

# INTRODUÇÃO À ROBÓTICA MÓVEL

## Aula 8



Edson Prestes  
Departamento de Informática Teórica  
<http://www.inf.ufrgs.br/~prestes>  
[prestes@inf.ufrgs.br](mailto:prestes@inf.ufrgs.br)

# SENSORES

---

- São dispositivos que medem algum atributo do ambiente.
- São chamados de transdutor (transducer), pois eles transformam um sinal de entrada (som, luz, pressão, etc) em um sinal analógico ou digital capaz de ser usado pelo robô.
- Através deles um robô pode reagir aos eventos inesperados assim como extrair informações úteis sobre o ambiente.
- Exemplos : encoder , sonar, laser, etc.

# SENSORES

---

- Sensores podem ser classificados em
  - Passivo : contam apenas com a informação disponível pelo ambiente.  
*Exemplo: uma câmera requer uma certa quantidade de luz para produzir uma imagem útil.*
  - Ativo : emite energia no ambiente a fim de obter informações sobre ele.  
*Exemplo: um sonar envia um sinal, recebe um eco e mede o tempo de emissão/recepção do sinal.*
- Uma câmera com flash é um sensor ativo.
- Sensoriamento ativo é diferente de sensor ativo.

# SENSORES

---

- A **fusão sensorial** é um processo que combina dados oriundos de vários sensores em um simples elemento de percepção (*percept*).
- A combinação dos sensores pode ser
  - **Redundante** (ou competitiva): quando os sensores fornecem as mesmas informações sobre um objeto de interesse.
  - **Complementar**: quando os sensores fornecem informações diferentes sobre um mesmo objeto de interesse. Em um resgate, um robô pode combinar um sensor térmico com uma câmera.
  - **Coordenada**: os sensores são usados sequencialmente, em geral, para focar um objeto de interesse. Quando um predador vê o movimento de presa, ele pára a fim de realizar uma análise mais apurada da cena.

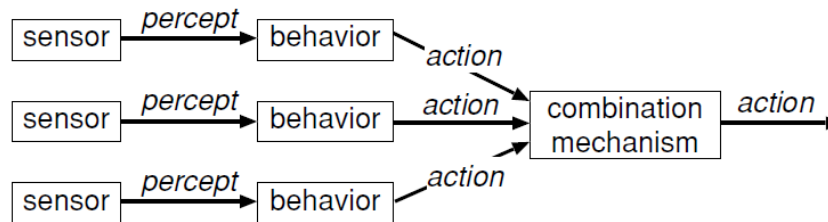
# SENSORES

---

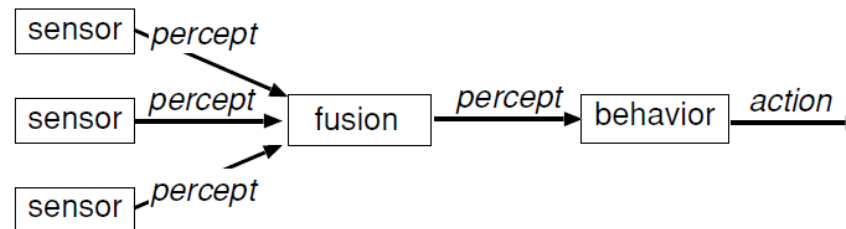
- A fusão sensorial pode ser incorporada em comportamentos através da :
  - **fusão sensorial** - gera ações a partir do disparo de vários comportamentos, onde cada comportamento recebe suas próprias leituras sensoriais
  - **fusão sensorial orientada à ação** - uma ou mais leituras sensoriais podem influenciar o comportamento resultante, por exemplo, reforçando-o.
  - **Sensor fashion**: um robô pode intercambiar entre as modalidades sensoriais de acordo com a situação corrente.

# SENSORES

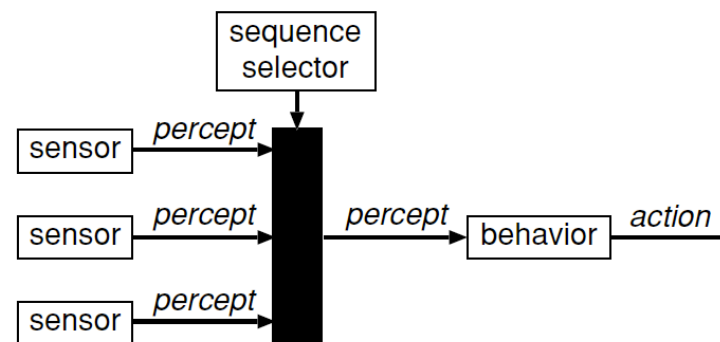
## Fusão Sensorial



## Fusão Sensorial orientada à ação



## Sensor Fashion



# SENSORES

---

De acordo com [1], existem três tipos de sensores:

- **Proprioceptivo** : fornece informação interna relativa ao sistema robótico : velocidade das rodas, nível da bateria, etc.
- **Exteroceptivo** : adquire informações sobre a área de atuação do robô, por exemplo, medidas de distância, luminosidade do ambiente, etc.
- **Exproprioceptivo** : fornece informação sobre o corpo do robô ou partes dele relativa ao ambiente, por exemplo, posição no ambiente.

# SENSORES

---

## Atributos de um sensor

- **Campo de visão (FOV):** especifica a largura da região do espaço coberta pelo sensor. Em geral, ele é expresso em graus.
- **Alcance:** distância máxima que o sensor consegue fornecer uma medida confiável.
- **Acurácia** refere-se a quão correto é a leitura fornecida pelo sensor. É expresso como uma proporção do valor real.

$$\text{Acurácia} = 1 - |\text{Erro}|/v,$$

onde  $\text{Erro} = m - v$ , com  $m$  = valor medido e  $v$  o valor real.



# SENSORES

---

## Atributos de um sensor

- **Repetibilidade** : está associada a quantidade de vezes que um sensor fornece a mesma medida em uma dada condição. Sensores de alta acurácia tem alta repetibilidade.
- **Resolução** : é a menor diferença entre dois valores que podem ser detectados pelo sensor.
- **Reposta no ambiente**: está associada ao desempenho do sensor no ambiente. Câmeras não são adequadas para ambientes escuros.

# SENSORES

---

## Atributos de um sensor

- **Consumo de energia.** Sensores ativos consomem mais energia que os passivos.
- **Confiabilidade do hardware.** Sensores sonar produzem resultados incorretos quando a carga da bateria fica abaixo de 12V.
- **Tamanho.** Dependendo do tamanho do sensor, ele pode se tornar inadequado para a plataforma robótica.
- **Complexidade computacional.**

# SENSORES

---

## Dead Reckoning

- Segundo Murphy[1], dead reckoning é propriocepção, onde o robô mede um sinal que origina dentro de si próprio.
- Segundo Borenstein [2], dead reckoning é um procedimento matemático para determinar a posição corrente de um robô usando informações sobre sua localização prévia e velocidade em um intervalo de tempo.
- Exemplo: odometria, a qual é calculada a partir de odômetros instalados no robô.

# SENSORES

---

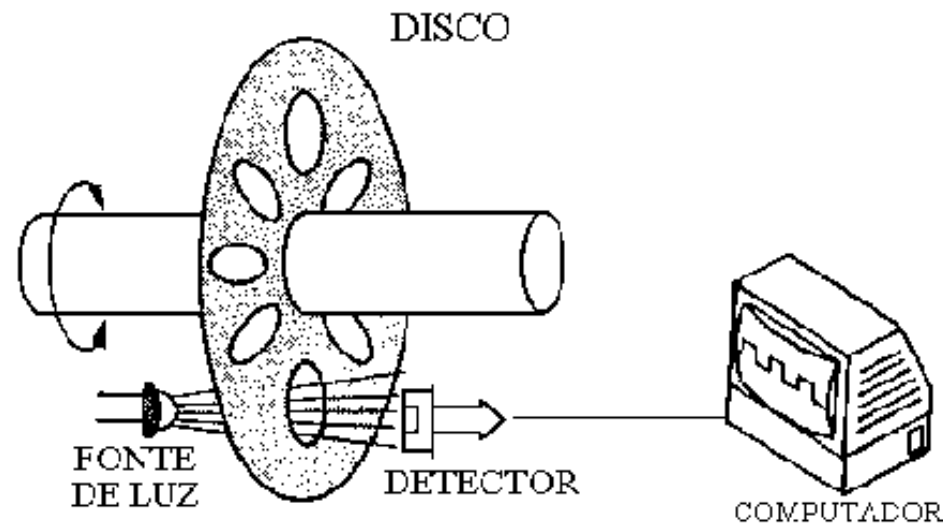
- Encoder Ótico
  - Desenvolvido em meados de 1940 por Baldwin Piano Company.
  - É um exemplo de sensor proprioceptivo.
  - Em robôs móveis, ele é acoplado ao eixo das rodas do robô para medir a quantidade de vezes que a roda girou. Isto permite *estimar* o deslocamento feito pelo robô.
  - Em braços manipuladores, ele pode fornecer a posição das juntas.

# SENSORES

---

- Encoder Ótico

- Incorporam uma versão de sensor de proximidade chamado “break-beam proximity sensor”.
- Um feixe de luz é periodicamente interrompido por um padrão opaco atachado em um disco intermediário rotatório.



# SENSORES

---

- Classificação de Encoder Óticos
  - Incremental : mede a velocidade rotacional e infere a posição relativa do robô;
  - Absoluto: modela diretamente a posição angular e infere a velocidade.
- Encoders incrementais em geral são mais baratos que os absolutos, porém a informação contida neles é volátil.

# SENSORES

---

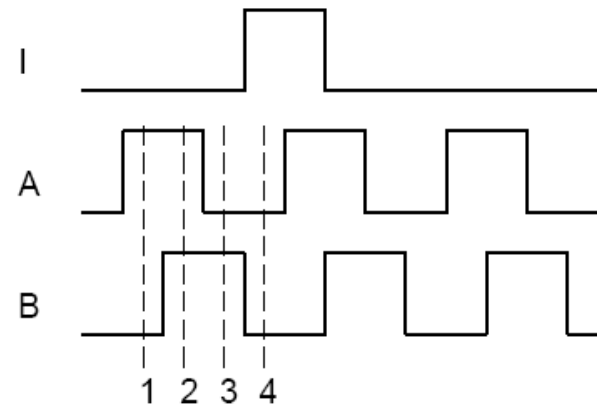
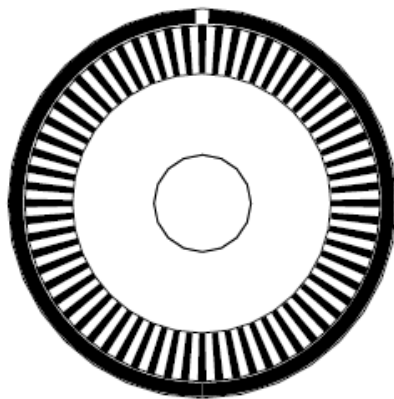
## ○ Encoder Incremental

- A versão mais simples possui um único canal.
- Este encoder produz um certo número de pulsos na forma de uma onda quadrada para cada revolução do eixo das rodas do robô.
- Quanto maior a quantidade de pulsos (resolução) maior o custo.
- De acordo com Borenstein[2], eles são convenientes em sistemas de controle **alta e média velocidades**, porém são instáveis em velocidades muito baixas devido a erros de quantização.
- Encoder com um único canal é incapaz de detectar a direção da rotação.

# SENSORES

## Encoder Incremental

- A versão com dois canais permite detectar a direção da rotação.
- O segundo canal gera uma onda de pulsos deslocada da onda gerada pelo primeiro canal



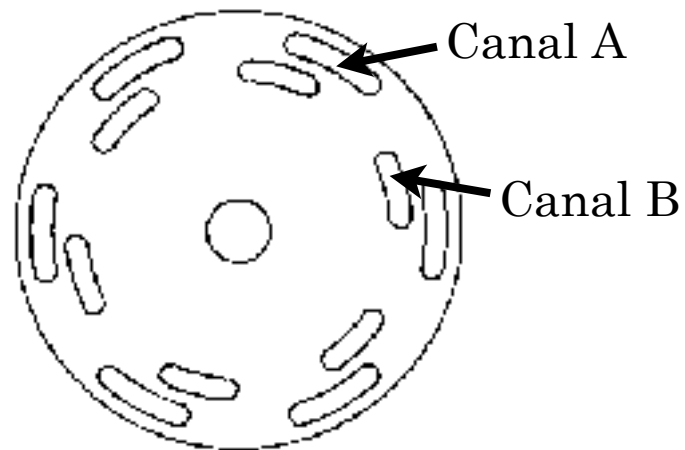
State	Ch A	Ch B
S <sub>1</sub>	High	Low
S <sub>2</sub>	High	High
S <sub>3</sub>	Low	High
S <sub>4</sub>	Low	Low

I – índice de saída, alto uma vez para cada revolução  
Canais A e B



# SENSORES

- Encoder Incremental



Sentido Horário		
	Canal A	Canal B
Passo 1	High	Low
Passo 2	High	High
Passo 3	Low	High
Passo 4	Low	Low

Sentido Anti-horário		
	Canal A	Canal B
Passo 1	High	Low
Passo 2	Low	Low
Passo 3	Low	High
Passo 4	High	High

# SENSORES

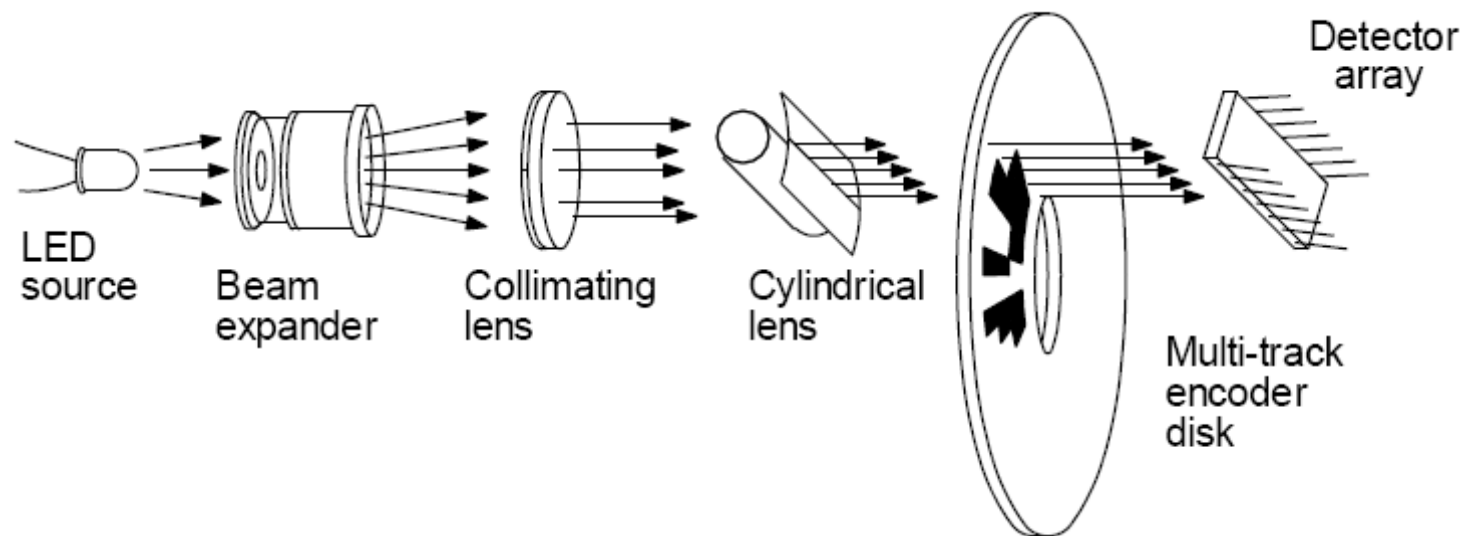
---

## ○ Encoder Absoluto

- Mantém a informação posicional mesmo após uma interrupção de energia.
- Possui múltiplos discos concentricos que são usados para formar diferentes padrões.
- Um array de elementos fotodetectores são individualmente alinhados com o padrão formado pela rotação dos discos do encoder.
- Isto gera uma saída paralela que especifica de forma unívoca a posição angular da junta.

# SENSORES

## Encoder Absoluto



# SENSORES

---

## ○ Encoder Absoluto

- O sistema de codificação usado pela saída pode ser o código Gray, codificação binária, etc.
- A codificação binária envolve múltiplas mudanças de bits para incrementar ou decrementar um contador de 1 unidade.
- A codificação gray envolve apenas a mudança de 1 bit para incrementar ou decrementar um contador de 1 unidade.

Decimal	Código Binário	Código Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100

# SENSORES

---

## ○ Encoder Absoluto

- São usados em aplicações que envolvem rotações de **baixa velocidade** diferentes dos encoder incremental
- Devido a saída ser paralela, requeem uma interface mais complexa para a decodificação do padrão formado pelos discos.

# SENSORES

---

## ○ Sensores de Direção

- Ajudam a amenizar alguns problemas encontrados na odometria.
- Em sistemas baseados em odometria, qualquer erro mínimo de orientação causará um erro posicional ilimitado.
- Através de sensores de direção, é possível identificar erros de orientação e corrigir os erros de odometria.
- Exemplos de sensores de direção:
  - Giroscópio;
  - Bússolas.

# SENSORES

---

## ○ Sensor Geomagnético

- Determina a orientação absoluta de um veículo móvel.
- Usa o campo magnético da Terra.
- São passíveis de erros na presença de linhas de força e estruturas metálicas.
- Exemplo: Bússolas
- Bússolas são exemplos de sensores exproprioceptivo.

# SENSORES

---

## ○ GPS

- Desenvolvido pelo Departamento de Defesa Norte-Americano
- É um exemplo de sensor exproprioceptivo.
- A localização absoluta de um receptor é determinada pela triangularização do tempo de recepção de sinais enviados pelos satélites.
- Existem 32 satélites em órbita ao redor da Terra a uma altura de aproximadamente 10900 milhas náuticas (1 milha  $\approx$  1.85km)
- Os gps comuns possuem erros de localização de 15m. Porém existem gps comerciais com erro de localização em torno de 10-15 cm.



# SENSORES

---

## ○ Sensores Time-of-flight (TOF)

- São usados para medir distâncias através do tempo que um sinal leva para ir até um objeto e ser refletido de volta ao emissor;
- A emissão e a recepção do sinal podem ocorrer a partir de um mesmo dispositivo. Em alguns casos, o transmissor pode ser diferente do receptor.
- São exemplos de sensores ativos e exteroceptivos.

# SENSORES

---

## ○ Sensores Time-of-flight (TOF)

- O sinal pode ser um pulso de energia acústico ou ótico. Por isso convém usar nos cálculos de distância a velocidade do som (0.3 m/ms) ou da luz (0.3m/ns).
- A distância percorrida é dada por  $d = vt$  e representa 2 vezes a distância entre o emissor e o objeto.
- Exemplo : Laser e Sonar.

# SENSORES

---

## ○ Sensores TOF Ultrasônico

- São usados em sistemas robóticos indoor.
- Amplamente disponíveis; de baixo custo e fácil de usar.
- Aplicabilidade:
  - Modelagem de ambientes;
  - Estimação de posição;
  - Tratamento de colisões
  - Detecção de movimentos
- Em geral, os sistemas robóticos assumem que o FOV é 30 graus e alcance de 5m.

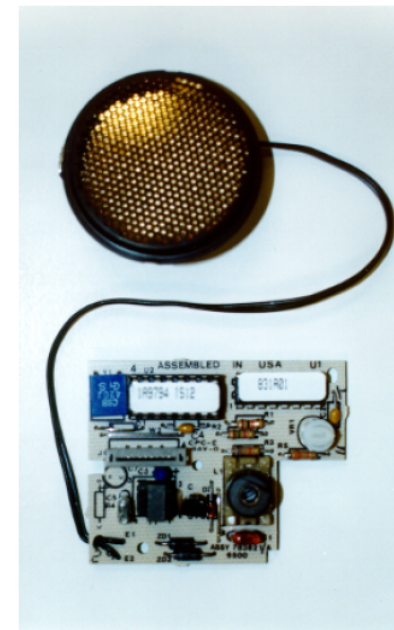


Figura extraída de [1]

# SENSORES

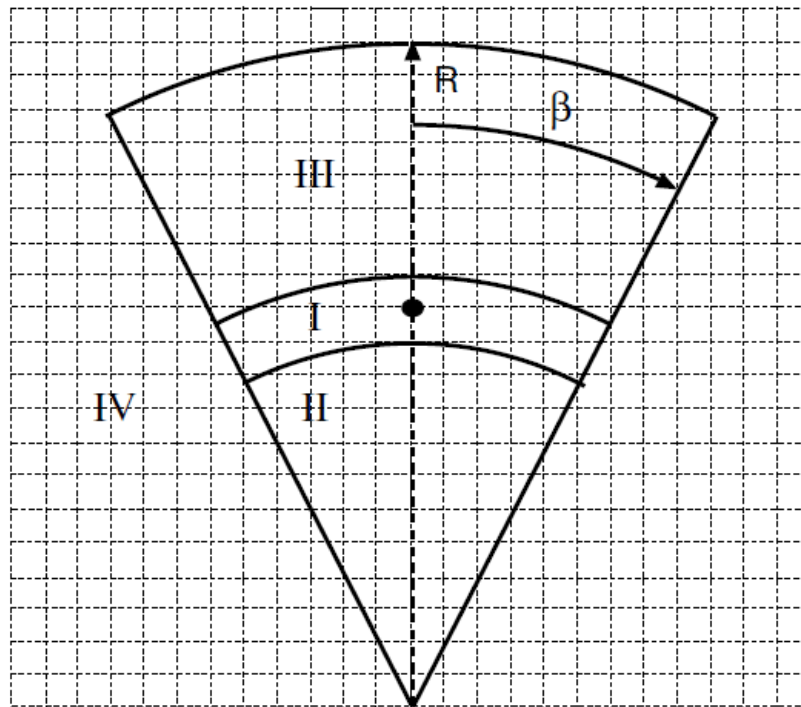
---

## ○ Sensores TOF Ultrasônico

- O transdutor corresponde a uma fina membrana metálica.
- Um pulso elétrico forte gera uma onda fazendo a membrana produzir um som.
- Em seguida membrana pára de vibrar esperando o retorno do sinal emitido.
- O sinal retornado faz a membrana vibrar.
- Ele é amplificado e se a intensidade do sinal estiver acima de um dado limiar então a distância associada ao sinal é calculada.

# SENSORES

## ○ Sensores TOF Ultrasônico



Área observada pelo sensor de ultrasom.

Figura extraída de [1]

I – região associada à leitura.  
Objeto pode estar em qualquer  
posição nesta área.

II – região vazia.

III – região “coberta” pelo sensor,  
mas desconhecida.

IV – região fora do campo de visão  
do sensor.

# SENSORES

---

- Sensores TOF Ultrasônico - Fontes de erros [2]:
  - Variações na velocidade de propagação devido à temperatura do ambiente ou umidade.
  - Incertezas na determinação exata do tempo de chegada no pulso refletido, devido à diminuição de energia do pulso emitido.
  - Falta de precisão no circuito de temporização usado para medir o tempo de ida e volta do pulso. Sistemas acústicos usam tecnologia de detecção mais barata que sistemas óticos.

# SENSORES

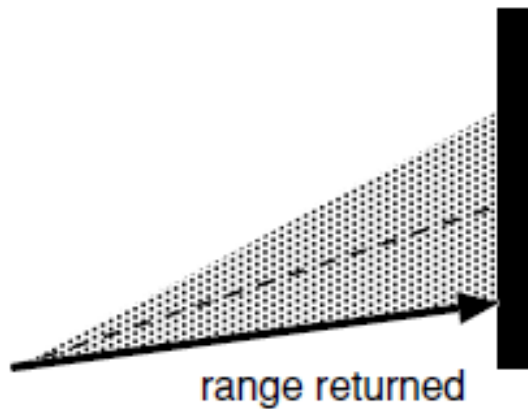
---

- Sensores TOF Ultrasônico - Fontes de erros [2]:
  - Ângulo de incidência do pulso na superfície do alvo. O sinal refletido representa apenas uma pequena porção do sinal original (**specular reflexion**).
  - A energia restante se dispersa em outras direções; é absorvida pela superfície do alvo; ou é absorvida por outro sensor (**crosstalk**).
  - Devido ao ângulo de incidência da superfície, um dos lados do cone de visão do sensor irá atingir primeiro a superfície do que o outro. Isto irá provocar um sinal de retorno que corresponderá a uma distância inferior a real (**foreshortening**).

# SENSORES

---

- Sensores TOF Ultrassônico - Fontes de erros:



**foreshortening**



**specular reflexion**

Figuras extraídas de [1]



# SENSORES

- Sensores TOF Ultrassônico - Fontes de erros:

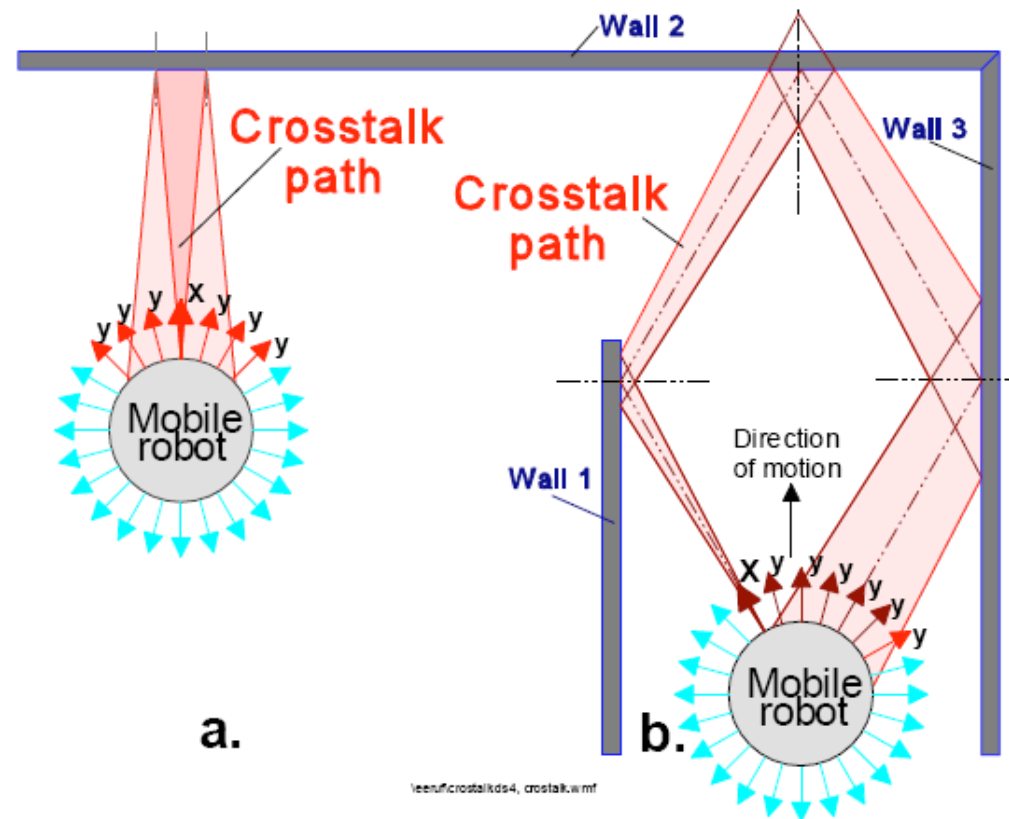
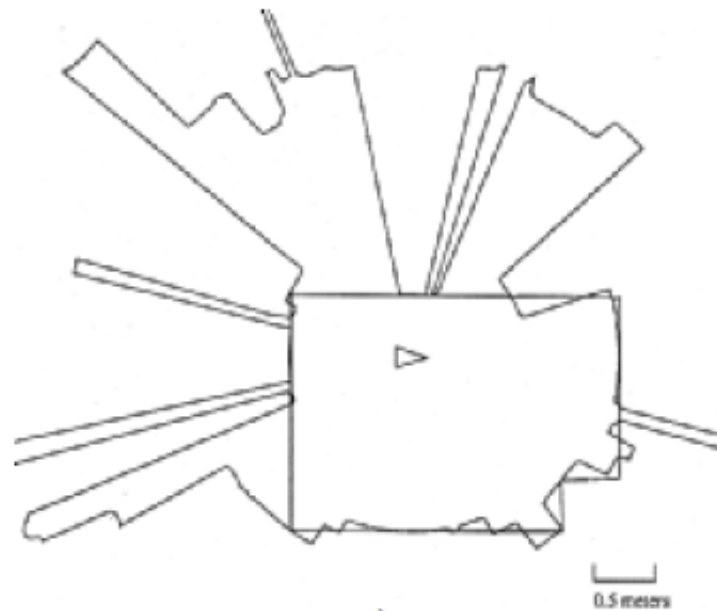


Figura Extraída de [2]

# SENSORES

---

- Sensores TOF Ultrasônico



Varredura de 360 graus.  
Figura Extraída de [3]

# SENSORES

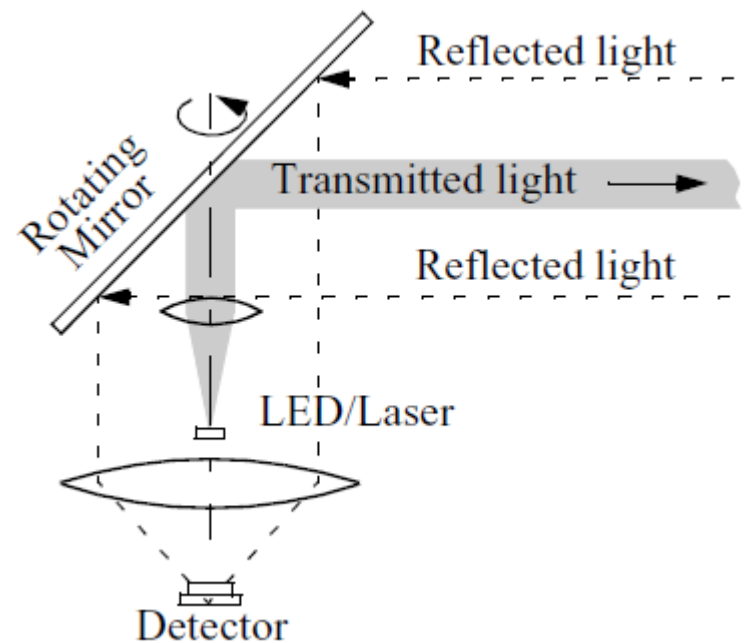
---

## ○ Sensores TOF baseado em Laser

- Sistemas baseados em laser são chamados de Radar Laser ou LIDAR (**L**ight **D**etection and **R**anging).
- O primeiro experimento foi desenvolvido no Jet Propulsion Laboratory.
- O laser é emitido em pulsos rápidos e refletido de volta pelo objeto alvo. A energia que retorna é medida e usada para calcular a distância até o objeto usando a velocidade da luz.
- Os primeiros sensores laser conseguiam detectar objetos a uma distância máxima de 5m.

# SENSORES

- Sensores TOF baseado em Laser



Desenho esquemático de um sensor laser com espelho rotatório.  
Figura extraída de [3].

# SENSORES

---

- Sensores TOF baseado em Laser



SICK LMS 200

FOV 180 graus.  
Condições ideais 80 m.  
Resolução angular 0.25 graus  
Resolução 10 mm  
peso 4.5kg.  
40ms/scan



Hokuyo URG

FOV 240 graus.  
Alcance máximo 5m.  
Resolução angular 0.36 graus.  
Resolução 1mm  
100ms/scan.  
160gramas.

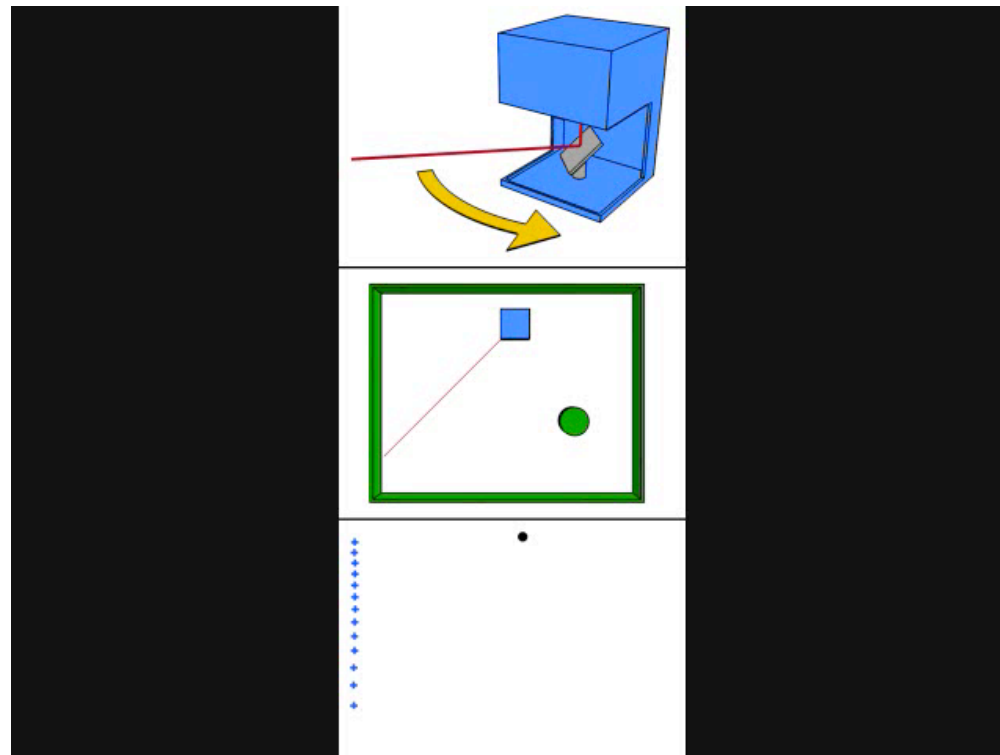
# SENSORES

---

- Sensores TOF baseado em Laser



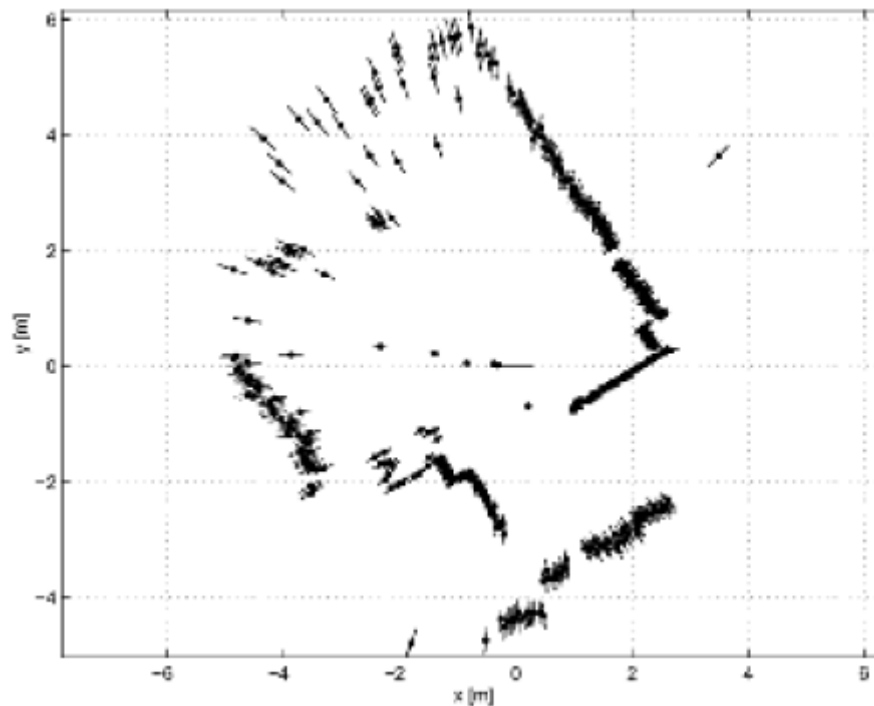
SICK LMS 200



# SENSORES

---

- Sensores TOF baseado em Laser



Varredura de 360 graus.  
Figura Extraída de [3]

# SENSORES

- Sensores TOF baseado em Laser – Triangularização 1D

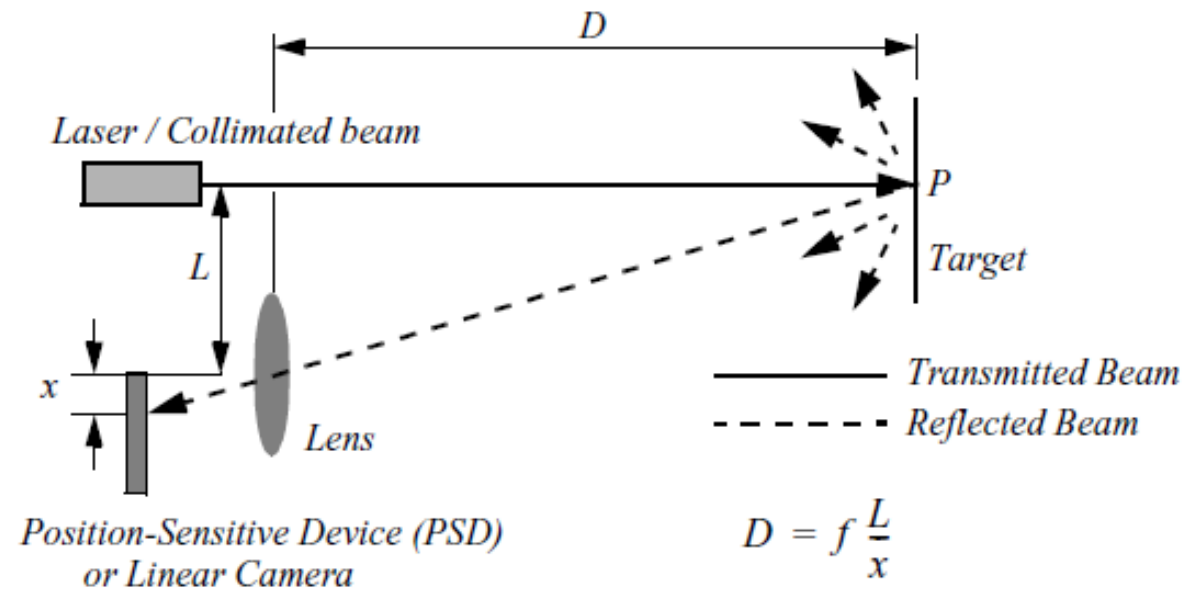


Figura Extraída de [3]



# SENSORES

- Sensores TOF baseado em Laser – Triangularização 2D

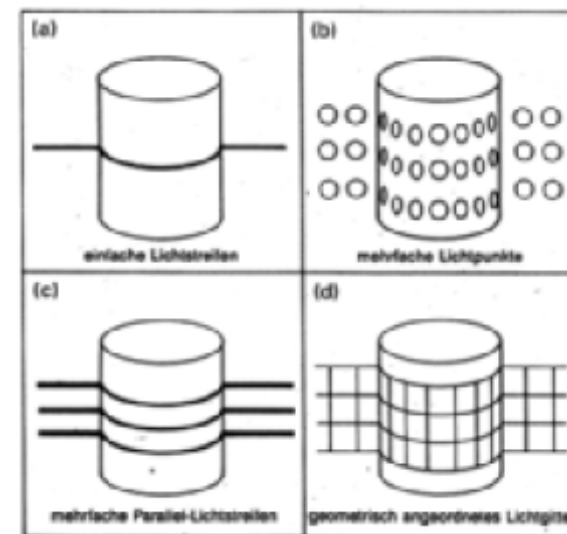
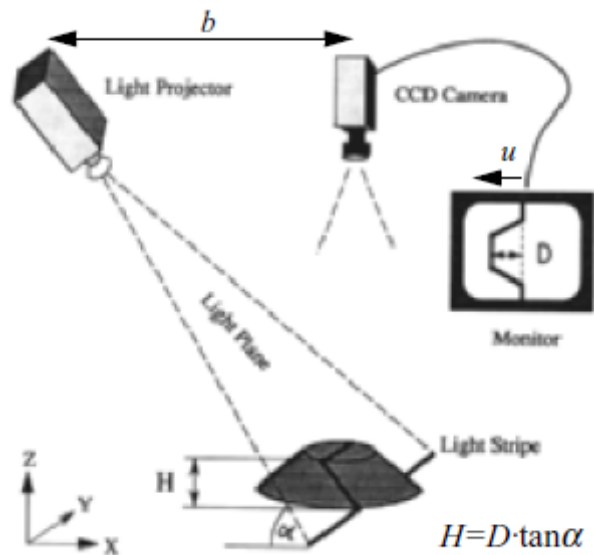


Figura Extraída de [3]

# SENSORES

---

- Sensores TOF baseado em Laser - Principais fontes de erros [3]:
  - Objetos escuros ou distantes não produzem estimativas tão boas quanto objetos próximos e brilhantes.
  - Reflexão da energia, similar ao que acontece com TOF ultrassônicos, porém em superfícies altamente lisas ou superfícies muito rugosas.
  - Paredes transparentes, como vidro.

# BIBLIOGRAFIA

---

- [1] R. Murphy. Introduction to AI Robotics, MIT Press, 2000.
- [2] Borenstein, J. Everett, H.R, Feng, L. Where am I? Sensors and methods for Mobile Robot Positioning, 1996. disponível para download em <http://www-personal.umich.edu/~johannb/position.htm>
- [3] Siegwart, R. Nourbakhsh, I. R. Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press, 2004.

# SENSORES

---

## ○ Sensores baseados em Visão

- Fornecem uma quantidade enorme de informação sobre o ambiente
- Permitem uma interação rica e inteligente em ambientes dinâmicos.
- São exemplos de sensores exteroceptivos passivos (sem o uso de flash).
- Tentam imitar a o sistema visual humano.
- Tecnologias usadas :CMOS ( Complementary Metal Oxide Semiconductor ) e CCD (Charge-coupled device)

# SENSORES

---

## ○ Sensores baseados em Visão

- CCD é um array de elementos sensíveis a luz de tamanho 5 a 25 $\mu$ m, chamados de pixels.
- Os capacitores de todos os pixels são carregados completamente dando início ao período de integração.
- Quando os fótons atingem cada pixel, eles liberam elétrons que são capturados pelo campo elétrico e retido pelo pixel.
- Cada pixel acumula um nível de carga baseado no número total de colisões.
- As cargas relativas de todos os pixels são congeladas e lidas.

# SENSORES

---

## ○ Sensores baseados em Visão

- O processo de leitura dos pixels é realizado em uma área específica do CCD.
- Linha após linha, começando pela última linha do CCD, é transferida para este local e lida.
- Como as cargas são transportadas através do Chip, elas necessitam de um circuito de controle especializado.

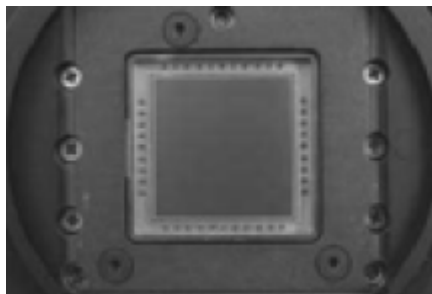


Figura extraída de [3]

# SENSORES

---

## ○ Sensores baseados em Visão

- CMOS é um array de pixels que acumulam cargas durante o período de integração.
- Cada pixel possui associado um conjunto de transistores.
- O circuito associado a cada pixel mede e amplifica o sinal do pixel, tudo em paralelo. Em seguida os valores resultantes desta leitura são enviados para seus locais de destino através de fios.

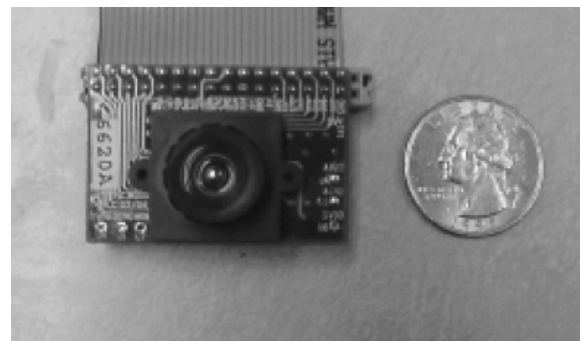


Figura extraída de [3]

# SENSORES

---

## ○ Sensores baseados em Visão

- CMOS não precisa de um circuito e temporizador para transferir os valores de pixels pelo chip.
- CMOS são mais baratos que CCD e consomem menos energia, em torno de 0.01% da energia consumida pelo CCD.
- CMOS são menos sensíveis a luz que os CCD. Isso faz com que o CCD produza imagens com mais qualidade que o CMOS.
- CMOS são susceptíveis a ruído.



# SENSORES

---

- Sensores baseados em Visão



Figura extraída de [4]

# SENSORES

- Sensores baseados em Visão



Figura extraída de [4]

# SENSORES

---

## Trabalho

Descrever o funcionamento dos sensores de infravermelho, sensor doppler, active beacons e giroscópio. É importante dar exemplos de aplicações que usem estes sensores.