

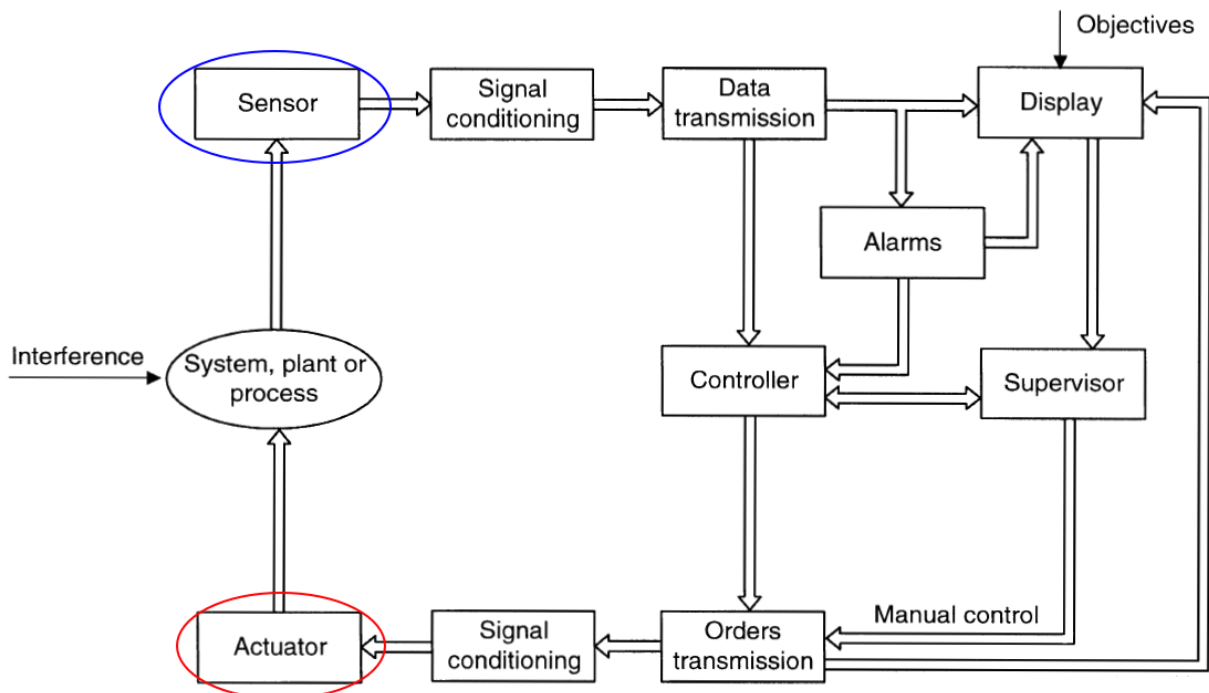
Principios de mecatrónica
Unidad 3: Sensores y Actuadores
Clase 19-22

SDI-11561-004, SDI-11561-002

Sistemas de medición

Un sistema es una combinación de dos o más elementos, subsistemas, y partes necesarias para llevar acabo una o más funciones.

En la siguiente figura se muestra las funciones y flujos de datos de sistemas de medición y control. En general, para la adquisición de información llevada acabo por un sensor, una medición es requerida para el procesamiento de la información y la intepretación del resultado, con el fin de hacerlo perceptible a los sentidos humanos. Cualquiera de esta información, puede ser remota o local, sin embargo funciones remotas requieren transmisión de información.



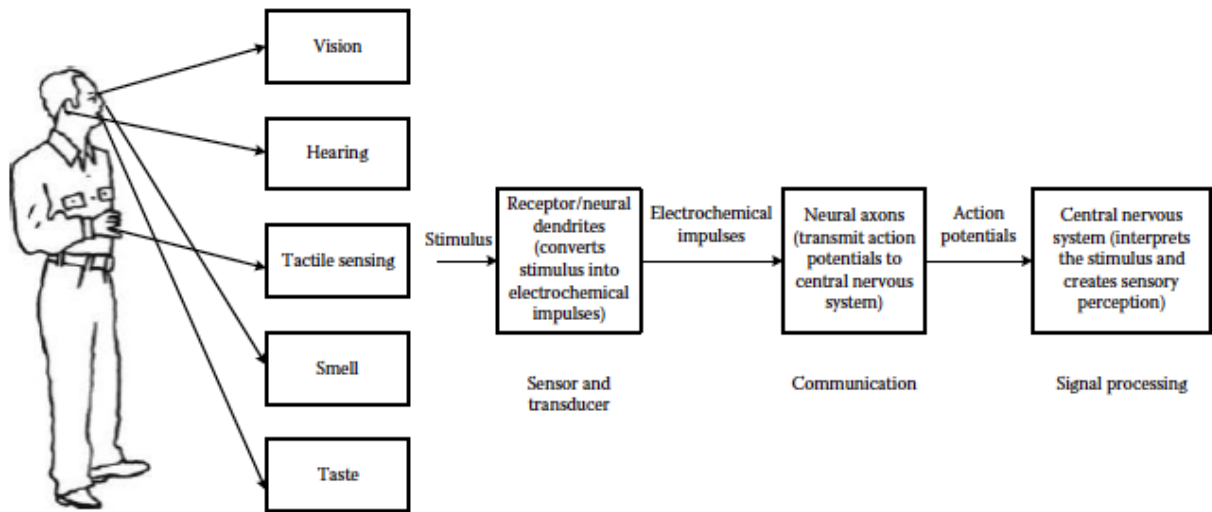
Sensores y Actuadores

Un área robusta en el desarrollo de robots inteligentes que puedan imitar las características de la inteligencia natural se refiere a la **sensores**. El objetivo principal es desarrollar sensores robóticos que puedan desempeñar el rol de actividades sensoriales humanas (cinco sentidos) de

- Vista (visual)
- Audición (Oído)
- Táctil (Tacto)
- Olor (olfativo)
- Sabor (gusto).

Los sensores en las **primeras tres categorías** se encuentran en una etapa más avanzada de desarrollo, comenzando con los básicos (cámaras, micrófonos, y sensores táctiles). Las dos últimas categorías de sensores utilizan principalmente procesos químicos, y son menos comunes ya que siguen en constante estudio. Además de estos cinco sentidos, los humanos también tienen otros tipos de características sensoriales; en particular, la **sensación de equilibrio, presión, temperatura, dolor y movimiento**. De hecho, algunas de estas capacidades sensoriales implicará el uso de uno o más de los cinco sentidos básicos, simultáneamente a través del sistema nervioso central. En su desarrollo, los sistemas robóticos y otros sistemas de ingeniería han sido inspirados durante mucho tiempo por el proceso sensorial de los humanos y otros animales.

El proceso básico de detección biológica se muestra en la siguiente figura. Se recibe un estímulo (por ejemplo, luz para la visión, ondas de sonido para la audición) en el receptor, donde las dendritas¹ de las neuronas convierten la energía del estímulo en impulsos electromecánicos. Los axones² de las neuronas luego conducen los potenciales de acción correspondientes al sistema nervioso central (SNC) del cerebro. Estos potenciales son interpretados por el cerebro para crear la correspondiente percepción sensorial. Un proceso sensorial de ingeniería, como el que se usa en un robot, básicamente usa procesos similares.



Transductores, sensores

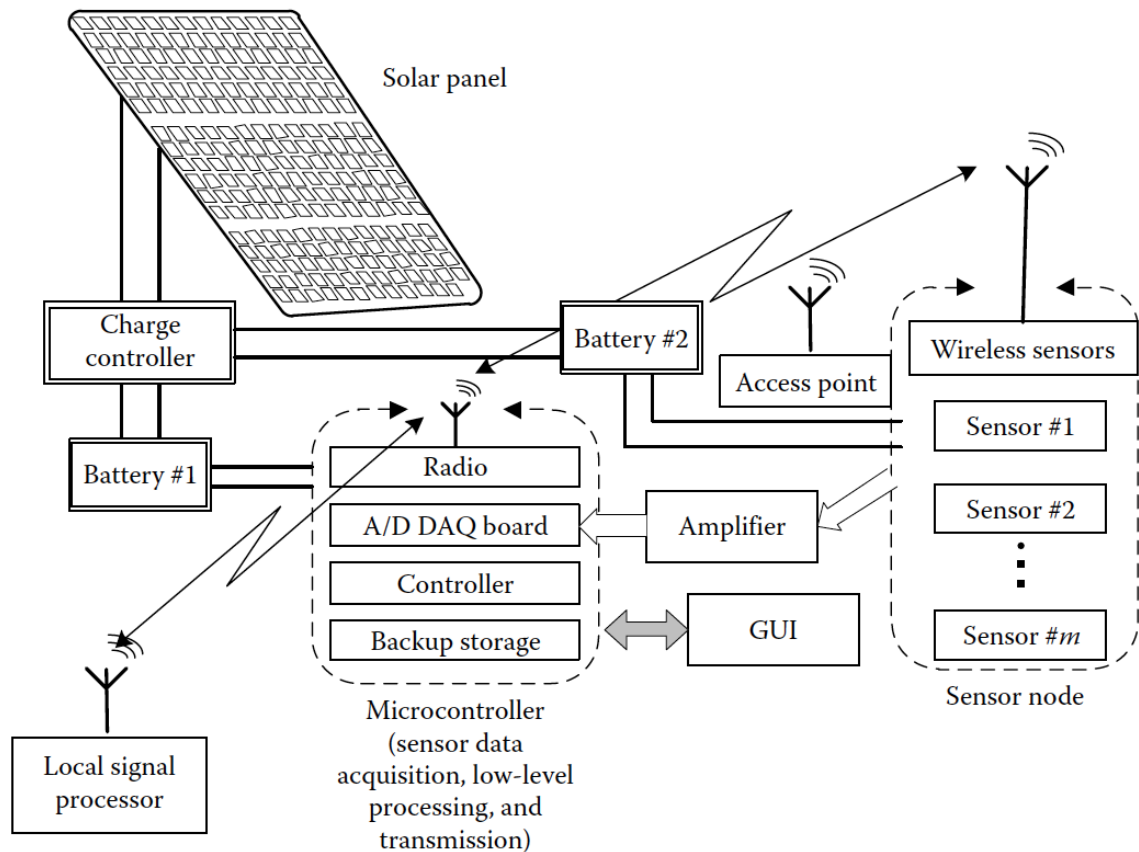
Los sensores y transductores son cruciales para instrumentar un sistema de ingeniería. Los sensores se pueden usar en un sistema de ingeniería para una variedad de propósitos. **Esencialmente, se necesitan sensores para monitorear y aprender sobre el sistema.** Este conocimiento será útil en muchos tipos de aplicaciones, por mencionar algunas tenemos

¹Las dendritas son prolongaciones protoplásmicas ramificadas, bastante cortas de la neurona, dedicadas principalmente a la recepción de estímulos. Son terminales de las neuronas; y sirven como receptores de impulsos nerviosos provenientes desde un axón perteneciente a otra neurona

²El concepto de axón se emplea en el ámbito de la biología para denominar a la continuación muy delgada de una neurona, mediante la cual esta célula envía los impulsos nerviosos hacia otros tipos de células

- I) Monitoreo de procesos.
- II) Operar o controlar un sistema.
- III) Modelado experimental (es decir, identificación del modelo).
- IV) Pruebas y calificación del producto.
- v) Evaluación de la calidad del producto.
- VI) Predicción, detección y diagnóstico de fallos.
- VII) Generación de alarmas y avisos.
- VIII) Vigilancia.

Ejemplo: Para recalcar la importancia de los sensores, a continuación describiremos su uso en el proceso de monitoreo de la calidad de agua.



La calidad del agua potable (local) se mide utilizando varios nodos de sensores que se distribuyen en una gran área geográfica. Los datos ad-

quiridos de un nodo (sensor) se pueden condicionar localmente y luego transmitir a un servidor central, que alberga la plataforma de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) para el monitoreo de la calidad y la evaluación del agua potable. El marco del sistema se muestra en la figura anterior. En esta plataforma, la calidad del agua se detecta a través de un conjunto de nodos de sensores distribuidos geográficamente.

Los sensores de temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica están disponibles comercialmente y se utilizan en el monitoreo de la calidad del agua. Se uti-

liza un microcontrolador para la adquisición de datos del sensor en cada nodo del sensor (SN). El microcontrolador lleva a cabo un procesamiento de bajo nivel de datos sensoriales (por ejemplo, filtrado, amplificación y representación digital) antes de transmitir los datos a través de un radio transmisor a una computadora poderosa llamada procesador de señal local (LSP) en una instalación bien mantenida. En el LSP, los datos recibidos se someten a un alto nivel de procesamiento y compresión de datos, y posteriormente se transmiten a través de Internet a una computadora central llamada unidad central de evaluación (CAU). La CAU es una unidad de toma de decisiones basada en el conocimiento, que evalúa los datos de diferentes ubicaciones geográficas de manera temporal. Sobre la base de la evaluación, la CAU proporciona avisos, alarmas, tendencias y otra información útil sobre la calidad del agua en varios lugares, y también proporciona justificación y explicaciones de estas decisiones. Además, la CAU optimiza el funcionamiento de la plataforma de TIC para que los resultados del sistema sean más precisos, uniformes y efectivos.

Un **Transductor** es un dispositivo que convierte una señal de una forma física a una señal correspondiente que tiene una forma física diferente. **En otras palabras es un convertidor de energía.** Estó significa que la señal de entrada siempre tiene energía o fuerza. Entonces, ya que existen **seis diferentes formas de señales: mecánica, térmica, magnética, eléctrica, quí-**

mica y radiación (electromagnéticas, incluyendo luz), cualquier dispositivo que convierta señales de un tipo a señales de otro tipo es un transductor.

Una de las tareas más importantes en sistemas autónomos de cualquier tipo, es la adquisición de información del medio que lo rodea. Lo cual se puede lograr tomando mediciones por medio del uso de sensores, de esta forma, se extrae la información más importante y relevante de estas mediciones.

Los dispositivos que ofrecen una señal eléctrica como salida son llamados sensores. Muchos sistemas de medición usan señales eléctricas y por lo tanto recaen en los sensores. Sistemas de medición electrónico proporcionan las siguientes ventajas:

- I) Sensores pueden ser diseñados para cualquier cantidad no eléctrica, seleccionando un material apropiado. **Cualquier variación en un parámetro no eléctrico** implica una variación en parámetros eléctricos debido a la estructura electrónica del material.
- II) Hay una variedad de circuitos integrados disponibles para el acondicionamiento o modificación de señales eléctricas. Algunos sensores integran estos acondicionadores en un solo paquete.
- III) Transmisión de señales es más versátil para señales eléctricas. señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas pueden ser apropiadas en algunas circunstancias, pero señales eléctricas prevalecen sobre ellas.

Sensores y transductores son algunas veces usados como sinónimos. Sin embargo, un sensor sugiere la extensión de nuestra capacidad para adquirir información sobre cantidades físicas no percibidas por los sentidos humanos debido a su naturaleza subliminal o minúscula. **Entonces, tenemos que un sensor puede no ser un transductor, ya que puede ser concretamente definido el término sensor a aquel proceso de convertir cualquier señal externa a una señal eléctrica.**

Sensores

Existe una amplia variedad de sensores usados en sistemas autónomos, algunos de ellos son usados para medir simples valores como la temperatura interna de la parte electrónica del sistema, hasta los más sofisticados y complejos, los cuales pueden adquirir información precisa del mundo que los rodea ó medir directamente la posición global respecto a un sistema de referencias universal. Así, para estudiar a los sensores, es necesario clasificarlos de acuerdo a dos importantes ejes funcionales: **propioceptivo / exteroceptivo y pasivos/activos**.

Los sensores **proprioceptivos (PC)** miden valores internos del sistema, por ejemplo en un robot móvil sería la velocidad del motor, carga de la rueda, ángulos de la articulación del brazo de un robot o el voltaje de la batería.

Los sensores **exteroceptivos (EC)** adquieren información del entorno del sistema. Por ejemplo, mediciones de distancia, intensidad de luz, amplitud de sonido. Por lo tanto, las medidas del sensor exteroceptivo son interpretadas por el sistema para extraer características ambientales significativas.

Los sensores **pasivos (P)** miden la energía del ambiente que entra en el sensor. Ejemplos de sensores pasivos incluyen sondas de temperatura, micrófonos y fotoresistencias.

Los sensores **activos (A)** emiten energía al medio ambiente, luego miden la reacción ambiental. Debido a que los sensores activos pueden administrar más interacciones controladas con el medio ambiente, a menudo alcanzan un rendimiento superior. Sin embargo, la detección activa presenta varios riesgos: la energía de salida puede afectar las mismas características que el sensor está intentando medir. Además, un sensor activo puede

sufrir interferencia entre su señal y aquellas fuera de su control. Por ejemplo, las señales emitidas por otros robots cercanos, o sensores similares en el mismo robot, pueden influir en las mediciones resultantes. Ejemplos de sensores activos incluyen, sensores ultrasónicos, sensores capacitivos y sensores infrarrojos, entre otros.

La siguiente tabla proporciona una clasificación de los sensores más usados en aplicaciones robóticas.

General classification (typical use)	Sensor Sensor System	PC or EC	A or P
Tactile sensors (detection of physical contact or closeness; security switches)	Contact switches, bumpers	EC	P
	Optical barriers	EC	A
	Noncontact proximity sensors	EC	A
Wheel/motor sensors (wheel/motor speed and position)	Brush encoders	PC	P
	Potentiometers	PC	P
	Synchros, resolvers	PC	A
	Optical encoders	PC	A
	Magnetic encoders	PC	A
	Inductive encoders	PC	A
	Capacitive encoders	PC	A
Heading sensors (orientation of the robot in relation to a fixed reference frame)	Compass	EC	P
	Gyroscopes	PC	P
	Inclinometers	EC	A/P
Ground-based beacons (localization in a fixed reference frame)	GPS	EC	A
	Active optical or RF beacons	EC	A
	Active ultrasonic beacons	EC	A
	Reflective beacons	EC	A
Active ranging (reflectivity, time-of-flight, and geo- metric triangulation)	Reflectivity sensors	EC	A
	Ultrasonic sensor	EC	A
	Laser rangefinder	EC	A
	Optical triangulation (1D)	EC	A
	Structured light (2D)	EC	A
Motion/speed sensors (speed relative to fixed or moving objects)	Doppler radar	EC	A
	Doppler sound	EC	A
Vision-based sensors (visual ranging, whole-image analy- sis, segmentation, object recognition)	CCD/CMOS camera(s) Visual ranging packages Object tracking packages	EC	P

A, active; P, passive; P/A, passive/active; PC, proprioceptive; EC, exteroceptive.

Los sensores varían mucho en sus características de rendimiento. Algunos sensores proporcionan una precisión extrema en entornos de laboratorio bien controlados, pero sus errores aumentan cuando se someten a variaciones ambientales del mundo real. Otros sensores proporcionan datos estrechos y de alta *precisión* en una amplia variedad de configuraciones. Para cuantificar tales características de desempeño, primero definimos formalmente la terminología del *desempeño* del sensor.

Índice básico de respuesta de un sensor

Una serie de características de los sensores se pueden evaluar cuantitativamente en un entorno de laboratorio. Dichas evaluaciones de rendimiento serán necesariamente los mejores casos cuando el sensor se coloca en un robot del mundo real, pero no son necesariamente las mejores, sin embargo resultan ser útiles.

Rango dinámico se utiliza para medir la extensión entre los límites inferiores y superiores de los valores de entrada al sensor mientras se mantiene **el funcionamiento normal del sensor**. Formalmente, **el rango dinámico es la relación entre el valor de entrada máximo y el valor mínimo de entrada medible**. Debido a que esta relación bruta puede ser difícil de manejar, por lo general se mide en decibels, que se calculan como diez veces el logaritmo común de la gama dinámica. Sin embargo, hay una confusión potencial en el cálculo de los decibels, que están destinados a medir el ratio entre fuerzas, como vatios (potencia) o caballos de fuerza.

De esta forma, podemos decir que: El decibelio o decibel, con símbolo dB, expresa una relación entre cantidades y no una cantidad. El decibel expresa cuantas veces más o cuantas veces menos, pero no la cantidad exacta. Es una expresión que no es lineal, sino logarítmica. Es una unidad

de medida relativa. En audiofrecuencias un cambio de 1 decibel (dB) es apenas (si hay suerte) notado.

Si se tiene dos valores de potencia diferentes: P_1 y P_2 , y se desea saber cuál es el cambio de una con respecto a la otra, se utiliza la siguiente fórmula:

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

Ahora, si se tienen voltajes, nosotros tenemos que voltaje no es una unidad de potencia, pero el cuadrado del voltaje es proporcional a la potencia, entonces se usa

$$dB = 20 \log \frac{V_1}{V_2}$$

Suponga que su sensor mide la corriente del motor y puede registrar valores de un mínimo de 1 mA a 20 Amperios. El rango dinámico de este sensor de corriente es de 43dB. Ahora, suponiendo que se tiene un sensor de voltaje y mide valores entre 1mv y 20v se tiene que el rango dinámico es de 86dB.

Rango también es una clasificación importante en aplicaciones, ya que los sensores frecuentemente operan en ambientes donde son regularmente expuestos a valores de entrada más allá de su rango de trabajo. En estos casos, es fundamental comprender cómo reaccionará el sensor. Por ejemplo, un sensor sonar, puede proporcionar datos falsos cuando se toman mediciones con el objeto más próximo que ese mínimo.

Resolución: Es la diferencia mínima entre dos valores que pueden ser detectados por un sensor. Normalmente, el límite inferior del rango dinámico de un sensor es igual a su resolución. Sin embargo, en el caso de sensores digitales, esto no es necesariamente así. Por ejemplo, suponga que

se tiene un sensor que mide el voltaje, realiza una conversión analógica a digital (A / D) y la salida lo convierte como un número de 8 bits que corresponde linealmente entre 0 y 5 V. Si este sensor es verdaderamente lineal, entonces tiene $2^8 - 1$ salida totales, o una resolución de $5V/255=20\text{mv}$.

Linealidad: Es una medida importante que gobierna el comportamiento de la señal de salida del sensor a medida que varía la señal de entrada. Las propiedades que rigen un sistema lineal son:

Homogeneidad : Un sistema es homogéneo cuando un cambio en la amplitud de la señal de entrada produce una variación proporcional en la señal de salida. Por ejemplo, si una señal de entrada $x(n)$ produce una señal de salida $y(n)$, una señal de entrada $kx(n)$ dara lugar a una señal de salida $ky(n)$.

Aditividad : Se dice que un sistema es aditivo cuando la señal de salida es igual a la suma de las salidas generadas por diferentes señales de entrada. Por ejemplo si $x_1(n)$ produce $y_1(n)$ y $x_2(n)$ produce $y_2(n)$ entonces $x_1 + x_2$ produce $y_1 + y_2$.

Invariabilidad en el tiempo : Significa que mover la señal de entrada en el tiempo produce un movimiento idéntico en la señal de salida. Entonces si $x(n)$ produce $y(n)$ entonces $x(n + t)$ produce $y(n + t)$.

Rendimiento del sensor en medios reales

Las características de los sensores anteriores pueden medirse razonablemente en un entorno de laboratorio con una extrapolación confiable al rendimiento en el despliegue del mundo real. Sin embargo, no se pueden adquirir de manera fiable una serie de medidas importantes sin una comprensión profunda de la interacción compleja entre todas las características ambientales y los sensores en cuestión. Esto es más relevante para los sensores más sofisticados, incluyendo sensores de alcance activo y sensores de

interpretación visual.

La sensibilidad es una medida del grado en el cual un cambio incremental en la señal de entrada de destino cambia la señal de salida. **La sensibilidad es la relación entre el cambio de la salida y el cambio de la entrada.** Formalmente se puede decir que, para un sensor en el cual la salida y es relacionada al punto x con la ecuación $y = f(x)$, la sensibilidad $S(x_a)$, en el punto x_a es

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a}.$$

Es deseable tener una alta y si es posible una constante sensibilidad en los sensores. De esta forma, para un sensor con respuesta $y = kx + b$ la sensibilidad es $S = k$ para el rango de valores para x donde es aplicable. Para un sensor con respuesta $y = kx^2 + b$ la sensibilidad es $S = 2kx$ y cambiara de un punto a otro sobre el rango de medición.

Sensibilidad cruzada es el término técnico para la sensibilidad a los parámetros ambientales que son contrarios a los parámetros objetivo para el sensor. Por ejemplo, una brújula de puerta de flujo puede demostrar una alta sensibilidad al norte magnético y es por lo tanto de uso para la navegación en robots móviles. Sin embargo, la brújula también demostrará una alta sensibilidad a los materiales de construcción ferrosos, tanto que su sensibilidad cruzada a menudo hace que el sensor sea inútil en algunos ambientes interiores. Alta sensibilidad cruzada de un sensor es generalmente indeseable, especialmente cuando no se puede modelar.

Error de un sensor es definido como la diferencia entre las mediciones de salida del sensor y los valores verdaderos que se miden dentro de un contexto operativo específico. Dado un valor verdadero v y valor medido m , el error se define como $error = m - v$.

La **exactitud** se define como el **grado de conformidad entre la medida del sensor y el valor real (v)**, y se expresa a menudo como una proporción del valor real (por ejemplo, 97.5 % de exactitud). Así, el pequeño error corresponde a una alta exactitud y viceversa:

$$exactitud = 1 - \frac{|error|}{v}$$

Por supuesto, la obtención de la verdad sobre el terreno, puede ser difícil o imposible, y por lo tanto establecer una confiada caracterización de la exactitud del sensor puede ser problemático. Además, es importante distinguir entre dos fuentes de error diferentes:

Los **errores sistemáticos** son causados por factores o procesos que en teoría pueden ser modelados. Estos errores son, por lo tanto, deterministas (es decir, predecibles). Una mala calibración de un sensor láser de telemetría (*Es un sensor basado en la tecnología LIDAR [de los términos “light” y “radar”]. El sensor láser emite un rayo láser sobre el entorno, que rebota sobre los objetos para determinar la distancia a un objeto*), una pendiente no modelada de un suelo de pasillo son algunas de las posibles causas de errores sistemáticos del sensor.

La presencia de errores sistemáticos puede descubrirse midiendo la misma cantidad con dos dispositivos diferentes, utilizando dos métodos diferentes, utilizando las lecturas de dos operadores diferentes o cambiando las condiciones de medición de manera controlada y observando su influencia en los resultados. Para determinar la consistencia de los diferentes resultados es necesario utilizar métodos estadísticos. En cualquier caso, incluso en mediciones de alta precisión, siempre existe el riesgo de que un error sistemático pueda permanecer sin ser detectado. Por lo tanto, el objetivo es tener un riesgo muy bajo de que los grandes errores permanezcan sin ser detectados.

Ejemplo: Con el fin de medir la caída de voltaje a través de una resistencia, consideramos dos métodos: (1) Utilizando un voltímetro, cuya precisión es aproximadamente el 0.1 % de la lectura. (2) Utilizando un amperímetro, cuya precisión es también alrededor del 0.1 % de la lectura. Si la resistencia tiene 0.1 % de tolerancia, qué método es más preciso?

Los **errores aleatorios** no pueden predecirse utilizando un modelo sofisticado ni pueden ser mitigados por una maquinaria de sensores más precisa. Estos errores sólo pueden describirse en términos probabilísticos (estocásticamente). La inestabilidad del tono en una cámara de color, los errores espaciales de alcance y el ruido de nivel negro en una cámara son ejemplos de errores aleatorios.

El error no suministra información sobre la calidad de la medición, es por esto que es necesario relacionarlo con el valor convencionalmente verdadero. Así, tenemos que el error de medición dividido entre un valor verdadero que se denomina como exacto le denominamos **error relativo**.

$$e_{rel} = \frac{error}{v_{exacto}}$$

La **precisión** a menudo se confunde con la exactitud, y ahora tenemos las herramientas para distinguir claramente estos dos términos. Intuitivamente, **la alta precisión se refiere a la reproducibilidad de los resultados del sensor**. Por ejemplo, un sensor que toma lecturas múltiples del mismo estado ambiental tiene una alta precisión si produce la misma salida. En otro ejemplo, varias copias de este sensor que toman lecturas del mismo estado ambiental tienen una alta precisión si sus salidas coinciden. **Sin embargo, la precisión no tiene ninguna influencia en la exactitud de la salida del sensor con respecto al valor real que se está midiendo**. Supongamos que el error aleatorio

de un sensor se caracteriza por algún valor medio μ y una desviación estándar σ . La definición formal de precisión es la relación entre el rango de salida del sensor y la desviación estándar:

$$precisión = \frac{rango}{\sigma}$$

Es importante notar que sólo σ y no μ tiene impacto en la precisión. Por el contrario, el error medio μ es directamente proporcional al error general del sensor e inversamente proporcional a la exactitud del sensor.

Sensores primarios

Los sensores primarios convierten mediciones de cantidades físicas a otras formas. Clasificamos aquí los sensores primarios de acuerdo a su medición. Los dispositivos que tienen salida eléctrica directa son sensores planos y se enuncian a continuación.

- Potenciómetros.
- Sensores de temperatura: Bimetales.
- Sensores de presión.
- Sensores de velocidad de flujo y de caudal.
- Sensores de nivel
- Sensores de fuerza y torque.
- Sensores de velocidad.
- Sensor de ultrasonido y sonido (efecto doppler).
- Visión–Luz estructurada(Sensor 2D)
- Sensores resistivos
 - I) Efecto piezoresistivo (Galgas extensiométricas)
 - II) RTD's

III) Termistores

IV) Magnetoresistencias

V) LDR's

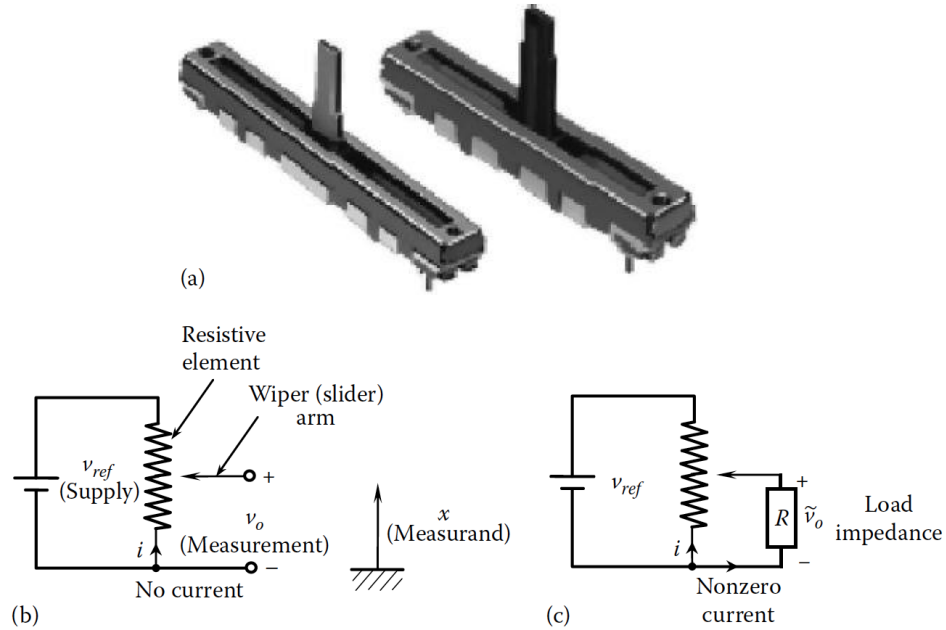
- Sensores capacitivos–Capacitor variable y Capacitor diferencial.
- Sensores inductivos –Reluctancia variable.
- Sensores basados en la Ley de Faraday
- Sensores de efecto Hall

Potenciometros

A pesar de que, inicialmente, un potenciómetro (pot) se usaba principalmente como un dispositivo para suministrar un voltaje variable o una resistencia variable a un circuito o alguna aplicación (girando un botón manualmente), abordaremos su uso como un sensor de desplazamiento. Este es un sensor activo que consiste en una bobina de alambre uniforme o una película de materiales de alta resistencia, como carbono, platino, cermet (elemento de resistencia metálico sobre un sustrato cerámico) o plástico conductor, **cuya resistencia es proporcional a su longitud**. Este principio se puede usar para medir tanto el desplazamiento rectilíneo (con un potenciómetro lineal) como los desplazamientos angulares (utilizando un pot giratorio). En la siguiente figura (a) se muestra un potenciómetro comercial lineal. Se aplica un v_{ref} de voltaje constante a través de la bobina (o película) utilizando una fuente de voltaje de corriente continua (corriente continua). La señal de salida v_o del transductor es la tensión de CC entre el contacto móvil (brazo limpiador o deslizador) que se desliza sobre la bobina y el terminal de tensión de referencia de la bobina, como se muestra esquemáticamente en la figura (b). El desplazamiento del deslizador x es proporcional a la tensión de salida

$$v_o = kx. \quad (1)$$

Errores de carga: la ecuación (1) supone que los terminales de salida están en circuito abierto; es decir, una carga de impedancia infinita (o resistencia en el presente caso de CC) está presente en los terminales de salida, por lo que la corriente de salida es cero. Sin embargo, en la práctica real, la carga eléctrica (los circuitos en los que se alimenta la señal del pot, por ejemplo, los circuitos de acondicionamiento, interconexión, procesamiento o control) tiene una impedancia finita. Por consiguiente, la corriente de salida (la corriente a través de la carga) es distinta de cero, como se muestra en la figura (c). A este fenómeno se le conoce como el efecto de carga del transductor (específicamente, carga eléctrica). En estas

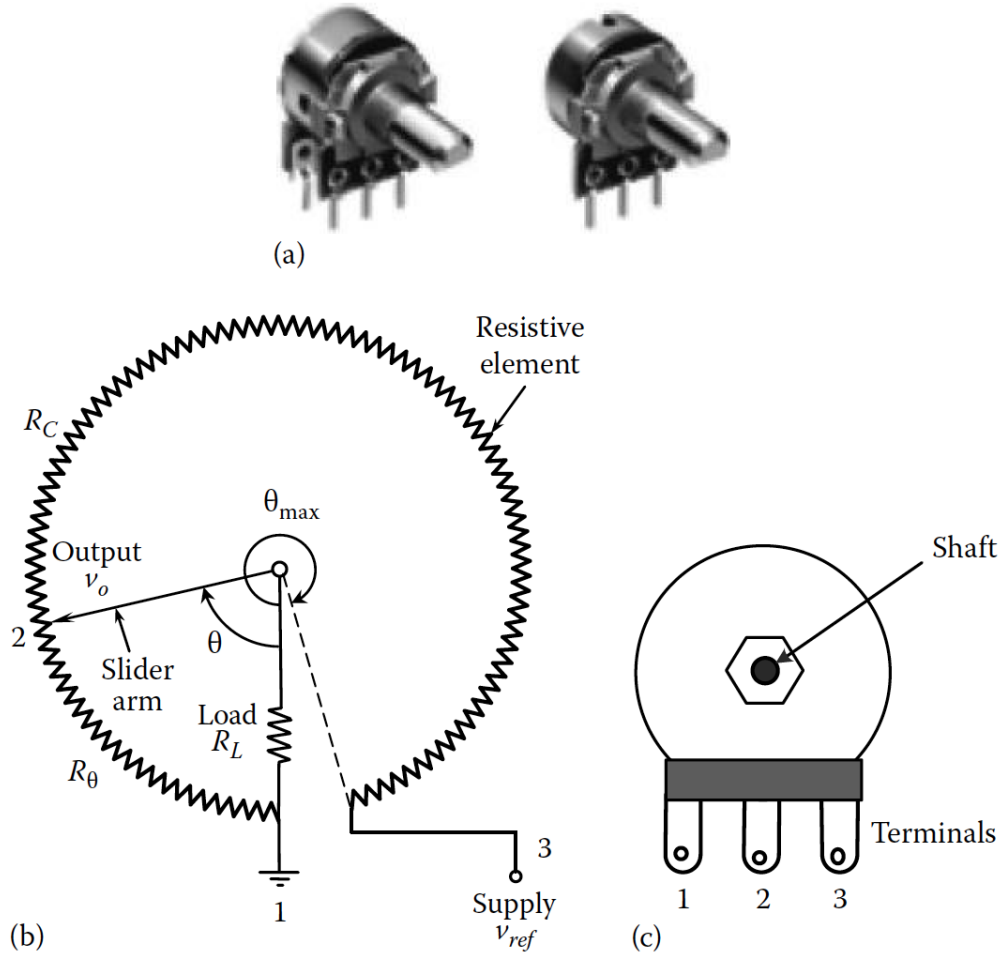


condiciones, la relación lineal dada por (1) ya no sería válida, causando un error en la lectura de desplazamiento.

Potenciómetros Rotatorios

Los potenciómetros que miden los desplazamientos angulares (rotatorios) son más comunes y convenientes, ya que en los diseños convencionales rectilíneos, la longitud del elemento resistivo debe aumentarse en proporción al rango de medición o carrera. Estos elementos resistivos pueden variar desde un valor bajo del orden de $10\ \Omega$ hasta un máximo de $1\ \text{M}\Omega$. La potencia nominal puede ser $10\ \text{mW}$ a varios vatios. Pueden venir en tamaños pequeños (tan pequeños como $5\ \text{mm}$ de diámetro). La figura (a) muestra un pot rotatorio comercial. La Figura (b) muestra un circuito para un “potenciómetro” rotativo y la figura (c) indica el aspecto externo, incluidos los tres terminales, que corresponden a las terminales de voltaje de referencia 1 (tierra) y 3 (voltaje) para alimentar el potenciómetro así como la salida (2) dando la lectura del potenciómetro (en voltios). Los potenciómetros giratorios de tipo hélice están disponibles para medir ángulos absolutos que superan los 360° . La misma función se puede lograr

con un potenciómetro rotatorio de un solo ciclo simplemente al incluir un contador para registrar rotaciones completas de 360^0 .



Tenga en cuenta que los transductores de desplazamiento angular, como los potenciómetros giratorios, se pueden utilizar para medir mayores desplazamientos rectilíneos.

- **Carga no lineal.**

Considere el potenciómetro rotatorio de la figura anterior, veremos la importancia del error no lineal causado por la carga eléctrica de una carga puramente resistiva conectada al pot. Para una posición general θ del brazo deslizando del pot, suponga que la resistencia en el segmento de salida (terminal de extracción 2) de la bobina es R_θ . Suponiendo una

bobina uniforme, uno tiene

$$R_\theta = \frac{\theta}{\theta_{max}} R_c$$

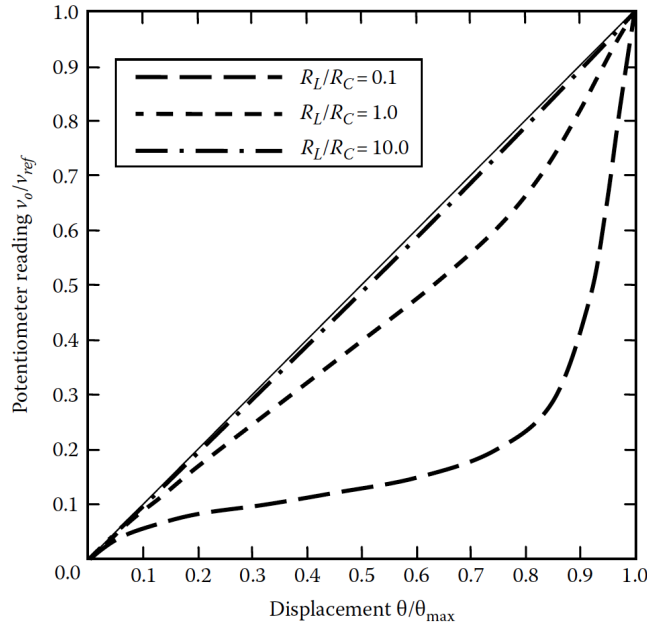
donde R_c es la resistencia total del bobinado del potenciómetro. El balance de corriente en el punto de contacto deslizante (nodo 2) es dado por

$$\frac{v_{ref} - v_0}{R_c - R_\theta} = \frac{v_0}{R_\theta} + \frac{v_0}{R_L}$$

donde R_L es la resistencia de la carga. Utilizando álgebra básica

$$\frac{v_0}{V_{ref}} = \left[\frac{\left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \left(\frac{R_L}{R_c} \right)}{\left(\frac{R_L}{R_c} + \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) - \left(\frac{\theta}{\theta_{max}} \right)^2} \right]$$

El comportamiento de esta ecuación se muestra en la siguiente figura.



Los errores de carga parecen ser grandes para valores grandes de radio $\frac{R_L}{R_c}$. Buena exactitud es posible para $\frac{R_L}{R_c} > 10$, particularmente para valores pequeños de $\frac{\theta}{\theta_{max}}$.

Debe quedar claro que se pueden tomar las siguientes acciones para reducir el error de carga en los potenciómetros:

- Aumentar $\frac{R_L}{R_c}$ (aumente la impedancia de carga, reduzca la impedancia de la bobina)
- Use pot's para medir valores pequeños de $\frac{\theta}{\theta_{max}}$ (o calibre solo un pequeño segmento del elemento de resistencia, para lectura lineal)

El error de carga no lineal se define por

$$e = \frac{\frac{v_0}{v_{ref}} - \frac{\theta}{\theta_{max}}}{\frac{\theta}{\theta_{max}}} 100 \%$$

El error en $\frac{\theta}{\theta_{max}}=0.5$ para valores de radio de resistencia carga se aprecia en la siguiente tabla.

Load Resistance Ratio R_L/R_C	Loading Nonlinearity Error (e) at $\theta/\theta_{max} = 0.5$ (%)
0.1	-71.4
1.0	-20
10.0	-2.4

1. Potenciómetros ópticos

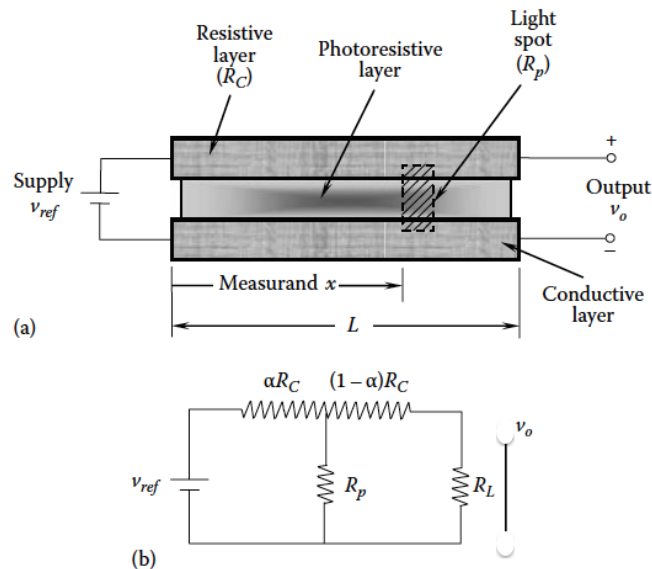
El potenciómetro óptico, que se muestra esquemáticamente en la siguiente figura, es un **sensor de desplazamiento**. Una capa de material fotoresistivo se intercala entre una capa de material resistivo ordinario y una capa de material conductor. La capa de material resistivo tiene una resistencia total de R_c , y es uniforme (es decir, tiene una resistencia constante por unidad de longitud). Esto corresponde a la resistencia del elemento de un potenciómetro convencional. La capa fotorresistente es prácticamente un aislante eléctrico cuando no se proyecta luz sobre ella. El objeto en movimiento, cuyo desplazamiento se mide, hace que se proyecte un haz de luz en movimiento en un área rectangular de la capa fotorresistiva. Esta área activada por la luz alcanza una resistencia de R_p , que une la capa

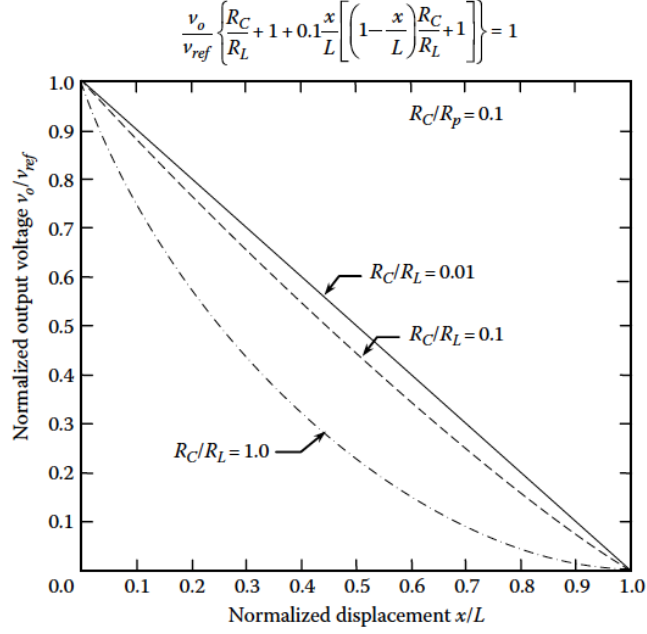
resistiva que está por encima de la capa fotorresistiva y la capa conductora que está por debajo de la capa fotorresistiva. La tensión de alimentación al potenciómetro es v_{ref} , y la longitud de la capa resistiva es L . El punto de luz se proyecta a una distancia x desde el extremo de referencia del elemento resistivo, como se muestra en la figura (a). En la figura (b) se muestra un circuito equivalente para el potenciómetro óptico. Aquí, se supone que hay una carga de resistencia R_L esta presente en la salida del potenciómetro, con v_o como tensión de cruce. La corriente a través de la carga es $\frac{v_o}{R_L}$. Por lo tanto, la caída de tensión en $(1 - \alpha)R_c + R_L$, que también es la tensión en R_p , viene dada por $[(1 - \alpha)R_c + R_L] \frac{v_o}{R_L}$. Tenga en cuenta que $\alpha = \frac{x}{L}$, es la posición fraccionaria del punto de luz. El balance actual en la unión de las tres resistencias en la figura (b) es

$$\frac{v_{ref} - [(1 - \alpha)R_c + R_L]v_o/R_L}{\alpha R_c} = \frac{v_o}{R_L} + \frac{[(1 - \alpha)R_c + R_L]v_o/R_L}{R_p}$$

La cual se puede reescribir como

$$\frac{v_o}{v_{ref}} \left\{ \frac{R_c}{R_L} + 1 + \frac{x}{L} \frac{R_c}{R_p} \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{R_c}{R_L} + 1 \right] \right\} = 1$$

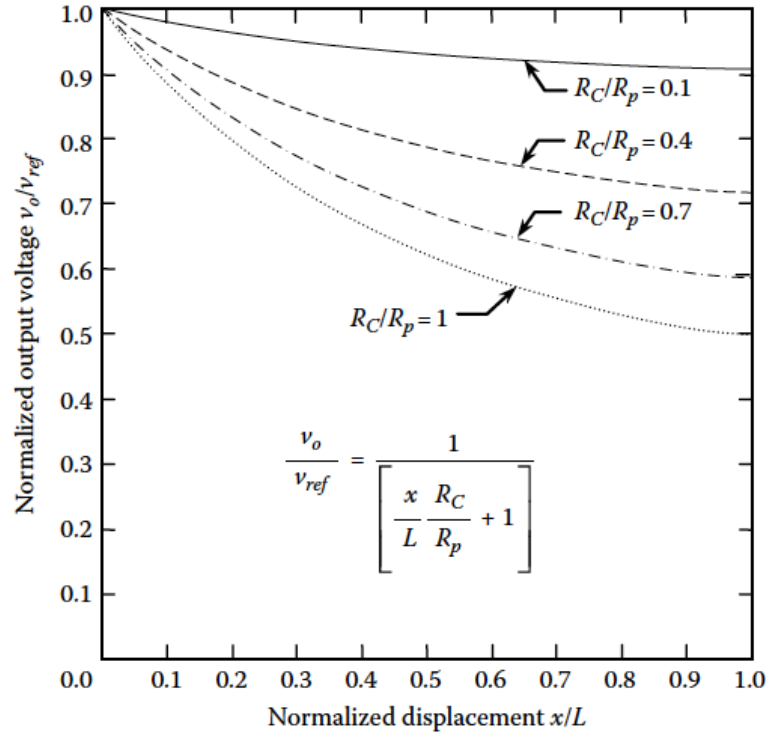




Cuando la resistencia de carga R_L es bastante grande en comparación con la resistencia del elemento R_c , tenemos que $\frac{R_c}{R_L} \approx 0$. Por lo tanto la ecuación anterior llega a ser

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{1}{(x/L)(R_c/R_p) + 1}.$$

Esta relación es todavía no lineal en $\frac{x}{L}$. Sin embargo, la no linealidad disminuye al disminuir $\frac{R_c}{R_p}$. Esto también se ve en la siguiente figura para varios valores de la relación de resistencia de carga. Se ve que, como se esperaba, el comportamiento del potenciómetro óptico se vuelve más lineal para valores más altos de resistencia de carga.



Sensores de capacitancia variable

Los dispositivos de inductancia variable y de capacitancia variable son dispositivos de **reactancia variable**. (Nota: la reactancia de una inductancia L está dada por $j\omega L$ y la de una capacitancia C está dada por $\frac{1}{j\omega C}$, ya que $v(t) = L \frac{di}{dt}$ e $i(t) = C \frac{dv}{dt}$. Por esta razón, los sensores capacitivos entran en la categoría general de transductores reactivos. Normalmente son sensores de alta impedancia, particularmente a bajas frecuencias, como se desprende de la expresión de impedancia (reactancia) de un capacitor. Además, **los sensores capacitivos son dispositivos sin contacto en el uso común**. Requieren hardware específico de acondicionamiento de señal. Además de los sensores capacitivos analógicos, también están disponibles los transductores capacitivos digitales (generadores de pulsos), como los tacómetros digitales. **Un capacitor está formado por dos placas, que pueden almacenar una carga eléctrica**. La carga almacenada genera una diferencia de potencial entre las placas y puede mantenerse utilizando un voltaje externo. La capacitancia C de un capa-

citor de dos placas viene dada por

$$C = \frac{kA}{x}, \quad (2)$$

donde A es el área común (superpuesta) de las dos placas, x es el ancho de la brecha entre las dos placas y k es la constante dieléctrica (o permitividad, $k = \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$; ϵ_r es la permitividad relativa, ϵ_0 la permitividad de un vacío), que depende de las propiedades dieléctricas del medio entre las dos placas.

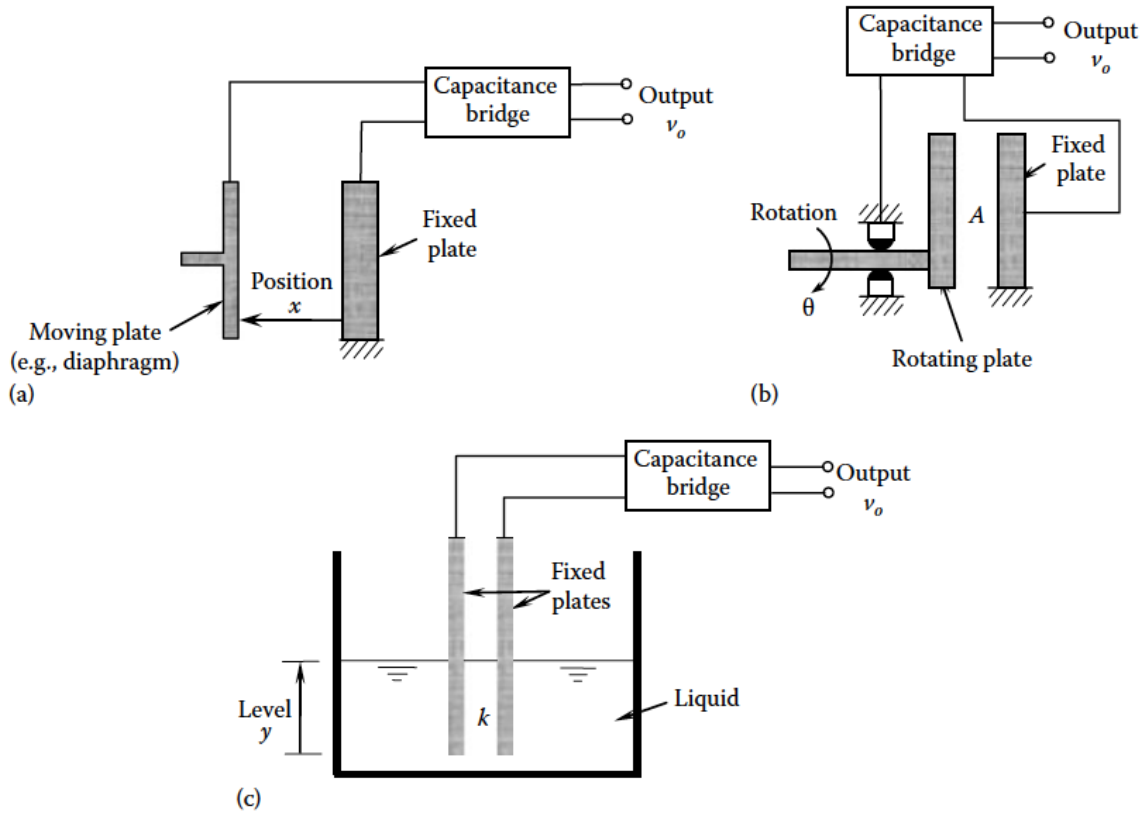
Un cambio en cualquiera de los tres parámetros en (2) se puede usar en el proceso de detección. Para esto, (2) puede escribirse como

$$\ln C = -\ln x + \ln A + \ln k$$

Al tomar los diferenciales de los términos en esta ecuación, tenemos

$$\frac{\delta C}{C} = -\frac{\delta x}{x} + \frac{\delta A}{A} + \frac{\delta k}{k} \quad (3)$$

Este resultado se puede utilizar, por ejemplo, para medir pequeños desplazamientos transversales, grandes rotaciones y grandes niveles de fluidos. Nota: La ecuación (3) es válida solo para pequeños incrementos en x , pero es válida incluso para incrementos grandes de A y k porque la ecuación (2) no es lineal en x , mientras que es lineal en A y k . Los diagramas esquemáticos de los sensores capacitivos que utilizan los cambios en las tres cantidades variables en la ecuación (3) se muestran en la siguiente figura. En la figura (a), un desplazamiento transversal de una de las placas produce un cambio en x . En la figura (b), el desplazamiento angular de una de las placas provoca un cambio en A . Finalmente, en la figura (c), se produce un cambio en k a medida que cambia el nivel de fluido entre las placas de los condensadores. En los tres casos, el cambio asociado en la capacitancia se mide directamente (por ejemplo, utilizando un puente de capacitancia o un circuito oscilador) o indirectamente (por ejemplo, el voltaje de salida de un circuito de puente o un circuito de potenciómetro) y se usa para estimar la medición.



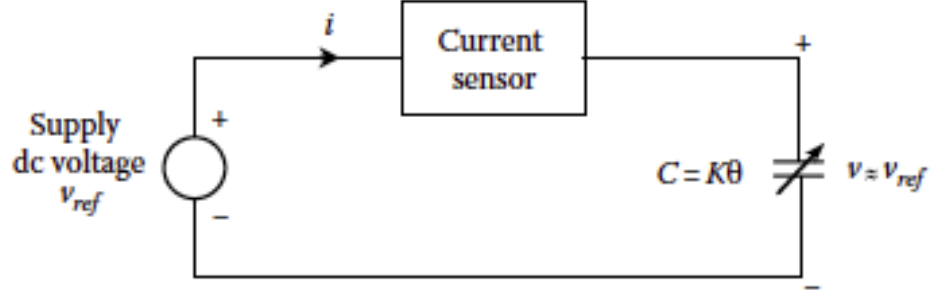
Sensores de rotación capacitiva

En la figura (b), una placa del condensador es (o está unida a) el objeto detectado (eje), que gira. La otra placa se mantiene estacionaria. Como el área común A es proporcional al ángulo de rotación θ , de la ecuación (2), la ecuación del sensor puede escribirse como

$$C = K\theta \quad (4)$$

Aquí, K es la ganancia del sensor. Esta es una relación lineal entre C y θ . El ángulo de rotación θ puede medirse midiendo la capacitancia mediante cualquier método tradicional. Luego, el sensor puede calibrarse linealmente para dar el ángulo de rotación.

El diagrama esquemático para un sensor de velocidad angular que usa un capacitor de placa giratoria se muestra en la siguiente figura. Tiene una tensión de alimentación de corriente continua y un sensor de corriente. Dado que el sensor de corriente debe tener una resistencia insignificante, el



voltaje a través del capacitor es casi igual a v_{ref} , que es constante. De ello se deduce que la corriente en el circuito viene dada por $i = \frac{dCv_{ref}}{dt} = v_{ref} \frac{dC}{dt}$, la cual, en vista de (4) puede ser expresada como

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{i}{Kv_{ref}} \quad (5)$$

Esta es una relación lineal para la velocidad angular en términos de la corriente medida i . Sin embargo, se debe tener cuidado para garantizar que el dispositivo de medición de corriente no interfiera con (por ejemplo, no cargue) el circuito básico.