

Sensores en Robótica Móvil

CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE ROBOTS

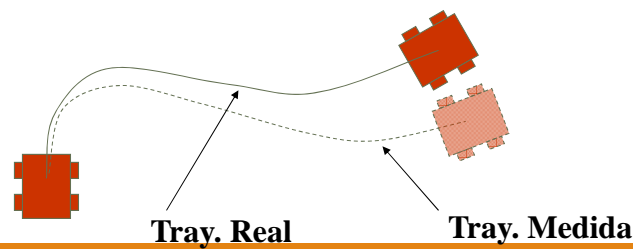
Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Sensores de navegación

- Necesidad de medir **posiciones, orientaciones, velocidades y aceleraciones** de un vehículo
- Varias técnicas dando una **medida absoluta o relativa** (incremental)
- Las técnicas de navegación combinan diferentes sensores → **fusión multisensorial**

Odometría (Dead- Reckoning)

- Procedimiento para determinar la localización y orientación de un vehículo basado en la trayectoria descrita a lo largo del tiempo.
- Los Errores son generalmente acumulativos.
- Los robots móviles que emplean este procedimiento, requieren “puestas a cero periódicas” para anular el error (Ej: Reconocimiento de marcas en terreno, sistemas de localización externos, etc.).



Sensores para Odometría

Medidas de posición/velocidad

Sensores de Rotación

- Brush Encoders
- Potenciómetros
- Synchros
- Resolvers
- Encoders ópticos
- Encoders Magnéticos
- Encoders inductivos
- Encoders Capacitivos

Sensores Doppler

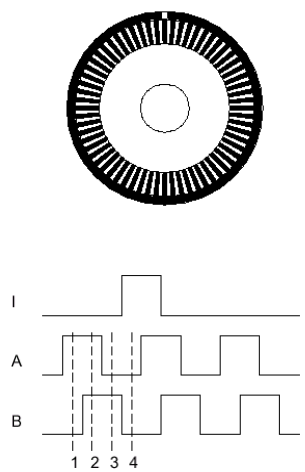
- Radar de microondas
- Sensores de velocidad ultrasónicos
- Otros

Encoders Opticos

- Desarrollados en los años 40 para permitir a los pianos eléctricos simular otros instrumentos.
- Los sistemas actuales generalmente usan sensores de proximidad 'break-beam'
- Dos tipos : Incrementales o Absolutos

Encoders Incrementales

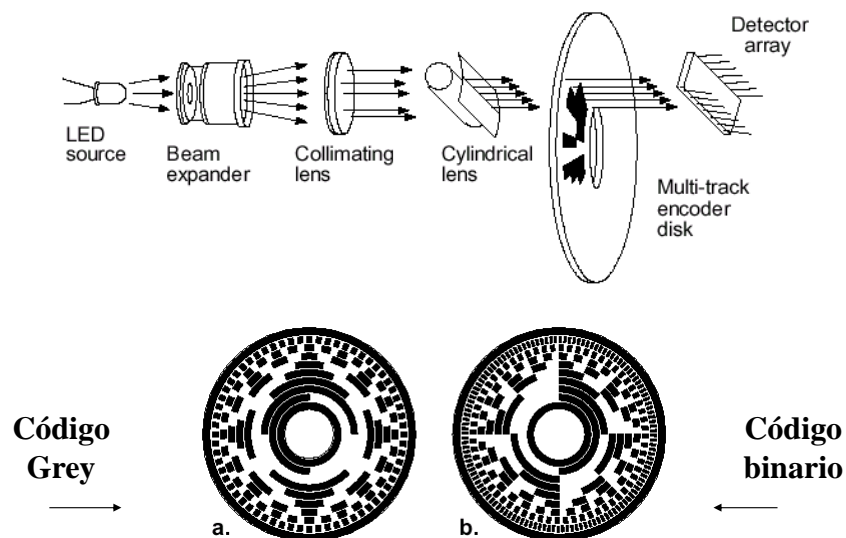
- Producen un cierto número de pulsos por revolución
- Tienen problemas de ruidos y estabilidad a baja velocidad debido a errores de cuantización
- Encoders monocanal no pueden determinar el sentido de giro. Se requieren dos canales para codificación de fase en cuadratura



Encoders Absolutos

- Se usan en aplicaciones de baja velocidad y resolución donde pérdidas de información por interrupciones de potencia no son tolerables
- Las salidas Multi-bit proporcionan posiciones absolutas del encoder sin necesidad de puestas a cero ('home positions').
- Disco y óptica más compleja que para encoders incrementales
- Se suele emplear códigos de Grey, ya que inducen menos errores de lectura.

Encoders Absolutos



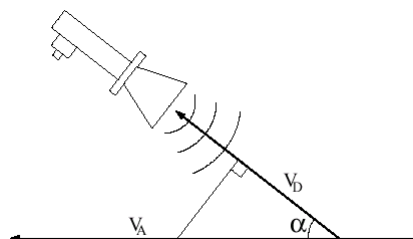
Sensores Doppler

- Los sensores de rotación presentan problemas para estimación de posición por:
 - Deslizamiento de ruedas
 - Desgaste de cintas o cadenas de transmisión
 - Diferencia de Inflado de neumáticos
- Principio de funcionamiento basado en el desplazamiento Doppler en frecuencia cuando una cierta energía radiada se refleja en una superficie que se desplaza respecto al emisor
- Difícil de fabricar y ajustar salvo que se adquiriera en un sistema comercial cerrado

Cálculo de Velocidad por efecto Doppler

- Medición de la velocidad absoluta de un objeto con respecto a otro
- Efecto Doppler: "Cuando una onda se refleja en una superficie en movimiento, se produce un desplazamiento en frecuencia."

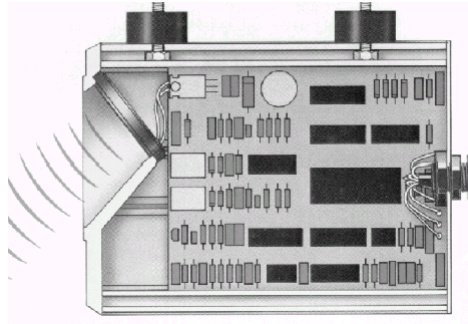
$$V_A = \frac{V_D}{\cos \alpha} = \frac{c F_D}{2 F_0 \cos \alpha} \quad (1.1)$$



where

- V_A = actual ground velocity along path
- V_D = measured Doppler velocity
- α = angle of declination
- c = speed of light
- F_D = observed Doppler shift frequency
- F_0 = transmitted frequency.

Sensores de velocidad ultrasónicos



Parameter	Value	Units
Speed range	17.7	m/s
	0-40	mph
Speed resolution	1.8	cm/s
	0.7	in/s
Accuracy	±1.5%+0.04	mph
Transmit frequency	62.5	kHz
Temperature range	-29 to +50	°C
	-20 to +120	°F
Weight	1.3	kg
	3	lb
Power requirements	12	VDC
	0.03	A

Sistema MicroTrak Trak-Star

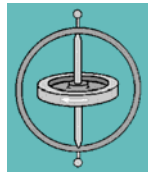
Sensores para Odometría

Sensores de Orientación

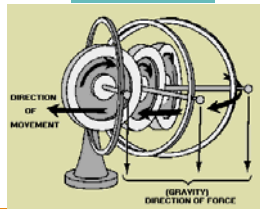
- Es una medida crítica para evitar grandes errores de odometría. Una pequeña desviación en la orientación origina errores laterales considerables.
- Sensores:
 - Compás magnético
 - Giróscopos (mecánicos y ópticos)

Giróscopos Mecánicos

- El primero se construyó en 1810
- Emplea las propiedades inerciales de un rotor girando a alta velocidad



- Inercia (resistencia) a cambiar de orientación.



- Precesión
- Aplicación para determinar el cambio de orientación en dirección perpendicular al eje del rotor.

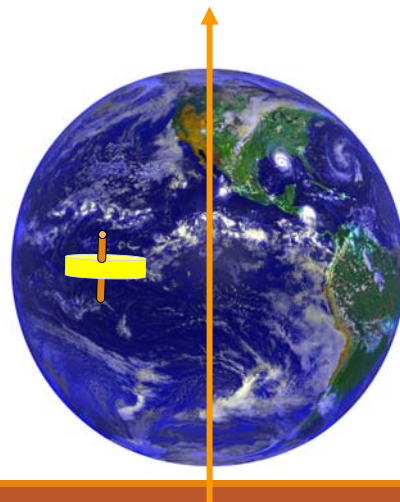
Girócompás

- Determina la orientación del norte geográfico

Principio de funcionamiento:

- Precesión + Amortiguamiento = orientación del rotor paralelo al eje de giro de la tierra.

Determina orientaciones absolutas.



Giróscopos Mecánicos

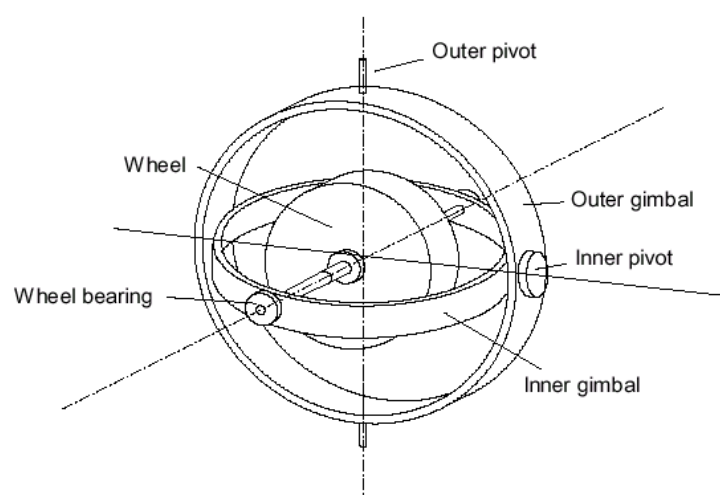
Inconvenientes:

■ Errores de medida por:

- Fricción en cojinetes de soporte del rotor
- Aceleraciones externas por movimiento del vehículo sobre el que va montado.
- Pequeños errores de balanceado del rotor

Ej: Los mejores sistemas, como los que emplean los aviones comerciales, tienen derivas de aprox. 0.1 grados a partir de unas 6 horas de vuelo.

Configuración típica de giróscopo



Giróscopos comerciales

- Los Giróscopos mecánicos de Precisión son caros (de 10.000 € a 100.000€).
- Existen modelos económicos para aplicaciones poco “exigentes” (Ej: Aeromodelismo) - 150 € a 300€ (Futaba)
- Son de bajo peso y consumo, pero tienen errores de sensibilidad y deriva varios órdenes de magnitud por encima de los de precisión

Giróscopos Mecánicos de bajas prestaciones



Figure 2.2: The Futaba FP-G154 miniature mechanical gyroscope for radio-controlled helicopters. The unit costs less than \$150 and weighs only 102 g (3.6 oz).



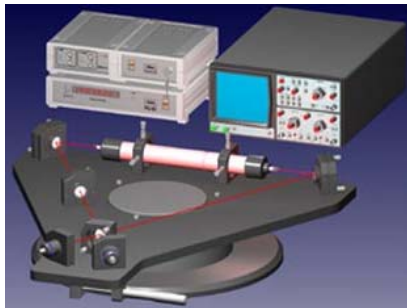
Figure 2.3: The Gyration GyroEngine compares in size favorably with a roll of 35 mm film (courtesy Gyration, Inc.).

Ratios de deriva: 9 grados /
minuto

Giróscopos ópticos

- Pequeños en peso y tamaño. Sin partes móviles.
- Alta precisión y sensibilidad.
- Pequeña deriva.
- No dependen de la gravedad,
- Emplean lasers, espejos y fibra óptica
- Coste elevado (Por encima de 5000 € unidad)

Giróscopos ópticos



- Si el sistema no está en un sistema inercial, los láseres que recorren el lazo en direcciones opuestas ven longitudes de camino distintas (**Efecto Sagnac**).
- Se detecta por Interferometría

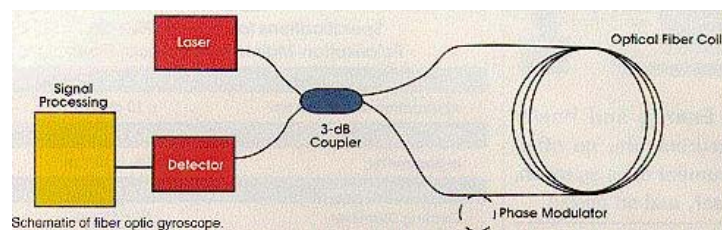




Figure 2.11: The Andrew Autogyro Model 3ARG.

Parameter	Value	Units
Input rotation rate	± 100	$^{\circ}/s$
Minimum detectable rotation rate	± 0.05	$^{\circ}/s$
Rate bandwidth	± 180	$^{\circ}/hr$
Bias drift (at stabilized temperature) — RMS	100	Hz
Size (excluding connector)	77 dia \times 88 mm	
Weight (total)	3.0 dia \times 3.5 in	
Power	0.63 kg	
	1.38 lb	
	9 to 18 VDC	
	630 mA	

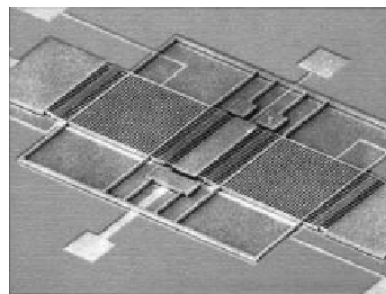


Figure 2.13: The OFG-3 optical fiber gyro made by Hitachi Cable Ltd. (Courtesy of Hitachi Cable America, Inc. [HITACHI].)

Parameter	Value	Units
Input rotation rate	± 100	$^{\circ}/s$
Minimum detectable rotation rate	± 0.05	$^{\circ}/s$
Rate bandwidth	± 180	$^{\circ}/hr$
Bias drift (at stabilized temperature) — RMS	10	ms
Size (excluding connector)	88(W) \times 88(L) \times 65(H) mm	
Weight (total)	3.5(W) \times 3.5(L) \times 2.5(H) in	
Power	0.48 kg	
	1.09 lb	
	12 VDC	
	150-250 mA	

Otros tipos de Giróscopos

■ Giróscopos de estado sólido



Tuning Fork Gyro

Se basa en la medida de deformación de micromasas debido a efectos centrífugos

Sensores Geomagnéticos

- Determinan la orientación midiendo el campo magnético terrestre (magnetómetros).
- Hay muchas tecnologías diferentes:
 - Compás Magnético (mecánico)
 - Compás Fluxgate (de núcleo saturable)
 - Compás Magnetoinductivo
 - Compás de efecto Hall
 - Compás Magnetoresistivos
 - Compás Magnetoelásticos

Compás Magnético

- Tecnología Simple: Aguja magnetizada flotando en un medio sin rozamiento (idealmente)
- ¿Cómo se materializa técnicamente?
 - ✓ Anillos magnéticos flotando en mezcla de agua, alcohol o glicerina.
 - ✓ Medida de posición respecto al norte con salidas seno/coseno por sonda de efecto Hall
 - ✓ Para aplicaciones marítimas se montan en "Gimbals"
- Coste económico (30 € a 60 €)
- Precisión moderada

Compás Fluxgate (Magnet. Nucleo Saturable)

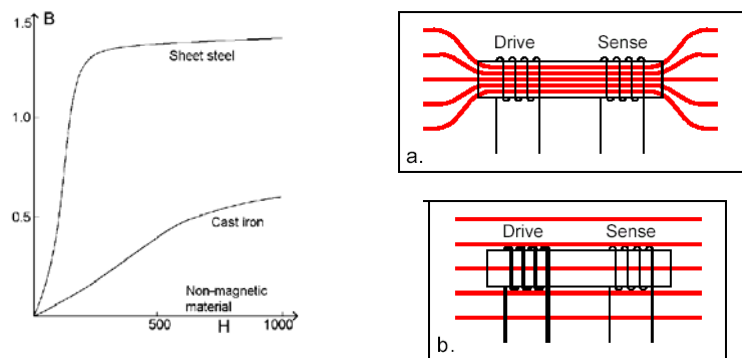
- Apropiado para aplicaciones móviles y de larga duración.
- Dispositivo económico y compacto
- Muy Robusto
- Problemas:
 - Interferencias de medidas con campos magnéticos externos.
 - Declinación (Diferencia entre el norte magnético y el geográfico)

Permeabilidad Magnética (μ)

- Es una Medida de los buen o mal conductor que es un material de las líneas de campo magnético
- Es análogo a la conductividad eléctrica
- $B = \mu * H$; donde
- H = Fuerza de Magnetización

Material	Permeability μ
Supermalloy	100,000 - 1,000,000
Pure iron	25,000 - 300,000
Mumetal	20,000 - 100,000
Permalloy	2,500 - 25,000
Cast iron	100 - 600

Permitividad de un núcleo y saturación

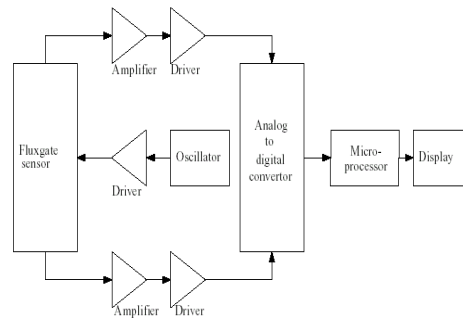


¿Como funciona?

- El campo magnético terrestre es estático
- Una bobina inductora produce un campo alterno en un núcleo hasta llevarlo alternativamente a saturación.
- Una bobina sensora se encarga de medir el campo magnético inducido en el núcleo (Intensidad). La diferencia en cada sentido de saturación es proporcional al campo externo (Campo magnético de la tierra....!! y otros !!).
- Dos devanados de medida ortogonales proporcionan un dirección.

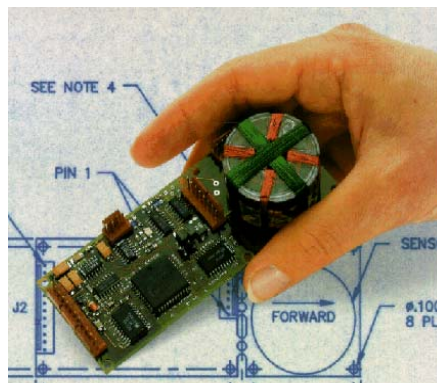
Ejemplo: Magnetómetro de núcleo saturable de Zemco

- Económico: 40€ a 90€
- Relativamente sensible a campos magnético externos (del robot u objetos metálicos cercanos)
- Precisión en las mejores versiones: ± 6 grados



Ejemplo: Magnetómetro de núcleo saturable de KVH

- Precio moderado aprox. 700€
- Resolución ± 0.1 grados
- Precisión de hasta 0.5 grados tras calibración.
- Posibilidad de autocalibración



Compás Magnetointductivo

Principio de funcionamiento:

- Un devanado sirve como inductancia en un oscilador de relajación de baja potencia.

$$L = \mu_0 n^2 V \frac{dB}{dH}$$

- Se hace trabajar al devanado en la zona lineal.
- Las variaciones del campo externo modifican la inductancia y por tanto la frecuencia de oscilación, que puede ser medida.

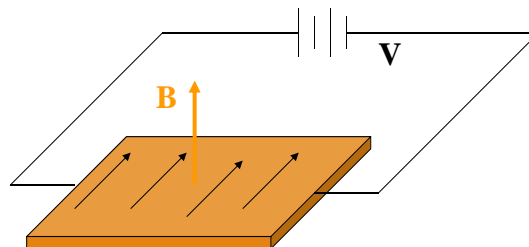
Ventajas:

- Un sólo solenoide por cada eje.
- Bajo Consumo

Compás de efecto Hall

Principio de funcionamiento:

- Efecto Hall: En un material conductor por el que circula una corriente eléctrica y sometido a un campo magnético, se induce una diferencia de potencial, V , perpendicular ambos, el campo magnético externo y a la corriente.



Propiedades:

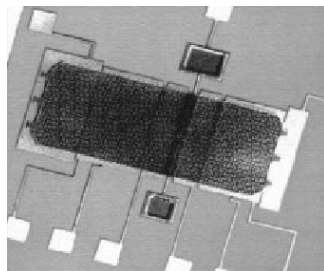
- Simples, compactos y baratos de fabricar
- Muy sensibles.
- Bajo Consumo

Sistemas de navegación Inercial

- Combinación de medidas de aceleraciones y cambios de orientación para determinar la posición y orientación de un vehículo en todo momento.
- Se emplean técnicas híbridas: Odometría + Sistemas externos de posicionamiento:
- Medidas típicas:
 - Aceleraciones → **Acelerómetros**
 - Cambios de orientación → **Giróscopos**
 - Posicionamiento externos: Balizas, marcas en el terreno, **GPS**

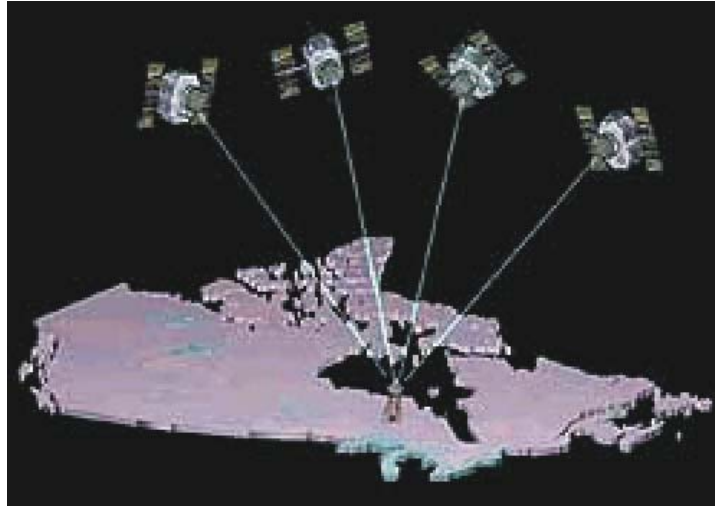
Acelerómetros

- Miden la aceleración de un sistema según un eje determinado.
- Varios principios de funcionamiento: El más común, medida de las fuerzas de inercia que la aceleración induce sobre una masa sonda.
- Existen dispositivos de estado sólido, muy compactos y de precisión aceptable.



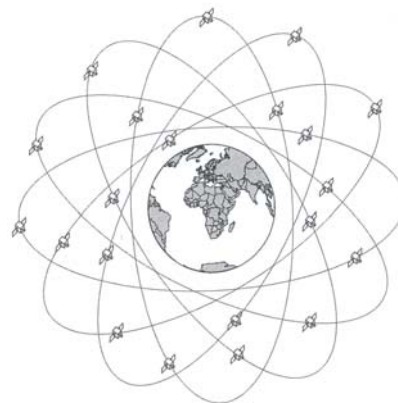
Ej: Micromechanical
pendulous rebalance
accelerometer

GPS (Global Positioning System)



GPS

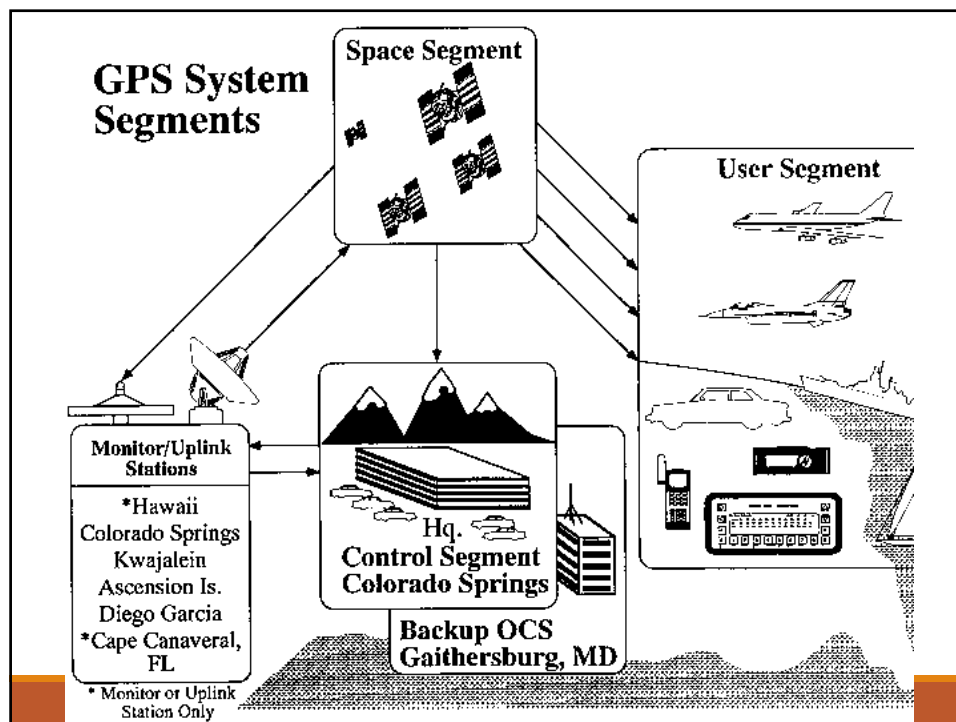
- Sistema de posicionamiento global por satélite, desarrollado por el **departamento de defensa de USA** en los años 70.
- Los **satélites** están **constantemente en movimiento**, y dan dos vueltas a la tierra en algo menos de 24 horas (1.8 millas por segundo).
- Los satélites del GPS se denominan **NAVSTAR**



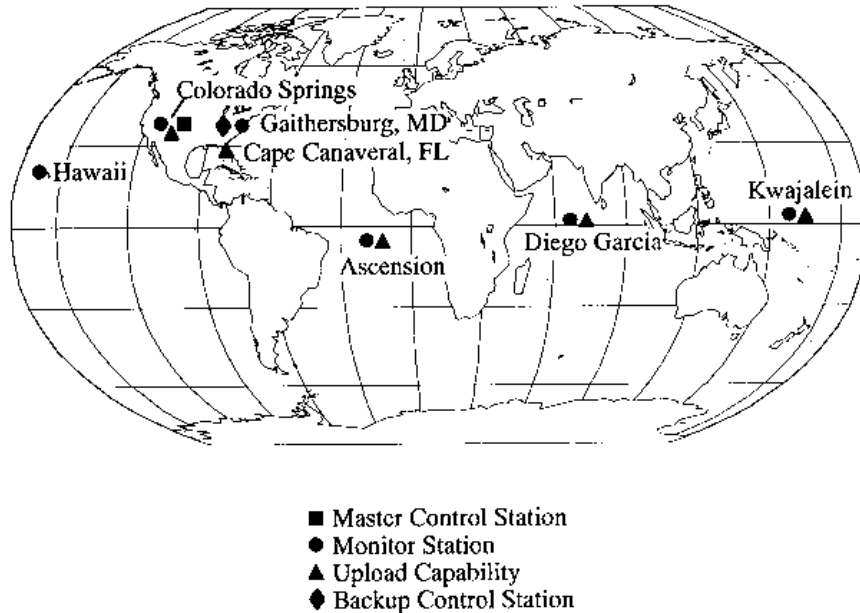
Componentes del Sistema

El Sistema consta de 3 segmentos

1. **Segmento de Control en Tierra**
Estaciones de control en tierra distribuidas por el globo. La Principal están en la base de Colorado Springs (USA)
2. **Segmento Espacial**
Compuesto por 24 satélites NAVSTAR en órbitas apropiadas
3. **Segmento de Usuario**
Compuesto por los receptores en tierra. Múltiples aplicaciones



GPS Operational Control System

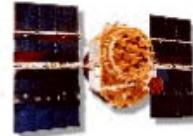


Descripción del GPS

- Calcula la posición del receptor GPS, midiendo el tiempo que tarda la señal en llegar a él desde los satélites. El tiempo transcurrido por la velocidad de la luz, determina la distancia a cada satélite (**tiempo de vuelo**)
- Con la medida de la distancia a 4 o más satélites, el receptor puede calcular su posición espacial, (**longitud, latitud y altura**), así como el **rumbo y velocidad** si se toman medidas en diferentes puntos.
- La **precisión es del orden de 1m** y la frecuencia de las lecturas inferior a **1 seg.**
- Los receptores GPS son **portátiles**, y de tecnología relativamente económica respecto al resto de elementos del sistema.
- **No hay límite de usuarios**
- Funciona en **toda la superficie del planeta, 24 horas al día**
- El funcionamiento es independiente de las **condiciones climáticas**

GPS: El satélite NAVSTAR

- El primero se lanzó en Febrero de 1978.
- Un NAVSTAR pesa aproximadamente 900 Kg y tiene unos 6 metros de envergadura
- La potencia de emisión es de sólo 50 vatios o incluso menos
- Cada satélite transmite en tres frecuencias . La frecuencia 'civil está localizada en 1575.42 MHz.
- La duración esperada de cada satélite es de unos 10 años. Constantemente se lanzan nuevos satélites de reemplazo.



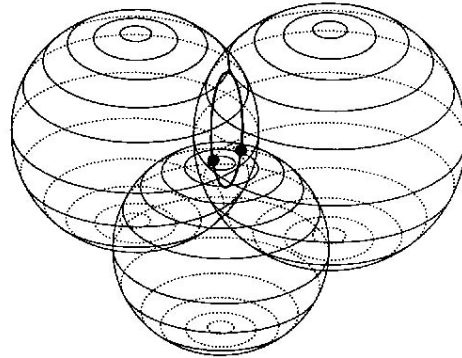
¿Cómo funciona el GPS?

- Se emplea sistemas de triangulación de las señales recibidas en tierra de varios saltélites
- La distancia se mide por el principio del “tiempo de vuelo”
- Se requiere gran precisión de medida de tiempo: Los satélites incorporan relojes atómicos de alta precisión (4 en cada satélite)
- Los receptores en tierra no requieren tanta precisión en la medida de tiempo (Redundancia de información)

¿Cómo funciona el GPS?

Triangulación:

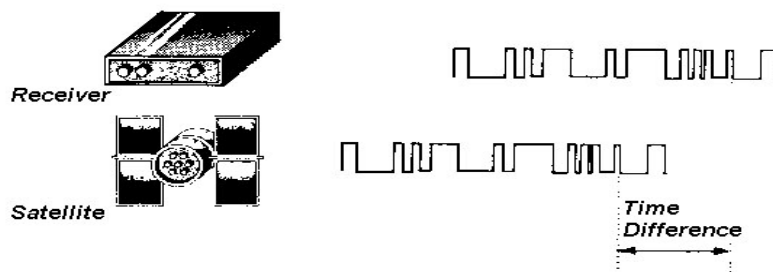
- La medida de la distancia a tres satélites es suficiente para determinar las tres coordenadas espaciales (longitud, latitud y altura) de cualquier punto de la tierra.
- Se emplea un cuarto satélite como mínimo para **incrementar la precisión**



¿Cómo funciona el GPS?

Medida de la distancia:

- **Tiempo de vuelo**
- El emisor y el receptor están sincronizados para emitir la misma secuencia en el mismo instante de tiempo.



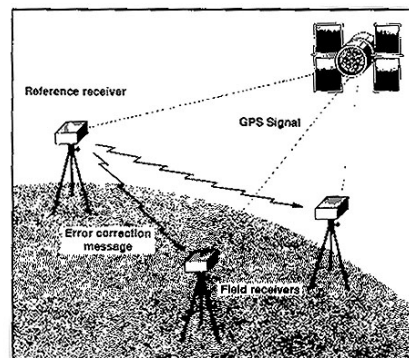
Fuentes de Error de GPS

- Variaciones en la velocidad de propagación en las **capas altas de la atmósfera**.
- Ecos de la señal recibida por rebotes en otros objetos (**Multipath signals**)
- Perturbación intencionada por los creadores del sistema (**Disponibilidad Selectiva**). Limita la precisión del sistema para aplicaciones civiles



GPS Diferencial

- Permite corregir los errores inducidos por la '**disponibilidad selectiva**'
- Se corrigen medidas basándose en la diferencia entre la posición dada por el GPS y la posición real sobre un punto del terreno de coordenadas conocidas .



Sensores para posicionamiento basado en mapa del entorno

- Sensores de medida de distancia a objetos en el entorno inmediato del robot
- Tres tipos básicos: Sensores Tiempo de vuelo (TOF), Medidas de desplazamiento de fase, y Modulación en frecuencia (Radar)
- El más utilizado con diferencia es el de tiempo de vuelo (**Sensores ultrasónicos**)

Sensores ultrasónicos: Generalizades

- El medio de propagación tiene gran importancia en el desempeño del sensor.
- El tamaño de transductores afecta a la dispersión del haz de sonido
- La longitud de onda del sonido (impuesto por la tecnología del transductor) tiene efecto en la calidad de la medida
- Los transductores tienen también sus propias peculiaridades (Ej: resonancias)

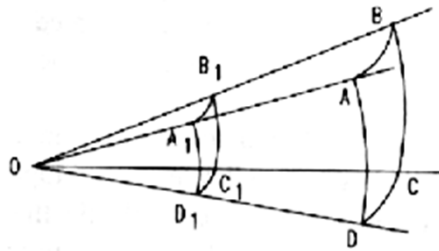
Conceptos: Atenuación

$I = I_0 / 4 \pi R^2$; donde

I = Intensidad (Potencia por unidad de superficie) a una distancia R

I₀ = Intensidad máxima (inicial)

R = Rango



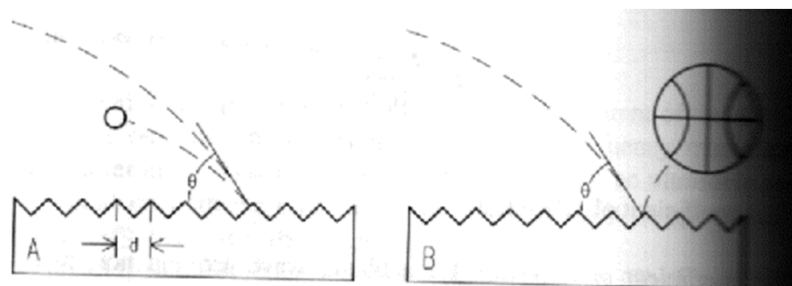
Conceptos: Atenuación Adicional

- Del medio – Absorción molecular (Pérdidas exponenciales)
- Ej: para un transductor de 40kHz , las pérdidas van de 0.15 a 0.3 db/m
- La atenuación total se debe a la divergencia esférica y absorción del medio. Además hay que tener en cuenta la reflectividad del medio sobre el que se incide.

Conceptos: Reflexión especular y difusa

- **Difusa** – Significa distribuida en todas direcciones
- **Especular** – Significa que el ángulo de incidencia es igual al de reflexión
- En sensores ultrasónicos típicos **predomina la reflexión especular**
- En cambio, generalmente se prefiere la reflexión difusa!!..... ¿Problema?

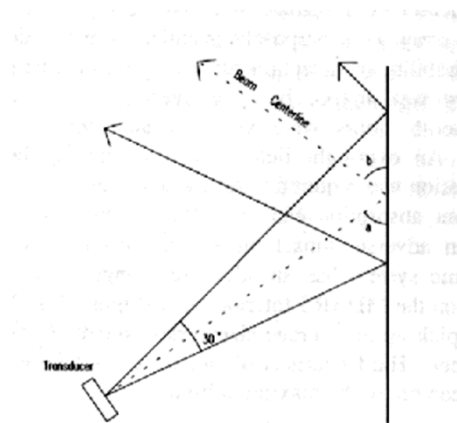
Reflexión frente a Longitud de onda



A: Reflexión difusa – Longitud de onda pequeña comparada con las irregularidades de la superficie

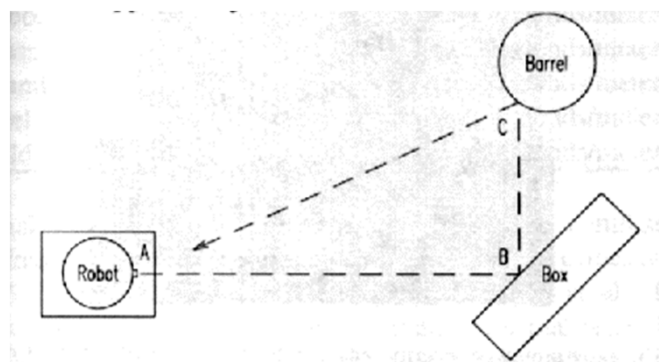
B: Reflexión especular

Problema con la reflexión especular



La distancia medida es infinita!!! No hay eco

Problema con la reflexión especular



La Distancia medida es $A+B+C$

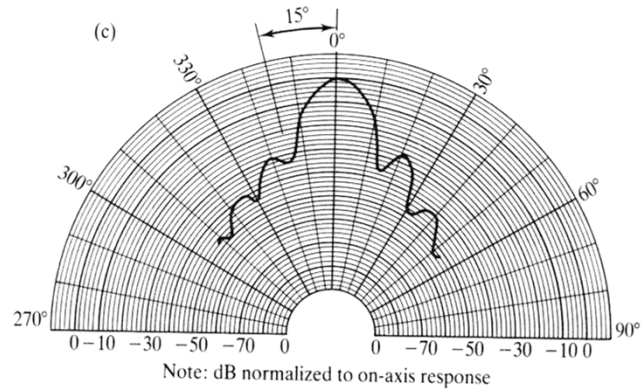
Efecto de la temperatura

- La velocidad de propagación del sonido depende de la temperatura
- Se requiere compensación térmica de las medidas
- $R_a = R_m \sqrt{T_a / T_c}$ (Temp en kelvin, Tc
Temp. calibración)

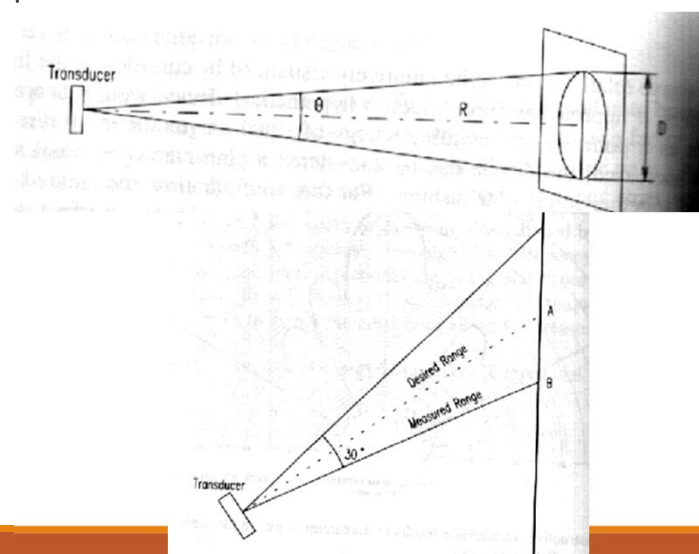
Efecto de la geometría del Haz

- **Apertura del haz:** Angulo en el que la potencia del sonido se reduce a la mitad respecto al máximo (-3db)
- **Apertura de haz efectiva:** Angulo en el que los objetos son realmente detectados por el sensor.
- La apertura del haz es una función del diámetro del transductor y la frecuencia de operación

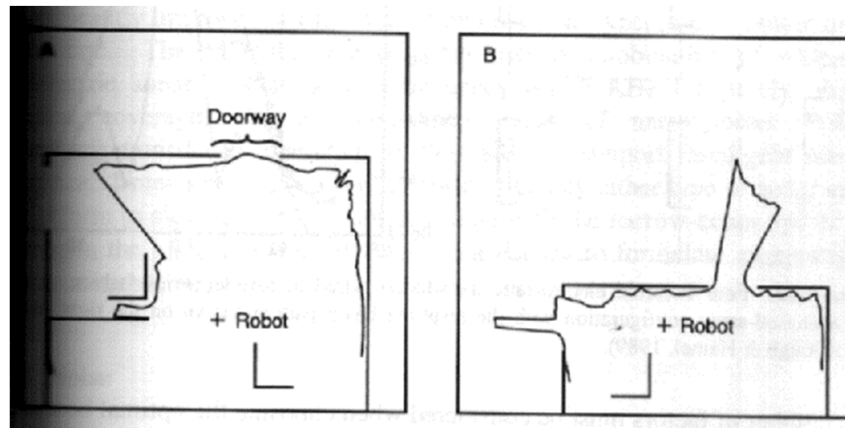
Dispersión típica del Haz



Consecuencias de la dispersión del Haz



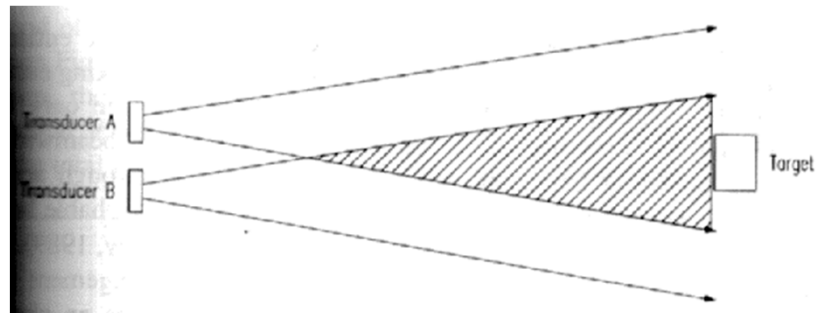
Más consecuencias



Mejora de la resolución angular

- División del Haz – Se usan dos o más transductores con haces parcialmente solapados
- Se incrementa el área de cobertura
- Se incrementa la resolución teniendo en cuenta que transductor recibe el eco en primer lugar.

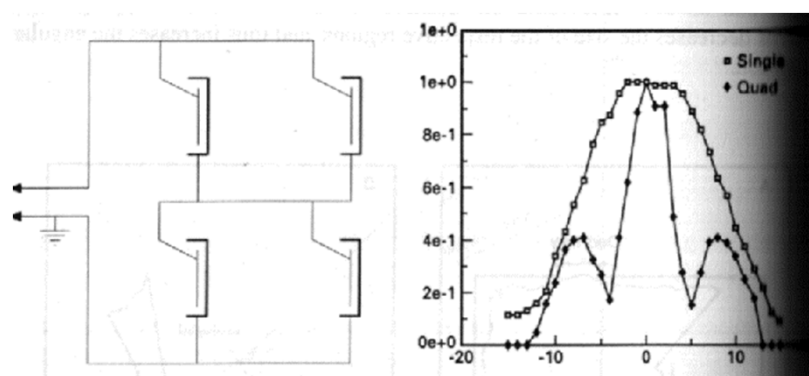
Ej: Dos transductores



Si A y B detectan objeto, entonces el objeto está en la zona de solape de ambos

Si sólo detecta A (ó B) , entonces el objeto está en A (ó B) y no en B (ó A)

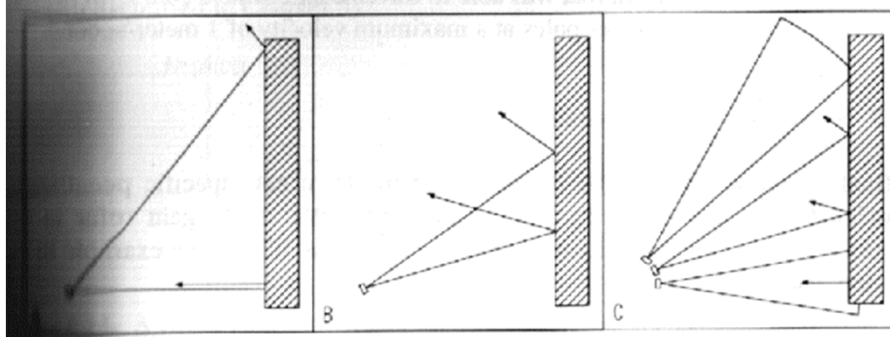
Estrechando el haz



Ej: Cuatro transductores en la fase apropiada consiguen generar un haz que por interferencias reducen la apertura:

Uno sólo: 30 grados, 4-transductores: 18 grados

Apertura grande frente a pequeña



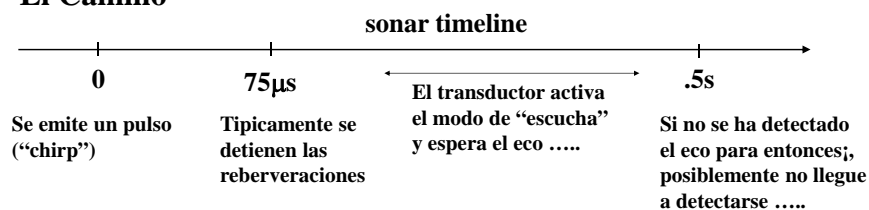
A – Grande: Se incrementa la posibilidad de detección sacrificando resolución

B – Pequeña: Puede no detectar reflexión en absoluto.

C – Múltiples haces de pequeña apertura: se incrementa cobertura y precisión a expensas de un coste y complejidad mayores

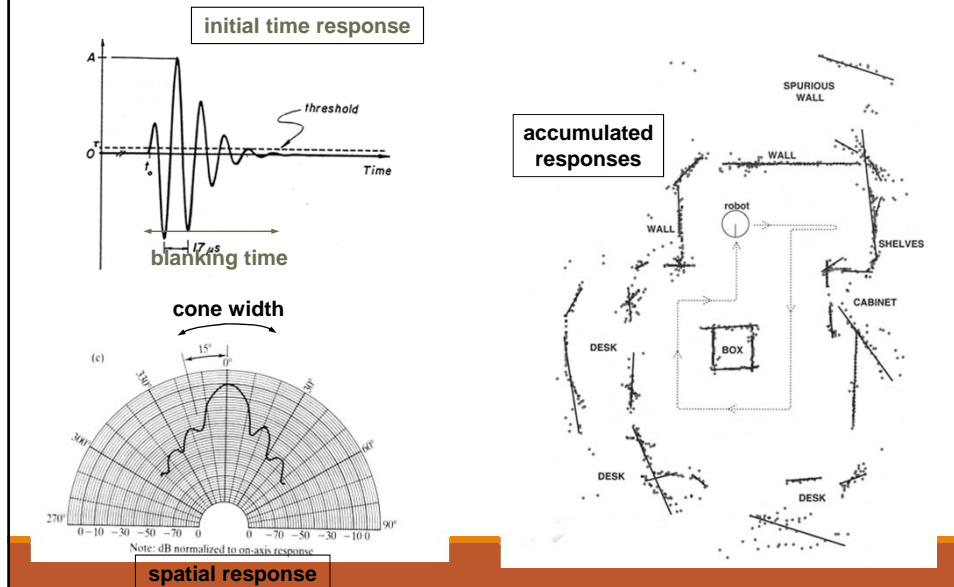
Sensores Sonar

“El Camino”

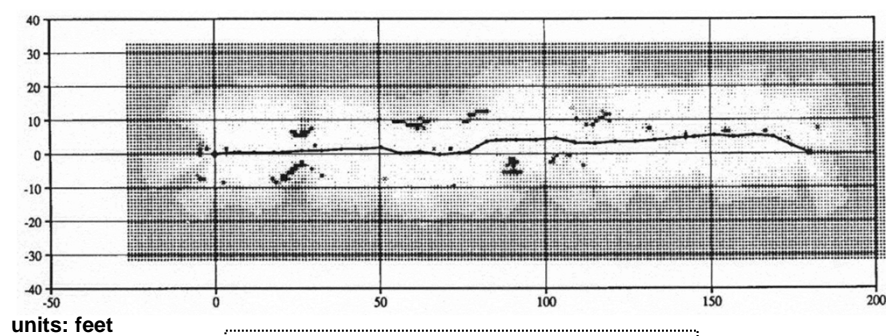


Ejemplo : Sonar Polaroid emitter/receivers

Modelado Sonar



Ejemplo de mapa sónico



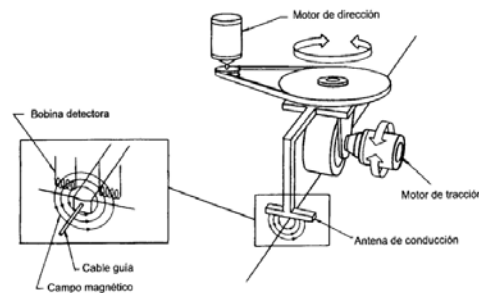
Camino seguido en exteriores

- Probabilidad baja de encontrar obstáculos
- Alta probabilidad de encontrar obstáculos

Sensores para AGVs

Circuito establecido por medio de:

- Un cable enterrado a través del cual pasa una corriente alternativa generando un campo magnético (vehículos filoguiados)



- Bandas magnéticas : muchas interferencias
- Bandas ópticas : no fuente de energía pero problemas de limpieza y de degradación de la línea. También muchas influencias del ambiente (luz, contraste,...)

Sensores para AGVs

- También existen sistemas de guiado por medio de balizas (sin nada en el piso)
- Emisores laser, de infrarrojo, de ultrasonido, de radio, ...
- Diferentes estructuras (sistema giratorio sobre el robot)
 - Balizas pasivas y emisor/receptor en el robot
 - O balizas receptivas y emisor en el robot
 - O balizas emisoras y receptor en el robot
 - O cámaras y señales (luminosas, código de barras,...) en las balizas
- Medida de distancias y ángulos a un cierto número de balizas: en el plano, 2 distancias o 2 ángulos son suficientes pero medidas redundantes mejoran la precisión ...