

Robótica Móvil

Percepción

Taihú Pire

Laboratorio de Robótica

CONICET



C I F A S I S

Tipos de sensores

Propioceptivos (o introceptivos)

Sensores propioceptivos miden valores internos del sistema (robot), por ejemplo, velocidad del motor, carga de la rueda, ángulos de articulación del brazo del robot y voltaje de la batería.

Exteroceptivos

Sensores exteroceptivos adquieren información del entorno del robot, por ejemplo, medidas de distancia, intensidad de la luz y amplitud del sonido. Por lo tanto, el robot interpreta las mediciones de los sensores exteroceptivos para extraer características ambientales significativas.

Pasivos

Los sensores pasivos miden la energía ambiental que ingresa al sensor. Los ejemplos de sensores pasivos incluyen sondas de temperatura, micrófonos y cámaras.

Activos

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

Sensores

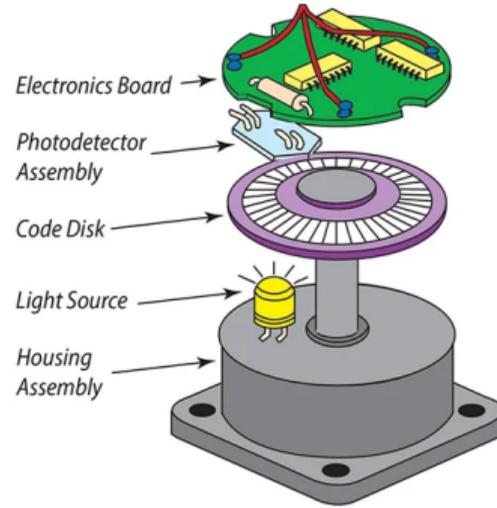
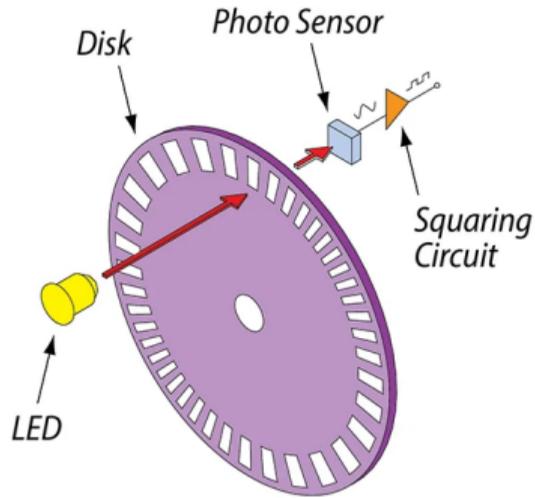
General classification (typical use)	Sensor Sensor System	PC or EC	A or P
Tactile sensors (detection of physical contact or closeness; security switches)	Contact switches, bumpers	EC	P
	Optical barriers	EC	A
	Noncontact proximity sensors	EC	A
Wheel/motor sensors (wheel/motor speed and position)	Brush 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
Acceleration sensor	Accelerometer	PC	P
Ground 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 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.

TODOs generales

agregar a cada sensor una imagen de un sensor real

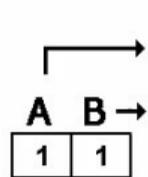
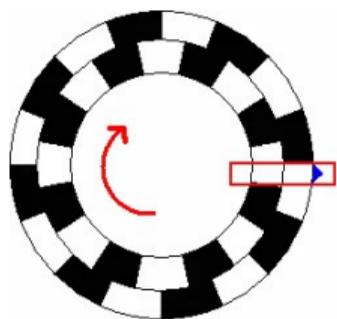
Encoders Ópticos



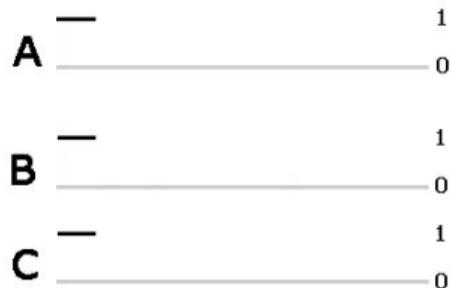
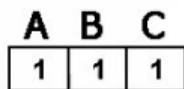
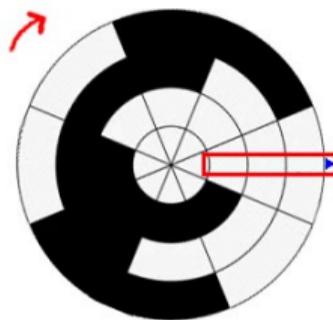
Principio de funcionamiento

A medida que el rotor se mueve, la cantidad de luz que incide en el detector óptico varía según pase o no la luz. La onda sinusoidal resultante se transforma en una onda cuadrada discreta utilizando un umbral para elegir entre estados claros y oscuros.

Encoders Ópticos

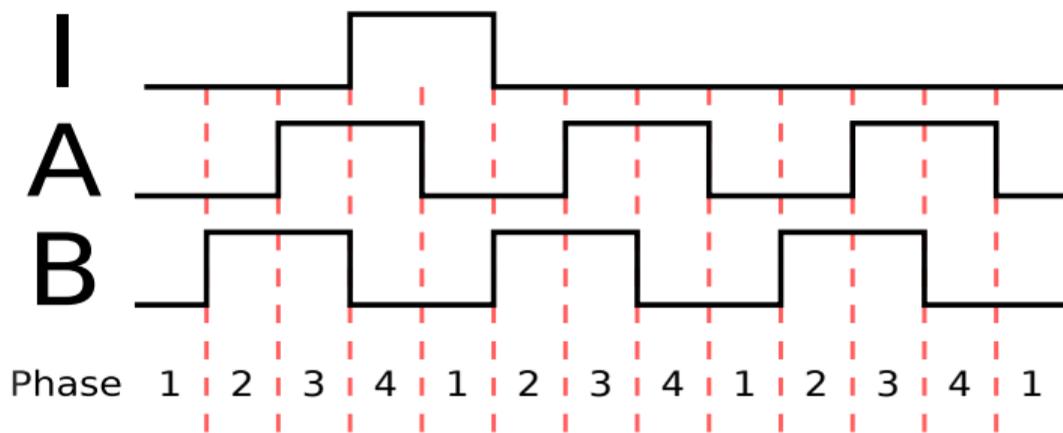
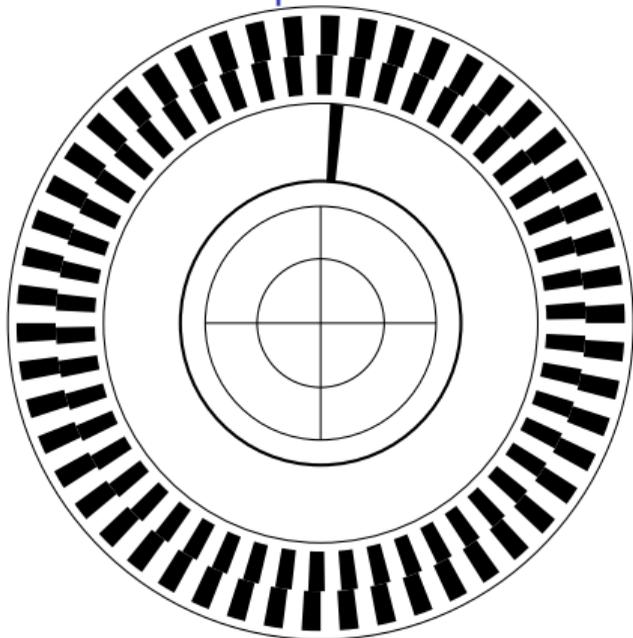


Encoder Incremental



Encoder Absoluto

Encoders Ópticos



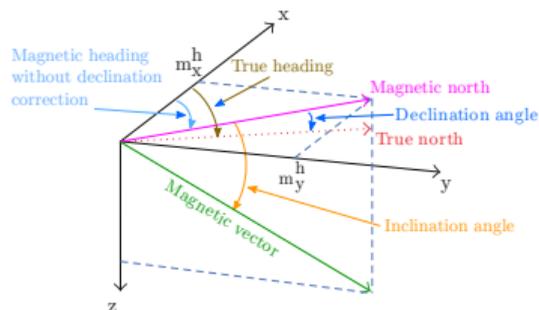
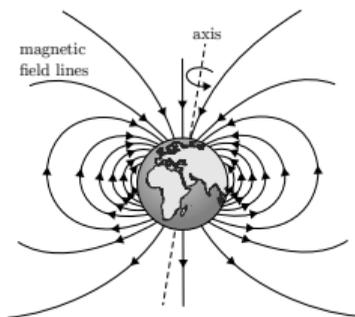
La relación de fase observada entre los trenes de impulsos del canal A y B se utiliza para determinar la dirección de rotación. Una sola ranura en la pista interior genera un pulso de referencia (índice) por revolución.

- ▶ Proprioceptivo
- ▶ La resolución se mide en ciclos por revolución (CPR). Suelen tener 2000 CPR.
- ▶ La odometría basada en encoders acumula error rápidamente por diferencias físicas en las ruedas, deslizamiento o giro en el aire de las ruedas.

Bumper



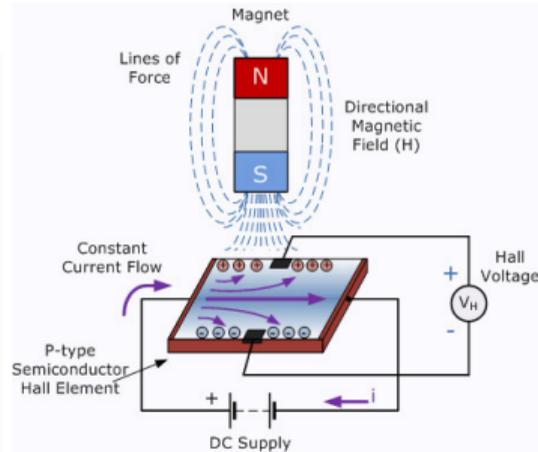
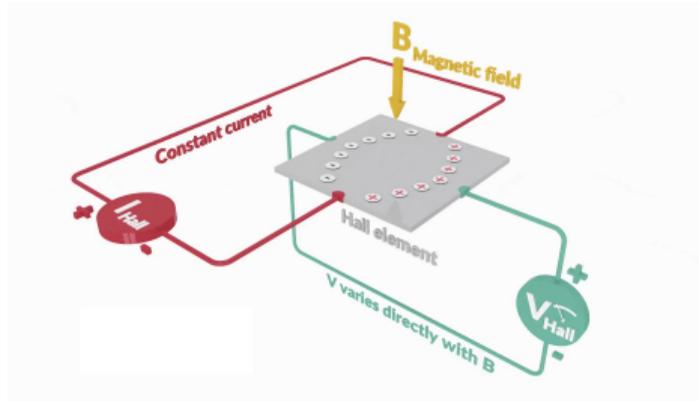
Magnetómetro



Principio de funcionamiento

- ▶ La Tierra es un imán masivo pero débil. Los polos del campo geomagnético son los polos magnéticos Norte y Sur. Los mismos se mueven constantemente y se encuentran a cierta distancia del eje de rotación de la Tierra.
- ▶ En cualquier punto del planeta, las líneas de flujo magnético pueden considerarse un vector \mathbf{m} cuya magnitud y dirección pueden predecirse y trazarse con precisión.
- ▶ Describimos la dirección del vector \mathbf{m} en términos de dos ángulos: **ángulo de Declinación (D)** e **ángulo de Inclinación (I)**.
 - Una proyección horizontal del vector \mathbf{m} apunta en la dirección del norte magnético y el **ángulo de declinación D** se mide desde el norte verdadero, en el sentido de las agujas del reloj hasta esa proyección.
 - El **ángulo de inclinación I** del vector se mide en un plano vertical hacia abajo desde la horizontal hasta \mathbf{m} .
 - La longitud del vector, la **intensidad del campo magnético**, se mide con un magnetómetro en unidades de Tesla (T) y para la Tierra varía de 25 – 65 μT .

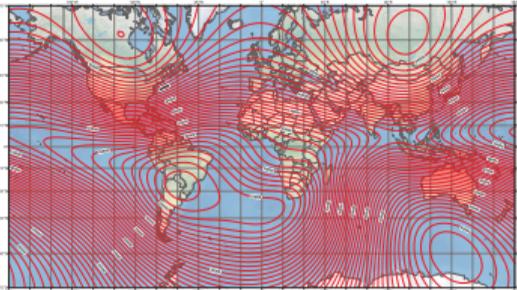
Magnetómetro



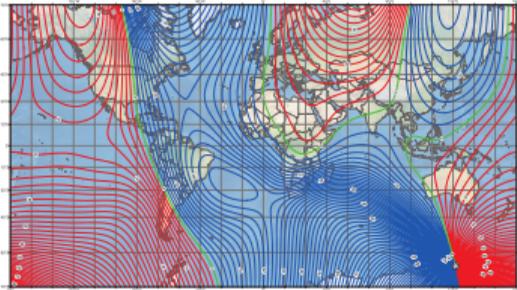
Principio de funcionamiento

- ▶ El elemento clave de la mayoría de los magnetómetros modernos es un **sensor de efecto Hall**, un dispositivo semiconductor que produce un voltaje proporcional a la intensidad del campo magnético en una dirección normal al flujo de corriente.
- ▶ Normalmente, tres sensores de efecto Hall se empaquetan juntos y se disponen de modo que sus ejes sensibles sean ortogonales.
- ▶ Las tres salidas de dicho magnetómetro triaxial son los componentes del vector de intensidad del campo magnético de la Tierra m medido en la estructura del cuerpo B .

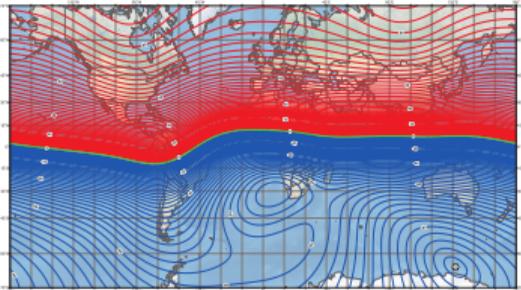
Magnetómetro



Magnetic field intensity

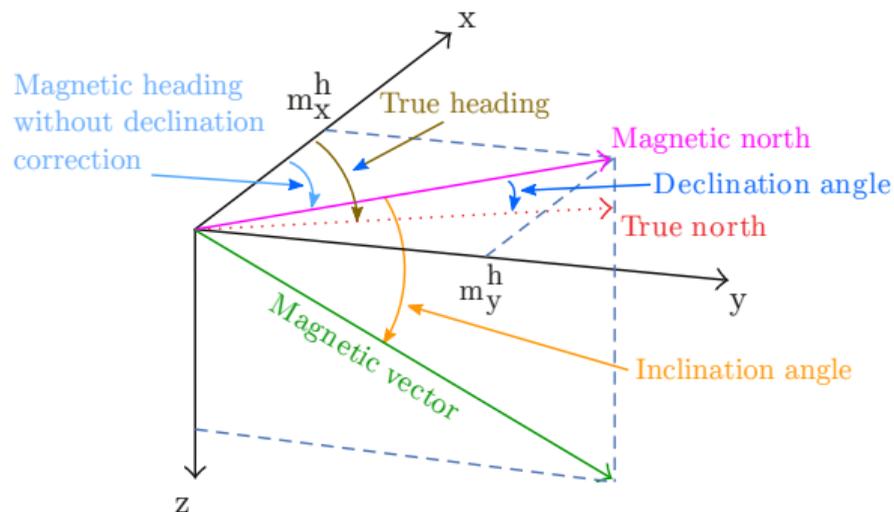


Magnetic declination



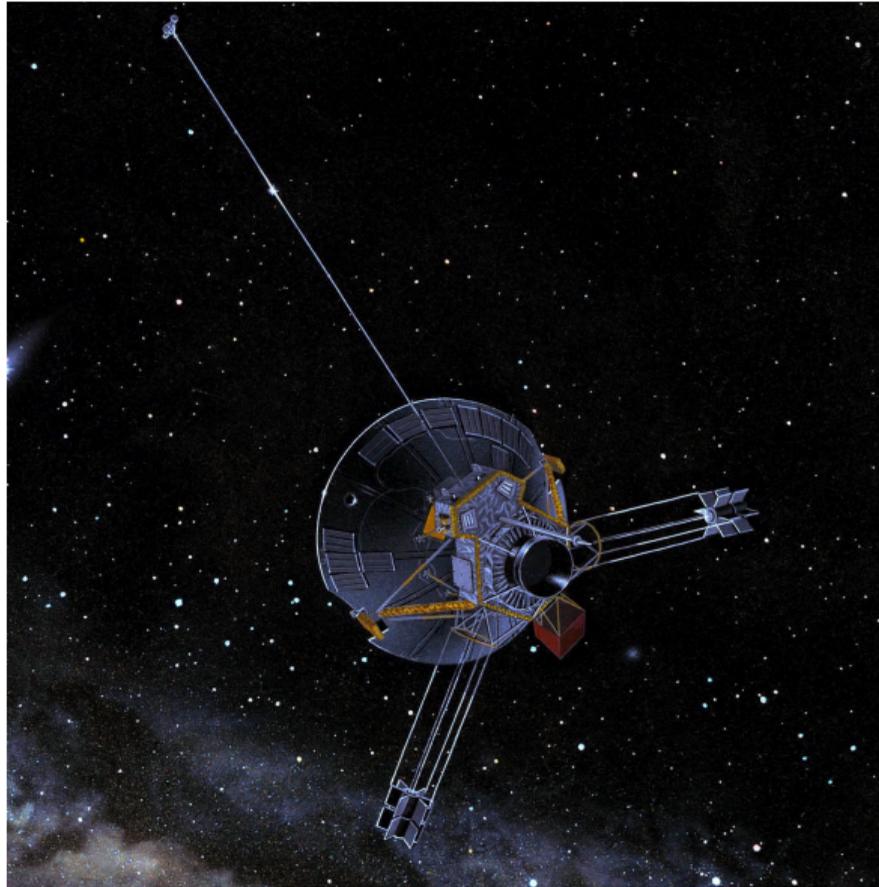
Magnetic inclination

Magnetómetro



- ▶ Exteroceptivo
- ▶ Pasivo
- ▶ Mediciones absolutas
- ▶ Muy ruidoso. Problemas con los componentes propios de los robots (componentes electromagnéticos) y con objetos del entorno materiales ferromagnéticos (estructuras metálicas)

Magnetómetro



Magnetómetro

Considere un marco de coordenadas inerciales $\{0\}$ con su eje z verticalmente hacia arriba y su eje x apuntando hacia el norte magnético. Por lo tanto, el vector de intensidad del campo magnético I se encuentra en el plano xz .

$${}^0\mathbf{m}$$

donde B es la intensidad del campo magnético e I el ángulo de inclinación. En un frame de cuerpo fijo $\{B\}$ en una orientación arbitraria expresada en términos de ángulos de roll-pitch-yaw la intensidad del campo magnético es

$${}^0\mathbf{m} = {}^0\xi_B^{-1}\mathbf{m} \tag{1}$$

donde

$${}^0\xi_B = R_z(\theta_y)R_y(\theta_p)R_x(\theta_r)$$

$${}^0\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix}$$

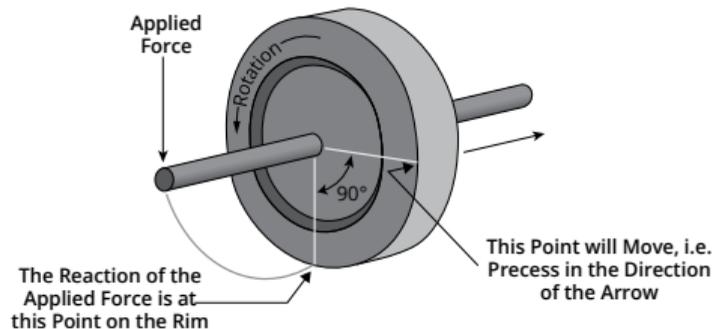
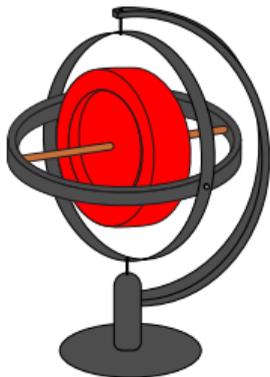
Igualando esta ecuación con 1 podemos despejar el ángulo yaw:

$$\theta_y = \tan^{-1} \frac{\cos \theta_p (m_z \sin \theta_r - m_y \cos \theta_r)}{m_x + B \sin I \sin \theta_p}$$

Definimos el ángulo yaw como la orientación del eje x del marco $\{B\}$ con respecto al norte magnético. Para obtener el ángulo de orientación con respecto al norte verdadero, restamos el ángulo de declinación local:

$${}^{tn}\theta_y = \theta_y - D$$

Giróscopo o Giroscopio Mecánico

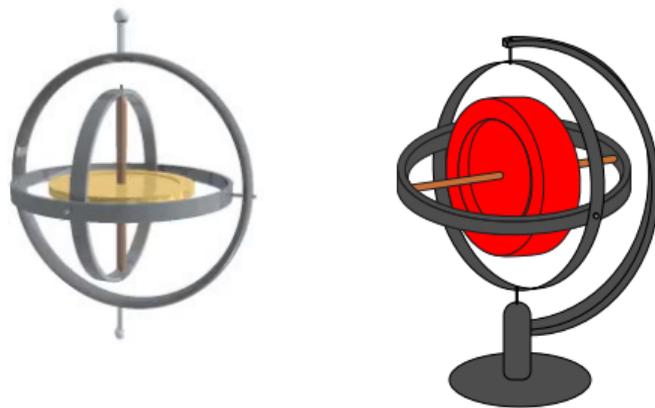


Principio de funcionamiento

- ▶ Un giróscopo mecánico es todo cuerpo simétrico en rotación a una velocidad suficiente como para experimentar los efectos giroscópicos.
- ▶ Los giróscopos mecánicos son dispositivos que miden o mantienen el movimiento de rotación.
- ▶ El Giróscopo Mecánico puede ser utilizado para fijar una **orientación absoluta** haciendo que el disco gire en dicha dirección (utilizando el principio de **Rigidez en el espacio**)
- ▶ El Giróscopo Mecánico puede ser utilizado para medir **velocidad angular** (utilizando el principio giroscópico de **Movimiento de Precesión**)

Ver vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=V6XSsNAWg00> para extraer sub-videos y aplicaciones (orientación)

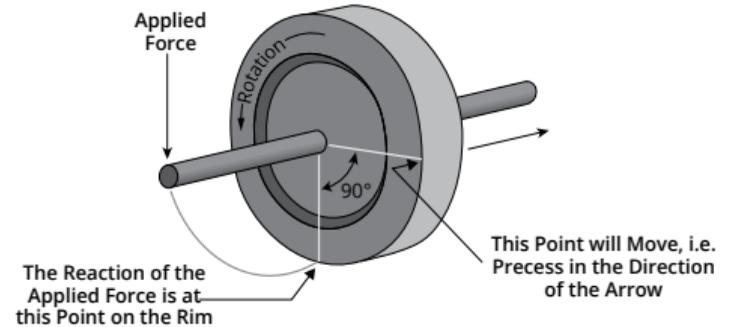
Giróscopo Mecánico: Principios giroscópicos



Rigidez en el espacio

- ▶ Al rotar, un giróscopo permanece en una posición fija en su plano de rotación, independientemente del movimiento de los soportes o el marco.
- ▶ La cantidad de **rigidez** que presenta el giróscopo es directamente proporcional a su velocidad de rotación (RPM) y su momento de inercia.
- ▶ Mayor velocidad de rotación, entonces mayor rigidez en el espacio.
- ▶ Mayor masa y radio efectivo, entonces mayor rigidez en el espacio.

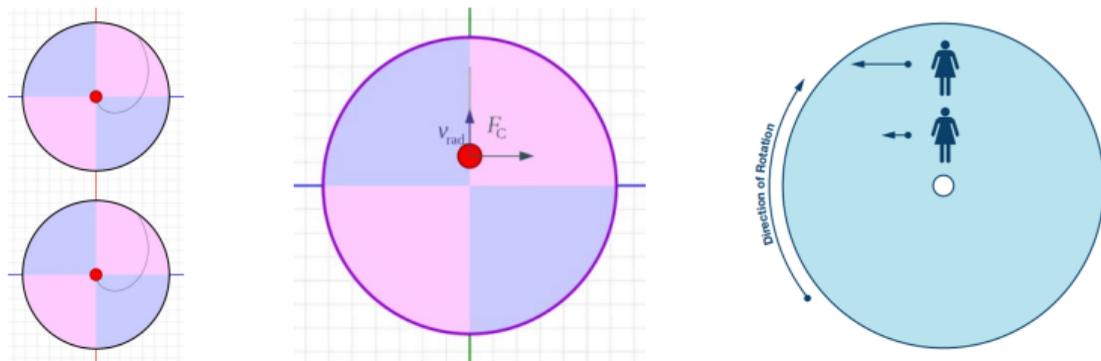
Giróscopo Mecánico: Principios giroscópicos



Movimiento de Precesión

- ▶ Toda fuerza aplicada perpendicularmente sobre el plano de rotación de un giróscopo se verá reflejada a 90° en el sentido de la rotación.
- ▶ La magnitud de la precesión que presenta el giróscopo es directamente proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a la velocidad de rotación (RPM).

Giróscopo MEMS: Aceleración de Coriolis



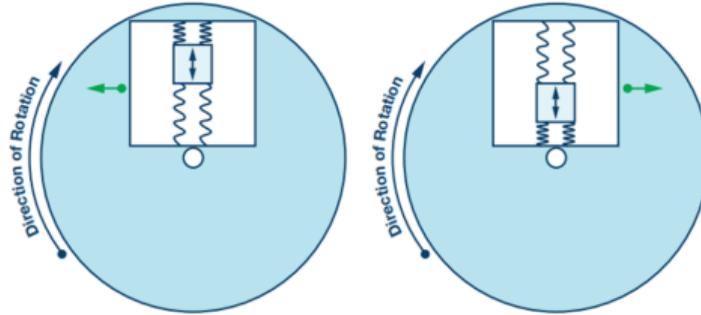
Principio de Funcionamiento

Los giróscopos MEMS utilizan la **fuerza de Coriolis**, fuerza tangencial experimentada por un objeto giratorio en movimiento radial.

Ejemplo de aceleración de Coriolis: Una persona que se mueve hacia el borde exterior Norte de una plataforma giratoria en sentido horario, debe aumentar el componente de velocidad hacia el Oeste (flechas azules) para mantener su rumbo hacia el Norte. La aceleración requerida es la **aceleración de Coriolis**.

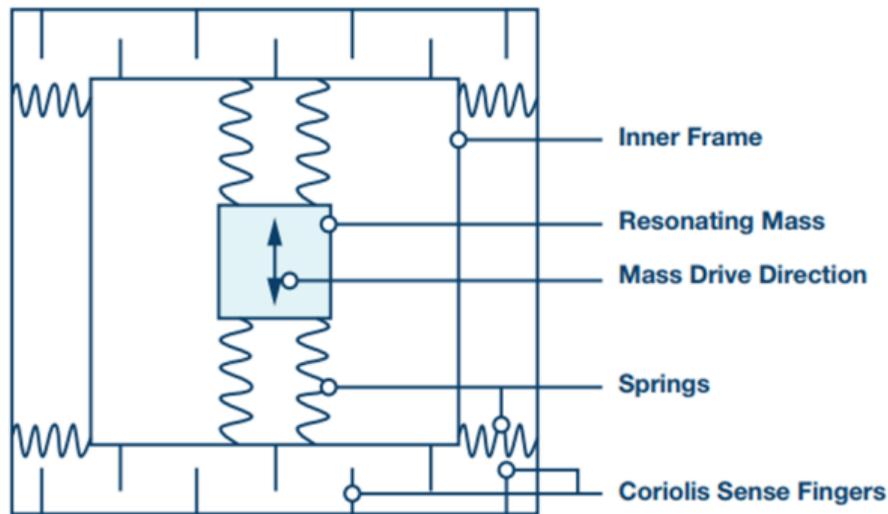
Giróscopo MEMS (Microelectromechanical Systems)

- ▶ Un Giróscopo internamente tiene una masa resonante (vibrando constantemente) dentro de un marco, que permise que solo pueda vibrar en una sola dirección. Este movimiento se convierte en señales eléctricas de muy bajas corrientes que se pueden amplificar para ser leídas por un microcontrolador.



- ▶ Cuando la masa resonante se mueve (o vibra) hacia el borde exterior de la rotación, se acelera hacia la derecha y ejerce sobre el marco una fuerza de reacción hacia la izquierda (flecha verde). Cuando se mueve hacia el centro de la rotación, ejerce una fuerza hacia la derecha (flecha verde).

Giróscopo MEMS (Microelectromechanical Systems)

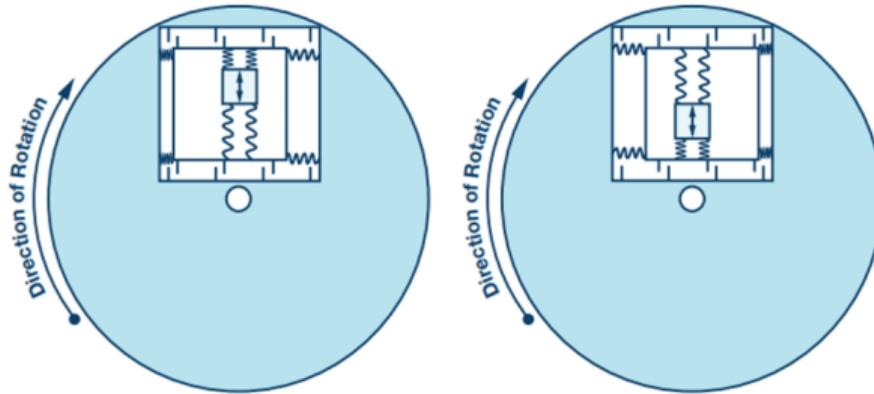


Estructura mecánica de un Giróscopo

- ▶ Para medir la aceleración de Coriolis, el marco que contiene la masa resonante está sujeto a un marco externo por resortes a 90° en relación con el movimiento resonante (de la masa). Esta figura también muestra los “dedos” de detección de Coriolis que se utilizan para detectar el desplazamiento del marco mediante transducción capacitiva en respuesta a la fuerza ejercida por la masa.

Giróscopo MEMS (Microelectromechanical Systems)

- ▶ A medida que la masa resonante se mueve y la superficie en la que está montado el giróscopo gira, la masa y su marco experimentan la aceleración de Coriolis, y se trasladan 90° con respecto al movimiento vibratorio.
- ▶ A medida que aumenta la velocidad de rotación, también aumenta el desplazamiento de la masa y la señal derivada de la capacitancia correspondiente cambia.

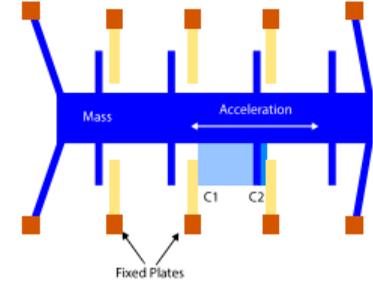
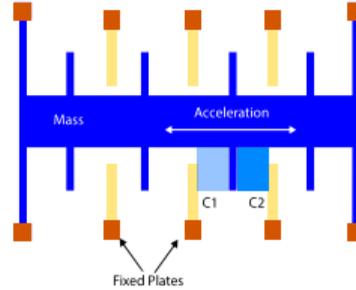
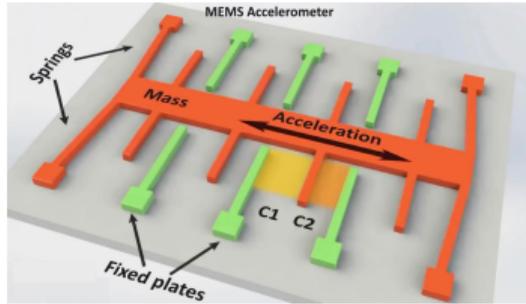


- ▶ Introceptivo
- ▶ Pasivo
- ▶ Mide Velocidad Angular
- ▶ Unidad de medición $^\circ/s$ o Revoluciones por Minuto (RPM)

Giróscopo Óptico: Sagnac Effect

Ver vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=V6XSsNAWg00> para extraer sub-videos y aplicaciones (orientación absoluta y calculo de velocidad de angular) y giróscopo óptico

Acelerómetro

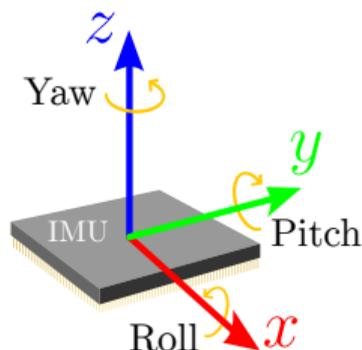


Principio de Funcionamiento

Mide la aceleración midiendo el cambio en la capacitancia. Tiene una masa unida a un resorte que se limita a moverse en una dirección y placas exteriores fijas. Entonces, cuando se aplica una aceleración, la masa se mueve y la capacitancia entre las placas y la masa cambiará. Este cambio de capacitancia es medido, y se corresponde a un valor de aceleración particular.

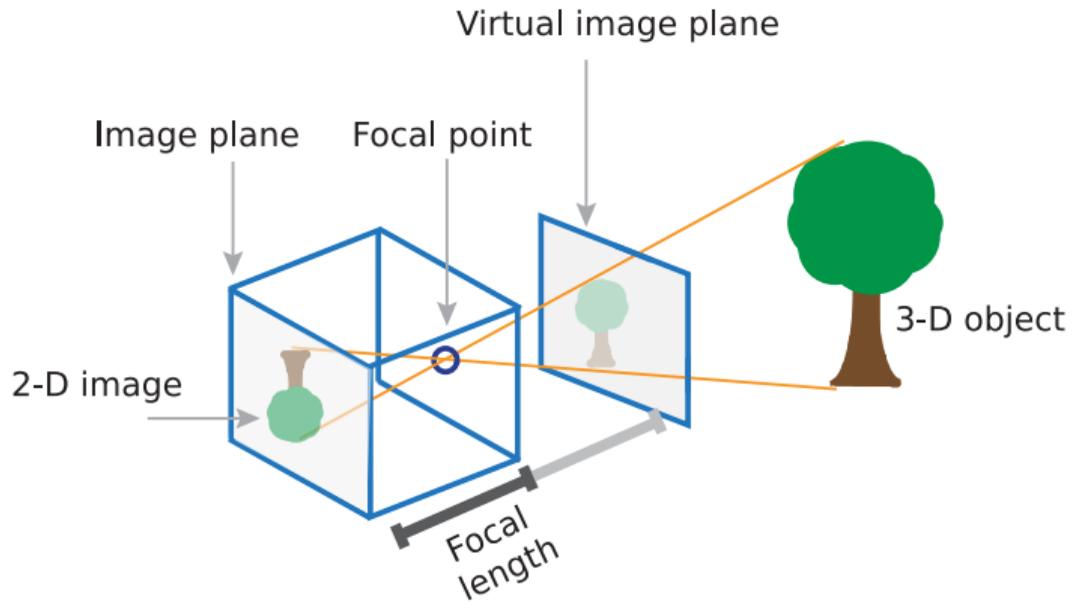
- ▶ Introceptivo
- ▶ Pasivo
- ▶ Mide aceleración
- ▶ Unidad de medición m/s^2

IMU (Inertial Measurement Unit)

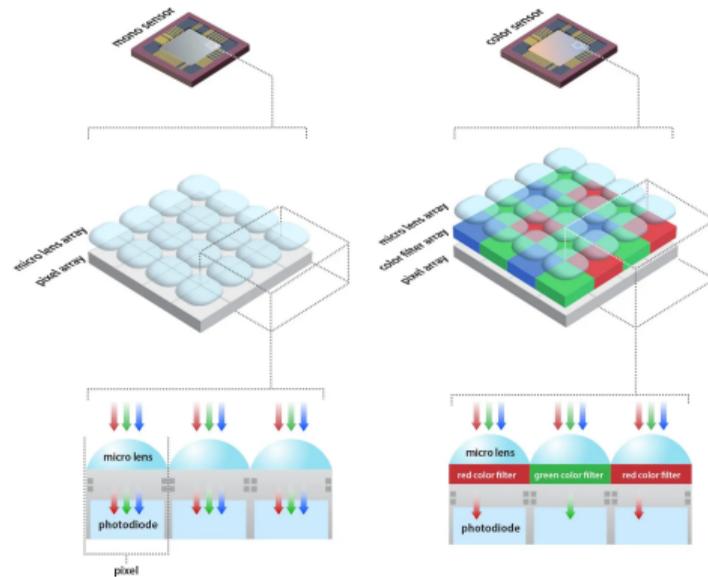
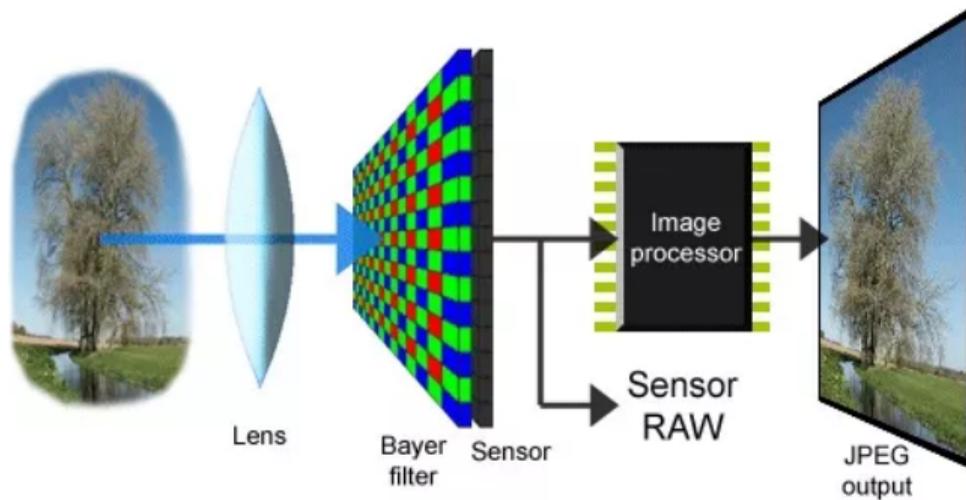


- ▶ 3 giróscopos ortogonales y 3 acelerómetros ortogonales.
- ▶ Permite estimar: posición, orientación, velocidad lineal, velocidad angular y aceleración
- ▶ La orientación se obtiene integrando el giróscopo en el tiempo
- ▶ La velocidad lineal se obtiene integrando el acelerómetro en el tiempo
- ▶ La posición se obtiene integrando la velocidad en el tiempo
- ▶ **Debido a que los datos del acelerómetro se integran dos veces para obtener la posición, cualquier error residual da como resultado un error cuadrático en la posición**
- ▶ Mediciones absolutas (GPS o cámaras) permiten cancelar esta deriva de error.

Modelo de cámara Pinhole



Modelo de cámara Pinhole



- ▶ Exteroceptivo
- ▶ Pasivo
- ▶ Capturan gran cantidad de información (información semántica)
- ▶ Las imágenes presentan blur ante movimientos rápidos o de poca luz
- ▶ Requiere escenas bien iluminadas

Imagen

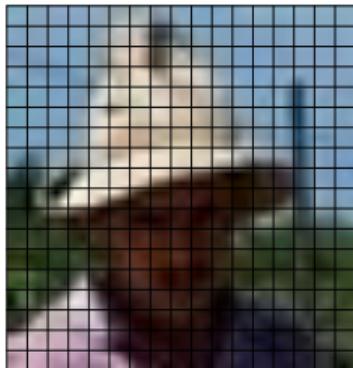
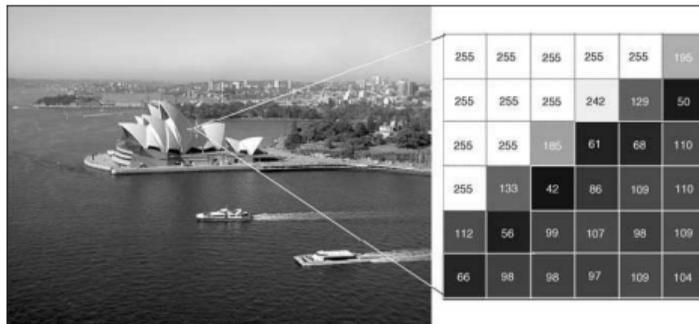
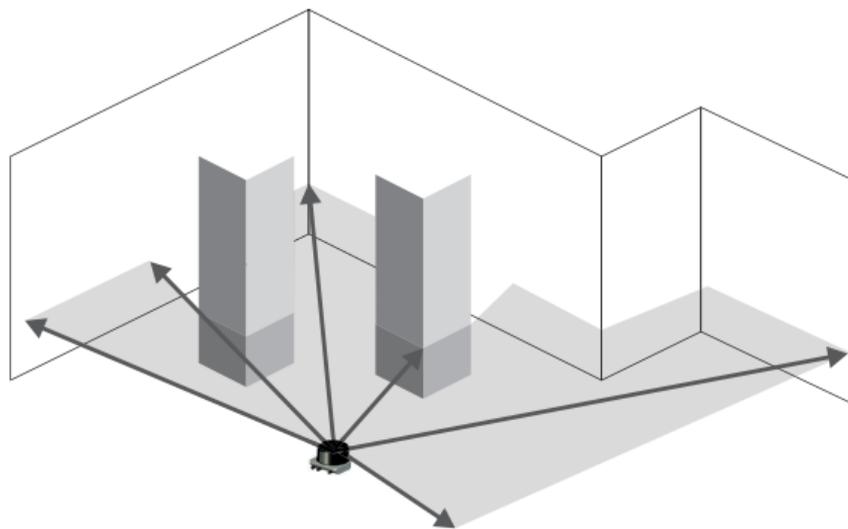
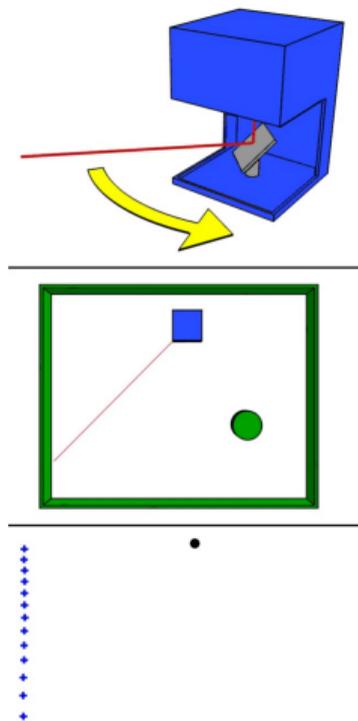


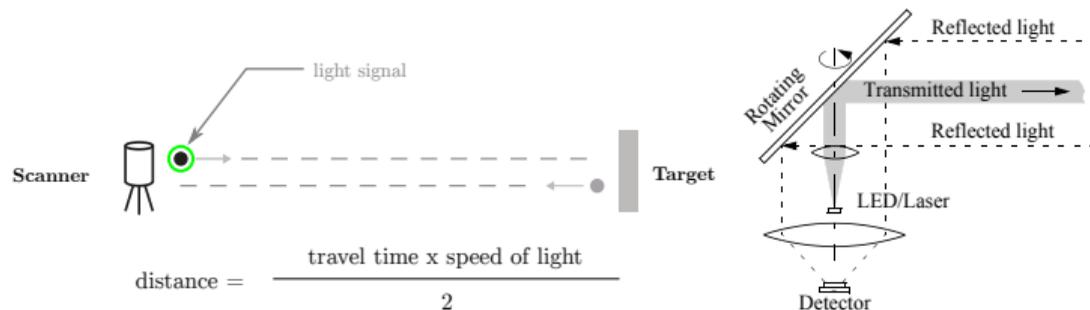
Imagen color tiene 3 canales:
R, G y B.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} r(x, y) \\ g(x, y) \\ b(x, y) \end{bmatrix}$$

LiDAR 2D



LiDAR 2D



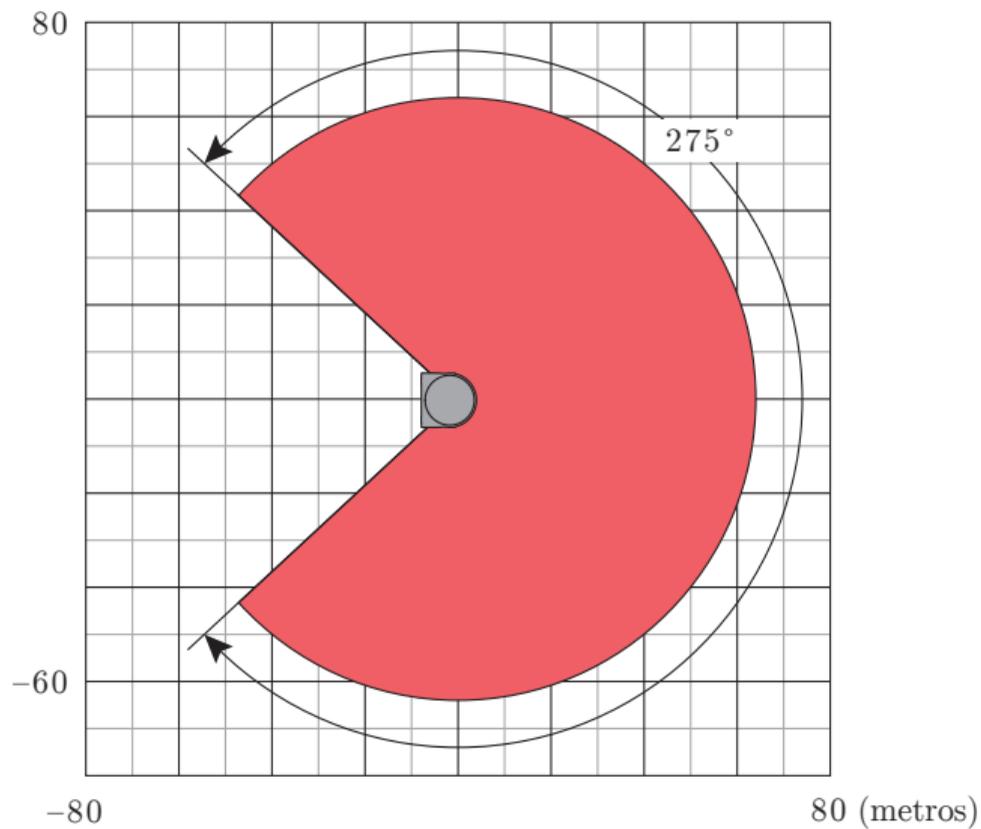
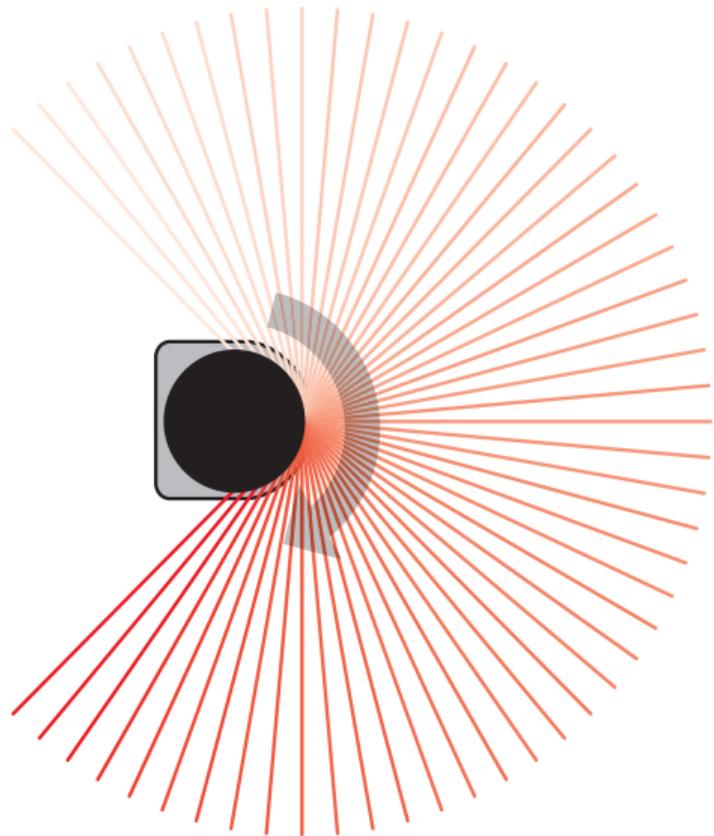
Principio de funcionamiento

Un LiDAR (*Light Detection And Ranging*) o Laser Rangefinder emite pulsos de luz mediante un diodo láser (infrarrojo). Si el rayo láser es reflejado por un objeto, el rayo reflejado es recibido por el sensor.

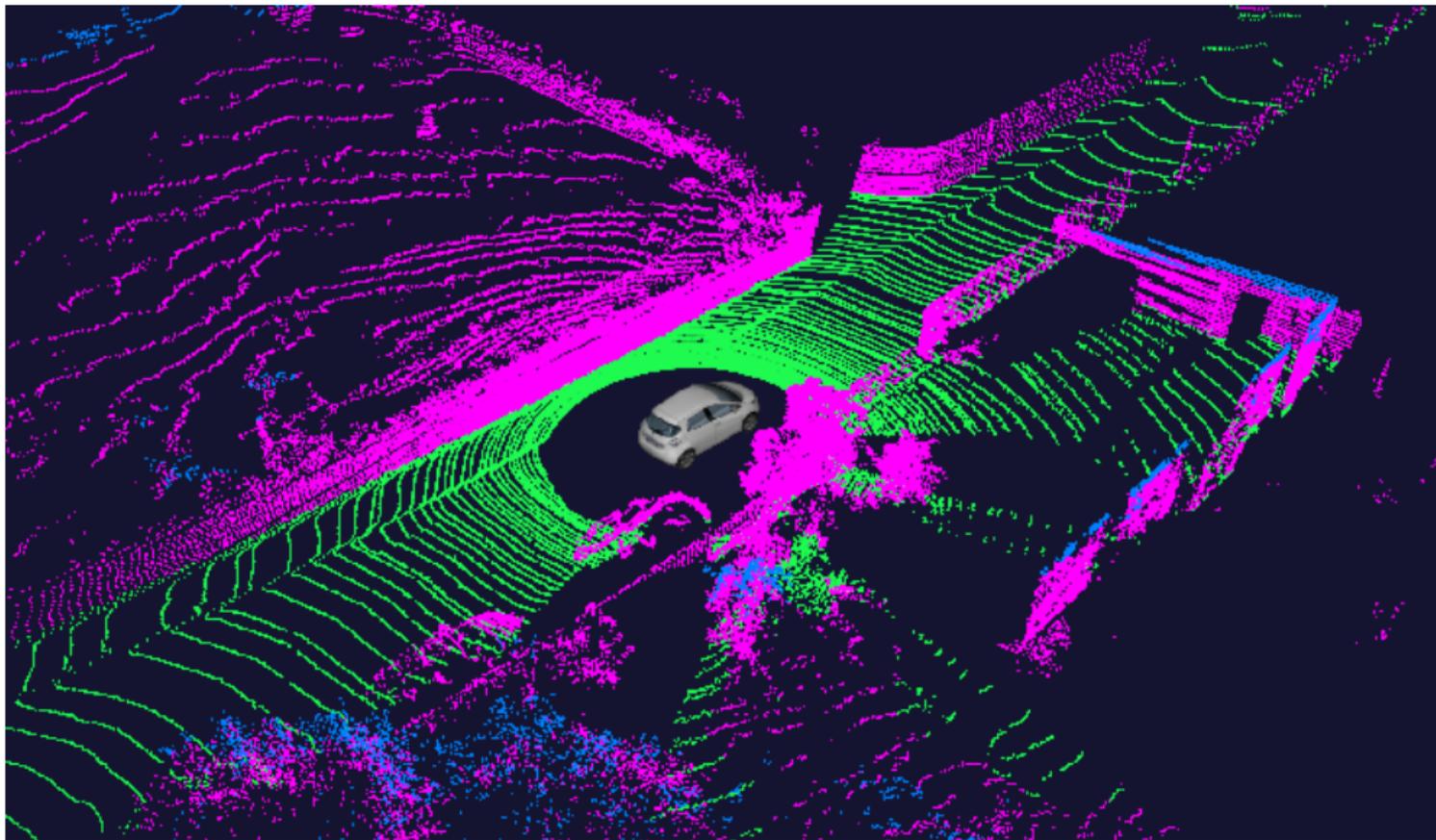
La distancia al objeto se calcula en base al tiempo que el haz de luz pulsada requiere para ser reflejada y recibida por el sensor.

- ▶ Exteroceptivo
- ▶ Activo
- ▶ Mide distancia y ángulo a cada punto (coordenadas polares)
- ▶ Unidad de medición (m, °)

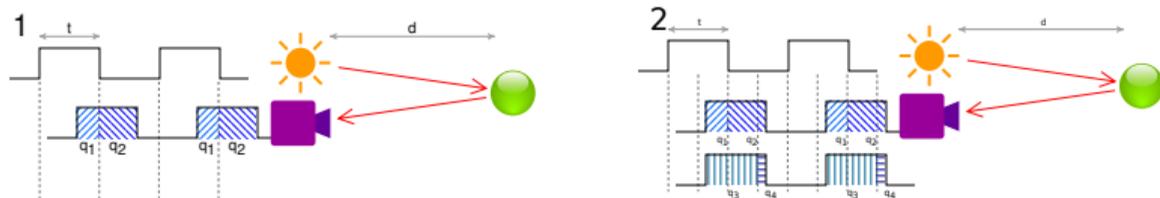
LiDAR 2D



LiDAR 3D



Cámara Time of Flight



Principio de funcionamiento

Funciona de manera similar a un LiDAR con la ventaja de que toda la escena 3D se captura al mismo tiempo y que no hay partes móviles. Este dispositivo utiliza una fuente de luz infrarroja modulada para determinar la distancia en cada píxel de un sensor *Photonic Mixer Device* (PMD). En el método basado en Pulsos (1), la distancia es

$$d = \frac{ct}{2} \frac{q_2}{q_1 + q_2}$$

donde

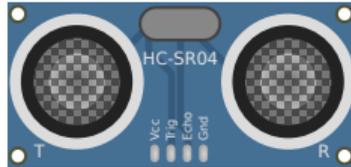
- ▶ c es la velocidad de la luz
- ▶ t es la longitud del pulso
- ▶ q_1 es la carga acumulada en el píxel cuando se emite luz
- ▶ q_2 es la carga acumulada cuando no se emite

En el método de onda continua (2):

$$d = \frac{ct}{2\pi} \arctan \frac{q_3 - q_4}{q_1 - q_2}$$

- ▶ Esteroceptivo
- ▶ Activo
- ▶ La precisión suele estimarse en un 1 % de la distancia medida, suelen tener un frame rate de unos 160 Hz
- ▶ La luz del entorno puede quemar la imagen (requiere píxeles con buen rango dinámico)

Sensor Ultrasónico



Principio de funcionamiento

El principio básico de un sensor ultrasónico es transmitir un paquete de ondas de presión (ultrasónicas) y medir el tiempo que tarda este paquete de ondas en reflejarse y regresar al receptor. La distancia del objeto que causa el reflejo d se puede calcular en función de la velocidad de propagación del sonido c y el tiempo de vuelo t .

$$d = \frac{ct}{2}$$

La velocidad del sonido está dada por

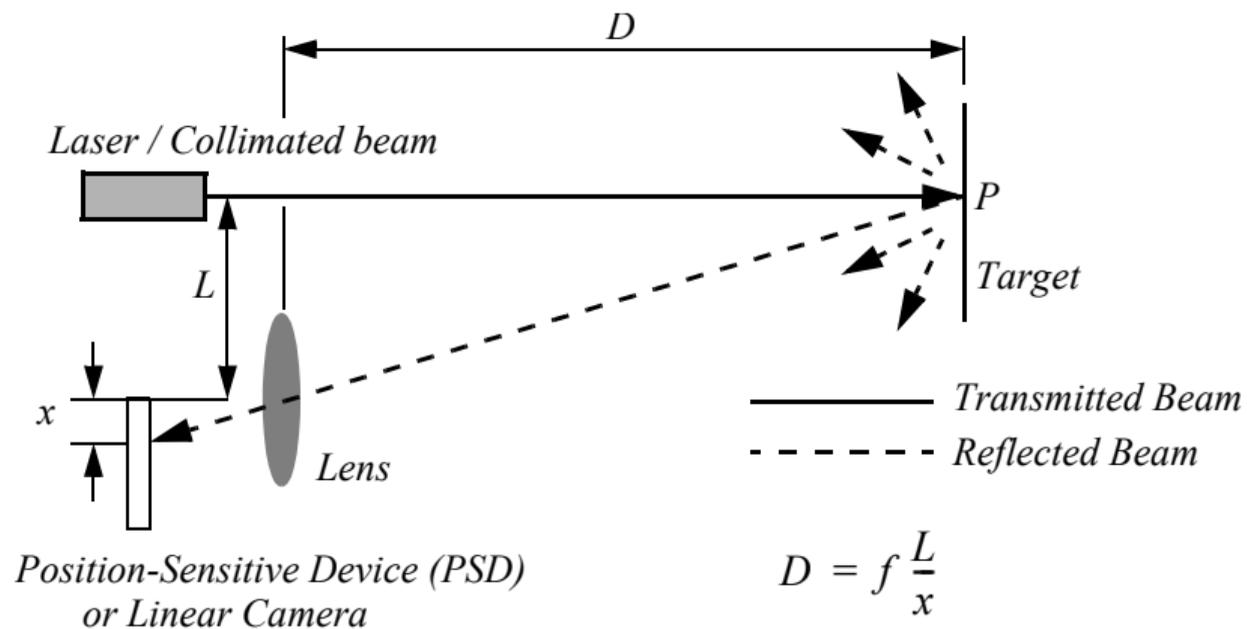
$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

donde

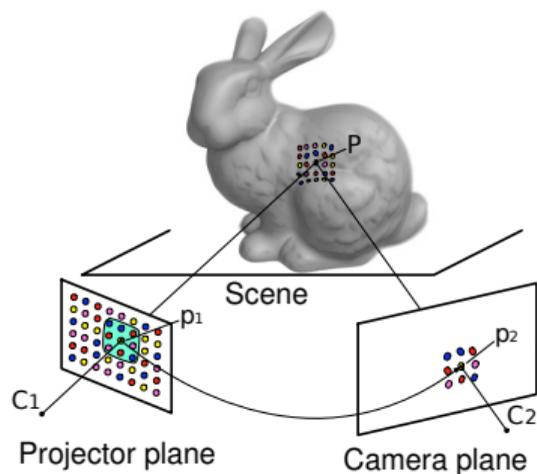
- ▶ γ es el ratio de calores específicos
- ▶ R es la constante del gas
- ▶ T es la temperatura del ambiente en grados Kelvin

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

Sensor de triangulación óptica



Cámara de luz estructurada

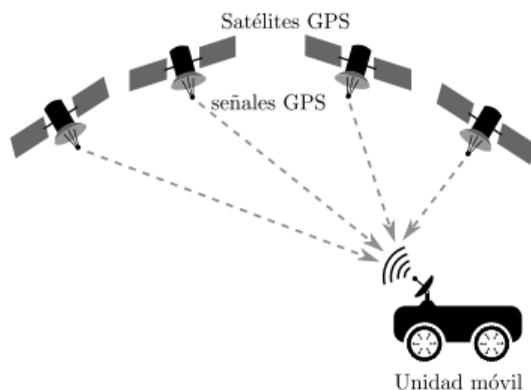


Principio de funcionamiento

La luz estructurada (*structured light*) es el proceso de proyectar un patrón conocido de píxeles (ocasionalmente rejillas o barras horizontales) en una escena. La manera en que dicho patrón se deforma cuando golpea distintas superficies permite a los sistemas de visión calcular la profundidad e información de la superficie de los objetos en la escena.

- ▶ Exteroceptivo
- ▶ Activo
- ▶ No funcionan bien en entornos exteriores
- ▶ Corto Alcance

GNSS (Global Navigation Satellite System)

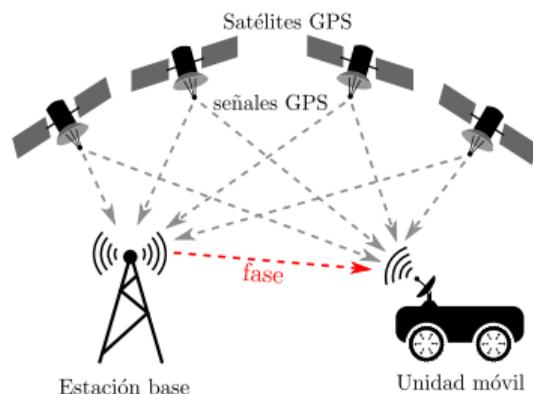


Principio de Funcionamiento

Se toma la distancia a cuatro satélites (uno por cada incógnita: latitud, longitud, altitud y offset en tiempo del reloj del receptor) y se estima la pose por triangulación. La distancia a cada satélite se obtiene midiendo el tiempo que tarda en llegar la señal de radio del satélite.

- ▶ Fuentes de ruido (Retrasos ionosféricos y atmosféricos, Efecto Multitrayectoria, Dilución de la Precisión, reloj del satélite)
- ▶ Error de posicionamiento métrico (~ 2 m)

Sistema GNSS-RTK (Real-Time Kinematics)

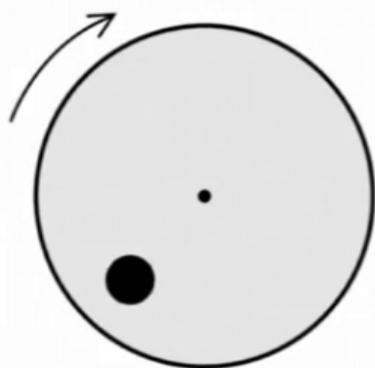


Principio de Funcionamiento

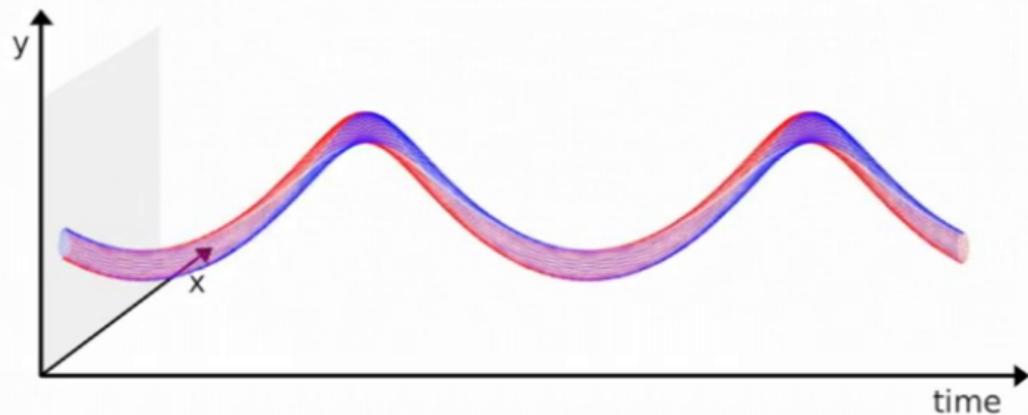
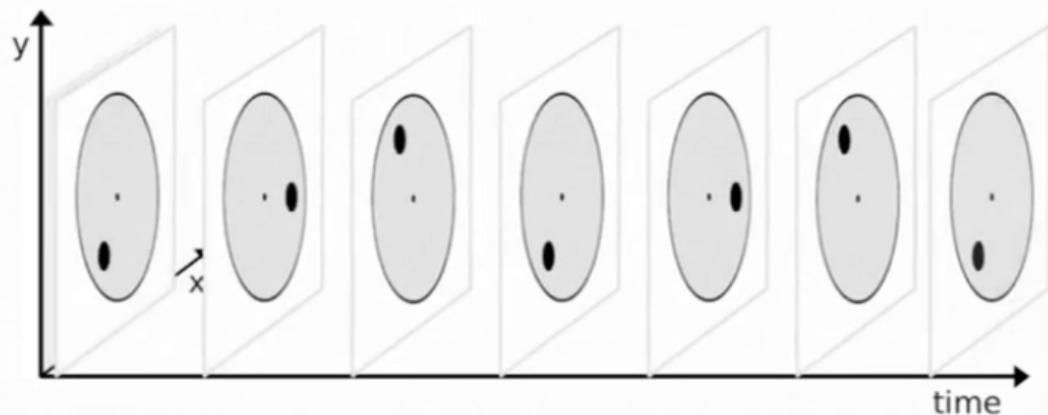
- ▶ Se requieren al menos dos receptores GPS (estación base y unidad móvil).
 - ▶ La estación base retransmite la fase de la onda portadora de la señal enviada por el satélite
 - ▶ La unidad móvil compara su medición de fase de la señal con la fase recibida de la estación base (*Resolución de Ambigüedad*)
-
- ▶ Error de posicionamiento submétrico ($\sim 0,05$ m).
 - ▶ Alcance de 10 km

Cámara basada en eventos

Standard Camera



Event Camera



Bibliografía

- [1] Peter Corke. *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms In MATLAB® Second, Completely Revised, Extended And Updated Edition*. Cham: Springer International Publishing, 2017, págs. 1-693. ISBN: 978-3-319-54413-7.
- [2] Richard Hartley y Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2.ª ed. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2004. ISBN: 0521540518. DOI: 10.1017/CB09780511811685.
- [3] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh y Davide Scaramuzza. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd. The MIT Press, 2011. ISBN: 0262015358.