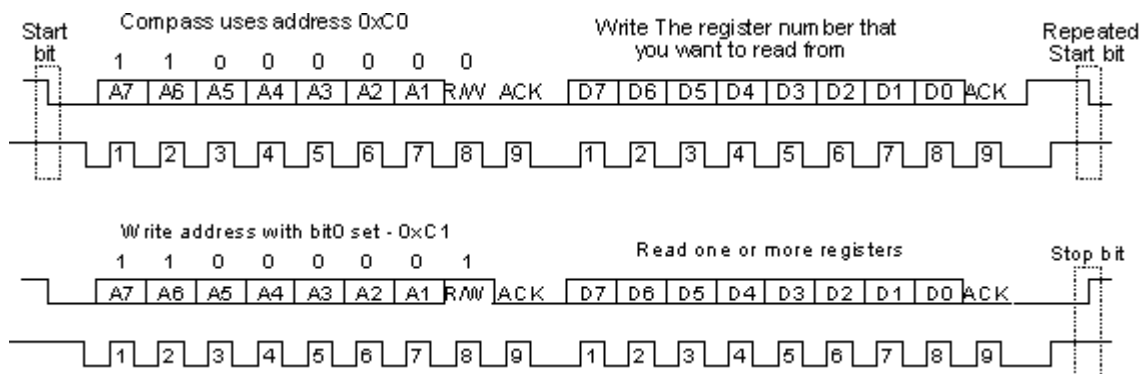
² <http://www.robot-electronics.com>

Connections

- Pin 1, +5v. The compass module requires a 5v power supply at a nominal 25mA. There are two ways of getting the bearing from the module. A PWM signal is available on pin 4, or an I2C interface is provided on pins 2, 3.
- Pins 2, 3 are the I2C interface and can be used to get a direct readout of the bearing. If the I2C interface is not used then these pins should be pulled high (to +5v) via a couple of resistors. Around 47k is ok, the values are not at all critical.
- Pin 4. The PWM signal is a pulse width modulated signal with the positive width of the pulse representing the angle. The pulse width varies from 1mS (0°) to 36.99mS (359.9°) – in other words $100\mu\text{S}/^\circ$ with a +1mS offset. The signal goes low for 65mS between pulses, so the cycle time is 65mS + the pulse width - ie. 66ms-102ms. The pulse is generated by a 16 bit timer in the processor giving a 1uS resolution, however I would not recommend measuring this to anything better than 0.1° (10uS). Make sure you connect the I2C pins, SCL and SDA, to the 5v supply if you are using the PWM, as there are no pull-up resistors on these pins.
- Pin 5 is used to indicate calibration is in progress (active low). You can connect an LED from this pin to +5v via a 390 ohm resistor if you wish.
- Pin 6 is one of two ways to calibrate the compass, the other is writing 255 (0xFF) to the command register. Full calibration instructions are further down this page. The calibrate input has an on-board pull-up resistor and can be left unconnected after calibration.
- Pins 7 and 8 are currently unused. They have on-board pull-up resistors and should be left unconnected.
- Pin 9 is the 0v power supply.

I2C interface.

I2C communication protocol with the compass module is the same as popular eeprom's such as the 24C04.



First send a start bit, the module address (0XC0) with the read/write bit low, then the register number you wish to read. This is followed by a repeated start and the module address again with the read/write bit high (0XC1). You now read one or two bytes for 8bit or 16bit registers respectively. 16bit registers are read high byte first.

Calibration

Calibration only needs to be done once - the calibration data is stored in EEPROM on the PIC18F2321 chip. You do not need to re-calibrate every time the module is powered up.

Before calibrating the compass, you must know **exactly** which direction is North, East, South and West. Remember these are the magnet poles, not the geographic poles. Don't guess at it. Get a magnetic needle compass and check it. When calibrating, make sure the compass is horizontal at all times with components upwards, don't tilt it. Keep all magnetic and ferrous materials away from the compass during calibration - including your wristwatch.

6.28. LCP-45: Dual Axis Inclinometer, $\pm 45^\circ$ range, RS232 Output¹

Overview

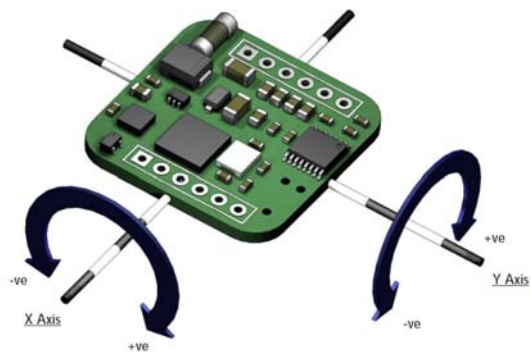
The LCP-45 is a low cost dual axis inclinometer sensor supplied in a PCB format for mounting onto 0.1" PCB headers. It has a digital interface with a full duplex RS232 output as well as a TTL level (3.3V) UART for connection directly to a micro-controller serial port. A housed version with cable is also available (part number LCH-45). These devices are manufactured and calibrated in our UK factory to guarantee performance to the stated specification.

Features:

- Dual axis measurement, range : $\pm 45^\circ$
- Solid state MEMS sensor
- RS232 and TTL level UART full duplex communication
- Low cost (<£15 for 1kpcs)
- Zero offset position can be easily programmed and stored
- Programmable frequency response between 0.125 and 32Hz
- On board temperature sensor
- Small size, 25.4 x 25.4 x 5mm

Applications

- PV Solar tracker control systems
- Platform levelling and monitoring
- GPS compensation
- Platform scales and weigh bridge levelling
- Agricultural and industrial vehicle tilt monitoring
- Telescopic and scissor lift platform monitoring
- Can be readily customised to suit most Applications



¹ http://www.leveldevelopments.com/wp/wp-content/uploads/documents/LCP-45_Dual_Axis_Inclinometer_PCB.pdf

Parameter	Value	Unit	Notes
Supply Voltage	3.3 or 5 to 15	V dc	Supply voltage can be either a regulated 3.3V to drive board directly via connector 2 (pin 1), or a 5 to 15V supply via connector 1 (pin 1) which is then regulated by the on board 3.3V LDO regulator.
Operating Current	20	mA	Maximum value at any operating voltage in range. Low power version (<2mA) can be configured on request.
Operating Temperature	-40 to 85	°C	Maximum operating temperature range. Temperature variation will cause measurement errors as defined below.
Measuring range	±45	°	Direction of measurement can be reversed and zero position can be reset anywhere in range. Settings are stored in non volatile memory so are remembered after power down.
Resolution (@1Hz BW)	0.1	°	Resolution is the smallest measurable change in output.
Accuracy (@20°C)	±0.5	°	This is the maximum error between the measured and displayed value at any point in the measurement range when the device is at room temperature (20°C)
Temperature Error	0.01	°/°C	This is the maximum change in output per °C change of temperature.
Accuracy (-20 to 70°C)	±1	°	This is the maximum error between the measured and displayed value at any point in the measurement range at any temperature over the specified temperature range.
RS232 Output Rate	38400	bps	Bit rate is adjustable between 115.2k, 57.6k, 38.4k, 19.2k and 9.6k, 4.8k and 2.4k via the digital interface
RS232 Data Format	38.4, 8,1,n		1 start bit, 8 data bits, 1 stop bit, no parity
Frequency Response	1	Hz	This is the frequency at which the output is 3dB less than the input value. This is adjustable between 0.125Hz and 32Hz via the RS232 control commands
Mechanical shock	3000 (0.5ms) 10000 (0.1ms)	g	Shock survival limit for MEMS sensor.
Weight	3	g	Not including cable