

Sistemas de Control para Robots



Bloque 0. Introducción a la Robótica Móvil

Elena López Guillén
Manuel Ocaña Miguel
Rafael Barea Navarro

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil.
2. El problema de la navegación autónoma
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Procesadores
 - 3.2. Actuadores
 - 3.3. Sensores
4. Tipos de robots móviles
5. Modelos de movimiento
6. Mapas de entorno
7. Enfoques de razonamiento

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil



- 1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil.**
- 2. El problema de la navegación autónoma**
- 3. Partes de un robot móvil**
 - 3.1. Procesadores**
 - 3.2. Actuadores**
 - 3.3. Sensores**
- 4. Tipos de robots móviles**
- 5. Modelos de movimiento**
- 6. Mapas de entorno**
- 7. Enfoques de razonamiento**

1.1. Vehículos autónomos (“unmanned vehicles”)

- ❑ **Definición:** Habitáculo para el transporte de objetos o personas que funciona sin conductor (auto-conducido).

- ❑ **Niveles de autonomía:**
 - **Control remoto** (teleoperado), dirigido por un operador humano.
 - **Autónomo**, es capaz de percibir el medio que le rodea y navegar en consecuencia, imitando las capacidades humanas de manejo y control.

□ Tipos de vehículos autónomos:

- ✓ UGV (Unmanned Ground Vehicle)
- ✓ UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
- ✓ USV (Unmanned Surface Vehicle)
- ✓ UUV (Unmanned Undersea Vehicle)
- ✓ US (Unmanned Spacecraft)

UGVs



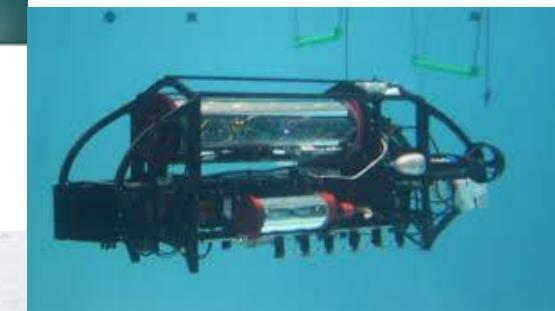
UAVs



USVs



UUVs



USs



1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil



1.2 ¿Qué es un robot?

- Palabra creada en 1920 por el escritor checo Karel Čapek a partir del término checo *robo*, que significa "siervo, trabajador forzado", para referirse a cualquier máquina, de forma humana o no, que pudiera llevar a cabo tareas inteligentes.
- RAE: “Máquina electrónica que puede ejecutar automáticamente distintas operaciones o movimientos”

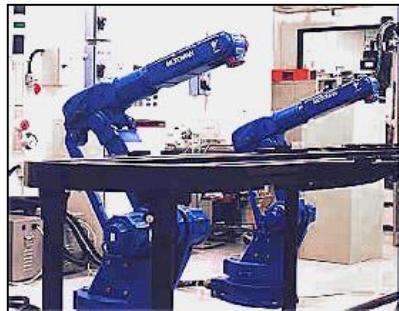
En términos científicos no existe una definición generalmente aceptada:

“Dispositivo generalmente mecánico, que desempeña tareas automáticamente, ya sea de acuerdo a supervisión humana directa, a través de un programa predefinido o siguiendo un conjunto de reglas generales, utilizando técnicas de inteligencia artificial. Generalmente estas tareas reemplazan, asemejan o extienden el trabajo humano, como ensamble en manufactura, manipulación de objetos pesados o peligrosos, trabajo en el espacio, etc.”

1.3 ¿Qué es un robot móvil?

Clasificación general de los robots según su capacidad de desplazamiento:

1. Robots manipuladores (base anclada)



3. Robots híbridos (móviles con manipulación)



2. Robots móviles (posibilidad de desplazamiento)



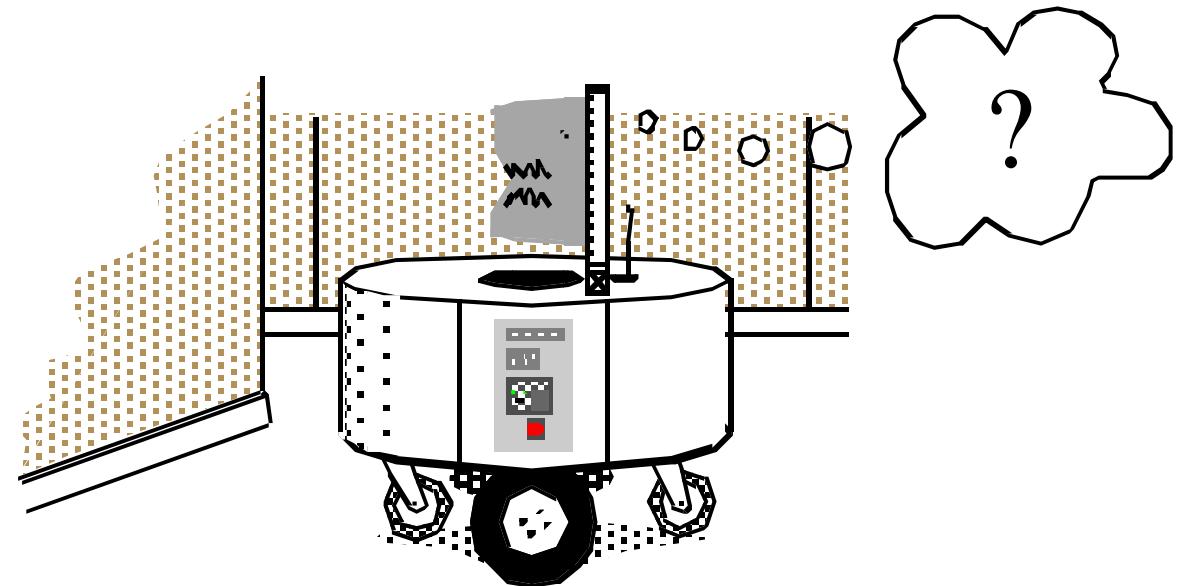
2. El problema de la navegación autónoma



1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. **El problema de la navegación autónoma**
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Procesadores
 - 3.2. Actuadores
 - 3.3. Sensores
4. Tipos de robots móviles
5. Modelos de movimiento
6. Mapas de entorno
7. Enfoques de razonamiento

La **navegación autónoma** incluye la resolución de una serie de problemas:

- ¿Dónde estoy?
- ¿Hacia dónde me dirijo?
- ¿Cómo lo consigo?

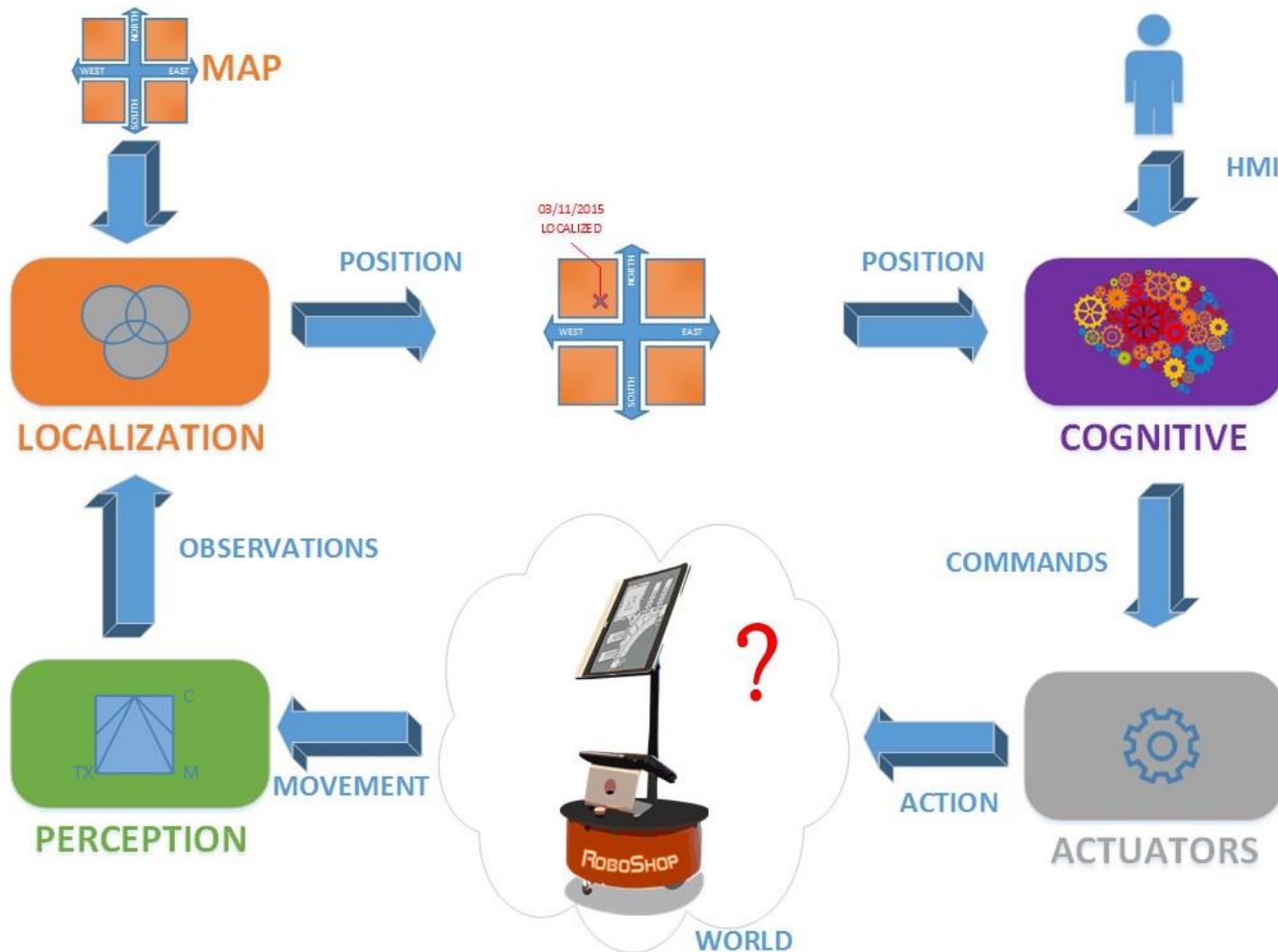


2. El problema de la navegación autónoma

- La **navegación** es una de las principales competencias requeridas en un vehículo autónomo.

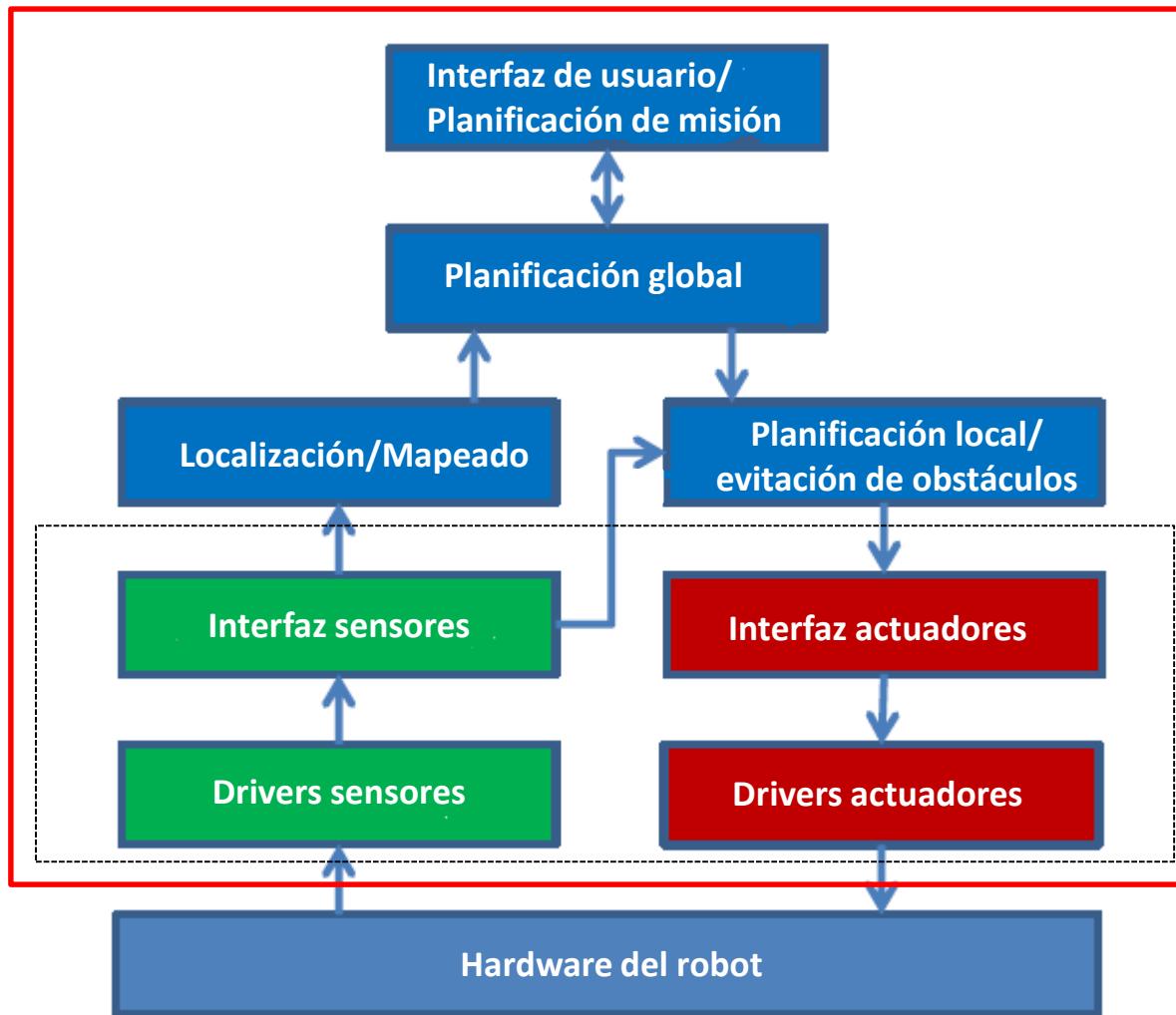
- Esta **competencia** conlleva la ejecución correcta de cuatro tareas principales:
 - **Percepción** (interpretar información de los sensores de forma eficaz)
 - **Localización** (conocer la ubicación dentro del entorno)
 - Procesos **cognitivos** (decidir como conseguir el objetivo, planificación-navegación)
 - Control del **movimiento** (modular el movimiento de los motores para conseguir el objetivo).

2. El problema de la navegación autónoma



2. El problema de la navegación autónoma

Ejemplo de arquitectura de navegación:



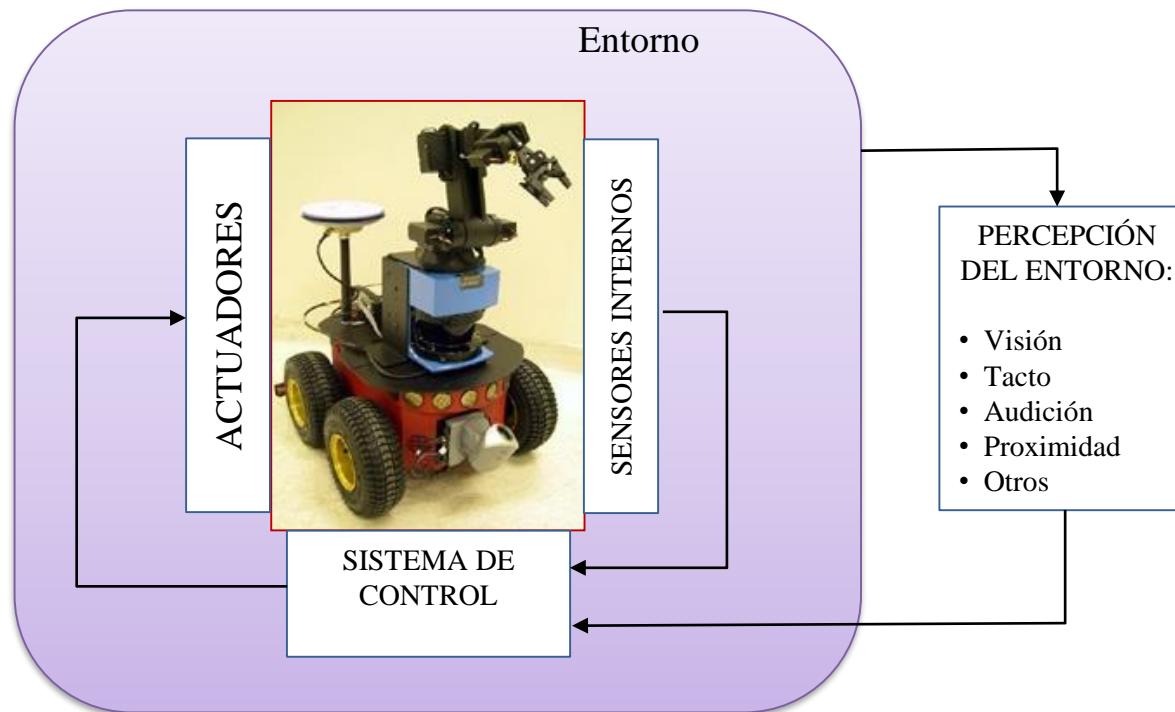
Entornos de desarrollo
(Ej: **ROS** – Robot Operating System)

3. Partes de un Robot Móvil



1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. El problema de la navegación autónoma
3. **Partes de un robot móvil**
 - 3.1. Procesadores
 - 3.2. Actuadores
 - 3.3. Sensores
4. Tipos de robots móviles
5. Modelos de movimiento
6. Mapas de entorno
7. Enfoques de razonamiento

Esquema general de un sistema robot



PARTES PRINCIPALES

- Estructura mecánica
- Actuadores
- Sensores
- Procesadores (sistema de control)

3.1. Procesadores

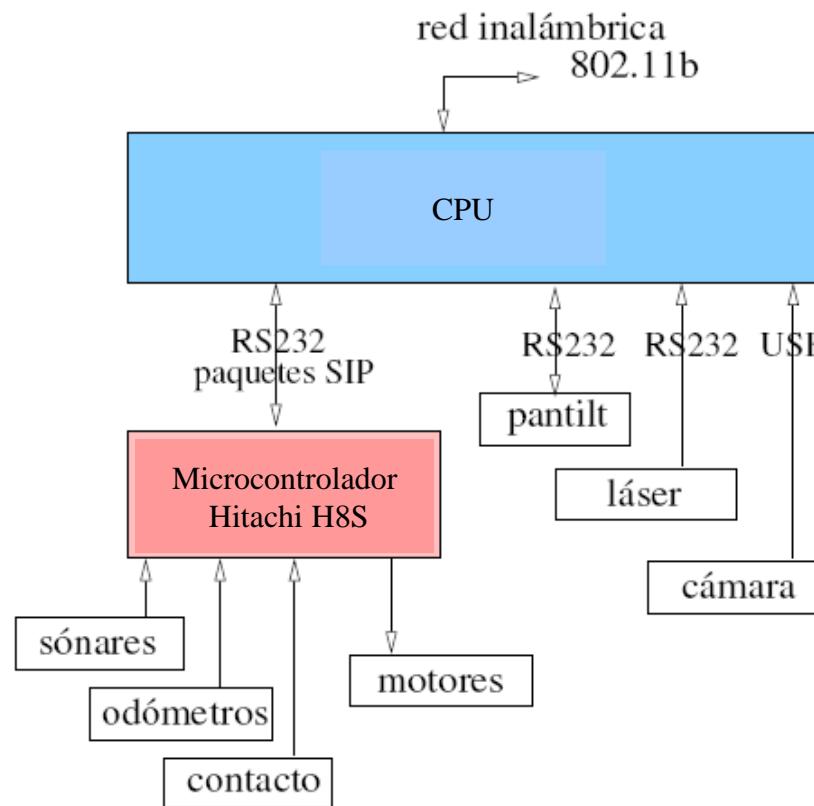
- ✓ **Antes de 1970** los cómputos se realizaban fuera del robot (ordenadores demasiado grandes y pesados)
- ✓ **A partir de los años 80** ya se utilizaban procesadores específicos dentro de la estructura mecánica del robot.
- ✓ **Desde comienzos de los 90** los ordenadores personales (PC) se han insertado como elementos principales de cómputo de los robots de investigación, dejando los procesadores específicos para tareas de bajo nivel muy concretas (procesamiento de imágenes, control de motores y lectura de sensores, etc.)

La configuración más frecuente hoy en día consiste en un PC y varios microcontroladores:

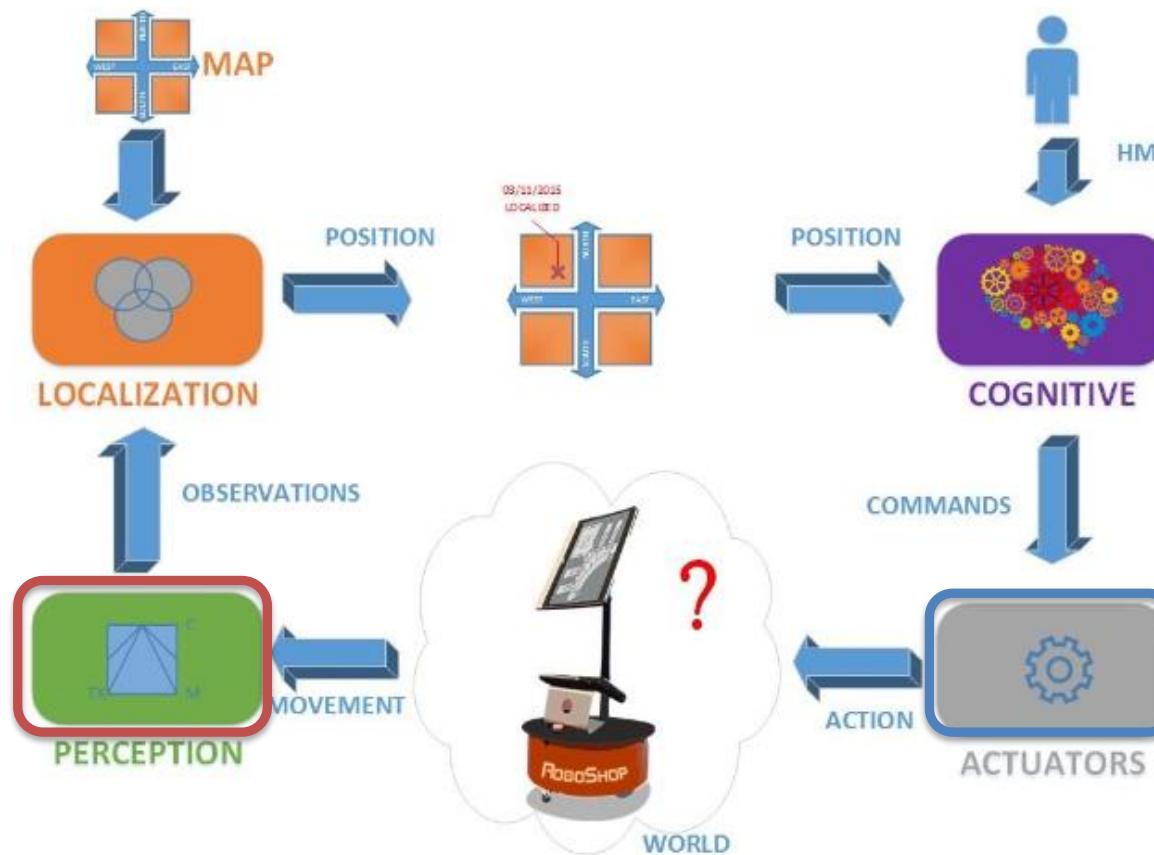
En los microcontroladores se ejecuta un SO de bajo nivel (ej: ARCOS en los Pioneer) y la comunicación con el PC se realiza a través del puerto serie RS232 respetando cierto protocolo.

De esta manera se concentra la mayor parte del cómputo en el PC, que es sencillo de actualizar cuando queda obsoleto.

Ejemplo de arquitectura de computadores de un robot Pioneer:



3.2 Actuadores



Los **actuadores** traducen los comandos de la etapa cognitiva en **movimientos** reales del robot (traslación, manipulación, etc.)

3.2 Actuadores

Convierten las órdenes del sistema de control en ACCIONES FÍSICAS (movimientos):

- LOCOMOCIÓN (desplazamiento)
- MANIPULACIÓN (manejo de objetos)

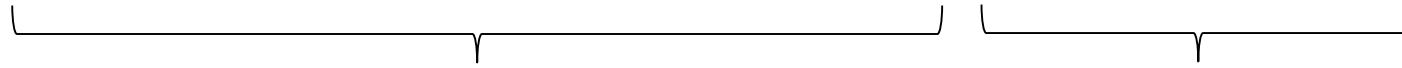
ACTUADOR se refiere al elemento que **genera movimiento**, no a la parte mecánica
(ejemplo: el actuador es el motor, no la rueda que mueve)

TIPOS DE ACTUADORES utilizados en robótica

Neumáticos

Hidráulicos

Eléctricos



Aplicaciones industriales

Los más utilizados en robótica móvil

3.2 Actuadores

Actuadores ELÉCTRICOS

Son los más utilizados en robótica móvil, tanto para ruedas

como para articulaciones



Motores DC



Servomotores



Motores paso a paso

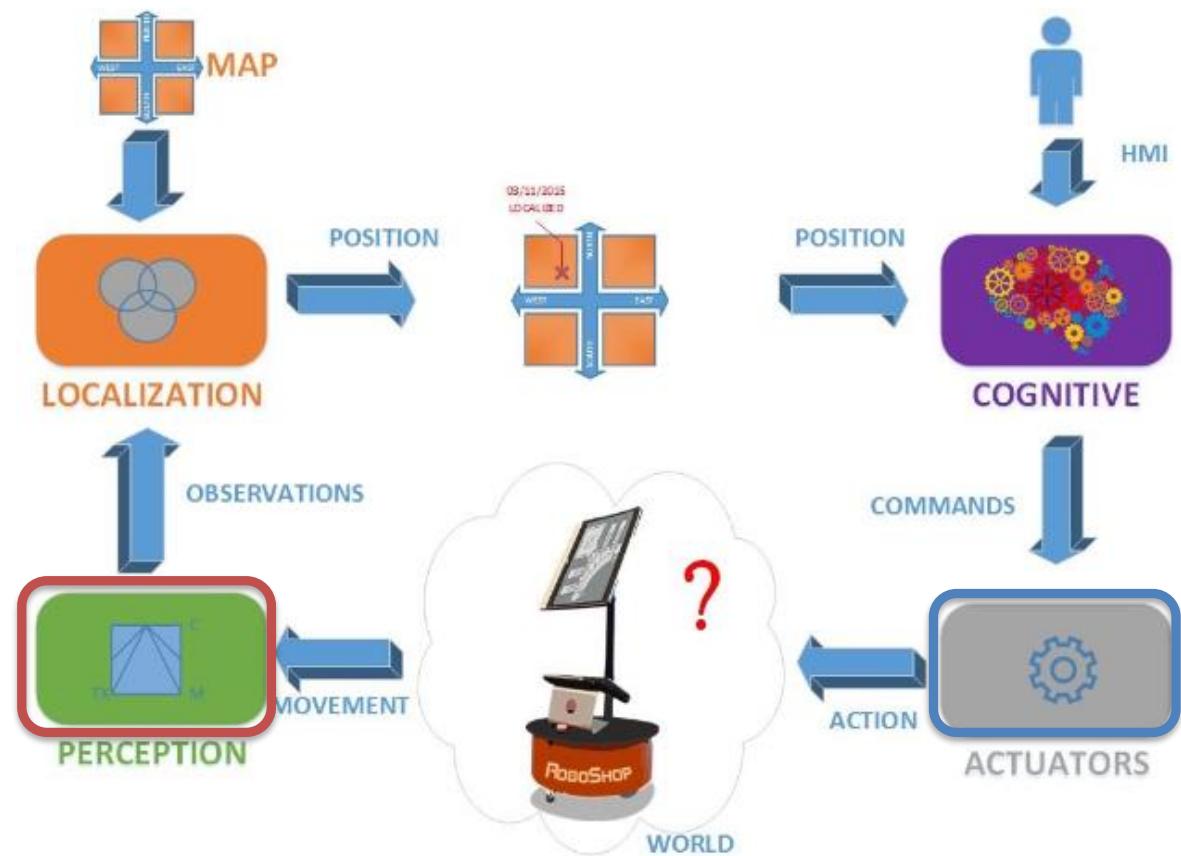
- * Estátor (imanes) y rотор
- * Velocidad de giro proporcional a tensión
- * A más corriente más par
- * Eficientes para girar con poca fuerza y gran velocidad
- * Sistemas digitales lo modulan con PWM

- * Motor DC+ engranajes +sensor de posición + control proporcional
- * Capaces de colocarse en una posición
- * Suelen limitarse a 180°
- * Se controlan mediante pulsos modulados en anchura (3 hilos: Vcc, tierra y PWM)

- * Se controlan digitalmente (pulsos – códigos digitales) y a bajas velocidades no requieren realimentación
- * Los más precisos
- * Menores cargas que los motores DC
- * A altas velocidades pueden deslizar

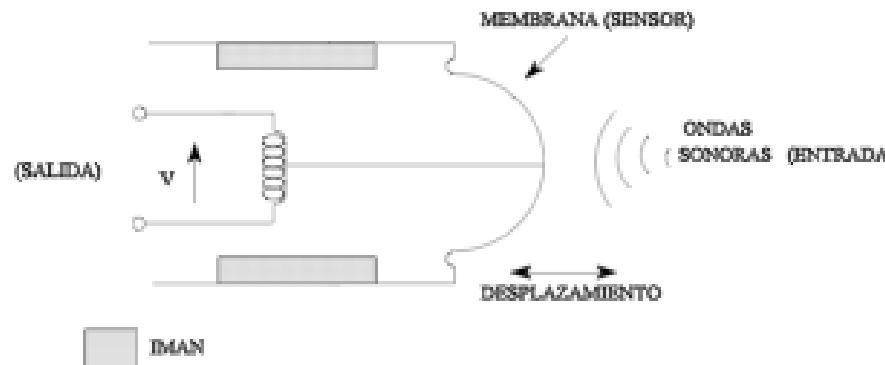
3.3. Sensores

Por **percepción** se entiende la función que permite al robot **obtener, elaborar e interpretar** la información de su entorno por medio del uso de diferentes **sensores**.



3.3 Sensores

- ❑ **Sensor:** es el elemento directamente en **contacto** con la magnitud a medir y no tiene porqué proporcionar ninguna salida eléctrica. Su finalidad es captar esta magnitud para posteriormente transformarla y obtener una salida eléctrica.
- ❑ **Transductor:** Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que **convierte** una señal de una forma física en otra, que se corresponde con la primera, pero de otra forma física distinta (normalmente eléctrica). El fin del transductor es, por tanto, acoplar la magnitud a medir al sistema de medida.



Ejemplo de micrófono magnético

3.3.1 Clasificación de Sensores

Según el **origen** de la **información**:

- Propioceptivos**: informan del **estado** del propio **robot** (encoders, estado de la batería, orientación del robot, etc.)
- Extereoceptivos**: informan del **estado** del **entorno** en el que se mueve el robot (medidores de distancia, visión, etc.)

Según la **procedencia** de la **energía**:

- Pasivos**: **reciben** información de la energía del entorno (brújula, cámara visible, etc.)
- Activos**: **emiten** energía (en forma de radiación por ejemplo) y **comprueban** su efecto sobre el entorno (ultrasonidos, láser, etc)

Sensores más utilizados en robótica móvil

CLASIFICACIÓN GENERAL (uso típico)	SENSOR	Interno/ Externo
Sensores táctiles (detección de contacto físico)	Sensores de contacto, <i>bumpers</i> Sensor táctil óptico	E E
Posición y velocidad (medida de posición/velocidad de ruedas)	Potenciómetros Máquinas síncronas y resolvedores Encóders ópticos, magnéticos, inductivos o capacitivos	I I I
Orientación (orientación del robot respecto a un eje de referencia fijo)	Brújulas Giróscopos Inclinómetros	E I E
Balizas fijas (localización en un sistema de referencia fijo)	GPS Balizas RF Balizas ultrasónicas activas Balizas reflectivas	E E E E
Distancia (reflectividad, tiempos de vuelo, etc.)	Sensores de ultrasonidos Sensores láser	E E
Movimiento (velocidad relativa a objetos)	Radar Doppler Sonido Doppler	E E
Sensores visuales (distancia visual, reconocimiento de objetos,etc.)	Cámaras CCD/CMOS Paquetes de distancia visual Paquetes de seguimiento de objetos	E

3.3.2 Características básicas

- **Valores max/min:**
 - Límites máximos y mínimos del sensor
- **Rango dinámico:**
 - Indica el cociente entre los valores de entrada máximo y mínimo del sensor, normalmente se mide en decibelios (dB).
- **Resolución:**
 - Es la mínima diferencia entre dos valores.
 - Normalmente coindice con el límite inferior del rango dinámico.
- **Linealidad:**
 - Variación de la señal de salida en función de la señal de entrada
 - Esta linealidad es menos importante si posteriormente se trata en un PC
- **Frecuencia o Ancho de Banda:**
 - La velocidad con la entrega los datos un sensor
 - Normalmente hay un límite superior que depende del sensor y, en su caso, de la velocidad de muestreo
 - También puede existir un límite inferior, como por ejemplo en los sensores de aceleración

3.3.3 Medidas de rendimiento

- **Sensibilidad:**
 - Relación entre el cambio que se produce en la salida del sensor y en la entrada (magnitud medida).
 - En el mundo real, se suele confundir con sensibilidad indeseada o acoplamiento de otros parámetros del entorno
- **Sensibilidad cruzada:**
 - Sensibilidad a otros parámetros del entorno que son ortogonales a los parámetros que mide el sensor (por ejemplo: brújula magnética)
- **Error:**
 - Diferencia entre el valor medido por el sensor (m) y el valor real (r).
 - Pueden ser: determinísticos (modelables), probabilísticos (se define con distribuciones de probabilidad).
- **Exactitud:**
 - Es el grado de conformidad entre el valor medido (m) y el real (r):
- **Precisión:**
 - A menudo se confunde con la Exactitud
 - Indica la repetitividad en los resultados del sensor

$$\text{exactitud} = 1 - \frac{|m - r|}{r}$$

error

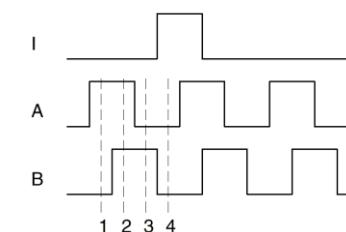
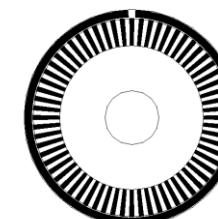
3.3.4. Sensores de odometría

- ❑ Para medir la velocidad de las ruedas se emplean los sensores **propioceptivos** conocidos como encoders. Se fabrican con diferentes tecnologías: ópticos, magnéticos, inductivos, capacitivos, etc.
- ❑ La velocidad de las ruedas se puede integrar para obtener el avance estimado del robot, este proceso se conoce como **odometría**.
- ❑ La resolución de la odometría viene dada por el tamaño de la rueda (radio R) y el número de pulsos que proporcionan los encoders (*N_pulsos_vuelta*):

$$q = \frac{2\pi R}{N_pulsos_vuelta}$$

- ❑ Sólo son útiles en desplazamientos cortos ya que tienen errores acumulativos y problemas con **deslizamientos laterales y longitudinales** de las ruedas.
- ❑ **Ejemplo:** encoders ópticos

Utilizan foto-interruptores formados por un emisor-receptor junto con una rejilla asociada a la rueda o motor para llevar la cuenta de las



	State	Ch A	Ch B
S ₁	High	Low	
S ₂	High	High	
S ₃	Low	High	
S ₄	Low	Low	

3.3.5. Sensores de orientación

- ❑ En este grupo se incluyen los sensores **propioceptivos** que miden el giro o la inclinación respecto a una referencia interna (giróscopos, inclinómetros) o bien los **exteroceptivos** que miden la orientación respecto al campo magnético terrestre (compass).

- ❑ **Brújula** o “Compass”: utilizan el campo magnético de la Tierra para obtener una medida absoluta de orientación.
 - Emplean diferentes tecnologías:
 1. Brújulas magnéticas mecánicas. Empleando potenciómetros
 2. Medida directa del campo magnético: sensores de efecto Hall
 - sensores magneto-resistivos
 - Principales **inconvenientes** de las brújulas:
 1. Debilidad del campo magnético de la tierra
 2. Perturbaciones causadas por otros objetos o fuentes magnéticas
 3. No suelen ser útiles en entornos interiores



3.3 Sensores

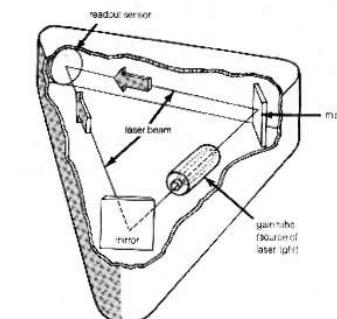
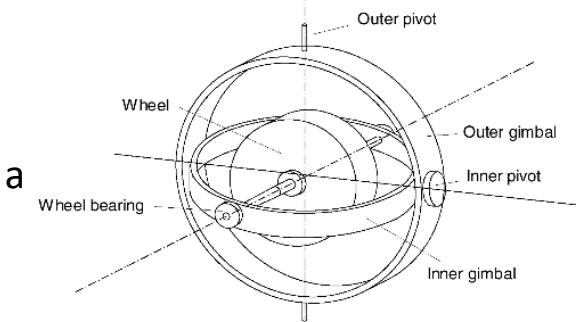
- Los **giróscopos**: Son sensores de orientación que mantienen un sistema de coordenadas fijo. Proporcionan una medida **absoluta** de orientación del robot. Dos tecnologías básicas:

- **Mecánicos** (Gimbaled Gyro, MEMs)

- Precesión giroscópica: propiedad **inercial** de una rueda que gira a gran velocidad. Momento angular asociado con la rotación mantiene el eje del giróscopo inercialmente **estable**.
- Aparece un torque reactivo τ (mantiene estabilidad) es proporcional a la velocidad de giro ω , la velocidad de precesión Ω y la inercia de la rueda I .
- No se transmite torque desde el “outer pivot” al eje de la rueda, con lo que el eje de giro será estable en el espacio.
- Deriva típica en HQ gyro: $0.1^\circ/6h$.

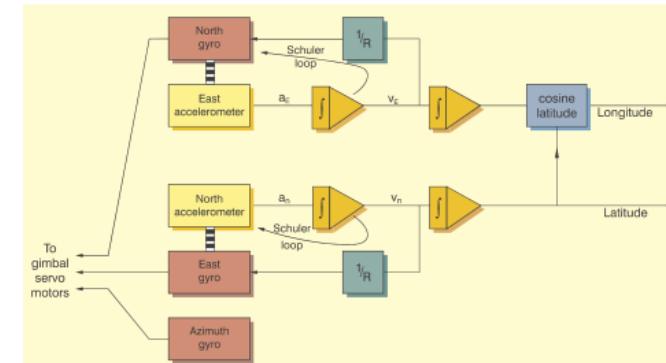
- **Ópticos** (Ring Laser Gyro - LRG)

- Utilizan dos haces monocromáticos de luz (**Láser**) que provienen de la misma fuente y que viajan a través de dos fibras ópticas iguales dentro de un anillo.
- Un haz viaja en sentido horario y otro en sentido antihorario.
- El haz que viaja en el sentido de la rotación recorre un camino que es ligeramente inferior (efecto Sagnac). La **diferencia en fase** $\Delta\phi$ de ambos haces es proporcional a la velocidad angular del anillo.



3.3.6. Acelerómetros

- Son sensores **propioceptivos** que sirven para medir la aceleración en cada uno de los ejes del robot.
- Su principio de funcionamiento se basa en la 2^a ley de movimiento de Newton
Conociendo una masa y el desplazamiento que sufre debido a la fuerza aplicada se obtiene la aceleración. $F=m \cdot a$
- Tipos de acelerómetros:
 1. Capacitivos: deformaciones sufridas en el gap que separa ambas placas proporcionan información sobre la fuerza y por tanto se obtiene la aceleración.
 2. La mayoría de los acelerómetros hoy en día se fabrican empleando técnicas MEMs (Micro-Electro-Mechanical). Se imprime una masa conocida sobre una base de silicio y suspendida en unos resortes.
 3. Piezoeléctricos: la deformación del piezoeléctrico provoca una tensión entre sus extremos.
- Se emplean junto con los giróscopos adecuados para diseñar las Unidades de Medida Inercial o **IMUs**, que son la base de los Sistemas de Navegación Inercial (INS)



3.3.7. Medidores de distancia activos

- Ampliamente utilizados en robótica móvil por su **bajo coste** y por la **facilidad de interpretación** de las medidas que proporcionan.
- Información de distancia *elemento clave para la localización y el modelado del entorno local*
- Los sensores de ultrasonidos y láser utilizan normalmente la velocidad de propagación de las ondas (sonido/electromagnéticas) para conocer la distancia recorrida por la onda. Esta **distancia** viene dada por:

$$d = c \cdot t$$

- Donde:
 - d = *distancia recorrida (normalmente ida-vuelta)*
 - c = *velocidad de propagación de la onda*
 - t = *tiempo de vuelo*

- Es importante matizar:
 - **Velocidad** de propagación del **sonido**: aprox. 0.3 m/ms
 - **Velocidad** propagación de las **señales electromagnéticas**: 0.3 m/ns
 - 3 metros :
 - son 10 ms sistema ultrasónico
 - sólo 10 ns para un sensor láser
 - Tiempo de vuelo con señales electromagnéticas no es una tarea fácil
 - Sensores láser son caros y delicados
- La **calidad** de los sensores medidores del tiempo de vuelo depende de:
 - Incertidumbres en el tiempo de llegada exacto de la señal reflejada (imprecisión en la medida del tiempo de vuelo con sensores láser)
 - Apertura del **ángulo** transmitido (sensores ultrasónicos)
 - **Interacción** con el objetivo (múltiples superficies, reflexiones especulares)
 - **Variación** de la velocidad de propagación
 - **Velocidad** del robot móvil y el objetivo

3.3.8. Medidores de distancia ultrasónicos

- Transmiten un paquete de ondas de presión ultrasónicas ($>20\text{KHz}$) normalmente a unos 40KHz y esperan recibir su eco
- La distancia d al objeto que devuelve el eco se puede calcular en base a la velocidad de propagación del sonido c y el tiempo de vuelo t

$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

- La velocidad del sonido en el aire viene dada por

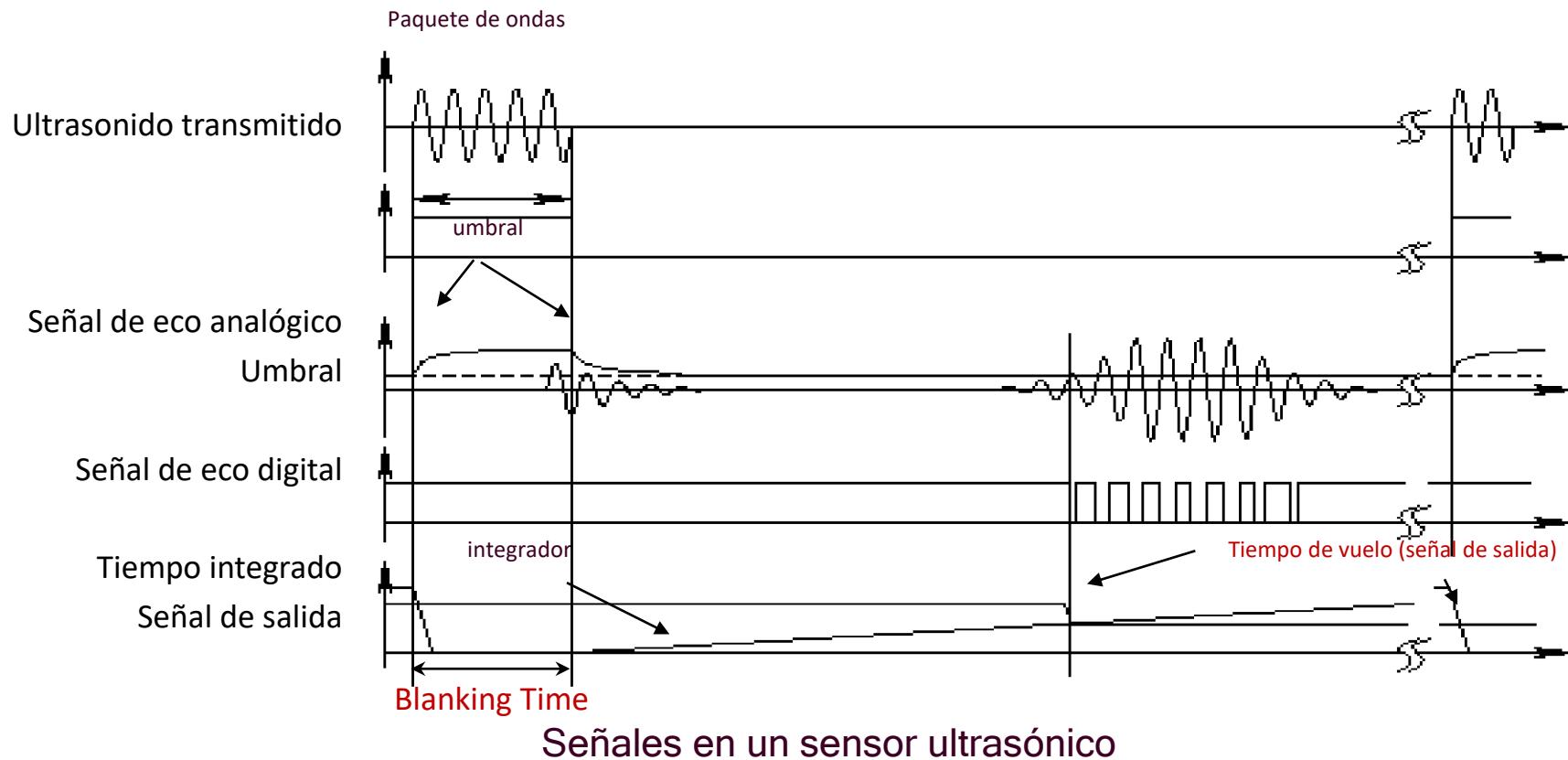
$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\text{Ta} - 273.15}{273.15}} \quad [\text{m/s}]$$

donde

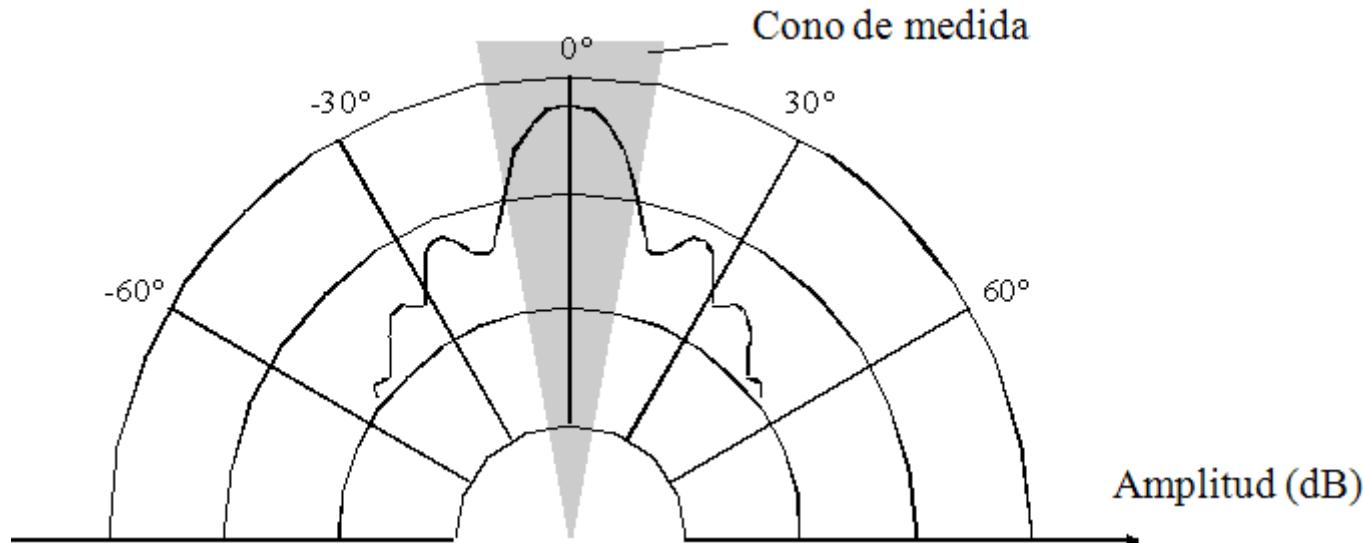
c_0 : velocidad ultrasonidos a 273.15 K (331.45 m/s)

Ta : temperatura ambiente (Kelvin)

$c_{20^\circ\text{C}} = 343\text{m/s}$



- Frecuencia típica de trabajo: 40 - 180 KHz
- Generación de la onda de US: transductores piezoeléctricos
 - El transmisor y receptor pueden estar separados o pueden ser el mismo transductor
- El haz de sonido se propaga en forma de cono:
 - Ángulos de apertura de entre 20 y 40 grados
 - Regiones de profundidad constante
 - Segmentos de un arco de circunferencia (esfera en 3D) con distancia equivalente

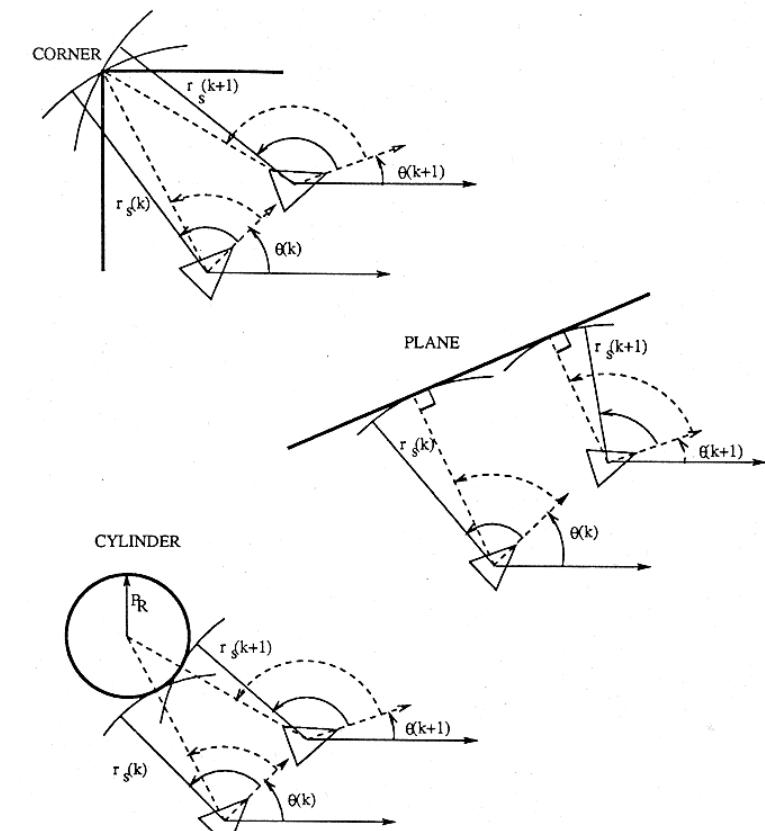
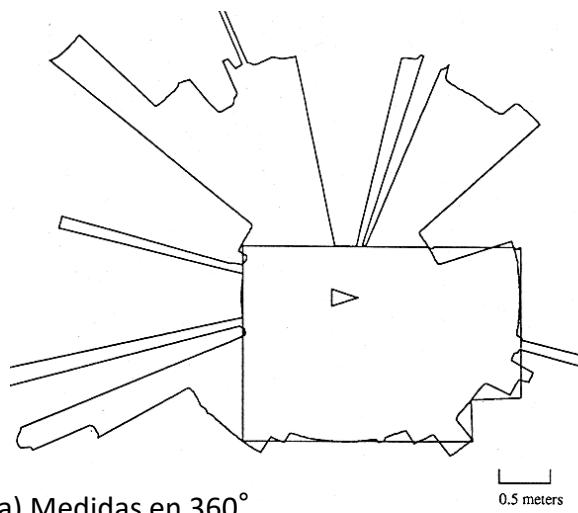


□ Problemas de los sensores de US

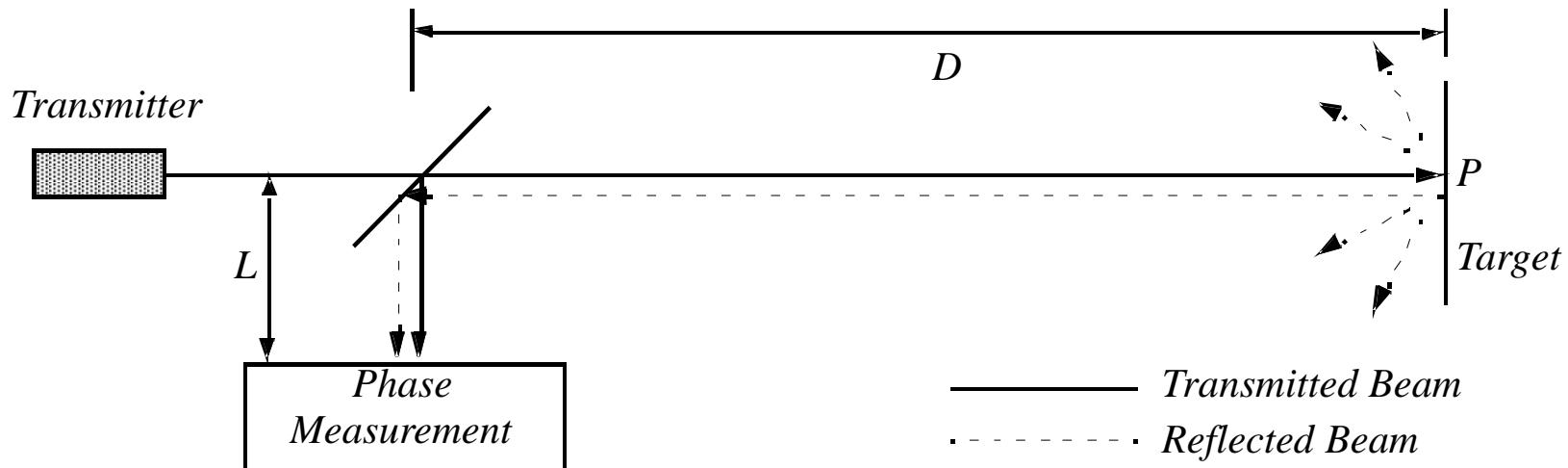
- Falsa detección por emisión **simultánea** (posible solución con códigos ortogonales como, por ejemplo, los códigos Golay)
- Superficies **porosas** (absorben energía)
- Superficies que no están en **dirección perpendicular** a la dirección del sonido
-> reflexión especular

□ **Exactitud:** 98 – 99.1%

□ **Rango:** 12cm - 5m



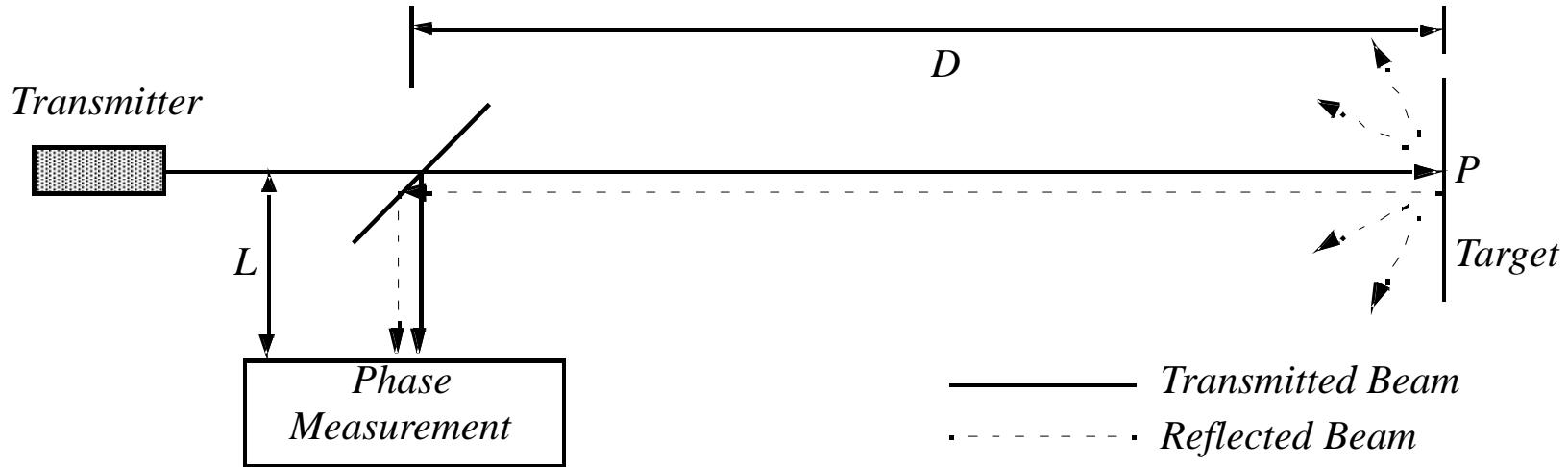
3.3.9. Medidores de distancia láser



□ Características principales de los sensores láser:

- Los haces transmitido y reflejado son **coaxiales**
- El transmisor ilumina el objetivo con un haz muy **direccional**
- Técnicas : **tiempo de vuelo**, **diferencias de fase** entre el haz emitido y recibido, **triangulación**.
- Sistema de **barrido** mecánico con espejos
 - medidas 2D ó 3D

- Medida de la **distancia** con Láser:
 1. Láser pulsado, medir el **tiempo de vuelo** directamente (resultados en picosegundos)
 2. Medir la interferencia entre la frecuencia continua modulada de la onda y la señal reflejada (**interferometría**)
 3. Medir la **diferencia de fase** para estimar la distancia.
 4. **Triangulación** en base a relaciones geométricas conocidas
- La técnica más fácil de implementar es la de *medida de diferencia de fase*



Medida de diferencia de fase:

$$\lambda = c/f \quad D' = L + 2D = L + \frac{\theta}{2\pi} \lambda$$

Donde:

c : es la velocidad de la luz; f la frecuencia de modulación; D' la distancia recorrida en ida-vuelta y θ : diferencia de fase entre la transmitida y la reflejada

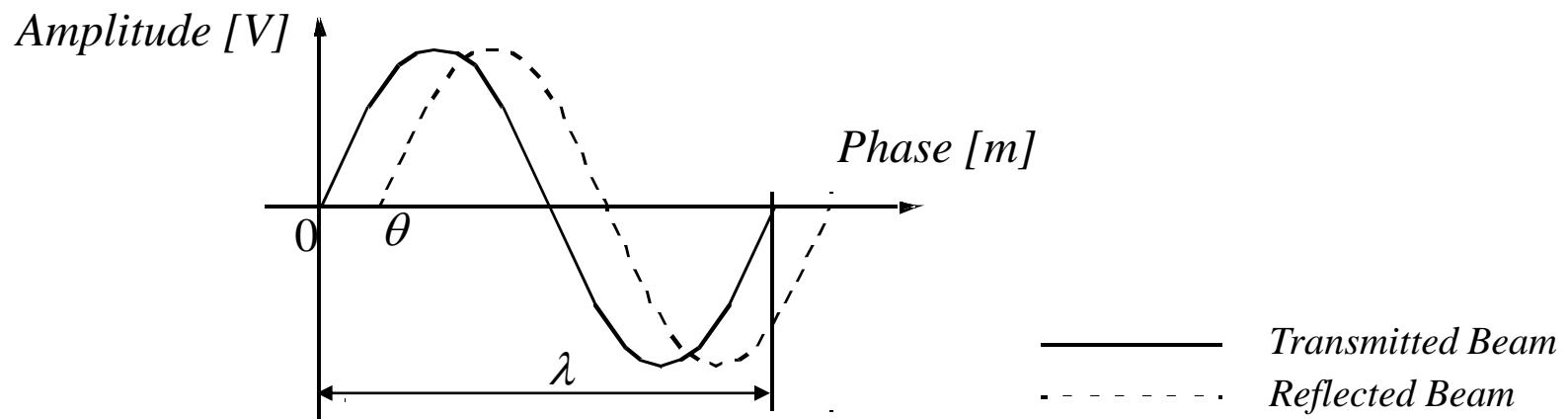
- para $f = 5$ MHz (sensor A.T&T.), $\lambda = 60$ metros

- Distancia D, entre el separador del haz y el objetivo

$$D = \frac{\lambda}{4\pi} \theta$$

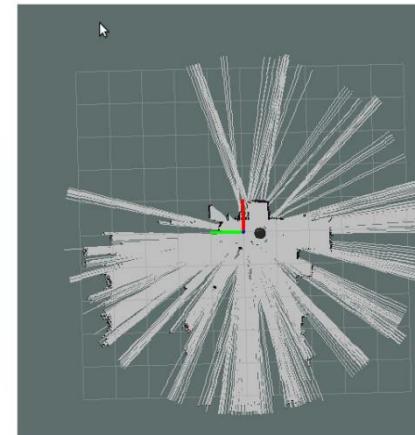
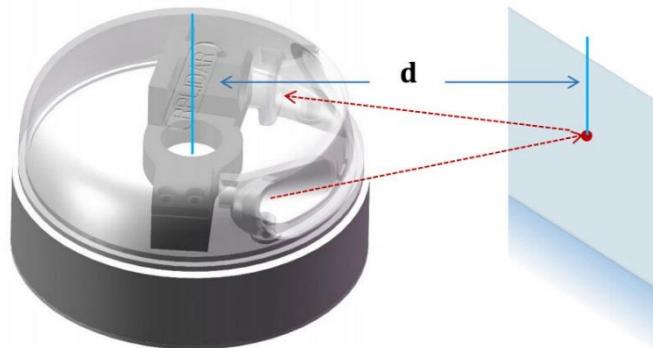
- Ambigüedad:

- En el ejemplo existiría cada $\lambda /2= 30$ m, el objetivo podría estar en 5m, 35m, 65m, ...

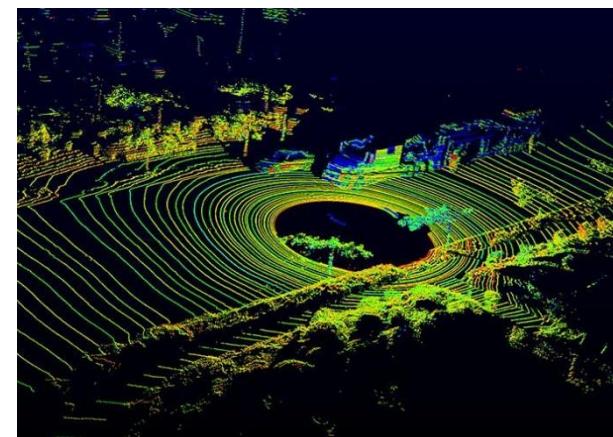
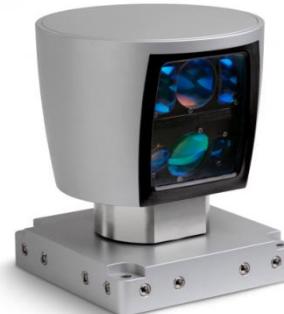


3.3 Sensores

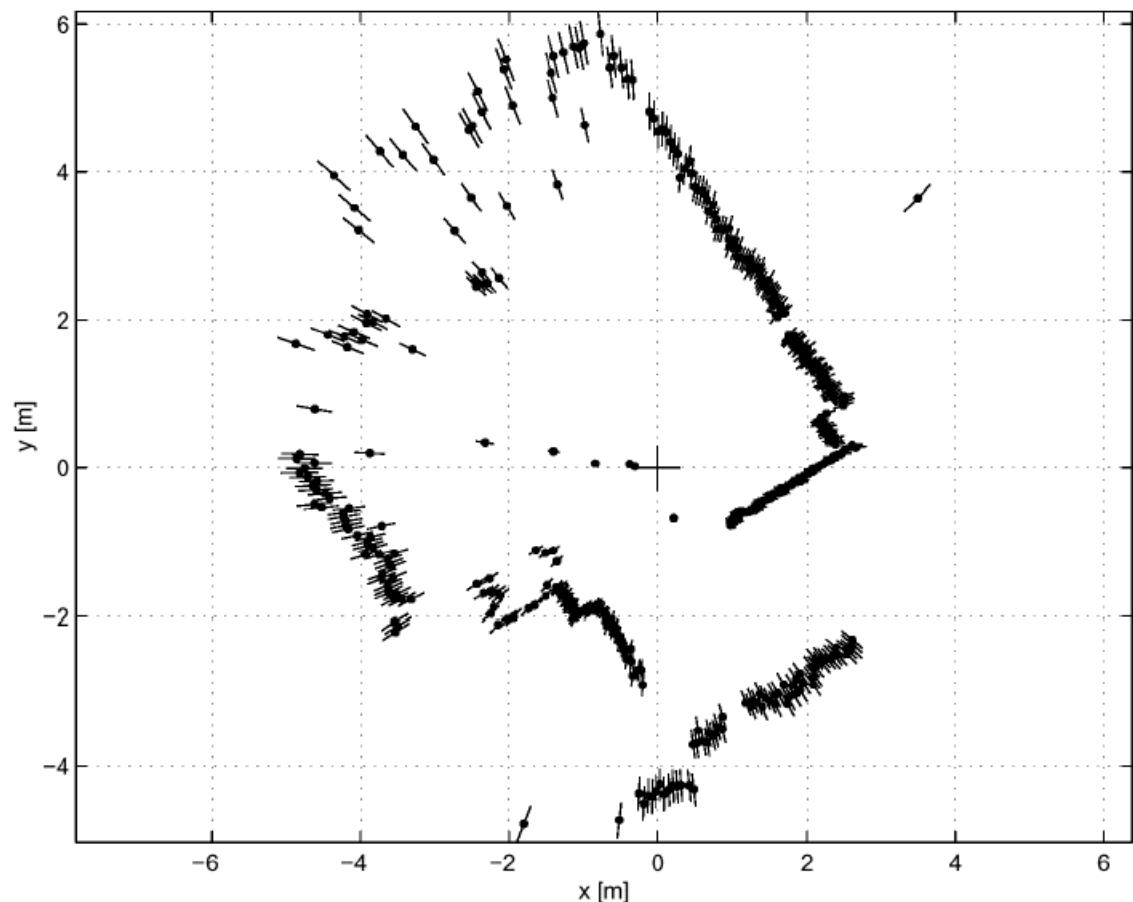
- Si se desea realizar medidas en 2D y 3D:
 - Barridos mediante espejos motorizados en 2D, ejemplo: RPLIDAR



- Barridos en 3D, ejemplo: Velodyne



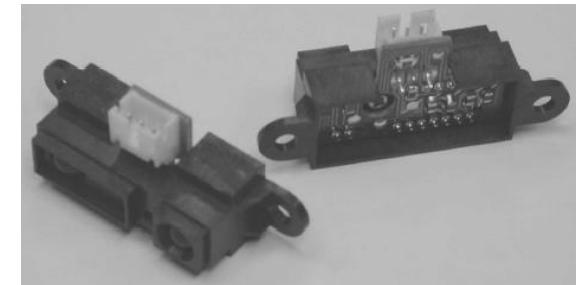
- Ejemplo lectura de un entorno con un sensor Láser. La longitud de las líneas indica la **incertidumbre** de la medida.
- La incertidumbre de la medida es inversamente proporcional al **cuadrado de la amplitud** de la señal recibida.



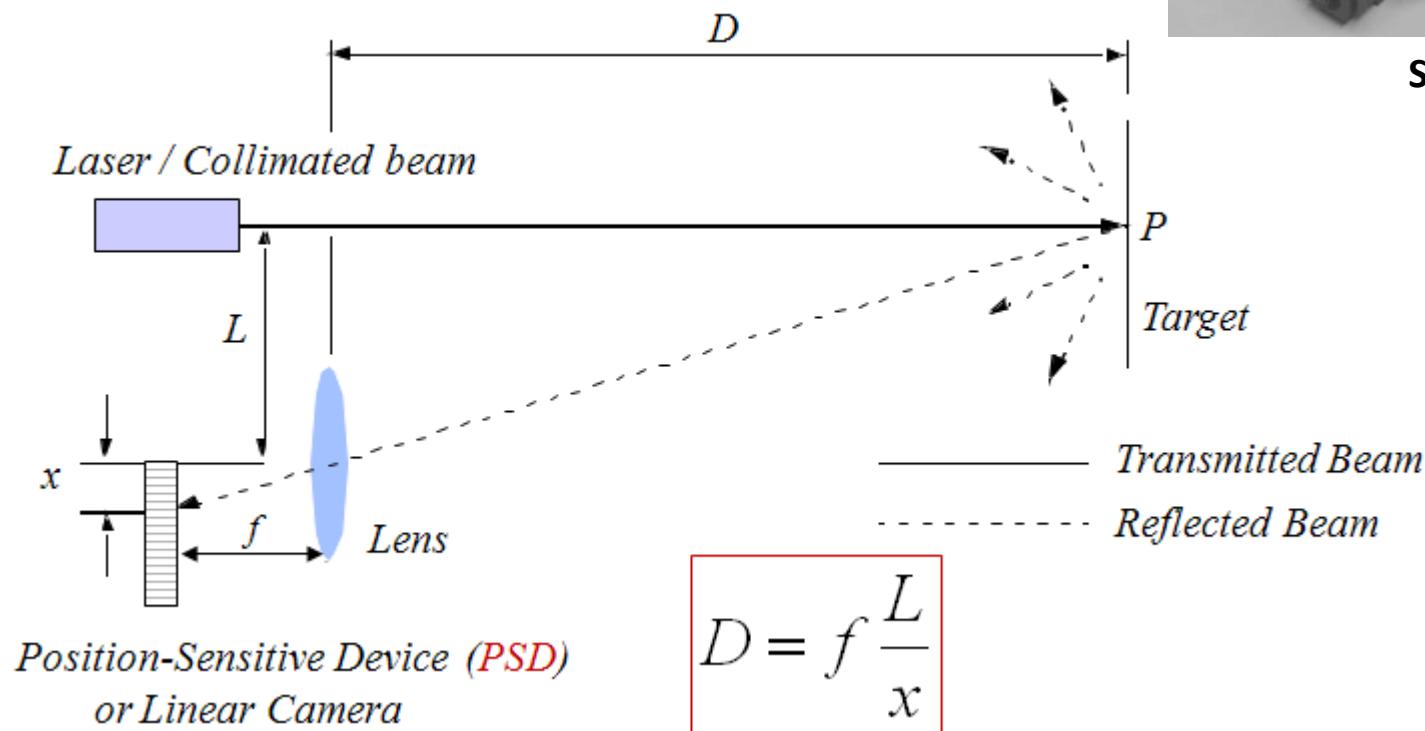
3.3.10. Sensores de distancia basados en propiedades geométricas

- Utilizan las propiedades **geométricas** de la imagen para establecer la medida de distancia
- Si se conoce las dimensiones de un objeto en particular, y se proyecta un patrón de luz estructurada conocido (un punto, una línea, etc.), se pueden establecer las **relaciones** geométricas entre el objeto y su imagen proyectada para conocer la distancia.
- Técnicas empleadas:
 1. Se puede utilizar una **triangulación** sencilla para conocer la distancia
 2. Con un patrón de luz estructurada, la luz reflejada podrá ser capturada por un sensor en forma de **línea fotosensible** o bien una matriz (**cámara**)

- Principio de **triangulación** Láser 1D
- La distancia es proporcional a $1/x$

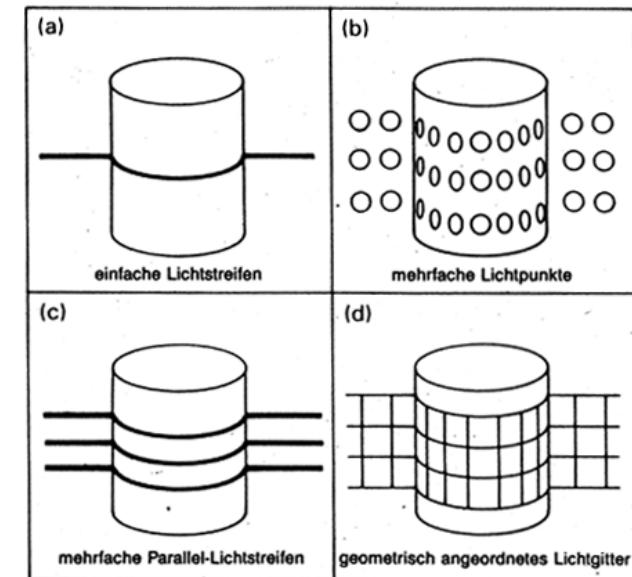
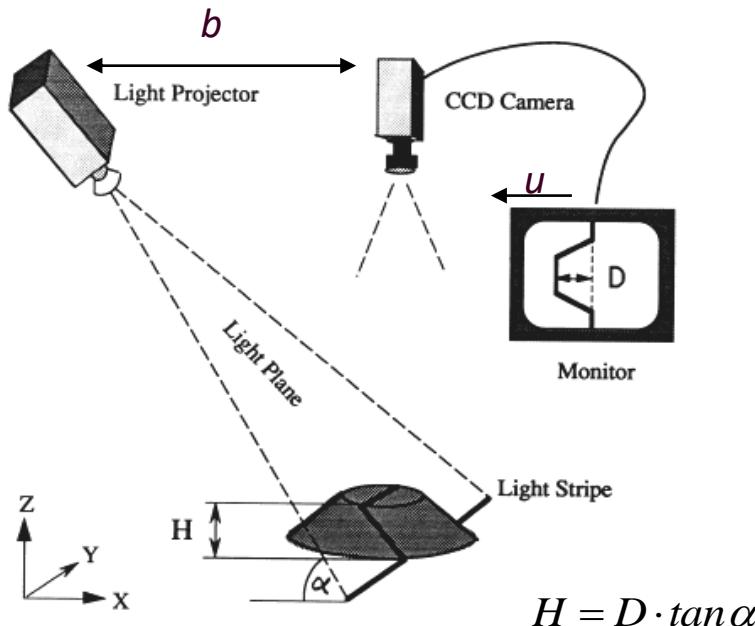


SHARP GP2Y



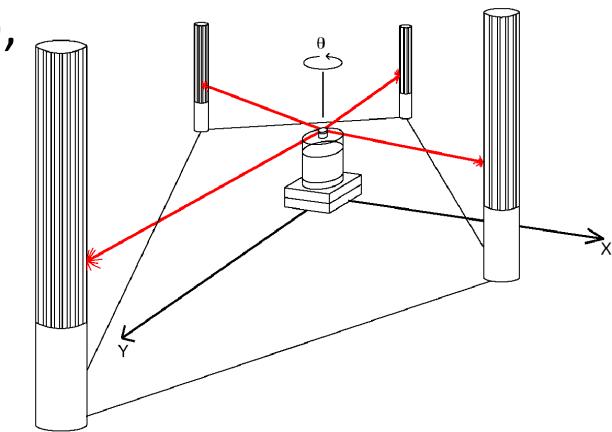
□ Luz estructurada: visión, 2D-3D

- Eliminar el problema de **correspondencia** proyectando una luz estructurada sobre la escena
- Emitir luz **direccional** (Láser) y con un espejo rotativo
- Utilizar relaciones **geométricas** entre la imagen formada en la cámara y los ángulos del emisor-cámara con respecto a la escena



3.3.11. Balizas de referencia

- ❑ Navegación basada en balizas es clásica desde que los humanos comenzaron a viajar:
 - Balizas/Marcas naturales tales como las estrellas, montañas, sol, etc.
 - Balizas artificiales como los faros
- ❑ Es una forma típica de resolver problemas de localización en robótica móvil.
- ❑ Las balizas se utilizan como una referencia conocida para estimar la posición del robot
- ❑ Exteriores: Sistema de Posicionamiento Global (GPS), triangulación/trilateración con señales de RF.
- ❑ Interiores: Balizas infrarrojos/ultrasonidos/RF
- ❑ Objetivos:
 1. Evitar modificar el entorno con las balizas (reducir costes)
 2. Flexibilidad/adaptación a los cambios en el entorno



3.3.11. Balizas de referencia exteriores

□ Global Positioning System (GPS)

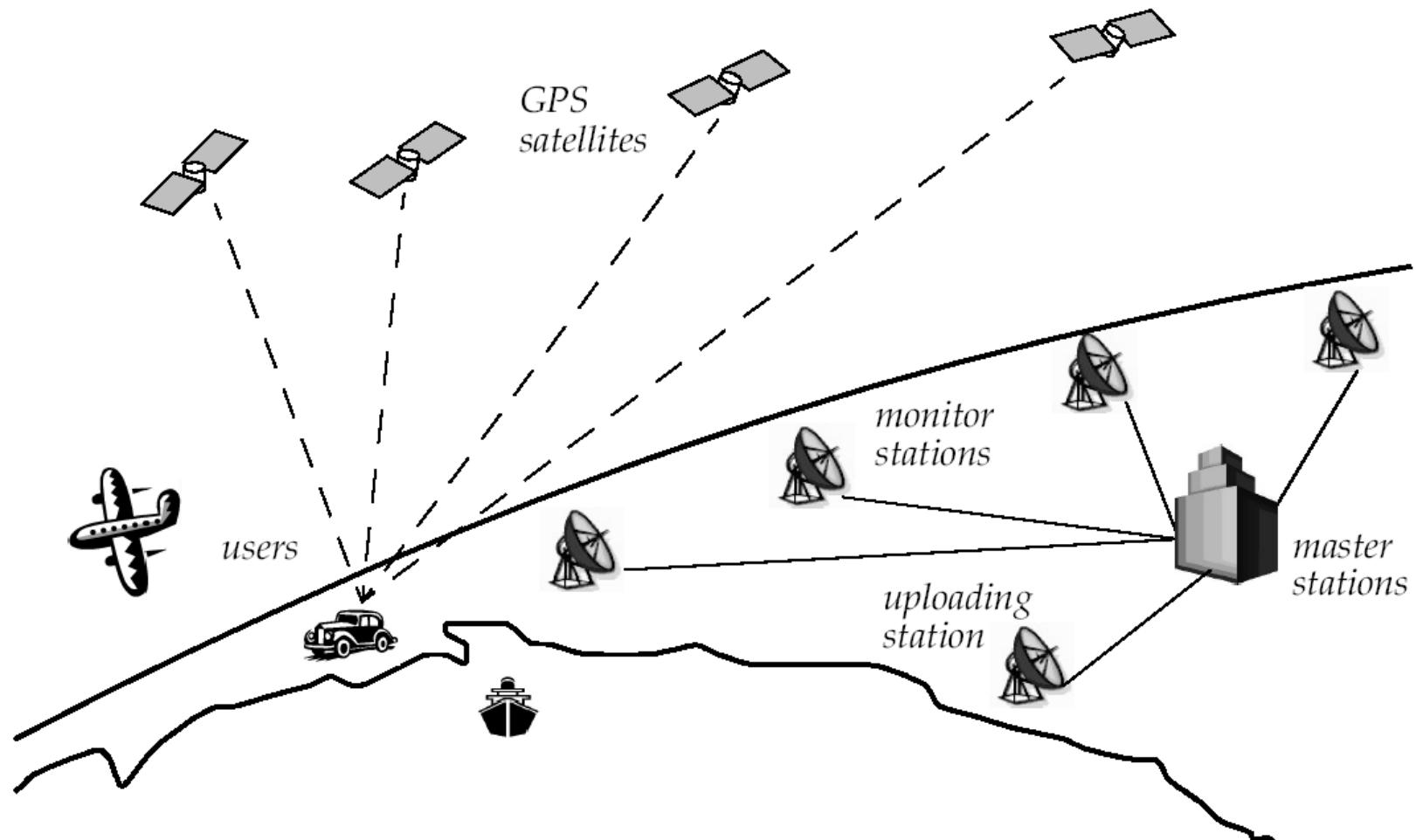
- Desarrollado para uso militar
- Recientemente accesible para aplicaciones comerciales
- 24 satélites (incluyendo tres recambios) orbitan alrededor de la Tierra cada 12 horas a una altura de 20.190 km.
- Cada satélite emite continuamente su posición y hora actual
- Los receptores de GPS son **pasivos** y **exteroceptivos**
- La localización del receptor GPS se realiza mediante el cálculo del **tiempo de vuelo** desde los diferentes satélites hasta el receptor

□ Desafíos técnicos:

1. **Sincronización** del tiempo entre los satélites y el receptor GPS
2. Actualización en tiempo real de la **posición** exacta de los satélites
3. Medida precisa del **tiempo de vuelo**
4. Visión directa de los satélites (ciudades, bosques, etc.)



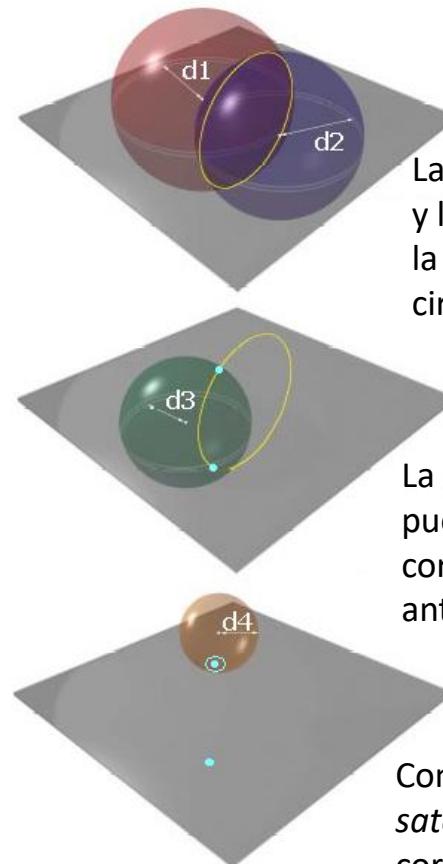
3.3 Sensores



3.3 Sensores

□ GPS:

- Principio de trilateración



La medida de la distancia d_1 al *satélite₁* y la distancia d_2 al *satélite₂* proporciona la intersección de las dos esferas (una circunferencia)

La medida de la distancia d_3 al *satélite₃* puede proporcionar hasta 2 puntos de corte con la circunferencia obtenida anteriormente

Con la medida de la distancia d_4 al *satélite₄* se obtiene un único punto de corte que corresponderá con la posición estimada del robot

$$(x - x_{AP_u})^2 + (y - y_{AP_u})^2 + (z - z_{AP_u})^2 = d_u^2, \quad \forall u \in [1, \dots, 4]$$

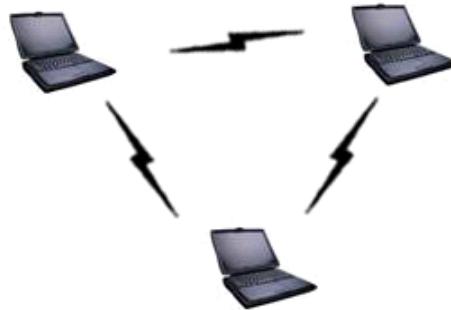
$$d_u = \sqrt{(x - x_{AP_u})^2 + (y - y_{AP_u})^2 + (z - z_{AP_u})^2}, \quad \forall u \in [1, \dots, 4]$$

□ GPS:

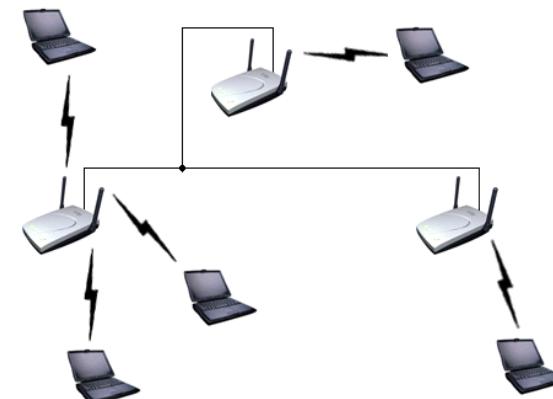
- Estrategias de mejora:
 - DGPS o GPS diferencial: se utiliza una **estación base** de posición geográfica perfectamente conocida, esta estación realiza correcciones sobre las medidas que recibe de los diferentes satélites y las envía a los receptores que tiene en sus cercanías (GSM, RDS, RF, etc.)
 - GPS **cinemático**: medida de la **fase** de las dos portadoras (L1, L2) en todas las señales recibidas desde los diferentes satélites en lugar de utilizar el mensaje contenido en ellas. Utilizan también una estación base para sincronizar las portadoras que se obtienen en cada uno de los receptores.
- Errores típicos:
 - GPS comercial: 15m
 - DGPS: 1m
 - GPS cinemático: 1cm
- Frecuencia/Ancho de banda:
 - Comerciales: 1Hz
 - Cinemáticos: 5Hz

3.3.12. Balizas de referencia interiores

- ❑ Se suele emplear tecnologías basadas en ultrasonidos/infrarrojos/RF
- ❑ A modo de ejemplo, las balizas basadas en **WiFi (RF)**
 - WiFi: Wireless-Fidelity
 - Principal aplicación: WLAN (Wireless Local Area Network)



Ad-Hoc “Punto-Punto”



Managed “Administrado”

- **Características:** IEEE 802.11a/b/g, **2.4GHz b/g** y 5GHz a, espectro ensanchado, velocidad 54Mbps/100Mbps

□ WiFi (RF)

□ Medida del **nivel de señal recibido** en el interfaz WiFi

■ **Técnicas** aplicadas a la localización:

- Modelo de **propagación** -> multilateración
- Comparación con un **mapa a priori (fingerprint)**:
 - Calculado con un modelo
 - Fase de entrenamiento (manual o automática)



■ **Ventajas:**

- No es preciso modificar el entorno
- **Frecuencia banda libre**
- **Coste nulo** (interfaz de comunicaciones)

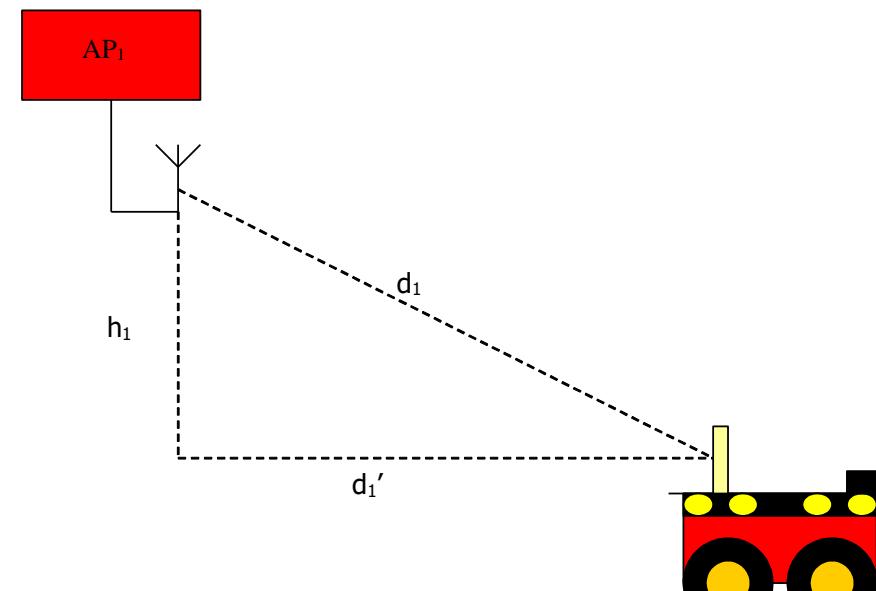
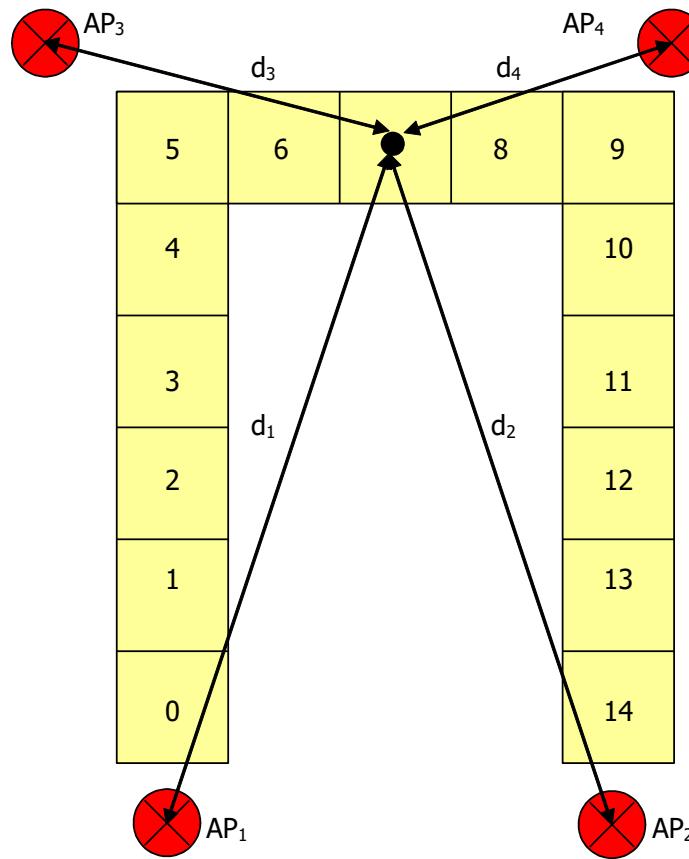


■ **Inconvenientes:**

- Frecuencia de trabajo **2.4GHz** (resonancia del agua)
- **Frecuencia banda libre**
- **Multicamino** en interiores

- WiFi (RF): modelo de propagación -> distancia -> multilateración

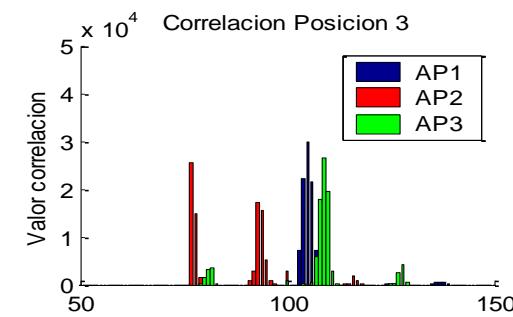
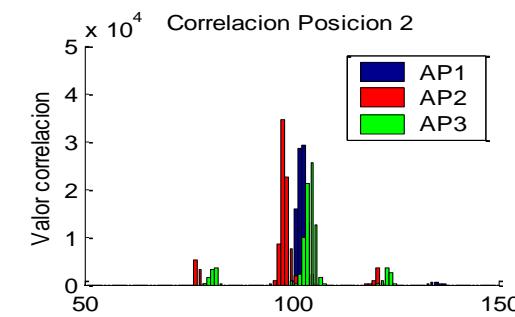
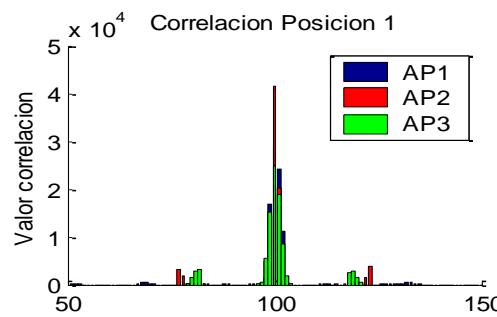
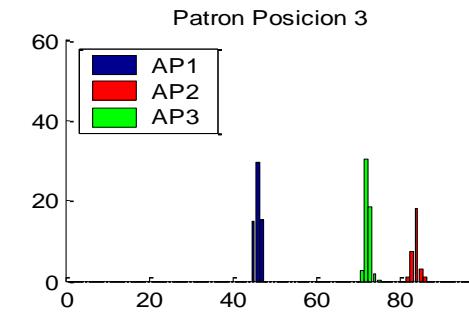
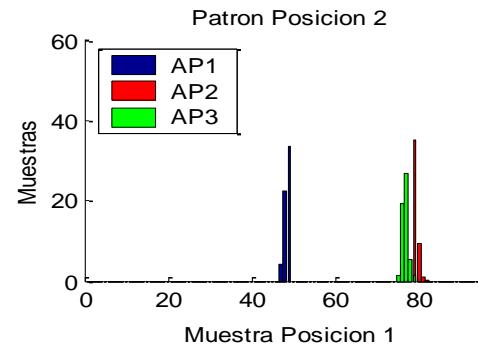
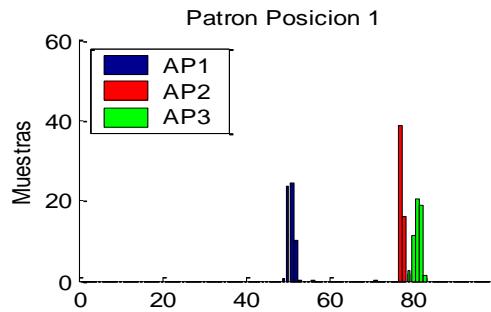
$$RSL_{AP_u} = TSL_{AP_u} + G_{TX} + G_{RX} + 20\log(\lambda) - 20\log(4\pi) - 10 \cdot n_W \cdot \log(d_u) - X_a, \forall u \in U$$



$$d_1 = \sqrt{d_1'^2 + h_1^2}$$

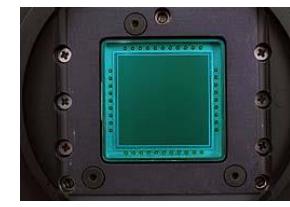
3.3 Sensores

- WiFi (RF): fingerprint -> BBDD -> clasificación/correlación/identificación



3.3.13. Sensores basados en visión

- La **visión** humana es uno de los más sentidos más potentes
- Proporciona una **gran cantidad de información** sobre el entorno y los cambios que ocurren en él.
- Sensores CCD (Charged Coupled Device)



2048 x 2048 CCD array

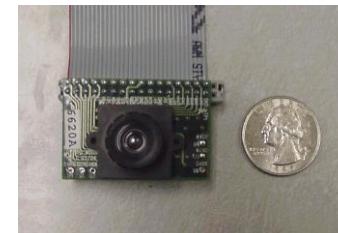


Sony DFW-X700



Canon IXUS 300

- Sensores CMOS



□ Características:

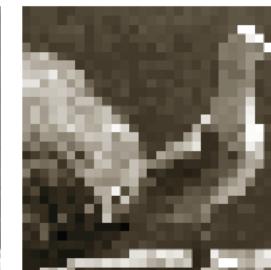
- **Resolución espacial**: determina el número de píxeles de la imagen



128 x 128 pixels



64 x 64 pixels

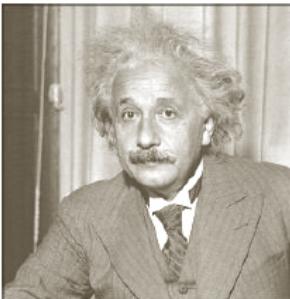


32 x 32 pixels

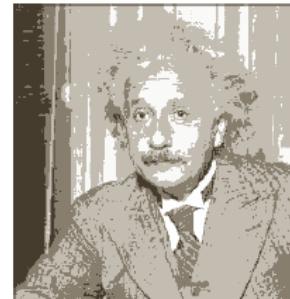


16 x 16 pixels

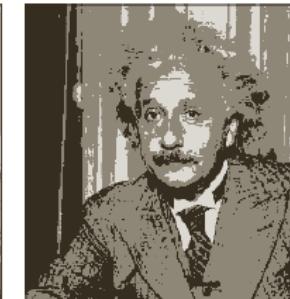
- **Cuantificación**: niveles de intensidad que se utilizan para representar el valor de un píxel



256 niveles



50 niveles



10 niveles



2 niveles

□ Características:

- Tamaño, peso, consumo, etc.
- **Frecuencia adquisición:** se mide en imágenes o frames por segundo (>30fps)
- B/N o color

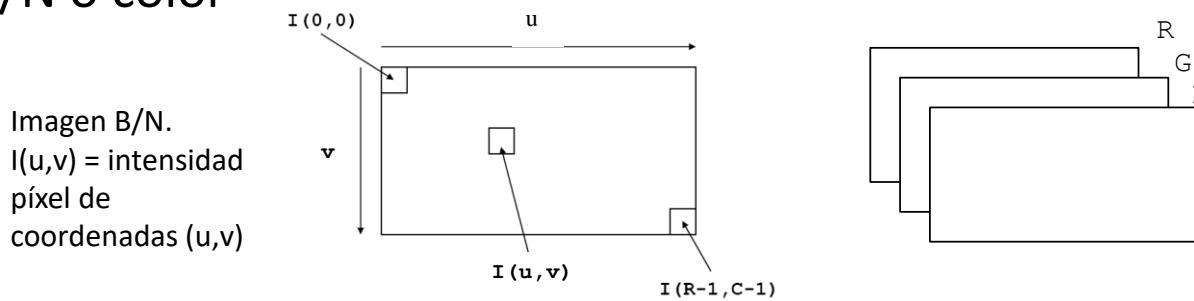
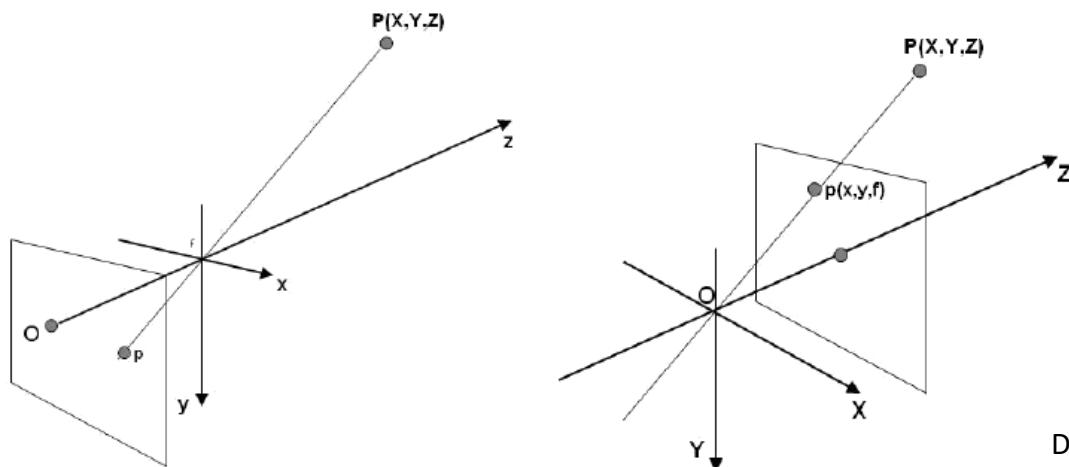


Imagen Color.
 $I(u, v)_3$ = intensidad píxel de coordenadas (u, v) por cada capa de color

- **Óptica:** normal (40-50mm), gran angular (<35mm, útil en robótica), teleobjetivo (>70mm), zoom (distancia focal variable)
- Longitudes de onda detectadas: **visible, infrarrojo**
- Cámaras fijas o con posibilidad de movimiento Pan-Tilt

□ Modelo de cámara pin-hole:



$$\begin{aligned}x &= fX_c/Z_c \\y &= fY_c/Z_c \\z &= f\end{aligned}$$

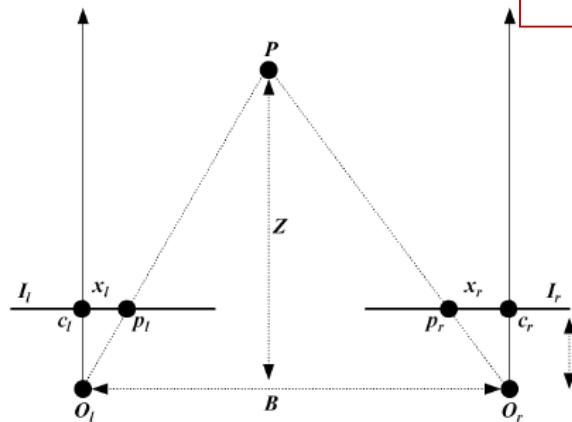
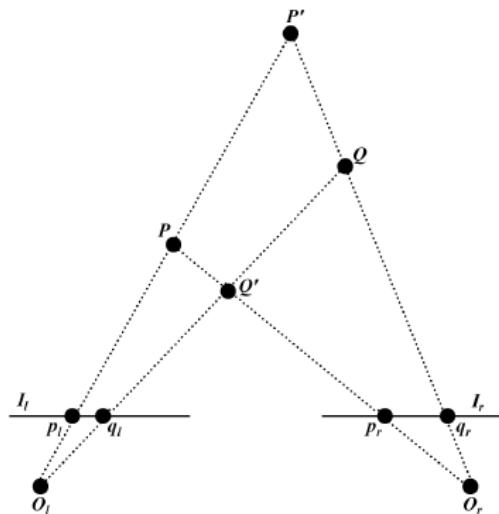
Donde
 f es la distancia focal y el vector $(x, y, z)^T$ expresa las coordenadas en la imagen referenciadas desde la cámara.

$$\begin{cases} u = x/dx + u_0 \\ v = y/dy + v_0 \end{cases}$$

Donde:
 (u, v) son las coordenadas pixélicas del punto 3D proyectado en el plano imagen
 (u_0, v_0) representan las coordenadas en píxeles de la intersección del eje óptico y el plano imagen
 (dx, dy) son las dimensiones en mm, en los ejes x e y respectivamente, de un píxel elemental de la matriz CCD de la cámara (esto es, mm/píxelx y mm/píxely)

- Se pierde la información de la profundidad (Z)

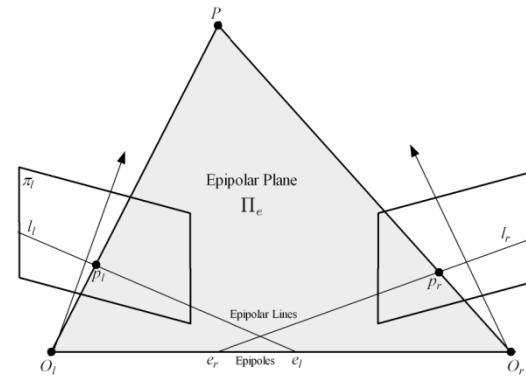
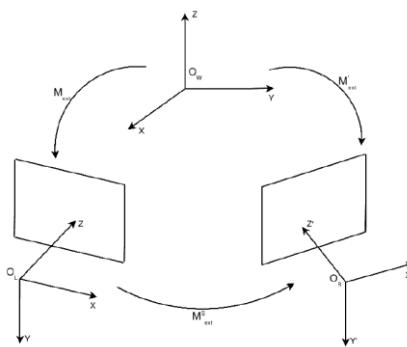
□ Modelo de cámara estéreo:



$$\frac{B + x_l - x_r}{Z - f} = \frac{B}{Z} \Rightarrow Z = f \frac{B}{d}$$

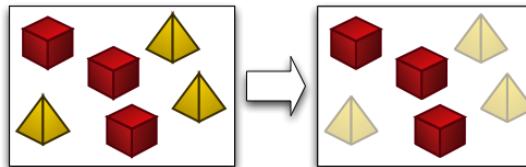
Donde: $d = x_r - x_l$ es la denominada **disparidad** que mide la diferencia en el eje x del plano imagen de los puntos correspondientes a las cámaras derecha e izquierda

- Problemas con la alineación -> Geometría epipolar



□ Procesado de imágenes:

- Trasformaciones geométricas, histogramas, realce, suavizado...
- Segmentación: consiste en localizar los diferentes objetos que están presentes en una imagen



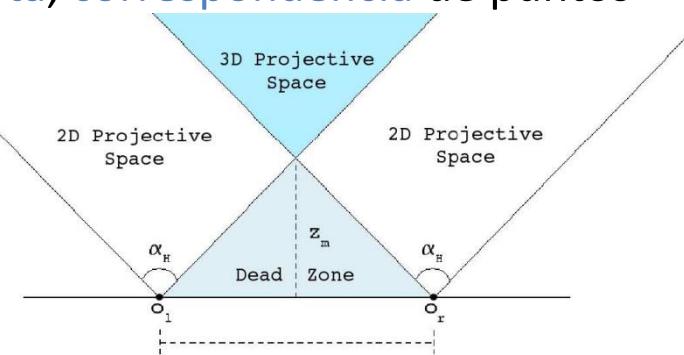
- Detección de bordes: fijar la atención en una zona imagen



- Clasificación: de los elementos detectados en base a unas características comunes (Redes Neuronales, SVM, Fuzzy, etc.).

□ Problemas de los sensores basados en visión:

- Oclusión: pérdida de visibilidad del objeto por una o varias cámaras
- Coste computacional: procesamiento elevado (Ej. $640 \times 480 \times 3 = 921\text{Kbytes}$)
- Estéreo: zona muerta, correspondencia de puntos



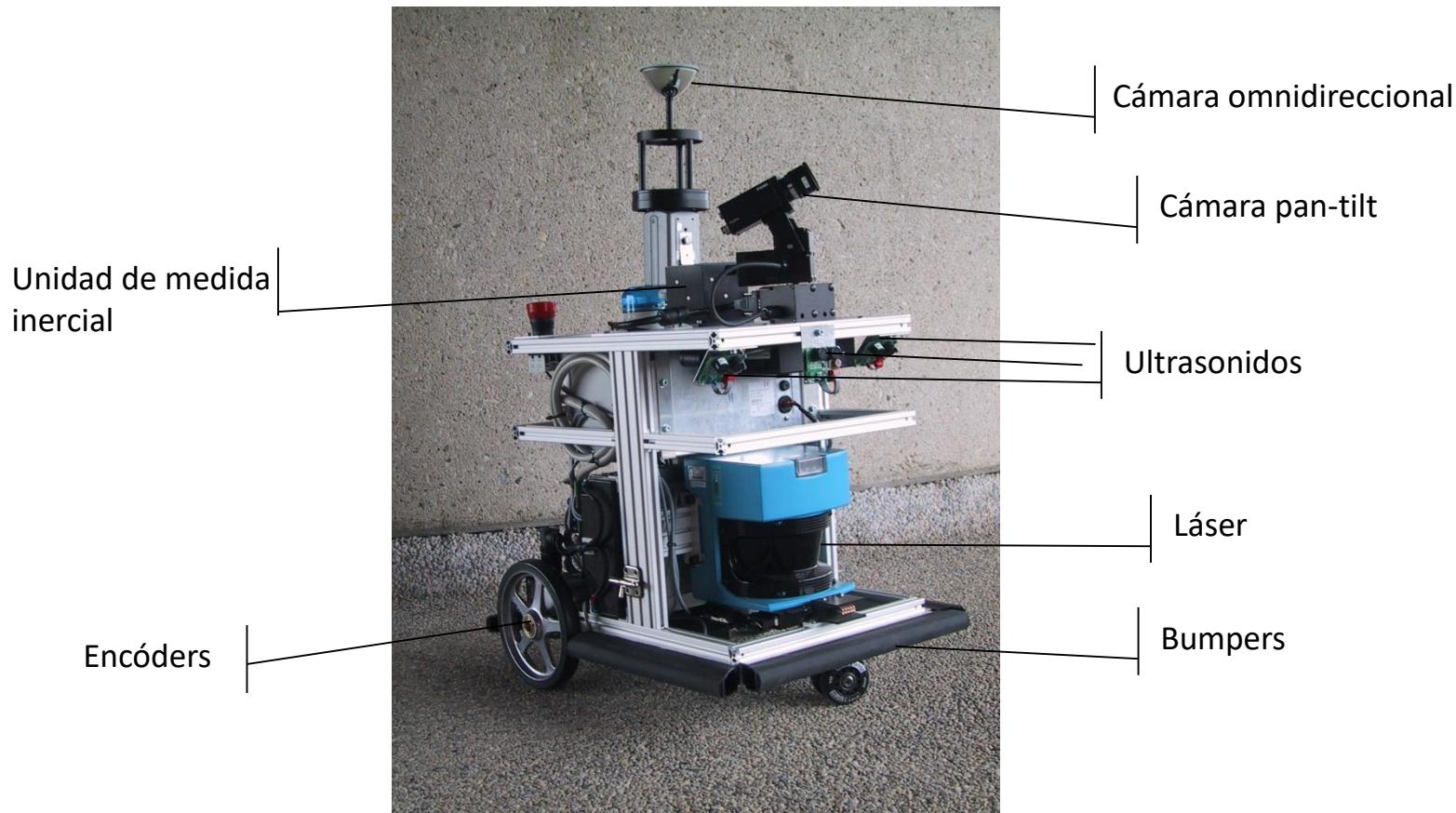
- Distorsiones: deformación imagen \rightarrow perspectiva o de lente (efecto barril, cojín)



3.3.14. Fusión sensorial

- En la mayoría de los casos resulta **insuficiente** la información proporcionada por un único sensor.
- La información puede estar **contaminada** con ruido o incluso puede llegar a desaparecer (occlusiones en visión, falta de visibilidad de satélites GPS, etc.)
- Utilizar la información de diferentes sensores puede ayudar a garantizar la correcta estimación del robot dentro del entorno o bien la dinámica del mismo.
- Problemas:
 - **Diferentes** exactitud/precisión/información/ruido de los diferentes sensores
 - Decidir la **estrategia** y el **algoritmo** más conveniente para cada caso

□ Ejemplo de robot móvil con sistema multisensorial



- **Estrategia:** ejemplo de fusión sensorial entre odometría y GPS en un robot. Premisa: odometría acumula un gran error en recorridos largos.
 1. Utilizar la **odometría** como estimador de la posición hasta que la distancia recorrida sea superior a un **umbral** (por ejemplo 10m) y entonces acudir a la estimación que proporciona el **GPS**.
 2. Emplear como estimador de posición el **GPS** y cuando no se reciba señal, acudir a la estimación del **odómetro**.
 3. Utilizar el **GPS** para mejorar continuamente la estimación proporcionada por el **odómetro**. La ventaja que presenta este método es que si desaparece la señal del GPS durante un periodo de tiempo la estimación del odómetro será fiable por haberse corregido en cada iteración con las estimaciones previas del GPS. En este modo de funcionamiento los problemas surgen sólo si la señal GPS desaparece durante largos periodos de tiempo, y aún en este caso una reducción drástica en la velocidad del robot paliaría el problema de la localización.
- **Algoritmos** de fusión: filtros bayesianos (Kalman, Filtros de Partículas), algoritmos basados en comportamientos, técnicas basadas en lógica borrosa, redes neuronales, etc.

4. Tipos de robots móviles

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. El problema de la navegación autónoma
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Procesadores
 - 3.2. Actuadores
 - 3.3. Sensores
- 4. Tipos de robots móviles**
5. Modelos de movimiento
6. Mapas de entorno
7. Enfoques de razonamiento



4. Tipos de robots móviles

4.1 Clasificación general



Vehículos con
ruedas



Pistas de
deslizamiento



Robots con patas



Robots articulados



Robots submarinos
y aéreos

4. Tipos de robots móviles

4.2 Vehículos con ruedas

4.2.1. Características principales:

- 😊 Solución simple y eficiente para terrenos duros, planos y libres de obstáculos
- 😊 Velocidades relativamente altas
- 😊 Buena capacidad de “carga”

- 😢 Deslizamientos y vibraciones
- 😢 Poco eficiente en terrenos blandos
- 😢 Maniobrabilidad limitada excepto en configuraciones especiales



4. Tipos de robots móviles

4.2.2. Tipos de ruedas

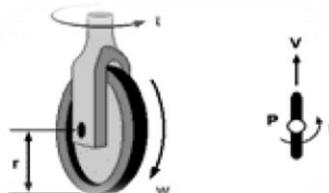
Atendiendo a la TRACCIÓN

- MOTRIZ** ⇒ su velocidad la fija un motor asociado a la rueda
- PASIVA** ⇒ no lleva motor, su movimiento queda fijado por el del vehículo (sólido rígido)

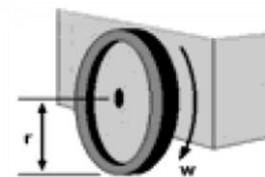
Atendiendo a la DIRECCIÓN

- DIRECTRIZ** ⇒ su ángulo de dirección lo fija un motor asociado a la rueda
- FIJA** ⇒ no puede cambiar de dirección
- LIBRE** ⇒ puede girar libremente, quedando su dirección determinada por el movimiento del vehículo (sólido rígido) . Ruedas tipo *castor*
- OMNIDIRECCIONAL** ⇒ puede girar en cualquier dirección de forma instantánea (ruedas suecas o esféricas).

Rueda directriz



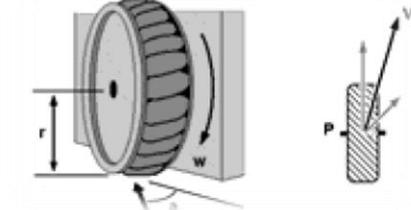
Rueda fija



Rueda libre
descentrada (*castor*)



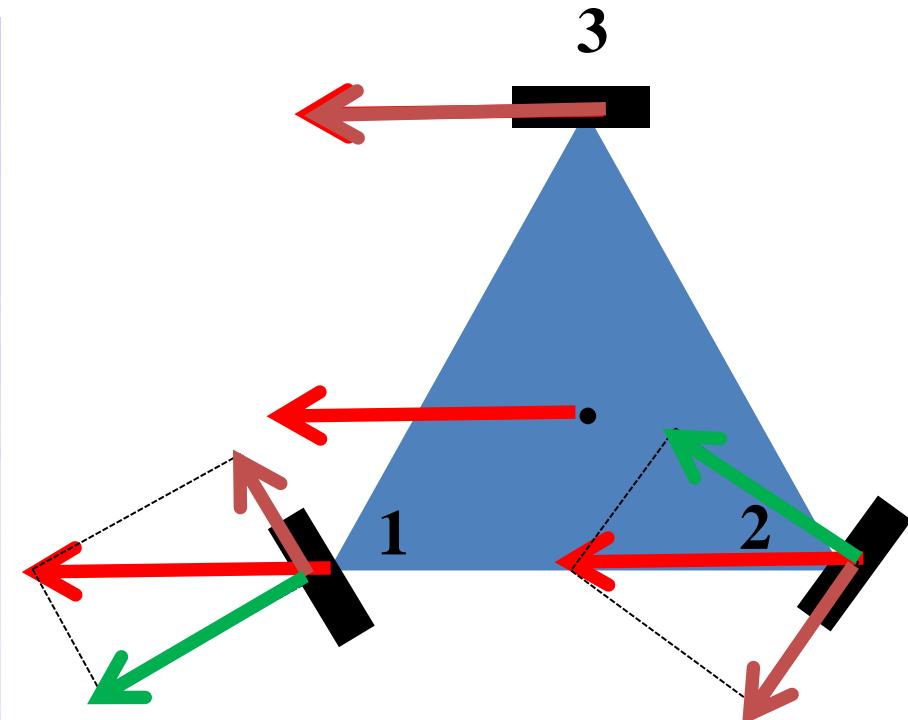
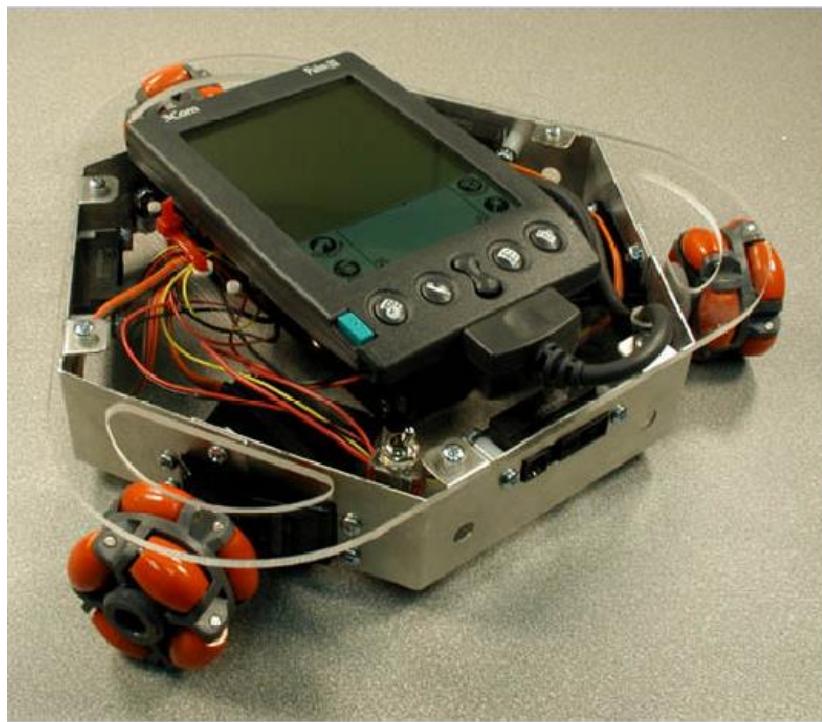
Rueda sueca
(omnidireccional)



4. Tipos de robots móviles

EJEMPLOS RUEDAS SUECAS

Robot PPRK

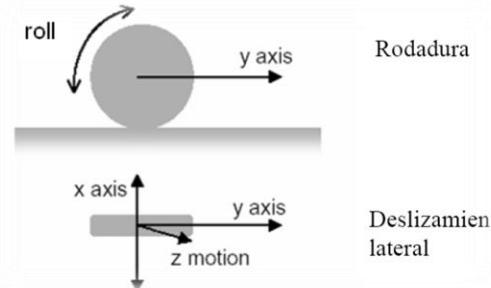
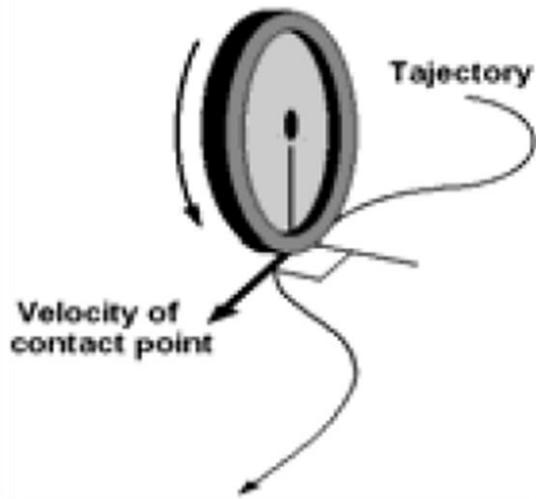


4. Tipos de robots móviles

4.2.3. Rodadura ideal

Se dice que existe rodadura ideal cuando:

- No hay deslizamiento de la rueda en dirección perpendicular a la rodadura



- No hay deslizamiento translacional entre la rueda y el suelo
- Como máximo hay un eje de dirección
- El eje de dirección es perpendicular al suelo

Este modelo es válido a velocidades bajas y en estas condiciones la distancia avanzada por el punto central de la rueda por cada giro de la misma es $2\pi r$ (siendo r el radio de la rueda)

4. Tipos de robots móviles

4.2.4. Condiciones de rodadura ideal en vehículos a ruedas

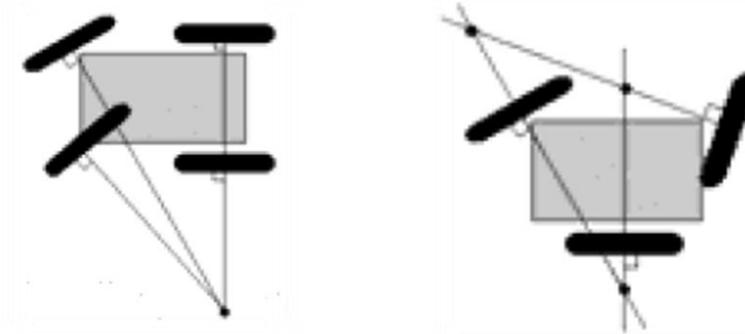
Puesto que un vehículo es un **sólido rígido** se deben cumplir ciertas restricciones para que exista rodadura ideal:

1. **Centro instantáneo de rotación (ICR)**

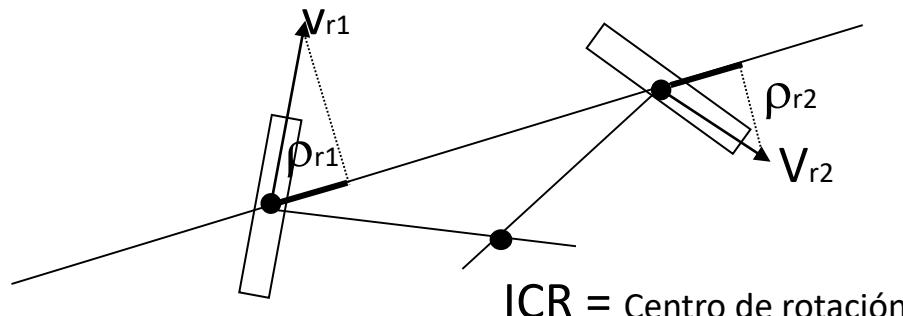
Todos los ejes de rodadura

(perpendiculares al plano de la rueda)

deben confluir en un mismo punto (ICR)



2. **Sólo existen tres grados de libertad en las variables de velocidad y dirección de las "n" ruedas**



$$v_{r1} \cdot \cos(\rho_{r1}) = v_{r2} \cdot \cos(\rho_{r2})$$

4. Tipos de robots móviles

4.2.5. Consideraciones en la elección del tipo/disposición de ruedas (SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN)

1. Estabilidad. Número de puntos de contacto, centro de gravedad,

estática/dinámica...

2. Maniobrabilidad. Omnidireccional, restricciones, geometría...

OMNIDIRECCIONALIDAD TOTAL: capacidad para desplazarse instantáneamente en cualquier dirección del plano sin “reorientar” el “cuerpo” del robot.

OMNIDIRECCIONALIDAD PARCIAL: capacidad para rotar sobre su propio centro

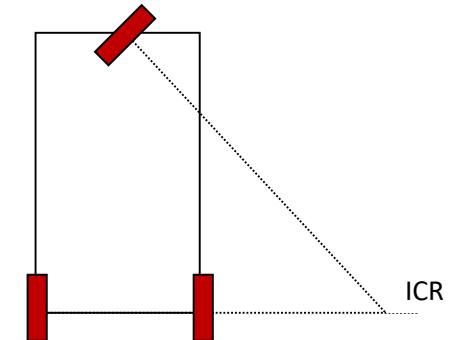
3. Controlabilidad. Sencillo/Complejo

EN GENERAL HAY COMPROMISO ENTRE ESTOS 3 ASPECTOS

4.2.6. Configuraciones típicas (sistemas de locomoción)

1. Triciclo clásico

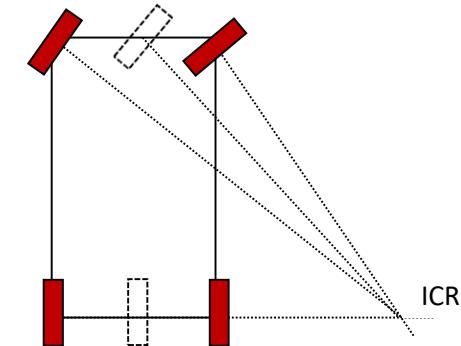
- Rueda delantera motriz y directriz. Ruedas traseras fijas y pasivas.
- Tres grados de libertad:
 1. Ángulo de ruedas traseras (fijo)
 2. Ángulo de la rueda delantera
 3. Velocidad de la rueda delantera
- Sencilla de implementar, por lo que se utiliza bastante en interiores y exteriores pavimentados
- Poco estable en terrenos difíciles. El centro de gravedad tiende a desplazarse en pendientes, causando pérdida de tracción.



4. Tipos de robots móviles

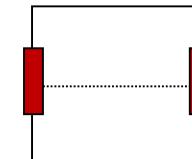
2. Ackermann

- Utilizado en **vehículos de cuatro ruedas convencionales**. Se usa de forma generalizada en robots móviles en exteriores.
- Dos ruedas motrices y directrices delanteras (con sistema diferencial) y dos ruedas pasivas fijas traseras.
- La rueda delantera interior gira a un ángulo ligeramente mayor que la exterior para evitar deslizamientos (sus ejes de rotación intersectan sobre el eje de rotación de las ruedas traseras).
- **Tres grados de libertad:**
 1. Ángulo de ruedas traseras (fijo)
 2. Ángulo de ruedas delanteras (diferencial)
 3. Sistema de tracción, normalmente en las ruedas delanteras mediante diferencial
- Requiere sistemas diferenciales en las ruedas delanteras.
- Permite soportar mayor carga que otras configuraciones ya que es una configuración muy estable incluso en los giros a alta velocidad (dada su gran direccionalidad). Por contrapartida, la maniobrabilidad es baja.



3. Direccionamiento diferencial

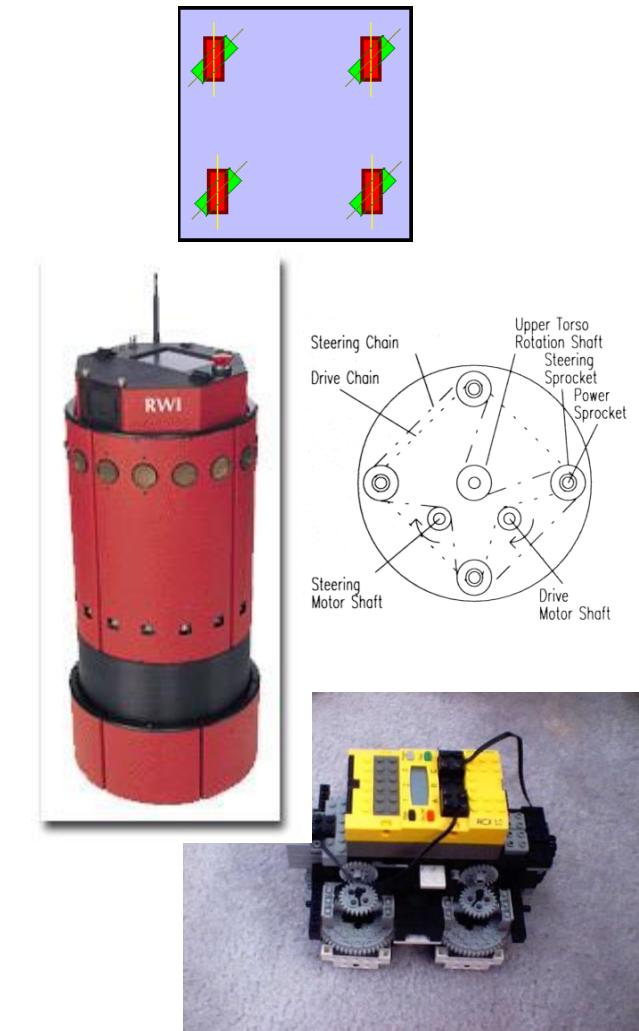
- Dos ruedas motrices fijas montadas sobre el mismo eje.
- El direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades entre las dos ruedas.
- Consigue OMNIDIRECCIONALIDAD PARCIAL (movimiento en sentido contrario de las dos ruedas)
- Tres grados de libertad:
 1. Ángulo de ruedas (fijo)
 2. Velocidad de la rueda derecha
 3. Velocidad de la rueda izquierda
- Necesidad de control para mantener el movimiento en línea recta.
- Necesidad de una o más ruedas tipo *castor* para soporte
- Configuración muy frecuente en robots para interiores, normalmente más pequeños y que soportan menos carga.



4. Tipos de robots móviles

4. Direccionamiento síncrono (*synchro drive*)

- Actuación simultánea de todas las ruedas, que giran de forma síncrona.
- Configuración mecánica más sencilla: dos motores, uno controla la tracción de todas las ruedas y el otro la dirección de todas las ruedas. La transmisión se consigue mediante coronas de engranajes o correas concéntricas (complejidad).
- Al girar las ruedas, el chasis se mantiene en la misma orientación. Si se desea controlar la orientación del robot debe unirse mediante una torreta al eje de las ruedas.
- La correcta alineación de las ruedas es crítica en esta configuración
- No se definen los tres grados de libertad para las ruedas: control directo de las velocidades lineal y angular del robot.



4.3. Pistas de deslizamiento

- Vehículos tipo oruga en los que tanto la impulsión como el direccionamiento se consiguen mediante pistas de deslizamiento.
- Las pistas actúan como ruedas de gran diámetro, permitiendo superar desniveles del terreno superiores a las ruedas convencionales.
- Útiles en navegación “campo a través” o en terrenos irregulares.
- Deslizamientos implícitos. Imposible localización mediante odometría. Suelen utilizarse en funcionamiento teleoperado.



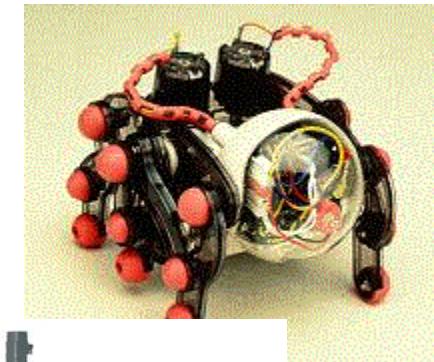
4.4 Robots articulados



- Para terrenos difíciles a los que debe adaptarse el cuerpo del robot.
- Normalmente se articulan dos o más módulos con locomoción a ruedas.
- La redundancia en la estructura ofrece la posibilidad de intercambiar segmentos y facilitar su transporte.
- Son configuraciones recientes. Prototipos de laboratorio. Control complejo.

4.5 Robots con patas

- Permiten aislar el cuerpo del terreno empleando puntos discretos de soporte.
- Mejores propiedades que las ruedas para atravesar terrenos difíciles llenos de obstáculos o desniveles.
- Permiten conseguir la omnidireccionalidad.
- Menor deslizamiento.
- Mayor complejidad de los mecanismos de control y mayor consumo de energía en la locomoción.
- Gran variedad de estructuras y tipos de patas.
- Son de interés los robots trepadores utilizados en tareas de inspección y reparación en paredes verticales.
- Reciente campo de interés: los robots humanoides (bípedos).



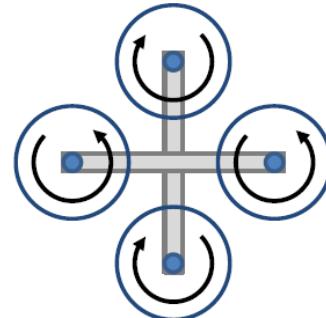
4.6 Robots submarinos y aéreos

- Mayor dificultad de control: movimiento tridimensional.
- No puede obviarse el estudio dinámico, al contrario de lo que sucede con los robots “terrestres” en la mayoría de los casos.



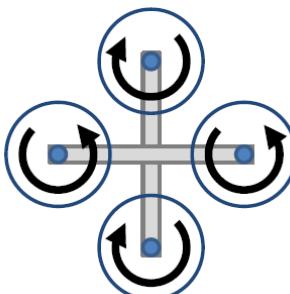
Auge de los robots aéreos

- De ala fija
- De hélice multi-rotor (Ej: cuadricópteros)

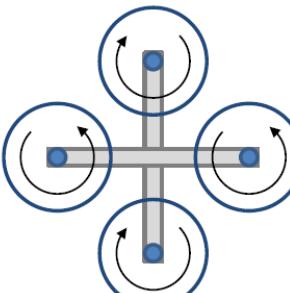


Posición estable
(compensa gravedad)

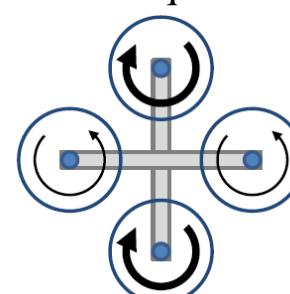
Ascender



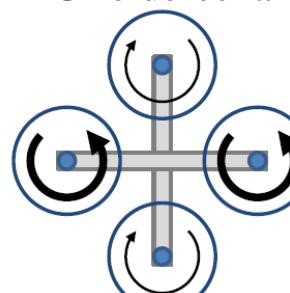
Descender



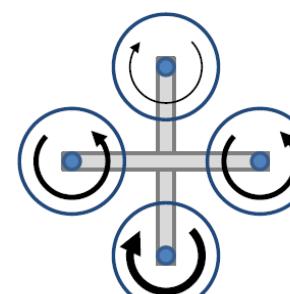
Giro izquierda



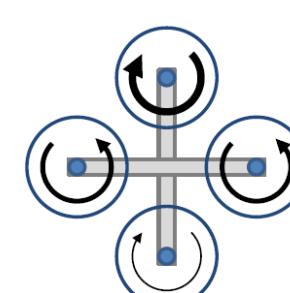
Giro derecha



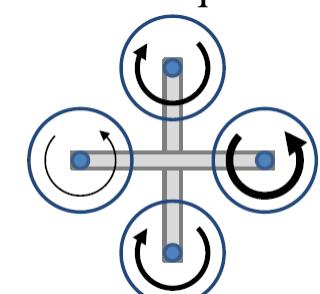
Avanza



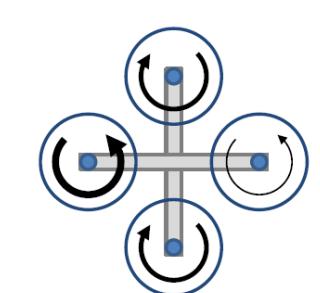
Retrocede



Mueve izquierda



Mueve derecha



5. Modelos de movimiento

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. El problema de la navegación autónoma
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Actuadores
 - 3.2. Sensores
 - 3.3. Procesadores
4. Tipos de robots móviles
5. **Modelos de movimiento**
6. Mapas de entorno
7. Enfoques de razonamiento

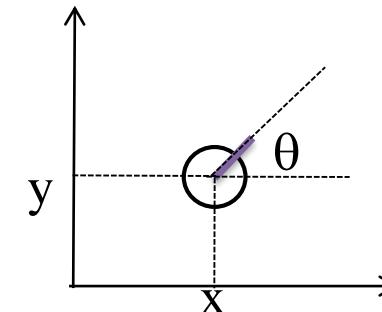


5.1 Variables para caracterizar el movimiento

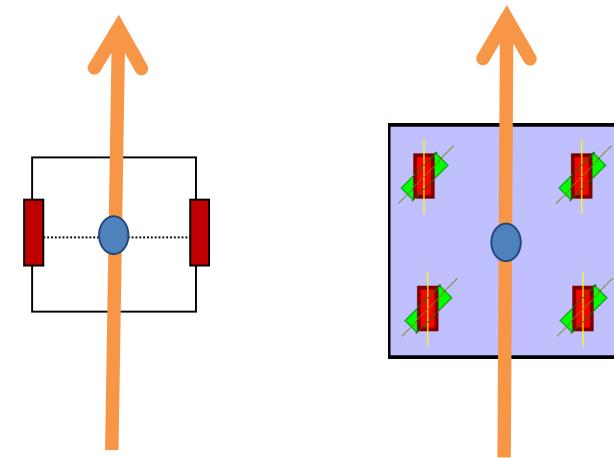
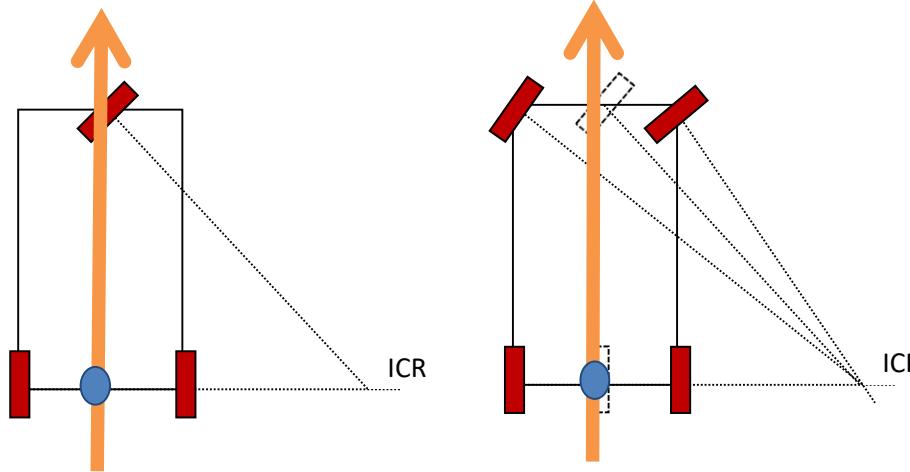
a) Posición del robot en el plano

Viene dada por la **posición de un punto** del móvil (“**punto de referencia**”) y el **ángulo de un eje** del mismo (“**eje de referencia**”) respecto a un sistema de referencia externo fijo (**sistema de referencia global**)

Sistema de referencia global



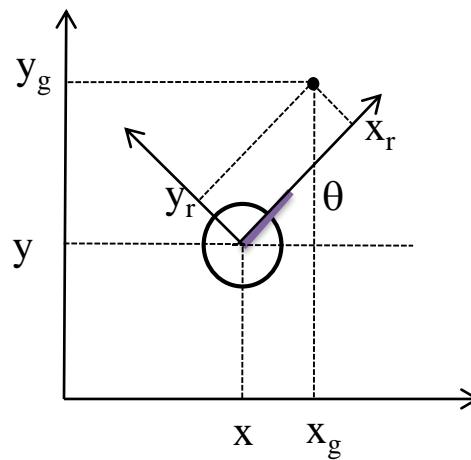
$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$$



5. Modelos de movimiento

Se conoce como **sistema de referencia del robot (local)** al que tiene como origen el punto de referencia del robot y cuyo eje de abscisas coincide con su eje de referencia

CAMBIOS DE UN SISTEMA DE REFERENCIA A OTRO:



Del sistema local al global:

$$\begin{bmatrix} x_g \\ y_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix}$$

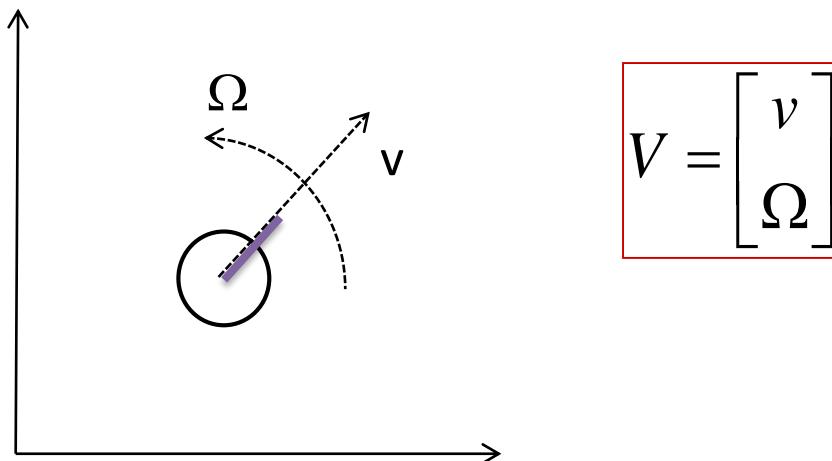
Del sistema global al local:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_g - x \\ y_g - y \end{bmatrix}$$

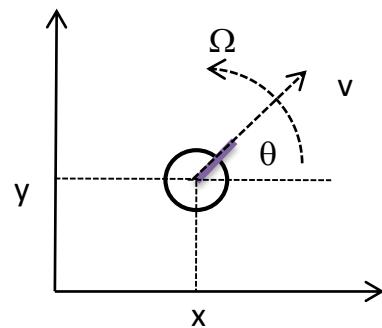
b) Velocidad global del robot

Caracteriza el movimiento del móvil respecto al sistema de referencia global mediante dos componentes:

- **Velocidad lineal (v):** velocidad del “punto de referencia” en la dirección del “eje de referencia”
- **Velocidad angular (Ω):** velocidad de variación del ángulo del eje de referencia respecto al sistema de referencia global



c) Integración de la velocidad global para obtener la posición



$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos\theta \\ v \cdot \sin\theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot V$$

5.2 Tipos de modelos de movimiento

1. Modelo dinámico

Describe el movimiento del móvil en función de los pares y/o fuerzas internas (sistemas de actuación) y/o externas (rozamientos, deslizamientos, etc.)

2. Modelo cinemático

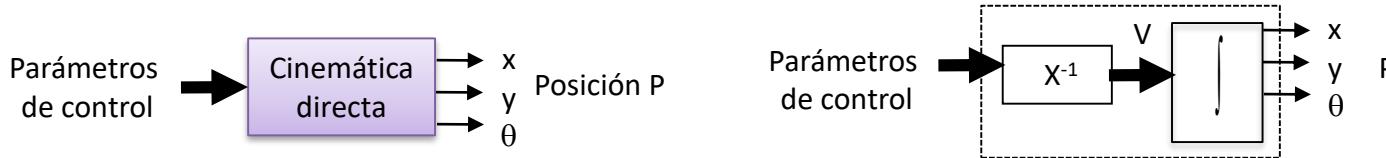
Describe el movimiento del móvil en función de las velocidades y giros aplicados a las ruedas (parámetros de control), sin tener en cuenta las fuerzas que los generan.

Puede aplicarse a velocidades bajas, cuando existe rodadura ideal.

5. Modelos de movimiento

Dentro del estudio cinemático se distinguen dos casos:

- a) **Cinemática directa.** Obtención de la posición en función de los parámetros de control.



- b) **Cinemática inversa.** Obtención de los parámetros de control que permiten llegar a una determinada posición



5.3 Modelos cinemáticos de móviles a ruedas

1. Hipótesis de partida

- El robot se mueve sobre una superficie plana
- Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo
- Condiciones de rodamiento ideal (no hay deslizamientos)
- El robot no tiene partes flexibles
- Durante un periodo de tiempo suficientemente pequeño en el que se mantiene constante la consigna de dirección, el vehículo se moverá de un punto al siguiente a lo largo de un arco de circunferencia
- El robot se comporta como un sólido rígido, de manera que si existen partes móviles (ruedas tipo *castor*), éstas se situarán en la posición adecuada para rodamiento ideal

2. Restricciones cinemáticas

Son dependencias de las variables que influyen en el movimiento. Dos tipos:

- **HOLÓNOMAS.** Son restricciones en las que no intervienen las velocidades. **Típicas en brazos articulados**
- **NO HOLÓNOMAS.** Son restricciones dependientes de las velocidades. **Típicas en muchos robots móviles**

Intuitivamente: las restricciones no holónomas no limitan la posición final a alcanzar dada una posición inicial, pero sí el camino seguido para llegar a ella

3. Ejemplo 1: cinemática de robots con configuración diferencial

Parámetros de control: $\begin{cases} w_r \Rightarrow \text{velocidad angular de la rueda derecha} \\ w_l \Rightarrow \text{velocidad angular de la rueda izquierda} \end{cases}$

CINEMÁTICA DIRECTA

r = radio de las ruedas ; L = distancia entre las ruedas

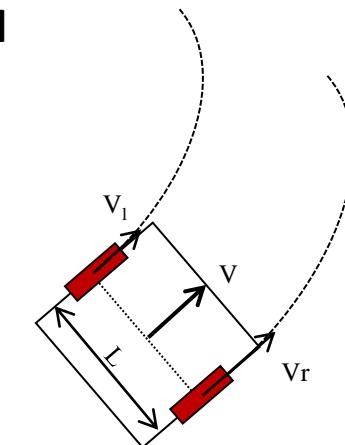
$$\text{Velocidad lineal del robot : } v = \frac{v_l + v_r}{2} = \frac{r \cdot w_l + r \cdot w_r}{2} = \frac{r}{2} \cdot (w_r + w_l)$$

$$\text{Velocidad angular del robot : } \Omega = \frac{v_r - v_l}{L} = \frac{r \cdot w_r - r \cdot w_l}{L} = \frac{r}{L} \cdot (w_r - w_l)$$

Sustituyendo en la ecuación general:

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos\theta \\ v \cdot \sin\theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos\theta & \frac{r}{2} \cos\theta \\ \frac{r}{2} \sin\theta & \frac{r}{2} \sin\theta \\ \frac{r}{L} & \frac{-r}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \end{bmatrix}$$

$$\text{Restricción no holónoma: } \dot{x} \cdot \sin\theta - \dot{y} \cdot \cos\theta = 0$$



CINEMÁTICA INVERSA

Debido a la restricción no holónoma la cinemática inversa es difícil de resolver.

Existen múltiples (pero no infinitas) soluciones para llegar a una posición final

Ejemplo: solución basada en la concatenación de giros sobre el sitio y trayectorias rectilíneas

5. Modelos de movimiento

4. Ejemplo 2: cinemática de robots con configuración “tipo bicicleta” (triciclo y ackerman)

Parámetros de control: $\left\{ \begin{array}{l} w_t \Rightarrow \text{velocidad angular de la rueda trasera (motriz)} \\ \rho_d \Rightarrow \text{ángulo de dirección de la rueda delantera} \end{array} \right.$

CINEMÁTICA DIRECTA

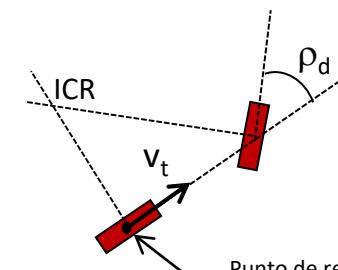
r = radio de las ruedas ; L = distancia entre las ruedas

Velocidad lineal del robot : $v = v_t = r \cdot w_t$

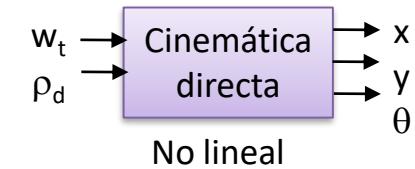
Velocidad angular del robot : $\Omega = \frac{v \cdot \operatorname{tg} \rho_d}{L} = \frac{r \cdot w_t \cdot \operatorname{tg} \rho_d}{L}$

Sustituyendo en la ecuación general:

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos \theta \\ v \cdot \sin \theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot w_t \cdot \cos \theta \\ r \cdot w_t \cdot \sin \theta \\ \frac{r \cdot w_t \cdot \operatorname{tg} \rho_d}{L} \end{bmatrix}$$



Punto de referencia
(velocidad lineal con
dirección del eje de
referencia)



CINEMÁTICA INVERSA

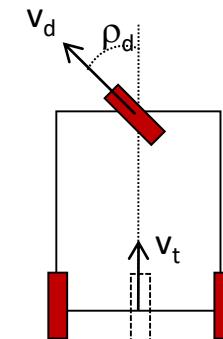
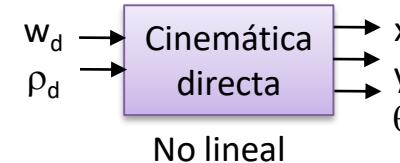
Debido a la restricción no holónoma la cinemática inversa es difícil de resolver.
 Existen múltiples (pero no infinitas) soluciones para llegar a una posición final

Adaptación de la configuración TRICICLO CLÁSICO al modelo de la bicicleta

Parámetros de control: $\begin{cases} w_d \Rightarrow \text{velocidad angular de la rueda delantera (motriz y directriz)} \\ \rho_d \Rightarrow \text{ángulo de dirección de la rueda delantera} \end{cases}$

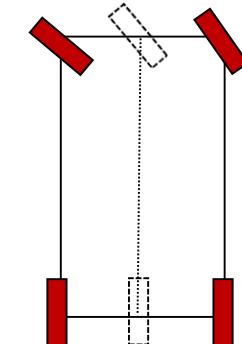
Teniendo en cuenta que $v_t = v_d \cdot \cos \rho_d$ se obtiene el modelo cinemático:

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos \theta \\ v \cdot \sin \theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot w_d \cdot \cos \rho_d \cdot \cos \theta \\ r \cdot w_d \cdot \cos \rho_d \cdot \sin \theta \\ \frac{r \cdot w_d \cdot \sin \rho_d}{L} \end{bmatrix}$$



Adaptación de la configuración ACKERMAN al modelo de la bicicleta

- El ángulo de dirección de la “rueda virtual delantera” es el valor medio del ángulo de las ruedas delanteras (sistema de transmisión diferencial)
- La velocidad angular de la “rueda virtual delantera” es el valor medio de las velocidades de las ruedas delanteras (sistema de transmisión diferencial)
- De esta manera, se ajusta al modelo del TRICICLO CLÁSICO



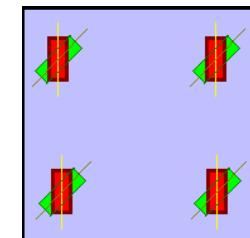
5. Ejemplo3: cinemática de robots con configuración síncrona

Parámetros de control: $\left\{ \begin{array}{l} \Omega \Rightarrow \text{velocidad del ángulo de dirección de todas las ruedas (} \dot{\rho}) \\ w \Rightarrow \text{velocidad angular de todas las ruedas} \end{array} \right.$

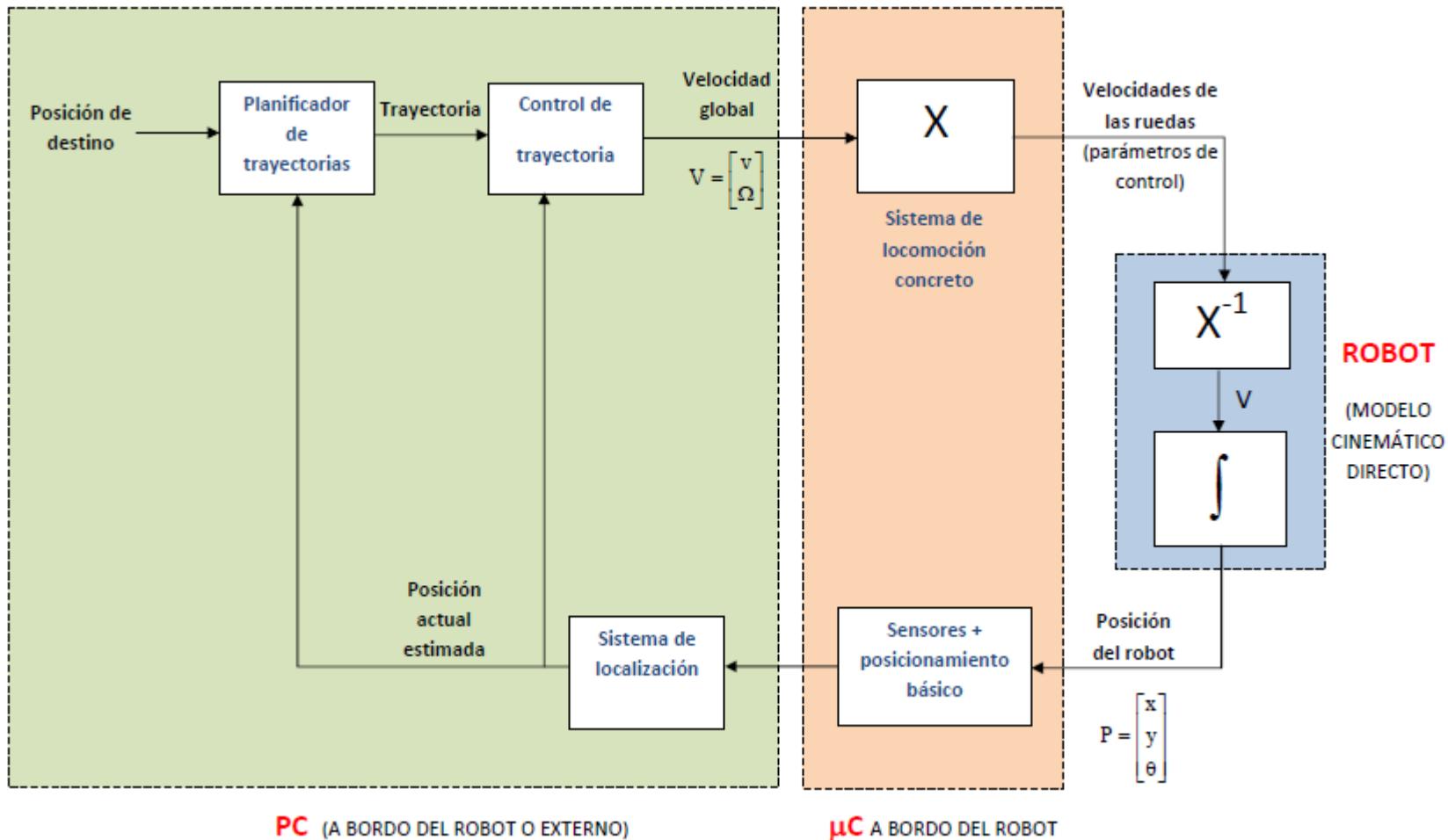
CINEMÁTICA DIRECTA

Es el modelo más sencillo, ya que los parámetros de control coinciden con las velocidades lineal y angular globales del robot, que en este caso se controlan de forma independiente

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos\theta \\ v \cdot \sin\theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot w \cdot \cos\theta \\ r \cdot w \cdot \sin\theta \\ \Omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \cos\theta & 0 \\ r \cdot \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w \\ \Omega \end{bmatrix}$$



5.4 Modelo completo del sistema de control de un robot



6. Mapas de entorno

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. El problema de la navegación autónoma
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Actuadores
 - 3.2. Sensores
 - 3.3. Procesadores
4. Tipos de robots móviles
5. Modelos de movimiento
6. **Mapas de entorno**
7. Enfoques de razonamiento



6. Mapas de entorno

Modelo o mapa de entorno

Abstracción en la que se representan únicamente aquéllas características del entorno que se consideran útiles para la navegación o localización.

Tipos principales

a) Rejillas de Ocupación

Discretización del entorno en celdas. Cada celda tiene asociada una probabilidad de ocupación

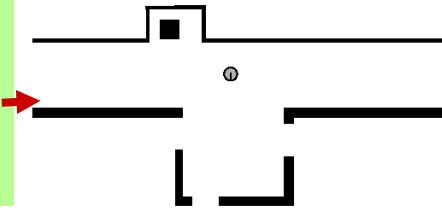


a)

MAPAS MÉTRICOS

b) Modelos geométricos

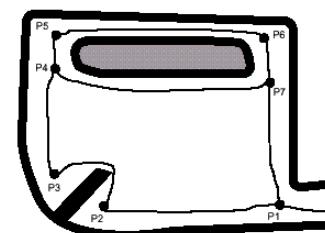
Definen el entorno mediante sus características geométricas (distancias, dimensiones, posiciones, etc.)



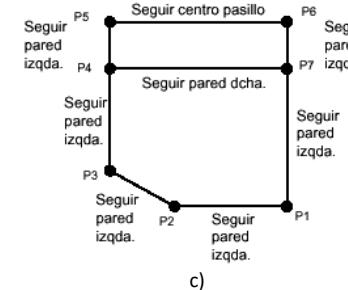
b)

MAPAS TOPOLOGICOS

Representan características esenciales mediante un grafo (discretización muy gruesa)



No ofrecen precisión métrica, pero no requieren mantener la consistencia métrica global



Más sencillos para la planificación (ej: “ir a la habitación A”)

7. Enfoques de razonamiento

1. Vehículos autónomos. Definición de robot móvil
2. El problema de la navegación autónoma
3. Partes de un robot móvil
 - 3.1. Actuadores
 - 3.2. Sensores
 - 3.3. Procesadores
4. Tipos de robots móviles
5. Modelos de movimiento
6. Mapas de entorno
7. **Enfoques de razonamiento**



7. Enfoques de razonamiento

Evolución en las últimas décadas de los métodos aplicados en robótica

Métodos clásicos o deliberativos (mediados de los 70)

- Modelos exactos
- Poca importancia de la percepción (sensores)

Métodos reactivos (mediados de los 80)

- No utiliza modelos
- Gran importancia de la percepción (sensores).

Métodos híbridos (principios de los 90)

- Basados en modelos en los niveles superiores
- Reactivos en los niveles inferiores

MÉTODOS PROBABILÍSTICOS (mediados de los 90)

- Integración de modelos y percepción (sensores)
- Modelos inexactos y percepción inexacta.