



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
29060-900 VITÓRIA, ES Fax: (27) 335-2737 E-mail: tfbastos@ele.ufes.br

**Disciplina: 017-5524 Oficina de Robótica
(Mestrado/Doutorado)**

Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
PROF. DR. TEODIANO FREIRE BASTOS FILHO

PROGRAMA DE DISCIPLINA

017-5524 : Tópicos Especiais em Automação: Oficina de Robótica

Professor : Teodiano Freire Bastos Filho

Período : 2007/2

Horário : Sextas-Feiras, de 14:00 às 17:00 h

Carga horária semanal e créditos:

Teoria: 3; Exercícios: 0; Laboratório: 0; Créditos: 3

Critérios de avaliação:

Desenvolvimento de um projeto (PJ) e média aritmética de trabalhos teóricos —apresentação de artigos, provas, simulações, etc. — (AT). A nota final (NF) é calculada por:

$$NF = \frac{(2PJ + AT)}{3}$$

NOTA: A cada ausência em aula, será descontado um ponto da nota AT.

Ementa:

1. Introdução
Objetivos do curso. Robôs Industriais e robôs móveis. Sensores internos. Sensores externos. Sensores para processos de soldagem. Critérios para avaliação de sensores: sensibilidade, linearidade, faixa de medida, tempo de resposta, precisão, repetibilidade, resolução, tipo de saída, tamanho e peso, confiabilidade, interfaceamento.
2. Motores e Atuadores em Robôs Móveis
Principais Tipos de Motores CC. Princípio de Funcionamento. Torque, Velocidade, Eficiência. Motor de Passo. Servo-Motor. Motor Piezelétrico. Motor Eletrostático. Ligas de Memória. Dimensionamento de Motor para Robô Móvel.
3. Acionamento de Motores (Ponte H e Sinal PWM) e Controle de Motores
Funcionamento de Ponte H. CIs Baseados em Ponte H. Sinal PWM. Uso de Sinal PWM e Ponte H para Impor Velocidade a um Robô. Uso de Controle Proporcional-Integral (PI) para Controle de Ambas as Rodas de um Robô Móvel.
4. Sensores

Fotosensíveis (Fotoresistor, Fotodiodo, Fototransistor). Circuitos Eletrônicos para Interface com microcontrolador. Implementação de Comportamento "esconder em local escuro" e "seguir uma fonte de luz". Sensor de Proximidade Ótico (infravermelho). Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Implementação de Comportamento "seguir parede". Sensor Piroelétrico. Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Implementação de Comportamento "seguir humanos". Câmara de Vídeo. Sensor de Força. Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Sensor de Contato. Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Microfone. Implementação de comportamento "obedecer padrão sonoro". Sensor de Ultra-Som. Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Codificadores Óticos (encoders). Inclínômetro. Giroscópio. Bússola. Sensor de Nível de Bateria. Circuito Eletrônico para Interface com microcontrolador. Sensor de Corrente. Sensor de Temperatura.

5. Baterias, Reguladores de Tensão, Reguladores de Chaveamento, Conversores CC-CC, Proteção de Circuitos, Isolamento, Redução de Ruídos
Tipos de Bateria para Robôs Móveis (ácido-chumbo, zinco-carbono, alcalina, lítio, mercúrio, níquel-cádmio, hidreto de níquel-metal, prata e zinco). Características (energia, densidade de energia, variações com o tempo e capacidade, voltagem da célula, resistência interna, recarregabilidade). Circuito Recarregador de Baterias. Regulador de Tensão. Exemplos de CIs comerciais. Conversor CC-CC. Regulador de Chaveamento. Isolamento de Circuitos de Parte Lógica, Sensores e Baterias. Resolvendo Problemas de Ruído no Circuito.

6. Estratégias de Programação e Técnicas de Controle de Robôs Móveis

Estratégias de Programação de um Microcontrolador para Resposta a Eventos Externos em Tempo Real (Polling, Interrupção, Input Capture). Controle Clássico de Robôs Móveis. Controle Reativo. Controle Baseado em Comportamentos. Controle Híbrido. Comportamentos. Estratégias para Implementação de Comportamentos. Linguagens de Programação Usadas em Controle Baseado em Comportamentos. Linguagem Interactive C. Programação de Comportamentos. Arbitração de Comportamentos. Problemas com Robôs com Controle Baseado em Comportamentos. Sistemas Multi-Agentes. Problemas Ainda Não Resolvidos em Robôs Móveis.

7. Formas de Locomoção de Robôs Móveis, Rodas e Chassis

Formas de Locomoção de Robôs Móveis (Rodas, Patas, Esteiras). Características e Problemas. Tipos de Acionamento de Robôs (diferencial, carro, triciclo, sincro-drive). Forma dos Robôs. Detalhes Mecânicos de Uso de Rodas. Materiais para Construção de Chassis.

8. Modelamento de Robôs Móveis

Modelamento dos motores CC de um robô móvel a rodas. Modelo das rodas. Modelo cinemático de um robô móvel a rodas. Diagrama de blocos. Obtenção da velocidade angular e velocidade linear do robô a partir de tensões aplicadas aos motores.

9. Controle Baseado em Lyapunov de Robôs Móveis

Controle Ponto a Ponto sem Orientação Final (sem restrições)
Controle Ponto a Ponto com Orientação Final (sem restrições)
Seguimento de Trajetórias (sem restrições)
Controle Ponto a Ponto sem Orientação Final (com restrições)
Controle Ponto a Ponto com Orientação Final (com restrições)
Seguimento de Trajetórias (com restrições)

10. Aplicações Especiais de Robôs

Robôs de limpeza (limpeza de pisos domésticos e industriais, limpeza de dutos para petróleo, limpeza de tubulações em geral, limpeza de cascos de navios). Robô cortador de grama. Robô de segurança. Robô bombeiro. Robô hospitalar. Robô agrícola. Robô explorador de vulcões. Robô explorador planetário (robô Sojourner)
Robô buscador de bombas e detector de minas. Robô tosador de ovelhas. Robô saltador. Robô escalador. Robô aéreo. Robô submarino. Sistemas multi-robôs. Robôs para entretenimento. Microrrobôs e Nanorrobôs. Robô para instalação de esferas de sinalização em cabos de alta tensão. Robô para geração de imagens de TV.

Bibliografia

1. Jones, J.L, Flynn, A.M., Mobile Robots: Inspiration to Implementation, A K Peters Ltd., 2nd Edition, 1999.
2. Martin, F. Oberoi, P., Sargent, R., The 6.270 Robot Builder's Guide for the 1992 M.I.T. LEGO Robot Design Competition, 2nd Edition, 1992. Obtido em cherupakha.media.mit.edu.
3. Fu, K.S., Gonzalez, R.C., Lee, C.S.G., Robotics. Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw-Hill International Editions, 1987.
4. Klafter, R.D., Chmielewski, T.A., Negi, M., Robotic Engineering. An Integrated Approach, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
5. Critchlow, A.J., Introduction to Robotics, Macmillan Publishing Company, 1985.
6. Ferraté, G., Amat, J., Ayza, J., Basañez, L., Ferrer, F., Huber, R., Torres, C., Robótica Industrial, Marcombo, S.A., 1986.
7. Tompkins, W.J., Webster, J.G., Interfacing Sensors to the IBM PC, Prentice Hall, 1988.
8. Bastos, T.F., Seguimiento y Análisis de Entornos de Soldadura por Arco Automatizada Mediante Ultrasonidos, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1995.
9. Bastos Filho, T. F. *et al.*, Robótica Industrial. Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos, Editor Vitor Ferreira Romano, Editora Edgard Blücher Ltda., 2002.

10. Artificial Intelligence and Mobile Robots. Case Studies of Successful Robot Systems, edited by David Kortenkamp, R. Peter Bonasso, and Robin Murphy, AAAI Press/The MIT Press, 1998.
11. Arkin, R. C., Behavior-Based Robotics (Intelligent Robots And Autonomous Agents, The MIT Press, 1998.
12. Bastos, T.F., Dynnikov, V., "Aplicación de Robots y Sensores en Manufactura", Tercer Congreso Internacional de Manufactura , Querétaro, 22-24 de Octubre, 1998, México.
13. Bastos, T.F., "Sensores de Proximidad en Robótica", Reunión del Proyecto SISPER (Sistema de Percepción Modular y Reconfigurable para Robótica) , Maracaibo, 7-11 de Septiembre, 1998, Venezuela.
14. Bastos, T.F., "Sensores para Robots de Soldadura por Arco", I Jornada de Robótica, Cartagena de Indias, 14-18 de Abril, 1997, Colombia.
15. Bastos, T. F. "Sensores de Ultra-Som: Características e Aplicações", Semana da Engenharia da UFES, Vitória, 20-24 de Novembro, 1995, Brasil.
16. Bastos, T.F., Scheneebeli, H.J., Dynnikov, V., "Tópicos Avanzados en el Control de Robots: Robots Móviles", I Curso Iberoamericano de Automática, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, Diciembre 1995.
17. Dudek, G., Jenkin, M., Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University Press, 2000.
18. Murphy, Robin R., Introduction to AI Robotics, The MIT Press, 2000.
19. Lunt, K., Build Your Own Robot!, A. K. Peters, 2000.
20. Cook, D., Robot Building for Beginners, Apress, 2002

Objetivos do Curso

Proporcionar os subsídios para a construção de robôs: características construtivas, controle, eletrônica, interfaces e finalmente uma descrição dos sensores atualmente utilizados em robôs ou que podem vir a ser utilizados no futuro.

SENSORES

Os sensores podem ser definidos como dispositivos projetados para quantificar ou detectar parâmetros específicos por meio de elementos transdutores. Em um sensor, os transdutores são os elementos que desenvolvem a função de transformação de uma magnitude física em outra.

Os sensores podem ser de contato (interruptores, palpadores, provadores, etc.) ou não-contato (através de campos magnéticos, ondas sonoras, luz, raio-x, luz infra-vermelha, etc.) e podem ser divididos em duas classes básicas:

1. Sensores Internos (dispositivos utilizados para medir posição, velocidade ou aceleração das juntas e/ou da extremidade de um robô manipulador, ou das rodas de um robô móvel).

Ex.:

- Potenciômetros (pots)
- Sincros (synchros)

- Resolvers
- Escala Indutiva Linear
- Transformadores Diferenciais (LVDT e RVDT)
- Interruptores Óticos
- Encoders Óticos (absoluto e incremental)
- Tacômetros
- Acelerômetros

2. Sensores Externos (utilizados para monitorar o próprio robô –auto-proteção– e/ou sua relação dinâmica com sua tarefa, ambiente ou objetos manipulados pelo mesmo). Podem ser Visuais ou Não-Visuais.

Entre os não-visuais estão os utilizados para monitorar:

- a) Distância a um objeto ou a um obstáculo
- b) Toque/Escurregamento
- c) Força/Torque

Ex.:

- Strain Gages
- Transdutores de Pressão
- Sensores de Proximidade
- Sensores de Ultra-Som
- Sensores Eletromagnéticos
- Materiais Elastométricos

Também discutiremos os sensores utilizados em robótica móvel e em processos de soldagem, onde provavelmente estão os mais avançados sensores externos para robôs. Veremos finalmente os sistemas de visão artificial aplicados à robótica.

O sucesso no controle da maioria dos robôs depende da capacidade de obtenção de informação sobre a junta e/ou extremidade de um robô manipulador, ou sobre as rodas de um robô móvel. Portanto, é necessário utilizar dispositivos (transdutores) que forneçam tal informação que possa ser utilizada pelo robô. Assim, posição, velocidade e/ou aceleração (ou pelo menos uma representação analógica ou digital das mesmas) devem ser medidas para comprovar que o robô se move da maneira desejada (por exemplo, em linha reta).

Embora seja possível utilizar um robô sem qualquer sensoramento externo, muitas e cada vez mais aplicações necessitam de sensores. Por exemplo, se é necessário manusear diferentes objetos, entre os quais há alguns objetos frágeis, é importante medir a força sendo exercida pela garra e ajustá-la para um valor suficiente para pegar o objeto sem quebrá-lo.

Ao utilizar sensores, devemos primeiramente decidir o que o sensor deve fazer e que resultados devemos esperar.

CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DOS SENSORES

1) Sensibilidade

Sensibilidade é definida como a taxa de mudança de saída para mudança na entrada. Como exemplo, se um movimento de 0.001 mm causa uma mudança na saída de 0.02 V, então a sensibilidade é de 20 V/mm.

2) Linearidade

Uma linearidade perfeita faria com que o gráfico de saída versus entrada fosse uma linha reta. Linearidade é a medida da constância da taxa de saída para entrada. Na equação $Y=bX$, a relação é perfeitamente linear se b é constante. Se b é variável, então a relação é não-linear; b pode também ser uma função de X , tal que $b=a+dX$, onde o valor de d introduziria uma não-linearidade. Uma medida da não-linearidade poderia ser dada como valor de d .

3) Faixa

Faixa é a medida da diferença entre o valor mínimo e o valor máximo medido. Um strain gauge pode ser capaz de medir valores sobre a faixa de 0.1 a 10 N, e um sensor de ultra-som pode medir distâncias na faixa de 30 cm a 5 m, por exemplo.

4) Tempo de Resposta

É o tempo necessário para uma mudança na entrada ser observável como uma mudança estável na saída. Em alguns sensores, a saída oscila por um certo tempo antes que ele alcance um valor estável. Pode-se medir então o tempo de resposta desde o início de uma mudança na entrada até quando a saída alcance uma faixa especificada.

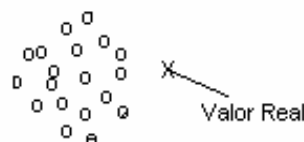
5) Precisão

É a medida da diferença entre os valores medidos e reais. Uma precisão de ∓ 0.001 mm significa que, sobre todas as circunstâncias consideradas, o valor medido estará dentro de 0.001 mm do valor real. São necessários equipamentos de medida de precisão cuidadosamente calibrados para verificar essa precisão.

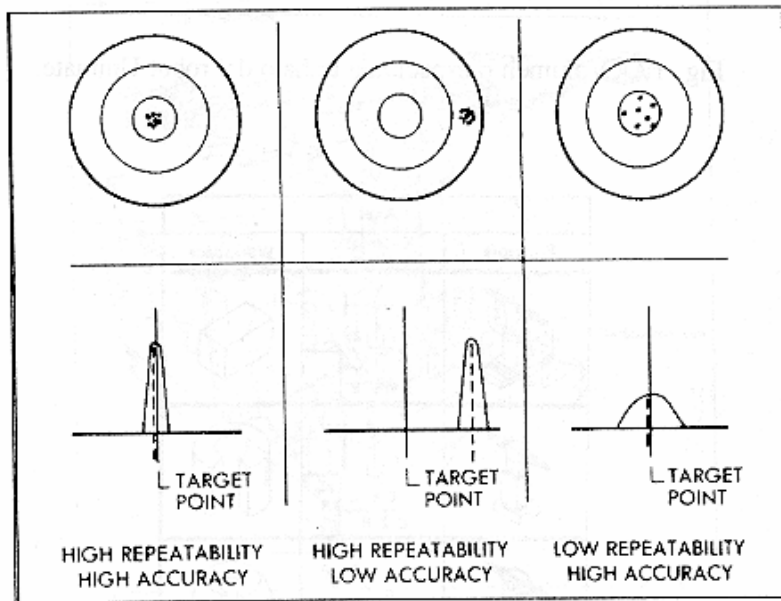


6) Repetibilidade

É a medida da diferença entre duas medidas sucessivas sob as mesmas condições. Um sensor pode ter alta repetibilidade, mas pouca precisão.



A figura abaixo mostra um exemplo claro da diferença entre os conceitos de precisão e repetibilidade:



7) Resolução

É uma medida do número de medidas de valores diferentes possíveis dentro de uma faixa de mínimo a máximo. É também utilizado para indicar o valor do menor incremento que é observável. Pode ser dado em valores percentuais (por exemplo, alguns sensores de ultra-som possuem uma resolução de 1% da medida de distância).

8) Tipo de Saída

A saída do sensor pode ser na forma de movimento mecânico, corrente ou tensão elétrica, pressão ou nível de líquido, nível de luz ou em outra forma.

Com relação a suas características físicas, os sensores devem ser avaliados em relação a:

1) Tamanho e Peso

Se um sensor deve ser montado em um robô móvel ou na extremidade ou braço de um robô manipulador, ele se torna parte da massa (além de ocupar um espaço na mesma) que deve ser acelerada e desacelerada pelos motores do punho e braço do robô manipulador –ou do motor de acionamento do robô móvel– , tal que ele afecta diretamente o desempenho do robô).

2) Confiabilidade

A confiabilidade é de grande importância em todas as aplicações de robótica. Pode ser medida em termos do tempo médio para falhar (MTTF – Mean Time To Failure) como o número médio de horas entre falhas que causam uma impossibilidade de operação do sensor.

3) Interfaceamento

Considerações de interfaceamento são frequentemente um fator determinante na usabilidade dos sensores. Conexões não padrões ou necessidade de tensões não padrões pode tornar um sensor muito complexo e caro. Da mesma forma, os sinais de controle e saída de um sensor devem ser compatíveis com outro equipamento que será usado conjuntamente com o sensor.

SENSORES INTERNOS

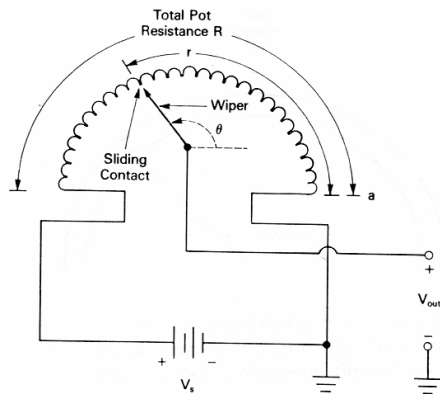
SENSORES DE POSIÇÃO NÃO-ÓTICOS

São utilizados para monitorar a posição das juntas de um robô manipulador e das rodas ou patas de um robô móvel.

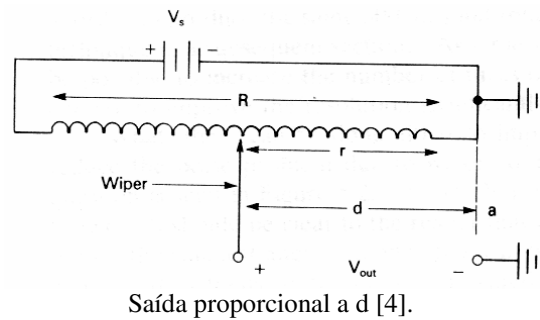
Ex.: Potenciômetros, sincro, resolver, escala indutiva linear (**inductosyn**), LVDT e RVDT.

1) Potenciômetro (Pot) :

É o dispositivo mais simples que pode ser usado para medir posição. Em um robô manipulador pode monitorar a posição angular de uma junta de revolução ou a posição linear de uma junta de translação.

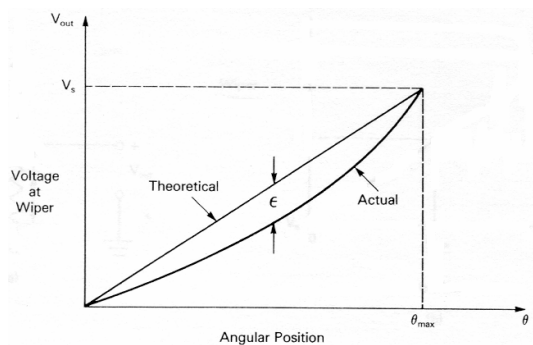


Saída proporcional a θ [4].



$$V_0 = \frac{r}{R} \cdot V_s$$

Problemas: Sempre existem não-linearidades nestes potenciômetros [4]:



A não linearidade (%) é definida como:

$$N.L. = \frac{100 \epsilon}{V_{\text{máx.}}}$$

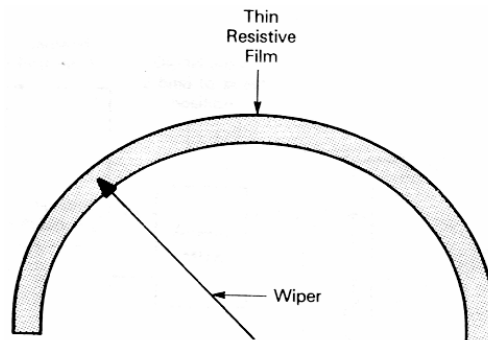
- Não podem ser usados em sistemas onde se requer grande precisão.
- Com o tempo os contatos se deterioram.

A resolução deste sensor depende do número de voltas do fio resistivo (a menor mudança que pode ser observada é V_s / N), e pode ser definido por:

$$\% \text{ Resolução} = \frac{100 V_s / N}{V_s} = 100 / N$$

Valores usuais estão na ordem de 1% que é insuficiente para muitas aplicações em robótica.

Solução: Utilizar um potenciômetro com filme resistivo fino, diminuindo também problemas de desgaste no contato [4].

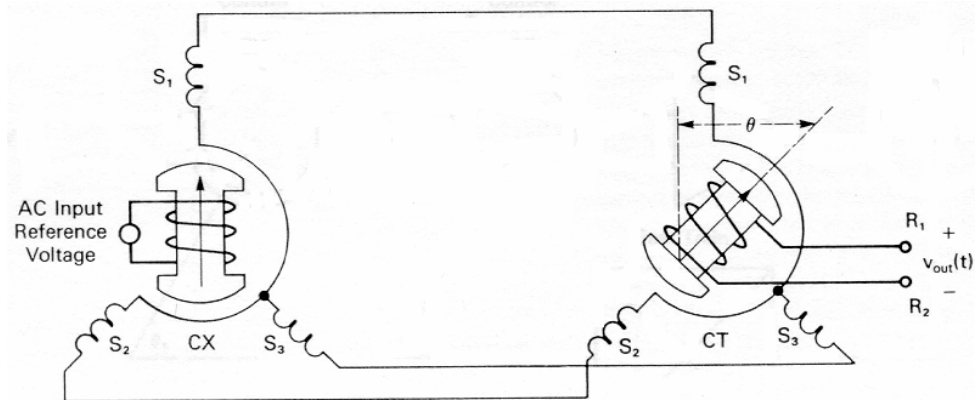


2) Sincro:

É um transdutor rotacional que converte deslocamento angular em uma tensão AC e vice-versa. Normalmente é constituído por componentes trifásicos separados [transmissor de controle (CX), transformador de controle (CT) e transmissor diferencial de controle (CDX)] e operam sob o princípio do transformador de rotação.

Dois ou três dos dispositivos são usados para medir a posição angular ou a diferença entre esta posição e uma posição de comando (erro de posição) [4].

Ex.:



Esquema de um sincro [4].

Nesta configuração, $V_0(t)$ é dependente do ângulo relativo θ entre os rotores CX e CT.

$$V_0(t) = V_m \text{sen}(\theta) \text{sen}(\omega t)$$

Onde:

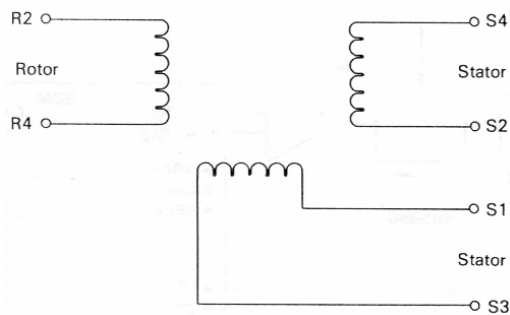
V_m é a amplitude e

ω é a frequência da tensão AC aplicada.

- Problema maior é a necessidade de adaptá-lo para interfaces com equipamentos digitais. Também são de eletrônica complexa e ocupam um volume importante, além do custo alto.

3) Resolver:

É uma variação do síncro, sendo freqüentemente chamado “síncro resolver”. Uma das principais diferenças entre ambos dispositivos é que os enrolamentos do estator e rotor do resolver estão deslocados mecanicamente por 90°, sendo que no síncro são 120°. O resolver mais comum tem um rotor simples e dois enrolamentos no estator [4].



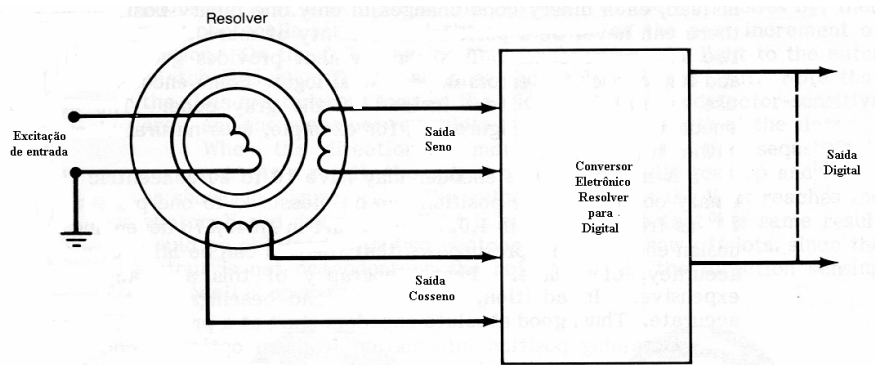
Com o rotor excitado por uma tensão AC, as tensões nos dois estatores são:

$$V_{1-3}(t) = V_m \sin(\theta) \sin(\omega t)$$

$$V_{2-4}(t) = V_m \cos(\theta) \sin(\omega t),$$

onde θ é o ângulo do eixo do resolver.

Uma representação digital da saída do resolver também pode ser obtida, facilitando seu uso em robótica [1].



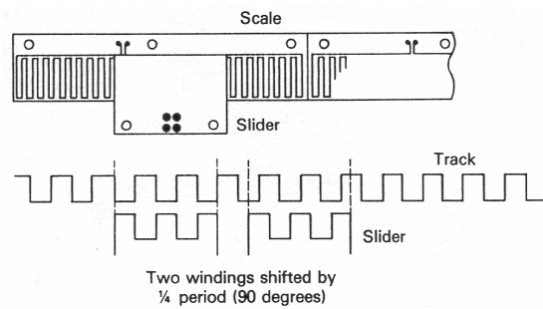
➤ É possível obter melhor resolução angular com o resolver do que com a maioria dos outros sensores de posição.

Problemas: custo alto, interferência eletromagnética devido ao sinal de excitação AC.

4) Escala Indutiva Linear – Inductosyn

Bastante utilizado em máquinas de controle numérico. É uma das formas mais precisas de medir posição, sendo capaz de obter precisões de 0,1 milésimos de polegada (linear) ou de 0,00042° (rotação).

Na operação, o Inductosyn é bastante similar ao resolver; há sempre dois componentes acoplados magneticamente, um dos quais se move em relação ao outro [4].



A saída nos dois deslizadores é:

$$V_{S1} = V \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x}{s}\right) \cdot \sin(\omega t)$$

$$V_{S2} = V \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{s}\right) \cdot \sin(\omega t)$$

onde x é a distância linear sobre a escala e s é o passo.

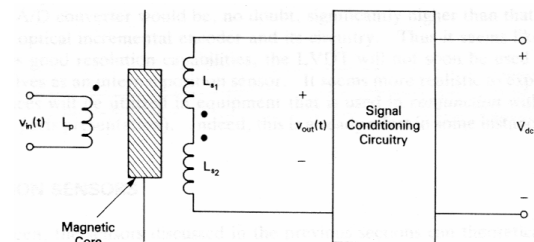
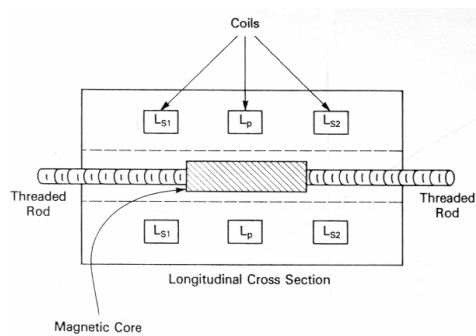
Problemas: Custo e eletrônica adicional para digitalização das saídas fazem este sensor menos atrativo em robótica, mas sua grande precisão torna-o atraente para o futuro.

5) Transformadores Diferenciais – LVDT e RVDT

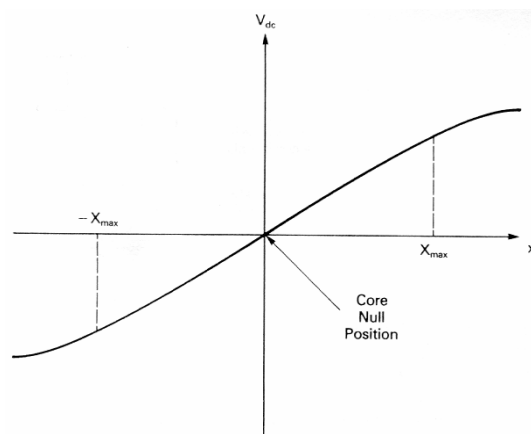
LVDT – Linear Variable Differential Transformer

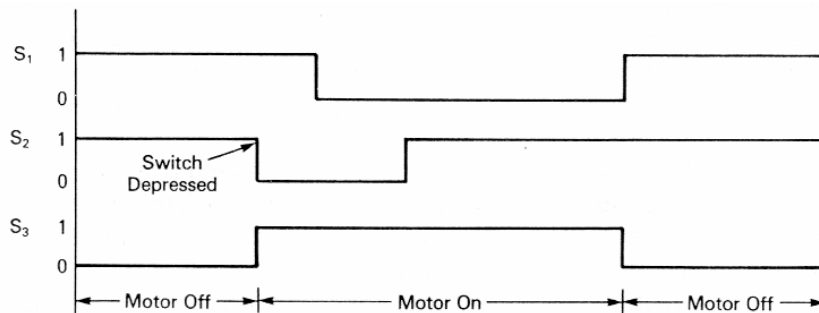
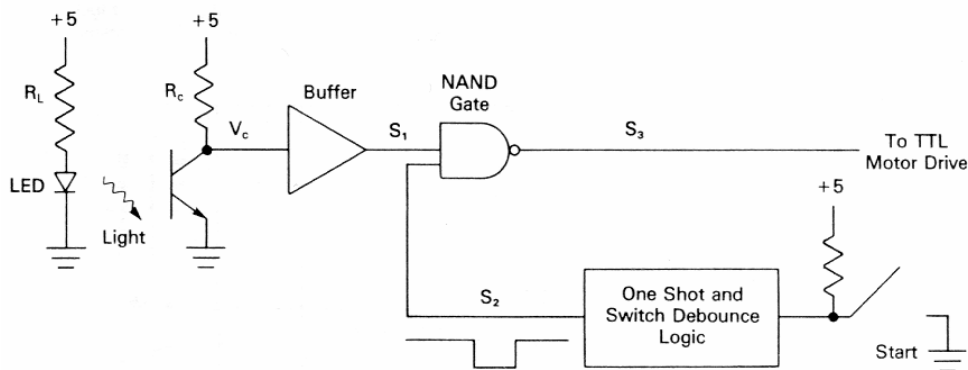
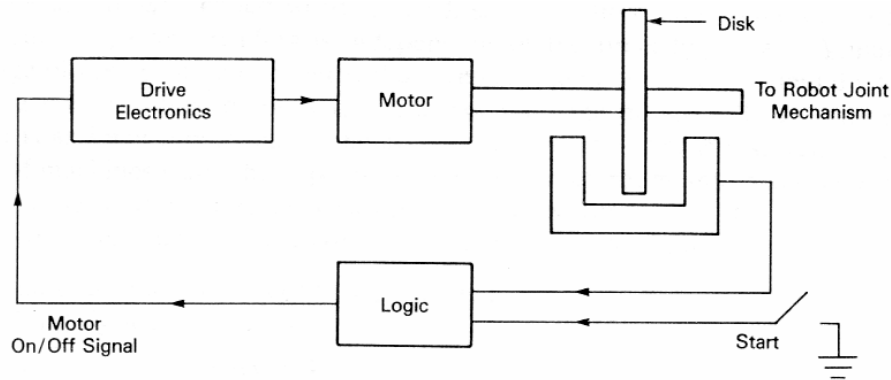
RVDT – Rotary Variable Differential Transformer

O LVDT é um transdutor eletrônico que consiste de duas partes, uma móvel e outra fixa, e produz uma tensão de saída proporcional ao deslocamento da parte móvel relativo à parte fixa [4].



As bobinas do secundário estão conectadas em série oposta tal que quando o núcleo está no centro, $V_{OUT}(t)$ é zero (a tensão induzida em ambas as bobinas do secundário é a mesma). O circuito acondicionador de sinal produz uma tensão CC proporcional à distância do núcleo à posição de tensão zero (centro). O RDVT trabalha sob o mesmo princípio.





➤ Podem-se utilizar mais etiquetas negras para outros pontos de parada.

2) Encoders Óticos:

Estão entre os sensores de posição mais utilizados em robótica, devido a proporcionar precisões mais do que suficientes. São divididos em duas classes distintas:

- a) Absoluto
- b) Incremental

Um robô equipado com um encoder absoluto não necessita de calibração, já que o sistema de controle conhece, nada mais ligar o robô, sua posição.

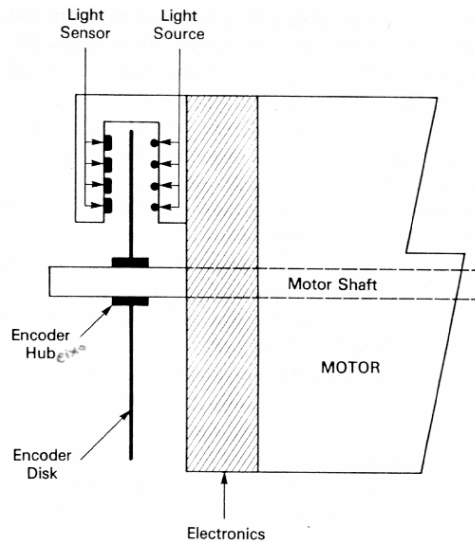
Já o encoder incremental fornece informações posicional relativa a algum ponto de referência. Um robô com este tipo de sensor deve executar uma seqüência de calibração para conhecer sua posição real.

Existem encoders lineares ou rotacionais, mas o dispositivo rotacional é majoritariamente utilizado em robótica, devido a que o número de robôs com juntas de revolução é bastante superior àqueles com juntas de translação. Além disso são usados também nas rodas ou nas patas dos robôs móveis. O encoder linear também é mais caro.

a) Encoders Absolutos de Rotação

Como dito antes, este sensor é capaz de proporcionar um código único para cada posição do eixo. Normalmente compõem-se de três partes principais:

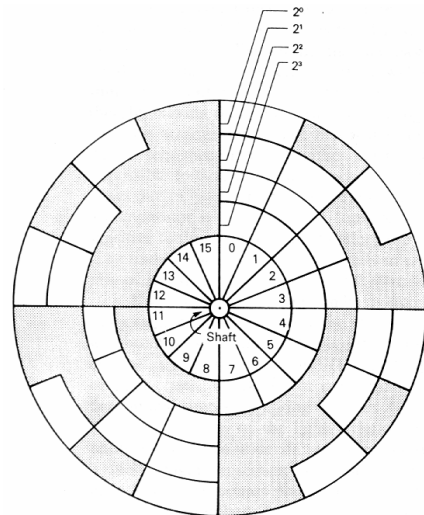
- Uma fonte de luz multi-canal;
- Um receptor de luz multi-canal;
- Um disco de rotação multi-pista.



A luz procedente dos n-elementos da fonte de luz (Ex.: LED's) passa através do disco e é recebida pelo correspondente conjunto de n-receptores (Ex.: fototransistores). O disco é dividido em pistas circunferenciais e setores radiais [4].

A informação rotacional absoluta é obtida utilizando um dos vários códigos. Pode-se usar código binário, BCD e código Gray. É possível produzir encoders absolutos com 13 bits, que implica em uma resolução de $360 / 2^{13} = 0,044^\circ$.

Como a sequência binária se repete a cada volta completa do disco, normalmente usa-se um segundo disco engrenado ao disco principal, que indica o número de rotações [4].

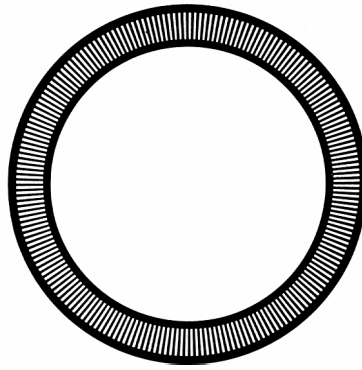


Problemas: Custo: custa algumas vezes mais do que os encoders incrementais, sendo por esta razão que os robôs normalmente utilizam os encoders incrementais.

a) Encoders Incrementais

São amplamente utilizados para monitorar posição em robôs, máquinas ferramentas, tornos, etc. por proporcionarem alta resolução e custo mais baixo que os encoders absolutos. Entretanto, necessita-se de calibração prévia, mas somente ao ligar o robô ou máquina.

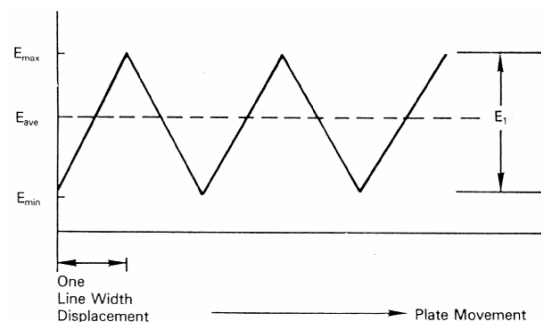
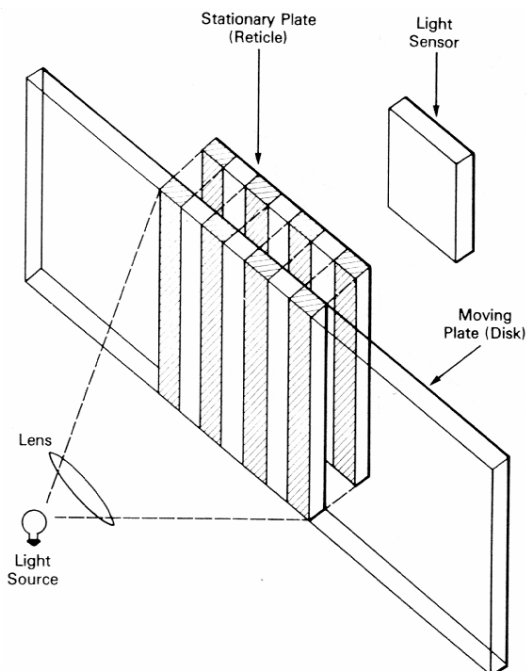
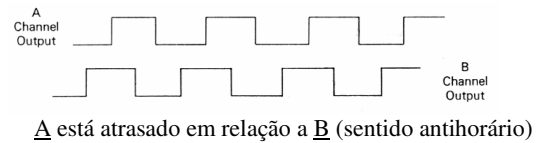
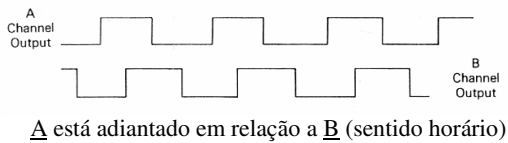
Tal como o encoder absoluto, consiste de um disco, uma fonte de luz (LED), e um conjunto de receptores de luz (fototransistores). Normalmente é utilizado um único LED e quatro fotodetectores, e um disco, que contém um único setor com n linhas radiais [4].



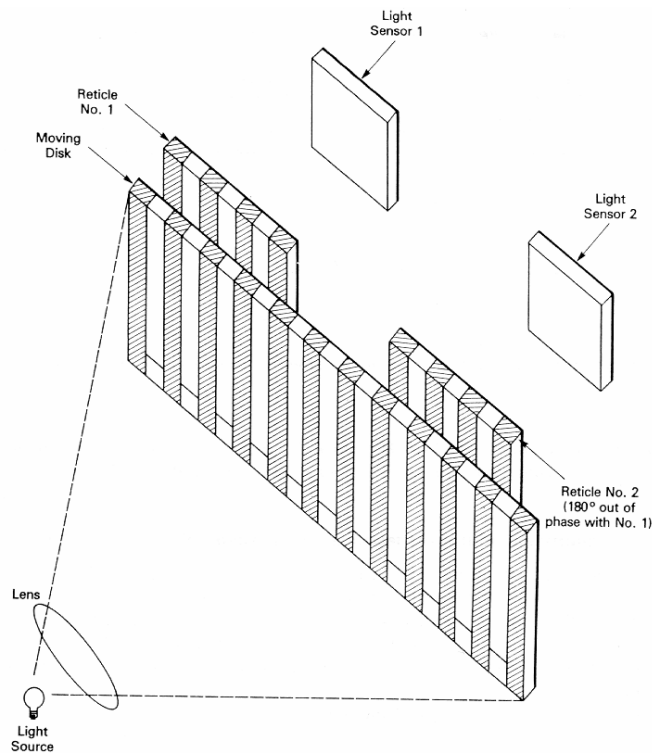
A resolução está associada com o número de linhas, assim a resolução na posição angular é $360^\circ / n$. Normalmente tem-se resoluções menores que $0,175^\circ$. Em robótica, resolução entre $1,8^\circ$ e $0,36^\circ$ são suficientes.

Se o encoder é montado sobre o eixo do motor, quando o disco gira a luz que chega ao receptor é interrompida por cada linha do disco. A forma de onda de saída é senoidal; usa-se então um comparador para converter esses sinais em pulsos TTL.

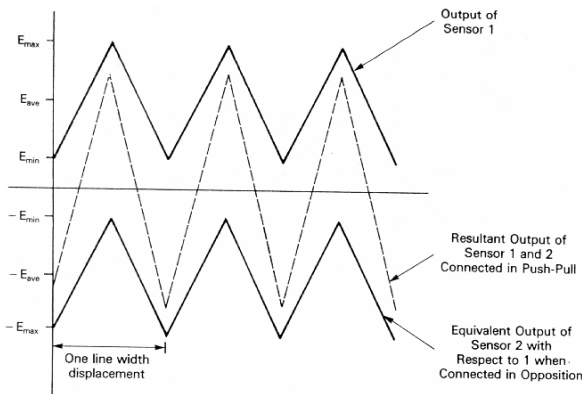
Há dois problemas com esta configuração de um emissor e um receptor: é impossível determinar a direção de rotação, e a largura dos pulsos gerados depende da velocidade da rotação e podem não ser detectados. Por isso empregam-se múltiplos receptores. Por exemplo, um segundo fotodetector separado eletricamente por 90° , produzirá pulsos idênticos ao primeiro, mas defasados de 90° . Pode-se então saber a direção do giro do disco [4].



Para o problema da perda dos pulsos (quando operando em alta velocidade), utilizam-se dois fotosensores adicionais e duas retículas fixas (ou disco fixo) na frente do sensor de luz [4].

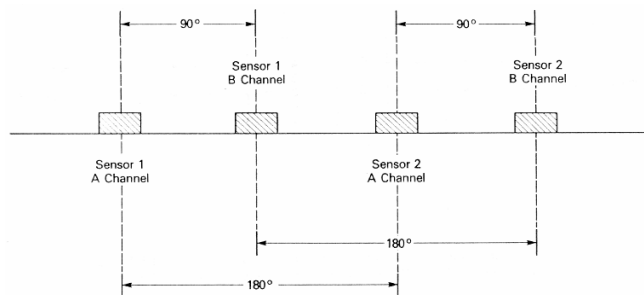


Se as saídas dos dois fotodetectores são subtraídas, teremos uma forma triangular centrada em zero e tendo aproximadamente duas vezes o valor de pico do sinal gerado.



Nesta configuração o encoder óptico é muito menos sensível a variações na fonte de luz (problemas no LED) ou sensibilidade do fotodetector (temperatura elevada ou operação em alta-frequência) [4].

O sensor completo de dois canais ficaria assim: [4]



- Além de permitir a determinação da direção de rotação e compensações para variações na fonte de luz e fotodetector, o uso de dois canais permite um aumento na resolução do sensor, através de circuitos eletrônicos, por um fator de até 20!
- Para determinar o zero de referência para o encoder incremental, normalmente se utiliza um outro canal adicional para detectar uma linha de referência no disco e assim produzir um pulso a cada rotação do disco.

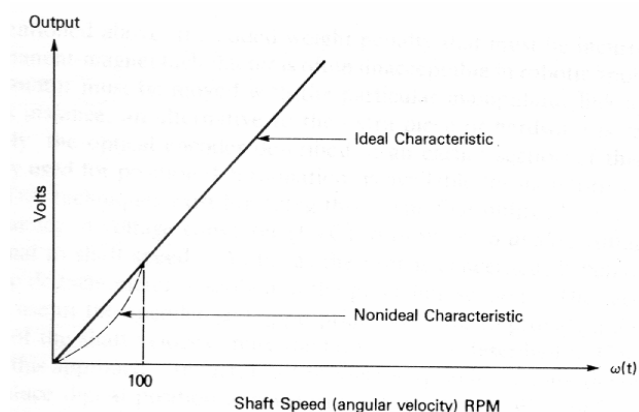
Para a calibração do robô, uma vez que o mesmo é ligado, cada junta se move em uma direção predeterminada até encontrar uma chave mecânica de fim de percurso. O ponto de parada é detectado pelo encoder, monitorando-se a contagem dos pulsos. Se ela não muda durante um curto período de tempo (Ex.: 100ms), então encontrou-se o fim de percurso. Neste ponto o atuador é movido na direção oposta até que o encoder detecta a Linha de Referência, neste ponto o contador é zerado. Todos os movimentos posteriores são relativos a este ponto de calibração.

SENSORES DE VELOCIDADE

Existem várias formas de se medir a velocidade angular de um eixo de rotação. O Tacômetro é amplamente utilizado em diversas aplicações. Além deste dispositivo analógico, é possível utilizar um encoder ótico e um conversor de frequência para tensão para obter velocidade analógica. O encoder ótico também pode produzir informação digital de velocidade utilizando-se um software apropriado.

1) Tacômetros CC

Sabe-se que o movimento de rotação de eixo do motor CC produz uma tensão analógica que aumenta (ou diminui) quando aumenta (ou diminui) a velocidade angular; o motor transforma-se então num gerador CC capaz de medir a velocidade do eixo. Os tacômetros são dispositivos projetados especialmente para este fim, e proporcionam uma tensão CC proporcional à velocidade do eixo, que é idealmente linear na faixa normal de operação (abaixo de 100 rpm existem algumas não-linearidades). Além disso, o ripple produzido é bastante baixo em relação a outros motores CC (um grande ripple pode prejudicar o controle de velocidade do robô, provoca vibrações) [4].



O robô SCARA utiliza este sensor, pois sua estrutura mecânica permite suportá-lo, mas em outros robôs é utilizado outro tipo de sensor, pois o peso do tacômetro provoca problemas.

2) Medida de Velocidade Usando Encoder Ótico

O encoder ótico também pode ser usado para medir velocidade; existem duas técnicas: a primeira usa o encoder e um conversor de frequência para tensão (FVC) para proporcionar uma tensão analógica que é proporcional à velocidade. A segunda técnica utiliza o encoder e um software adequado para proporcionar uma representação digital da velocidade.

a) Encoder e Conversor Frequência para Tensão (FVC)

Os pulsos produzidos pelo encoder podem ser contados periodicamente e este número de pulsos é convertido para um nível CC, que é proporcional à velocidade do eixo do motor. O FVC é um dispositivo que executa esta operação: recebe os pulsos do encoder e usando seu relógio interno conta os pulsos a cada ciclo. A contagem binária é passada a um conversor digital analógico que produz uma tensão CC proporcional à velocidade do disco do encoder e, conseqüentemente, ao eixo do motor. O chip AD451 é utilizado para produzir tensões de 0 a 5 V para frequências de até 10kHz. O AD453 vai até 100kHz.

b) Encoder e Software

Através do seguinte algoritmo pode-se obter a velocidade do motor:

1. Ler e armazenar o valor atual do encoder $P(kT)$
2. Recuperar o valor prévio do encoder $P((k-1)T)$
3. Obter a velocidade aproximada

$$V(kT) = \frac{P(kT) - P((k-1)T)}{T}$$

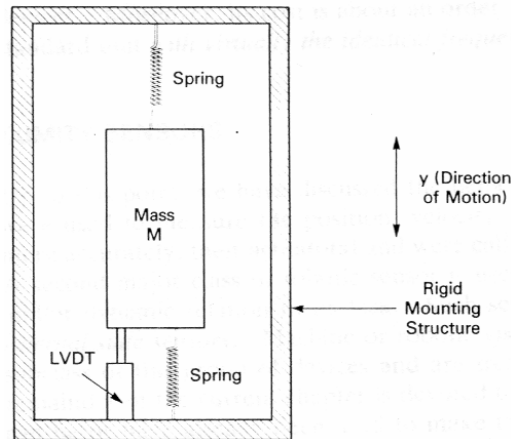
4. Incrementar k e repetir os passos de 1 a 3.

É um algoritmo fácil de implementar e rápido em execução, mas é uma aproximação de velocidade que pode ser insuficiente em algumas aplicações. O valor de T deve ser escolhido não muito grande (devido ao teorema da amostragem) e não muito pequeno devido ao baixo desempenho em baixas velocidades.

SENSORES DE ACELERAÇÃO

Além de ser possível monitorar a posição e a velocidade de um robô, é também possível monitorar a sua aceleração. Normalmente mede-se aceleração linear, sendo a aceleração angular derivada da velocidade angular por diferenciação.

Para obter a aceleração linear, normalmente é utilizado um acelerômetro.



O acelerômetro é composto de uma massa M , algum sensor de deslocamento linear (Ex.: LVDT), e um conjunto de molas com constante equivalente k .

Da Lei de Newton: $F = M \cdot a = K \cdot y \Rightarrow a = \frac{k \cdot y}{M}$

Estes dispositivos têm uso limitado em robótica porque medem apenas aceleração linear. Como a maioria dos robôs possuem juntas de revolução, para medir-se a aceleração angular, normalmente obtêm-se o sinal de aceleração diretamente da velocidade angular.

SENSORES EXTERNOS

Até agora vimos o comportamento e aplicação de sensores que foram usados para medir posição, velocidade ou aceleração das juntas (ou rodas) de um robô (ou mais precisamente, de seus atuadores). São os chamados sensores internos.

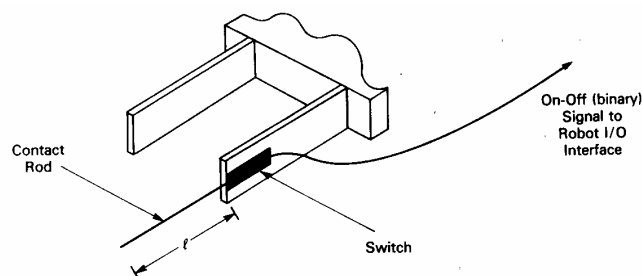
Será visto agora outra classe de sensores para robôs, usados para monitorar o próprio robô e/ou sua relação dinâmica com sua tarefa. São os chamados sensores externos. Eles podem ser visuais ou não visuais, de contato ou não contato.

1. Sensores de Proximidade

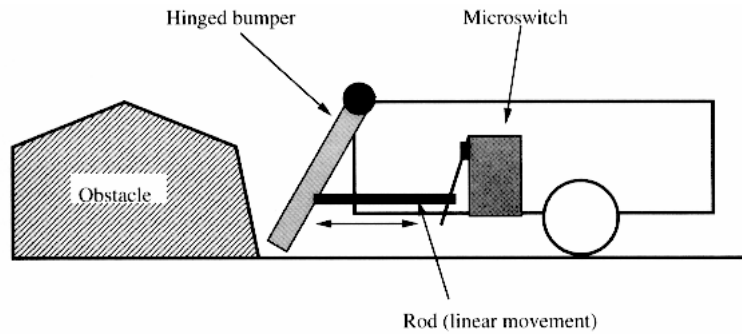
Indicam ao robô se ele está próximo (dentro de um intervalo de distância especificado, ex.: alguns centímetros) a um objeto ou obstáculo.

a) Sensores de Proximidade de Contato

É o tipo mais simples de sensor de proximidade. Tal dispositivo consiste de uma haste com uma extremidade localizada dentro do sensor (chave mecânica).



Sensor de proximidade de contato montado sobre um dedo de uma garra de robô [2].



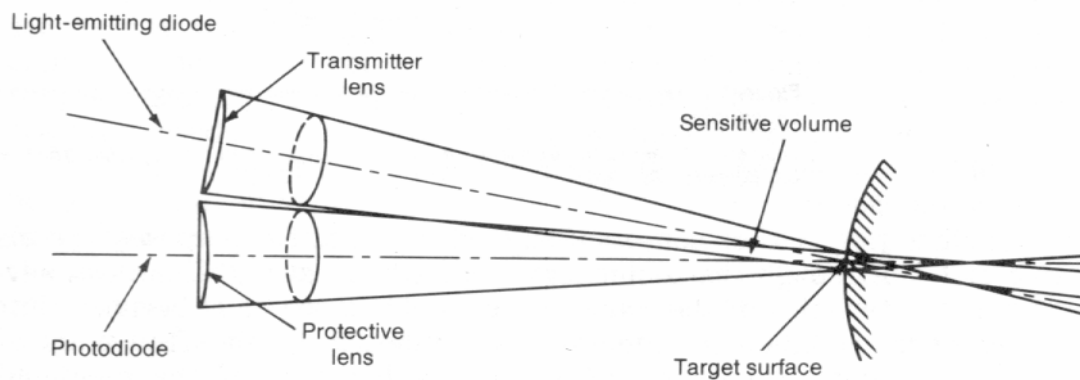
Pára-choques de um robô móvel, acoplado a um sensor de proximidade de contato [6].

b) Sensores de Proximidade de Não-Contato

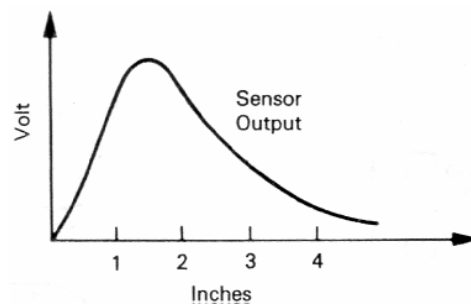
Existe uma grande classe de sensores de proximidade que não necessitam de contato com o objeto/obstáculo para saber se ele está próximo. O princípio de operação pode ser por luz refletida, ultra-som, variação de capacitância, indutância, ou resistência.

◆ Sensor de Proximidade Ótico (Luz Refletida)

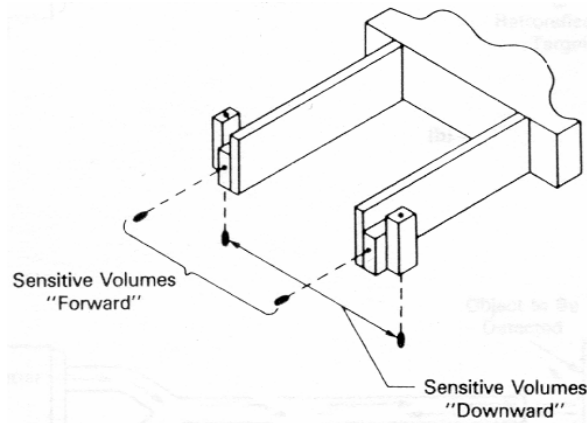
Este sensor consiste de uma fonte de luz (Ex.: LED, que age como transmissor de luz infravermelha) e um fotodetector (Ex.: Fotodiodo, que atua como receptor de luz infravermelha). Os cones de luz formados por focalizar a fonte e o detector formam o volume de operação do sensor [1].



A máxima tensão de saída do sensor ocorre quando o obstáculo está no ponto focal. Um problema no uso deste sensor é que duas posições diferentes produzem a mesma tensão, exceto quando o obstáculo está no ponto focal.



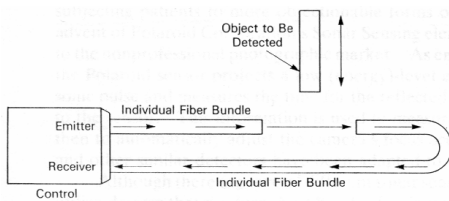
É necessário então uma lógica ou hardware adicional para eliminar esta ambigüidade. Se este sensor for usado para medir distância, outro problema é que a luz ambiente provoca variações na curva tensão x distância, além de que o sensor é sensível à reflexividade do obstáculo, e a temperatura provoca alterações no detector. Assim, este sensor é utilizado majoritariamente para sentir a proximidade de um objeto dentro de uma faixa de distância determinada, usando-se um comparador de tensão para isto.



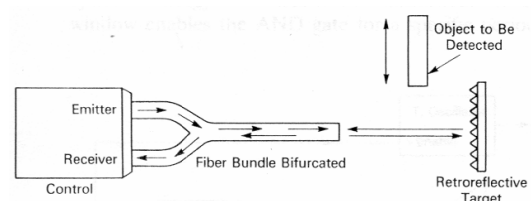
Sensores de Proximidade em duas dimensões [4].

◆ Sensores de Fibra Ótica

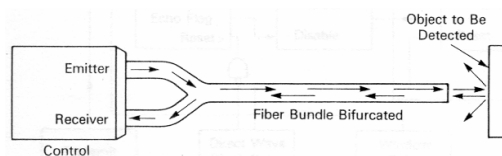
Existem três sistemas de sensor que utilizam esta tecnologia. Podem operar através de luz transmitida ou luz refletida.



Interrupção do feixe



Retroflexão



Difusão

Na configuração de interrupção do feixe o objeto é detectado quando ele interrompe o feixe de luz.

- Possui problemas de detecção de materiais transparentes ou translúcidos, e o espaçamento ou comprimento do sensor depende do tipo e tamanho do objeto a ser detectado.

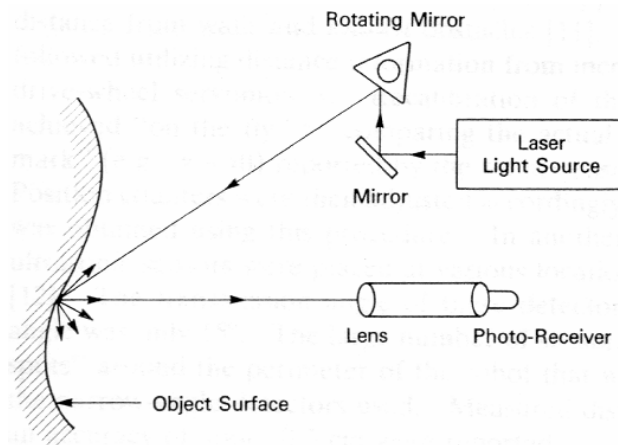
O dispositivo retroreflectivo utiliza uma superfície retroreflectiva a uma determinada distância do mesmo. Se um objeto opaco ou translúcido penetra na área entre ambas as partes a luz que chega ao receptor diminui consideravelmente de intensidade, sendo detectado tal objeto.

No dispositivo difuso, o sensor realmente mede a quantidade de luz refletida pelo objeto (até alguns centímetros de distância). Como a maioria dos materiais refletem algo de luz, este sensor pode detectar objetos “transparentes” e translúcidos.

- Estes sensores são bastante utilizados na indústria de manufatura, já que são baratos, leves e robustos.

◆ Sensor de Varredura Laser

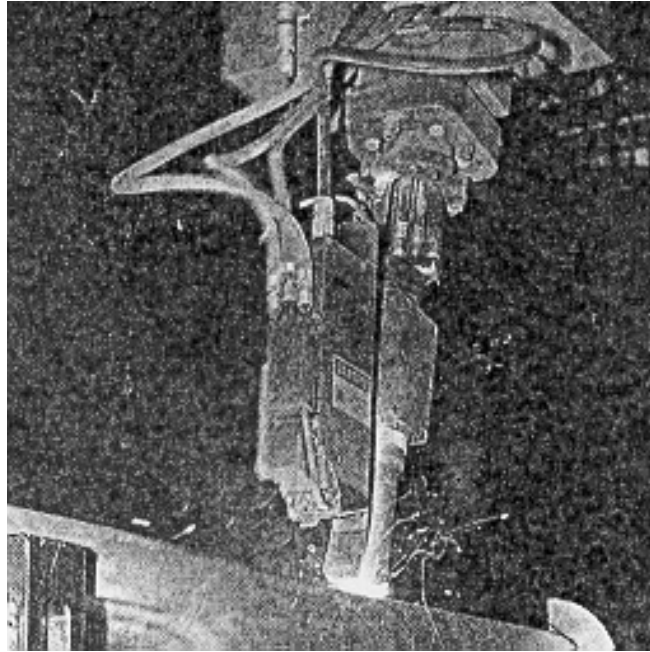
Uma fonte de laser, dois espelhos, sendo um deles montado sobre o eixo de um motor CA, e um conjunto lente-fotoreceptor pode ser usado como sensor de proximidade.



O feixe de luz do laser (hélio-neon) varre a superfície por ação do espelho montado no motor. Uma lente montada em frente ao fotoreceptor (Ex.: Foto-Transistor) capta a luz procedente de um ponto da superfície. A distância entre o sensor e o ponto da superfície é determinada sincronizando a tensão do motor AC com um relógio de alta frequência. O número de pulsos do relógio desde o tempo em que esta tensão é zero até que o fotodetector recebe a luz refletida, é proporcional à distância.

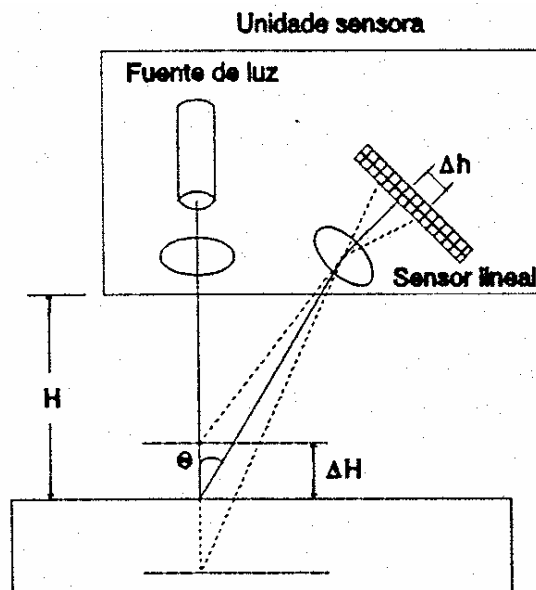
É um sensor caro e é comumente utilizado em aplicações de seguimento de linhas de soldagem, em soldagens por arco, por sua robustez neste tipo de ambiente. Objetos negros, transparentes, ou extremamente brilhantes causam problemas para este sensor de proximidade.

Um exemplo de sensor de proximidade laser comercial comumente utilizado em aplicações de soldagem por arco robotizada é o Seampilot de Oldfeldt. Este sensor utiliza laser de HeNe, classe II, de baixa potência, com potência máxima radiada de 1.5 mW. Além de detectar a proximidade às superfícies a serem soldadas, este sensor é capaz de reconstruir a topografia de juntas de soldagem, além de seguir linhas de soldagem, guiando uma pistola.



Sensor laser Seampilot adaptado a uma pistola de soldagem por arco [6].

A posição do receptor varia Δh quando a distância varia ΔH .



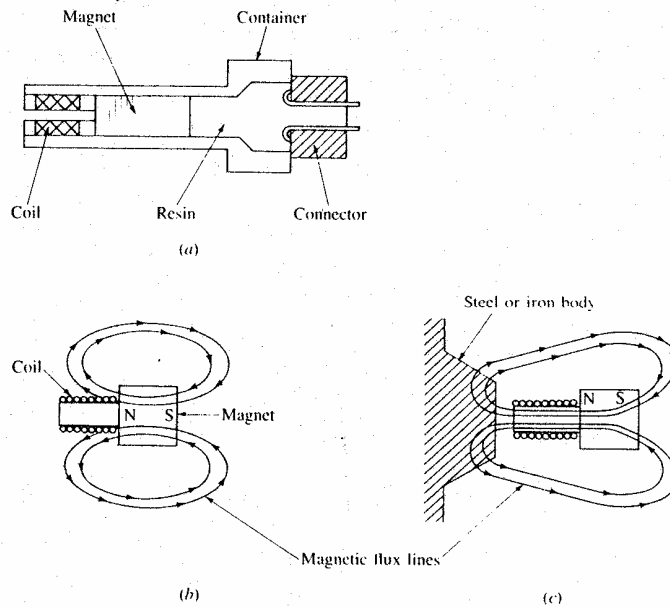
Sensor óptico lineal [2].

O feixe de laser alcança um ponto do objeto. A radiação é captada por uma lente e projetada sobre um detector linear. O detector consiste de um array de elementos, e o número de elementos sobre o qual incide a luz determina a distância ao objeto (triangulação).

◆ Sensor Indutivo

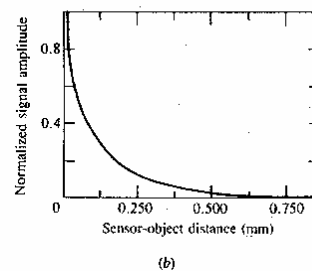
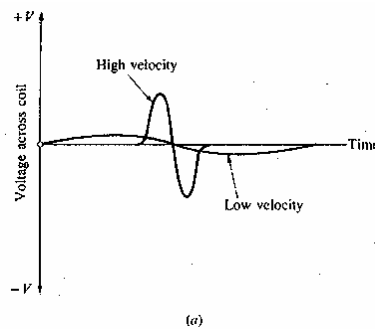
Produzem uma variação na indutância na presença de objetos metálicos. São muito utilizados na indústria já que proporcionam boa precisão em ambientes usuais na indústria (óleo, sujeira e com variações de temperatura e umidade).

O setor indutivo consiste basicamente de uma bobina enrolada localizada próxima a um ímã permanente. Quando o sensor se aproxima (ou se afasta) de um material ferromagnético, a posição das linhas de fluxo muda.



(a) Sensor indutivo; (b) forma das linhas de fluxo na ausência de material ferromagnético perto do sensor; (c) forma das linhas de fluxo quando um material ferromagnético está próximo ao sensor [2].

Essa mudança induz um pulso de corrente na bobina, cuja amplitude e forma são proporcionais à taxa de variação no fluxo [2].



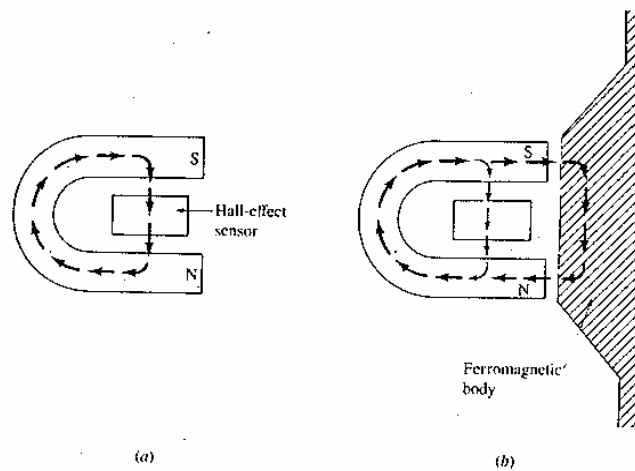
(a) Resposta de um sensor indutivo em função da velocidade de aproximação a um obstáculo; (b) resposta do sensor em função da distância [2].

Para gerar um sinal binário de saída do sensor, normalmente se integra a saída do sensor e utiliza-se um detector de nível. Quando o valor integral está abaixo do nível de detecção, a saída é baixa; quando este nível é excedido, a saída é alta, o que indica proximidade a um obstáculo. Este nível pode ser variado para detecção a distintas distâncias. A sensibilidade deste sensor cai rapidamente com a distância, sendo que o sensor é efetivo somente a alguns milímetros (até $\pm 20\text{mm}$).

Uma grande desvantagem destes dispositivos é que devem ser calibrados para cada tipo de metal que compõe objeto ou obstáculos. Alumínio e aço, por exemplo, produzem diferentes saídas no sensor. O robô deve portanto ser recalibrado para cada tipo de objeto presente em seu ambiente.

◆ Sensor de Efeito Hall

O efeito Hall relaciona a tensão entre dois pontos em um material condutor ou semiconductor com um campo magnético através do material. Sozinhos, os sensores de efeito Hall somente podem detectar objetos magnetizados, entretanto, quando usados em conjunto com um ímã permanente, eles são capazes de detectar todos os materiais ferromagnéticos. Nesta configuração, o sensor de efeito Hall detecta um forte campo magnético na ausência de um metal ferromagnético próximo ao campo. Já quando o objeto ferromagnético está próximo ao sensor, o campo magnético enfraquece no sensor de efeito Hall devido à indução das linhas do campo através do material [2].



Operação do sensor de efeito Hall em conjunto com um ímã permanente; (a) linhas de fluxo na ausência de material ferromagnético próximo ao sensor; (b) linhas de fluxo devido a proximidade a um material ferromagnético [2].

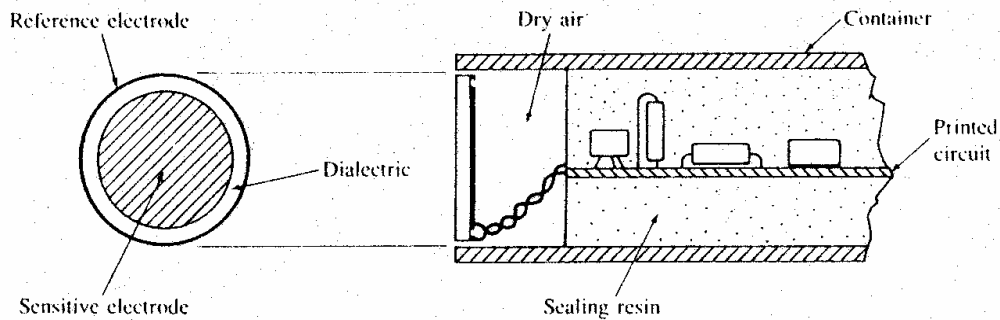
Os sensores de efeito Hall são baseados no princípio de uma força de Lorentz que age sobre uma partícula carregada viajando através de um campo magnético. Quando o material ferromagnético está próximo ao sensor, isso faz diminuir a força de campo magnético, o que reduz a força de Lorentz e, conseqüentemente, a tensão através do sensor. A queda de tensão no sensor de efeito Hall é então usada para detectar a presença do objeto.

◆ Sensor Capacitivo

Diferente dos sensores indutivos e de efeito Hall, que detectam somente materiais ferromagnéticos, os sensores capacitivos são capazes de detectar todos os materiais sólidos e líquidos.

Estes sensores detectam uma mudança na capacitância induzida quando uma superfície está próxima ao sensor.

O elemento sensor é um capacitor composto de um eletrodo sensor e um eletrodo de referência. Podem ser, por exemplo, um disco metálico e um anel separados por um material dielétrico [2].

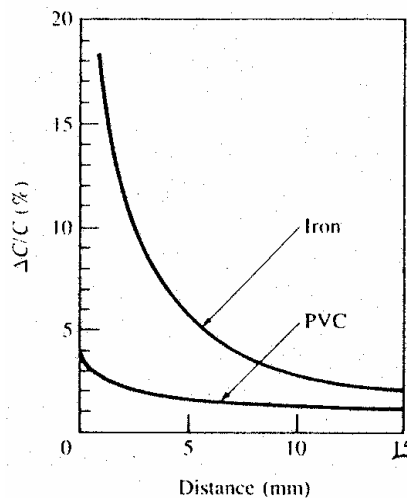


Sensor de proximidade capacitivo [2].

Há várias formas de detectar proximidade a objetos baseado na mudança de capacitância. Uma das mais simples tem o capacitor como parte de um circuito oscilador. A oscilação começa somente quando a capacitância do sensor excede um valor pré-determinado. Esta oscilação é transformada em tensão, que indica a presença de um objeto.

Uma outra forma de detectar proximidade através da mudança na capacitância é utilizar o elemento capacitivo como parte de um circuito que é continuamente alimentado por uma forma de onda senoidal de referência. Uma mudança na capacitância produz um deslocamento de fase entre o sinal de referência e um sinal derivado do elemento capacitivo. Desta forma detecta a proximidade a um objeto.

A figura mostra como a capacitância varia em função da distância para diferentes objetos.

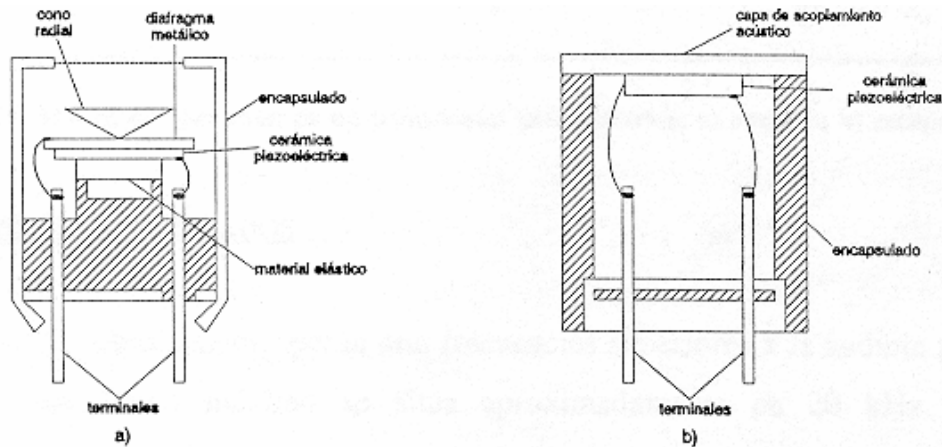


Resposta de um sensor de proximidade capacitivo em função do objeto e da distância [2].

Estes sensores não são usualmente empregados em robótica devido a que a capacitância sofre influência das condições ambientais.

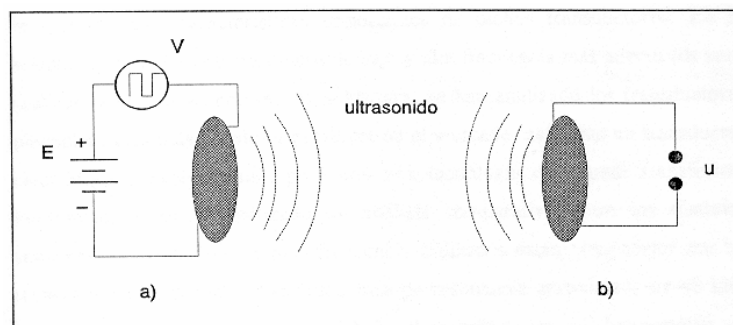
◆ Sensor de Proximidade Ultra-Sônico

Diferentemente de outros sensores de proximidade, a resposta deste sensor é quase independente do tipo de material que se quer detectar. Os transdutores piezelétricos apresentam duas estruturas básicas, usando a cerâmica piezelétrica como elemento transdutor. Podem ser utilizados os sensores piezelétricos e os eletrostáticos [2].



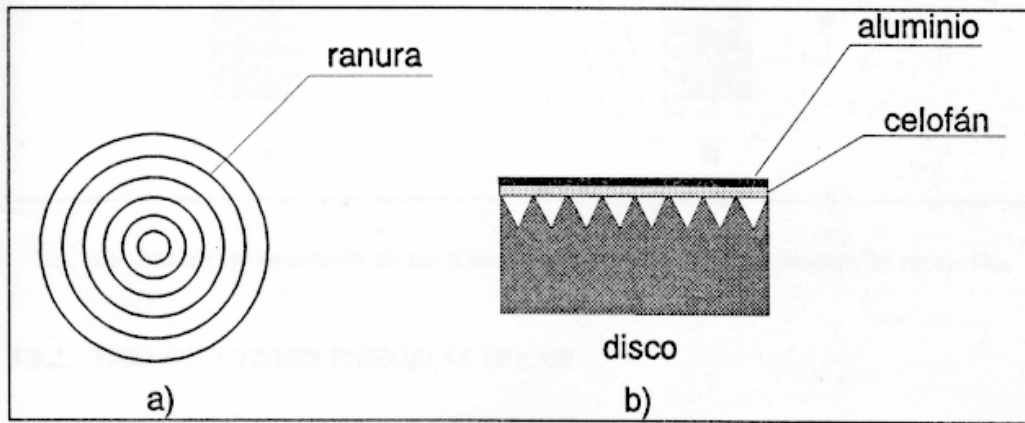
Montagens mais usuais de transdutores piezoelétricos: (a) 40 kHz; (b) 220 kHz [3].

As estruturas típicas dos transdutores piezelétricos ultrasônicos de 40KHz e 220KHz são mostradas. Para um mesmo diâmetro de transdutor, quanto mais alta a frequência, mais estreito é o lóbulo de emissão acústica. Um cone radial costuma ser utilizado para um aumento de sensibilidade (40KHz). Também é usual utilizar uma camada de resina para melhorar o acoplamento acústico com o ar (220KHz), além de proteger o transdutor contra sujeira, umidade etc. Um material de absorção acústica colocado na parte posterior do transdutor também costuma ser empregado para um rápido amortecimento das oscilações (necessário para detecção de objetos próximos).

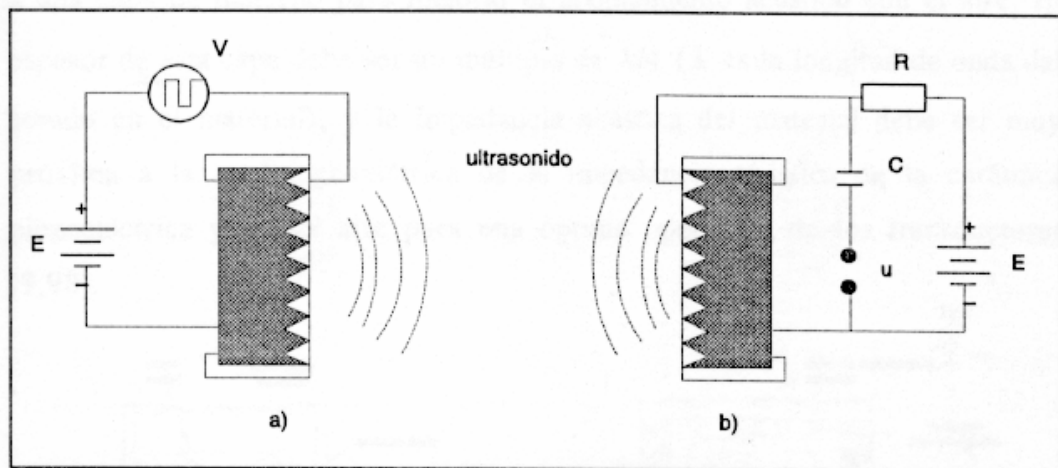


Para emissão de ondas acústicas, aplica-se uma tensão alternada às duas faces opostas da cerâmica. Se a frequência da tensão aplicada coincidir com a frequência de vibração da cerâmica, ela entra em ressonância e as vibrações alcançam um máximo. As vibrações transmitem-se ao meio, produzindo uma onda acústica. O fenômeno é recíproco de tal forma que na recepção, a pressão acústica faz aparecer cargas elétricas na cerâmica, produzindo-se assim um sinal elétrico u.

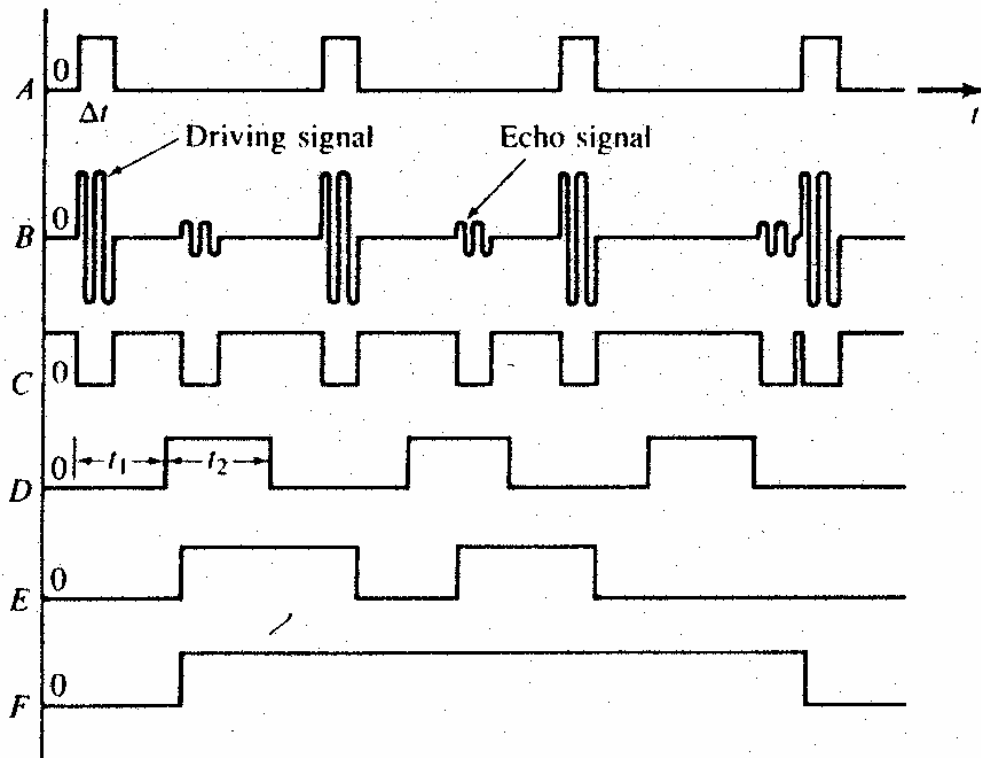
O outro tipo de transdutor ultra-sônico, o eletrostático, compõe-se basicamente de um capacitor de placas paralelas, no qual uma das placas é metalizada em uma das faces, sendo a outra face composta por material isolante. A outra placa é um disco metálico, cuja superfície possui ranhuras circulares que formam cavidades em forma de anéis concêntricos. As placas do capacitor formado estão separadas pelo material isolante (Ex.: Celofane) e pelo ar contido no interior das ranhuras.



Para a operação deste transdutor, aplica-se uma tensão contínua E de polarização às placas para carregá-las com cargas elétricas opostas, criando uma força de atração entre as mesmas. No modo emissor, uma tensão alternada é somada à tensão de polarização, modulando o campo elétrico existente entre as placas, e, conseqüentemente a força eletrostática de atração. Isto causa a vibração de uma das faces do transdutor e este movimento se transmite ao ar produzindo uma vibração de suas moléculas, isto é, uma onda acústica. No caso da recepção, a tensão de polarização se mantém através da resistência R , e se dá o processo inverso: a vibração do ar produz uma vibração da distância entre as placas do capacitor, o que provoca uma variação da capacitância, gerando uma tensão alternada u no transdutor.



A detecção de objetos próximos pode ser entendida através do diagrama de tempos: [2]



No diagrama de tempos, o sinal A é o sinal de trigger usado para controle da transmissão. O sinal B mostra o sinal de emissão do transdutor (zona morta) assim como o sinal de eco recebido. Os pulsos em C são resultantes ou de uma emissão acústica ou de um eco recebido. Para diferenciar entre os pulsos correspondentes aos sinais de emissão acústica e recepção de eco, introduz-se uma janela de tempo D, que estabelece a capacidade de detecção do sensor, isto é, t_1 é o tempo de detecção mínimo, e $t_1 + t_2$, o máximo. Um eco recebido enquanto o sinal D está alto produz o sinal mostrado E, que é resetado para baixo no final de um pulso de transmissão em A. Finalmente, o sinal F é setado para alto na subida do pulso em E e é resetado para baixo quando E é baixo e ocorre um pulso em A (subida do pulso).

Desta forma, F será sempre alto quando um objeto está presente no intervalo de distância especificado, $d_{\text{mín}} < d < d_{\text{máx}}$, que depende de t_1 e t_2 em D, onde $(d_{\text{mín}} = \frac{v_s \cdot t_1}{2}$;

$$d_{\text{máx}} = \frac{v_s \cdot (t_1 + t_2)}{2}; v_s \rightarrow \text{velocidade do som, problema: função da temperatura}.$$

F portanto é a saída de interesse para o sensor operando em modo binário.

➤ Problemas: Zona morta (Eletrostática: 10cm; piezoelétrico: de 40kHz \approx 20cm; de 220kHz \approx 5cm).

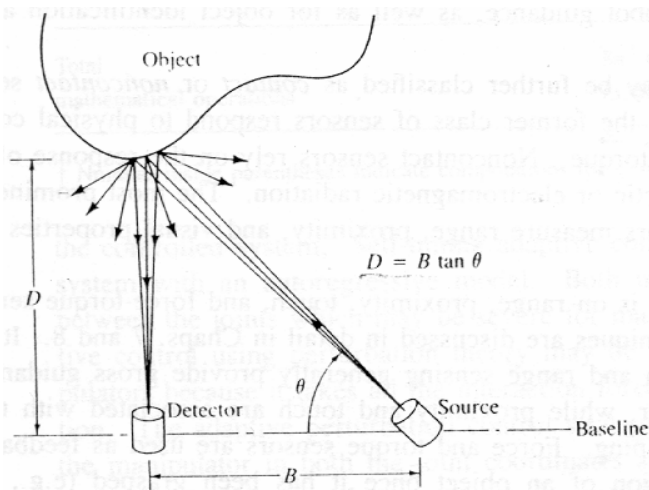
Solução: utilizar dois transdutores: um como emissor e outro como receptor. Neste caso, para um par de transdutores piezoelétricos: para $f = 40\text{kHz} \approx 2\text{cm}$.

2. Sensores de Distância

Um sensor de distância mede a distância entre um ponto de referência (usualmente no próprio sensor) e um objeto localizado no campo de operação do sensor. Os seres humanos estimam a distância por meio da visão estéreo obtida com os dois olhos, enquanto outros animais, tais como os morcegos, utilizam o “tempo de vôo”, ou seja, o intervalo de tempo gasto entre a transmissão e a recepção de uma onda acústica. Os sensores de distância são utilizados para navegação do robô e para evitar obstáculos. Também são utilizados para corrigir erros da posição obtida através de encoders, devido a escorregamento das rodas de um robô móvel. Neste caso, os sensores de distância são utilizados para recalibrar o sistema de tempos em tempos, comparando a distância medida a um ponto de referência com a distância obtida com o encoder.

a) Medida de Distância por Triangulação

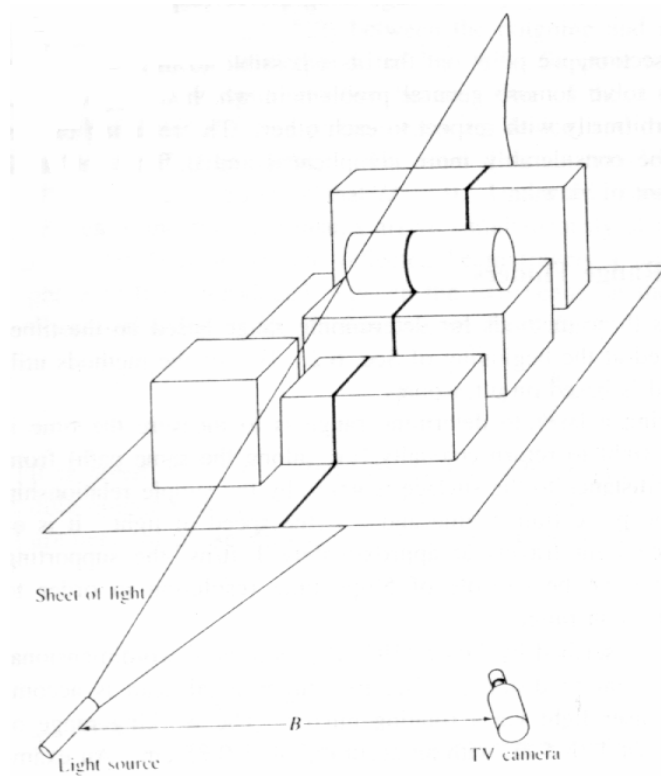
A técnica de triangulação é um dos métodos mais simples para medir distâncias.



Um objeto é iluminado por um feixe estreito de luz. O detector é focalizado sobre uma pequena porção da superfície. Quando o detector recebe o feixe de luz, pode-se obter a distância D entre ele e a porção do objeto iluminada. Esta configuração proporciona uma medida pontual, mas se o conjunto sensor é montado sobre um sistema móvel (motor), pode-se obter um conjunto de pontos cujas distâncias ao detector são conhecidas [2].

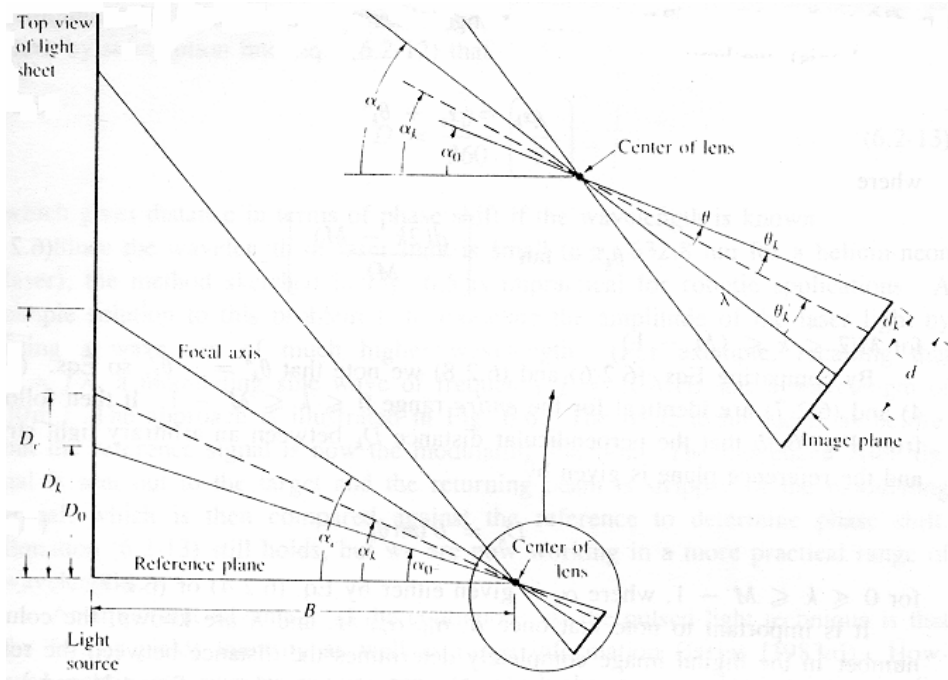
b) Por luz Estruturada

Consiste em projetar uma luz padrão (por exemplo, laser) sobre um conjunto de objetos, e usar a distorção dessa luz padrão para calcular a distância. Uma das formas mais usuais de padrão de luz é uma lâmina de luz gerada através de uma fonte cilíndrica ou uma fenda estreita [2].



A interseção da lâmina de luz com os objetos produz uma listra (ou linha) que é capturada por uma câmara de TV colocada a uma distância B da fonte de luz. As listras podem ser analisadas no computador; por exemplo, uma inflexão indica uma mudança de superfície, e uma descontinuidade corresponde a um espaço entre superfícies.

Para obter a distância aos objetos, é necessária, inicialmente, uma calibração do sistema. A figura seguinte mostra um dos arranjos mais simples para realizar a calibração:



O plano de referência é perpendicular à lâmina de luz, e qualquer superfície plana que intercepta a lâmina produzirá uma listra vertical de luz, estando todos os pontos desta listra à mesma distância. O objetivo do arranjo mostrado é posicionar a câmara tal que cada listra vertical também apareça vertical na imagem da TV.

Da figura: $d_c = \lambda \cdot \tan\theta$, onde λ é o comprimento focal da lente e $\theta = \alpha_c - \alpha_0$. Para determinar α_c , coloca-se uma superfície plana de tal forma que sua interseção com a lâmina de luz é captada no centro do plano da imagem (por exemplo, $y = M/2$ se a câmara é digital com matriz NXM de pixel). Mede-se então, fisicamente o valor de D_c . Da geometria da figura obtemos α_c por:

$$\alpha_c = \tan^{-1}(D_c / B)$$

Para determinar α_0 , colocamos o plano mais próximo até que sua listra de luz é captada em $y = 0$ no plano da imagem. Mede-se D_0 e podemos obter α_0 :

$$\alpha_0 = \tan^{-1}(D_0 / B)$$

Para obter distâncias arbitrárias (ver figura), utiliza-se a expressão:

$$D_k = B \cdot \tan\alpha_k, \text{ onde } \alpha_k = \alpha_c - \theta'_k \text{ e } \theta'_k = \tan^{-1}\left[\frac{d_c(M - 2K)}{M\lambda}\right]$$

onde M é o número de colunas da matriz imagem e K o número da coluna do elemento ótico da imagem digital.

Durante a operação normal, a distância a qualquer ponto da imagem é simplesmente obtido por determinar o número do elemento ótico que capta a luz, já que normalmente são tabulados os valores para as distâncias, ou seja, para $K=0,1,2,\dots,M-1$ os valores são armazenados na memória.

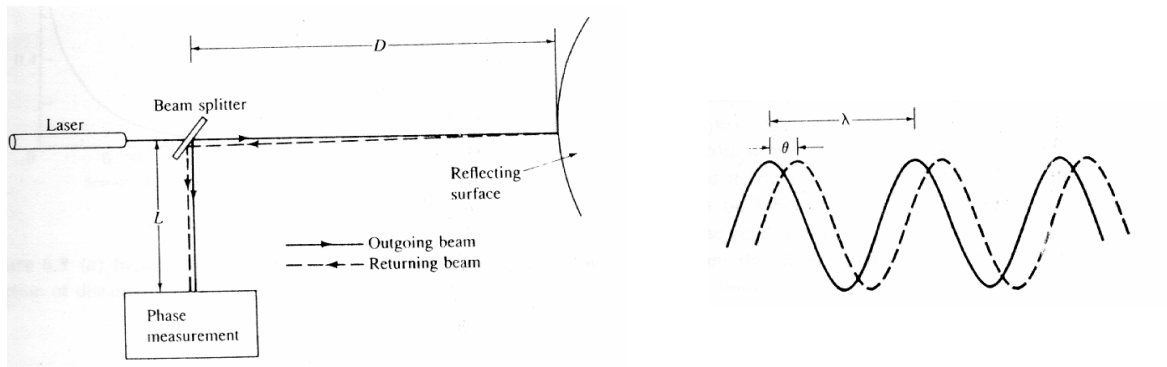
c) Por Tempo de Vôo

Três métodos são apresentados para a determinação de distância através do tempo de vôo; dois desses métodos utilizam laser, enquanto o terceiro utiliza ultra-som.

1) Laser (Luz Pulsada): Pode-se determinar a distância a uma superfície refletora, medindo-se o tempo que a luz emitida leva para ir e voltar entre a fonte emissora e o refletor. A distância pode ser obtida por: $D = \frac{c \cdot t}{2}$, onde t é o tempo de vôo e c a velocidade da luz.

É importante notar que como a luz viaja aproximadamente a 30 cm/ns, a instrumentação utilizada para a medição de tempos desta ordem deve ser de alta resolução, o que implica em alto custo. Alguns sistemas desenvolvidos medem distâncias da ordem de 1 a 4m, com uma precisão de $\pm 0,25$ cm. Um exemplo de sensor laser para robôs móveis é o sensor Sick, que realiza medidas de até 10 m, com resolução angular de 0,5°.

2) Laser (Deslocamento de Fase): Uma forma alternativa ao método anterior (luz pulsada) é usar um feixe de laser contínuo e medir o atraso (deslocamento de fase) entre o feixe emitido (feixe de referência) e o feixe refletido [2].



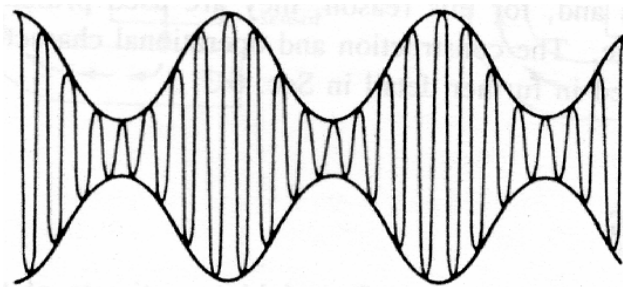
Para $D=0$, ambos os feixes de referência e refletido estarão em fase. Para $D>0$, a distância D' percorrida é dada por: $D'=L+2D$ e $D' = L + \frac{\theta}{360} \cdot \lambda$

Mas, se $\theta = 360^\circ$, os dois sinais estão alinhados e não é possível diferenciar entre $D'=L$ e $D'=L+n\lambda$; $n=1,2,\dots$ Assim, uma solução única somente pode ser obtida se $\theta < 360^\circ \Rightarrow 2D < \lambda$.

Neste caso, das equações anteriores ($D'=L+2D$ e $D' = L + \frac{\theta}{360} \cdot \lambda$) obtemos a distância D entre o sensor e o refletor por:

$$D = \frac{\theta}{360} \cdot \left(\frac{\lambda}{2}\right)$$

Entretanto, como o comprimento de onda da luz é pequeno (por exemplo: um laser de Hélio-Neon tem $\lambda=632.8\text{nm}$), o método apresentado é impraticável para aplicações em robótica ($D<316.4\text{nm}$). Uma solução simples é modular a amplitude do laser com uma forma de onda senoidal de frequência (por ex.: para $f=10\text{MHz} \Rightarrow \lambda=30\text{nm} \Rightarrow D<15\text{m}$).



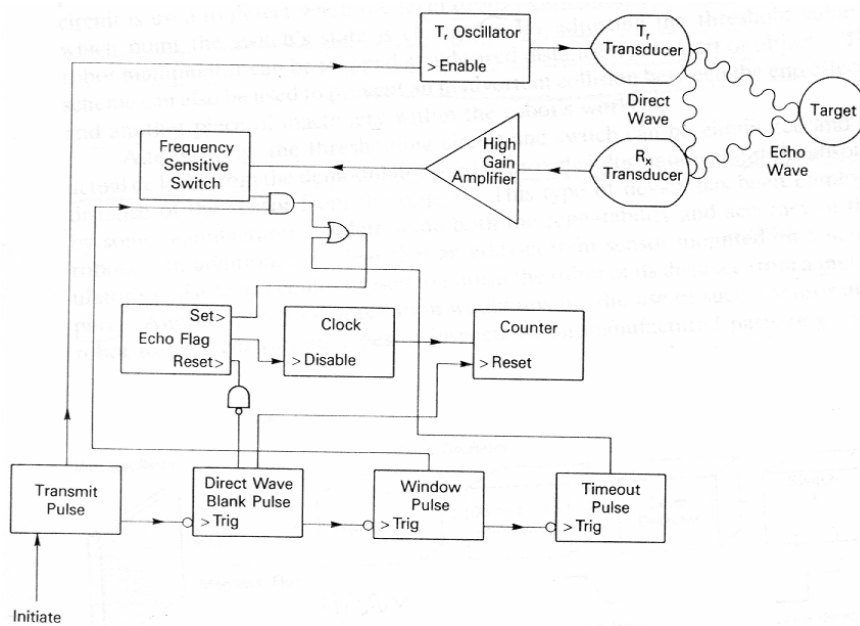
Forma de onda modulada ou amplitude [2]

O feixe modulado é emitido e ao retornar desde um refletor ele é demodulado, quando é então comparado com o feixe de referência para determinar o deslocamento de fase.

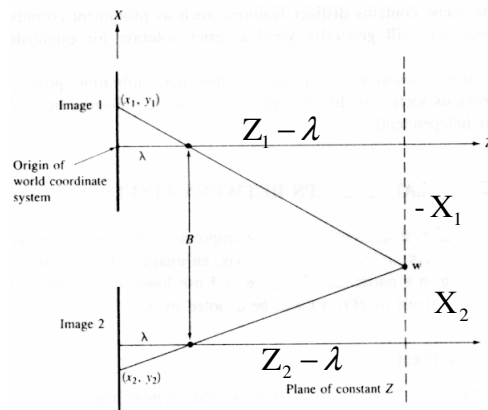
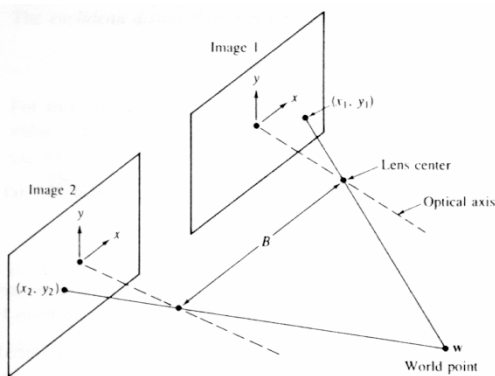
3) Ultra-Som (Pulso-Eco): A idéia básica para medir distância com ultra-som é a mesma usada com o laser de luz pulsada: emite-se uma onda acústica e mede-se o tempo de voo da onda no seu trajeto de ida e volta entre sensor e refletor. A distância D

é obtida por: $D = \frac{v_s \cdot t}{2}$, onde $v_s=331,6 \text{ m/s}$ a 0°C ; $v_s \approx 331,6 \sqrt{1 + \frac{T}{273}}$; T é a temperatura em $^\circ\text{C}$.

Pode-se medir distâncias de vários metros com este tipo de sensor (por exemplo, Polaroid: até 10m, com precisão de 1% da distância) [4].



Existem outras formas de se medir distância, como, por exemplo, realizar a correspondência entre duas imagens de um ponto, obtidas através de um par de imagens estéreo desde duas câmaras estáticas (em diferentes localizações), ou desde uma câmara que se desloca entre duas localizações conhecidas, o que afinal é o mesmo. A distância é então obtida por triangulação. Entretanto, existe o problema de “casar”, ou seja, fazer a correspondência entre as imagens, determinando assim quais pontos em uma imagem correspondem à outra imagem.



Da figura, se levarmos a imagem 1 e a imagem 2 para a origem do sistema de coordenadas mundo:

$$\frac{x_1}{\lambda} = -\frac{X_1}{Z_1 - \lambda} \quad X_2 - X_1 = B \quad Z_2 = Z_1 = Z$$

$$-\frac{x_2}{\lambda} = \frac{X_2}{Z_2 - \lambda}$$

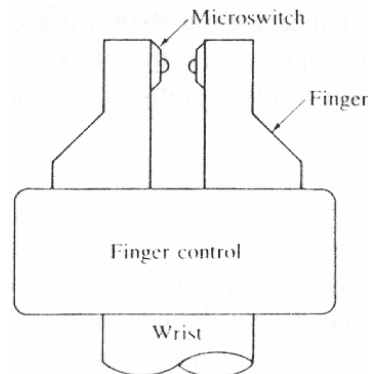
$$\begin{cases} X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z) \\ X_2 = X_1 + B = -\frac{x_2(Z - \lambda)}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow \boxed{Z = \lambda - \frac{\lambda \cdot B}{x_2 - x_1}}$$

SENSORES DE TATO

Estes tipos de sensores são usados em robótica para obter informação associada com o contato entre, por exemplo, a mão de um manipulador e objetos em seu espaço de trabalho. A informação de tato pode ser usada para localização e reconhecimento de objetos, e também para controlar a força exercida pelo manipulador sobre um determinado objeto. Podem ser divididos em binários ou analógicos. Os binários são basicamente chaves interruptoras que informam sobre a presença ou ausência de um objeto. Os analógicos, por outro lado, fornecem um sinal analógico proporcional à força local.

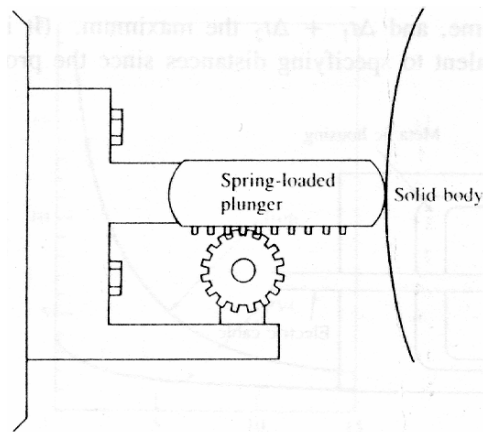
a) Sensores Binários

Em seu arranjo mais simples, um interruptor é localizado na superfície interna de cada dedo da mão do robô. É usual para determinar se um objeto está presente entre os dedos. Podem ser utilizados múltiplos sensores de tato binário para uma informação tátil mais completa [2].

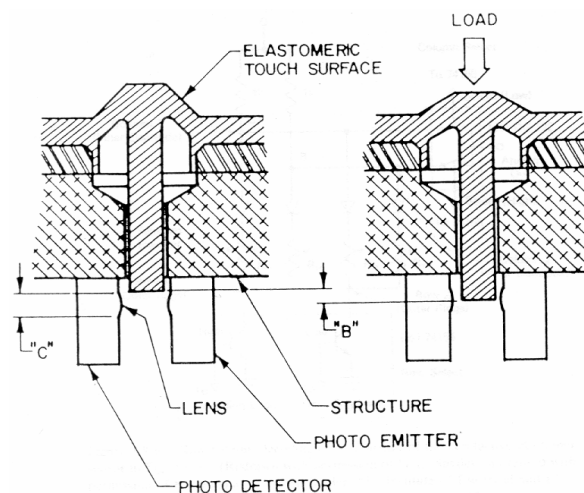


b) Sensores Analógicos

No sensor de tato analógico a saída é proporcional a uma força local. Um dos dispositivos mais simples consiste de um bastão que é mecanicamente ligado a um eixo rotacional e a uma mola de tal forma que o deslocamento do bastão resulta em uma rotação proporcional, que pode ser medida usando um potenciômetro ou roda codificada. Conhecendo-se a constante de elasticidade da mola, obtém-se a força para um dado deslocamento [2].



Outro dispositivo tátil (sensor de tato fotodetector) utiliza o princípio de interrupção do feixe. O sensor é coberto com um material elastomérico (como borracha). Se o material elastomérico é comprimido, a parte inferior do material interrompe o feixe de luz de fotosensor. Como a tensão do fotodetector varia com a intensidade de luz incidente, pode-se determinar a deflexão relativa (distância comprimida) em cada ponto de uma matriz de sensores.



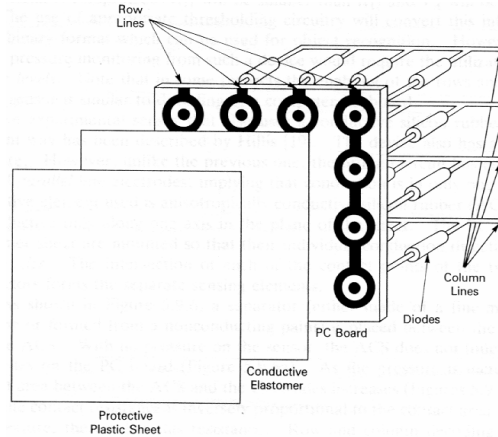
- Problemas: Histerese no material elastomérico (a borracha não retorna à sua posição original após ser comprimida). Como o material elastomérico fica em contato com o objeto, deve ser substituído frequentemente devido ao desgaste ⇒ consome tempo do processo [4].

- Pele Artificial

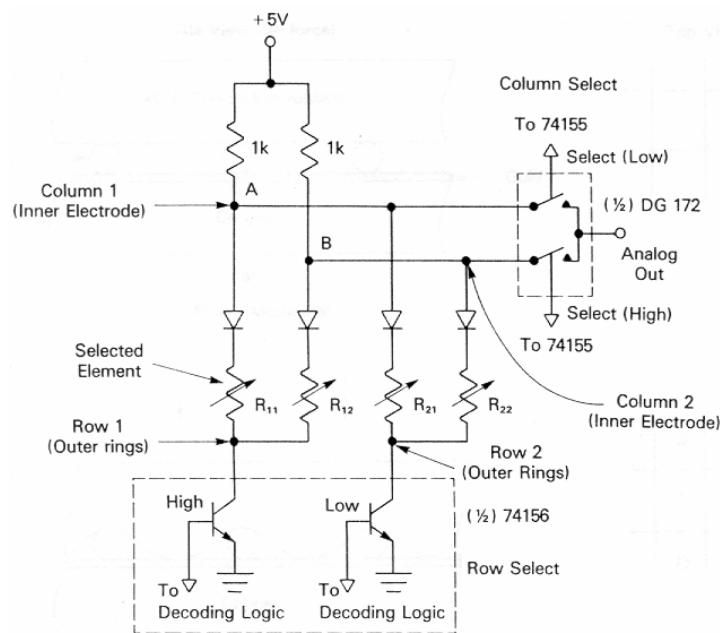
Embora matrizes de sensores possam ser formadas por sensores de tato individuais, estão sendo utilizadas com êxito matrizes de eletrodos em contato elétrico com um material elastomérico contínuo cuja resistência varia em função da compressão. Estes dispositivos são frequentemente denominados “pele artificial”. Um objeto pressionando contra a superfície causa deformações locais que são medidas como variações de resistência; tais variações são transformadas em sinais elétricos cujas amplitudes são proporcionais às forças sendo aplicadas em qualquer ponto sobre a superfície do material.

Existem várias técnicas de construção de peles artificiais. Uma delas possui uma estrutura de três camadas consistindo de material elastomérico condutivo coberto por

uma lâmina de plástico para proteção. Ambas as partes são colocadas sobre uma placa de circuito impresso com vários pares de anéis de eletrodos impressos na mesma (por exemplo 4x4) numa matriz retangular, formando quatro linhas. As colunas são obtidas conectando primeiro diodos individuais aos anéis internos; os grupos de 4 diodos são então conectados em paralelo [4].



Para determinar qual elemento (ou elementos) da matriz de sensores está em contato com um objeto, analisa-se o circuito abaixo [4]:



Se nenhum dos elementos do sensor tiver sido pressionado, as tensões nos pontos A e B serão quase iguais. Entretanto, se um desses elementos for pressionado (por exemplo, linha 1, coluna 1), R_{11} será diferente de R_{12} e V_A e V_B também serão diferentes; esta informação é então convertida em formato binário usando-se circuitos apropriados.

Problemas:

- Vida limitada: após determinado número de operações (algumas centenas) o material se deteriora e começa a romper-se. Quando usado para agarrar objetos com pontas, podem ser danificados. A única solução é substituir o material de tempos em tempos \Rightarrow Perda de tempo no processo

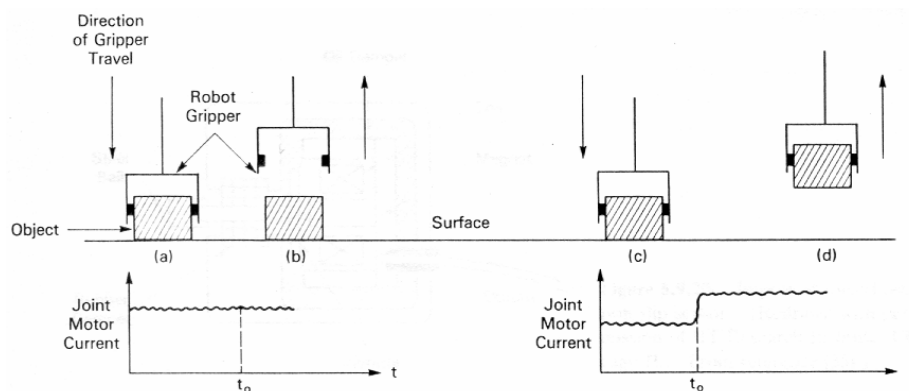
- Histerese: As resistências não retornam aos valores originais antes da compressão.

SENSORES DE DESLIZAMENTO

Todos os sensores de tato apresentados medem forças normais à superfície do sensor. A medida de movimento tangencial para determinar deslizamento é um outro importante aspecto de sensoriamento tátil.

De todos os sensores externos, a detecção de deslizamento é talvez a menos desenvolvida. Muita pesquisa tem sido realizada para uma rápida detecção de deslizamento, e, conseqüentemente, um ajuste rápido da força de agarramento de um objeto, impedindo assim que o objeto caia e se rompa.

Talvez a forma mais simples de determinar se um objeto está deslizando (ou tenha sido apropriadamente agarrado) é usar o que é freqüentemente denominado técnica de Lift-and-Try [4].



Esta técnica utiliza a corrente do motor de uma junta em particular ou conjunto de juntas do robô para a medição de se o objeto está ou não deslizando. Quando o robô tenta levantar o objeto desde a superfície, a corrente do motor deveria aumentar devido ao aumento de carga. Se nenhum aumento é detectado, o robô é comandado para retornar ao ponto de início. A força de agarramento é então incrementada por algum valor pré-determinado e o robô “tenta de novo”. O procedimento é repetido até que a corrente aumenta; nesse tempo t_0 , assume-se que o objeto não está escorregando e está apropriadamente agarrado.

Problemas:

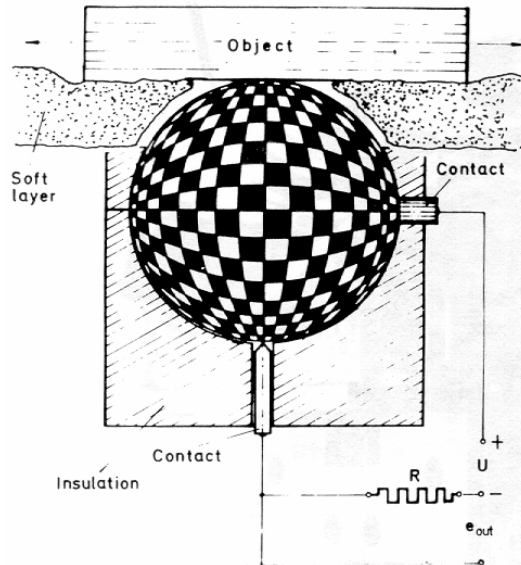
- Não há garantia de que o objeto após estar agarrado deslize e caia;
- Pode ser um procedimento muito demorado se devem ser agarrado objetos muito frágeis junto a outros bem rígidos, pois a força mínima deve ser bem pequena para não quebrar o objeto frágil;
- Erros na medição da corrente (por exemplo, devido a picos de corrente em motores com escovas. Motores sem escovas podem solucionar o problema, mas são bem mais caros, pois necessitam de comutação eletrônica).

Existem várias outras técnicas para detectar deslizamento, como as que utilizam discos e leitores magnéticos ou óticos para detectar o deslizamento, mas somente detectam em uma determinada direção. Outros utilizam um disco dentado que detecta deslizamento fazendo vibrar uma agulha e produzindo pulsos (PWM) que indicam a

velocidade do deslizamento, mas também com o problema de detectar somente em uma direção.

Este problema pode ser superado se se utiliza uma pequena esfera condutora (área negra não conduz) que pode girar em qualquer direção. Assim, um deslizamento pode ser detectado monitorando a tensão diferencial através dos terminais dos dois contatos.

Além de detectar deslizamento em qualquer direção o dispositivo é pouco afetado por vibrações externas.



SENSORES DE FORÇA E TORQUE

Em muitas aplicações envolvendo robôs industriais, é extremamente importante poder ajustar e/ou monitorar a força e o torque aplicado a um objeto. Alguns sensores de tato descritos anteriormente podem proporcionar esta informação sobre quanta força a garra de um robô está exercendo sobre um objeto, entretanto há aplicações onde se requer simplesmente conhecer a força/torque exercida sobre o objeto. Por exemplo, quando não se deseja conhecer a forma do objeto.

Há algumas técnicas e dispositivos construídos para medição de força/torque; entre estas estão:

a) Por monitoração da corrente do motor

Como visto na técnica de “Lift-and-Try”, é possível usar a corrente do motor para conhecer a força de agarramento de um objeto. A corrente de armadura do servomotor da garra é proporcional ao torque gerado pelo motor.

$$I_a = \frac{T}{K_T}, \quad \text{onde:} \quad I_a = \text{Corrente de armadura}$$

T = Torque gerado

K_T = Constante do torque do motor

Se se utiliza um conversor de movimento rotacional para linear (conjunto engrenagem-cremalheira), a força gerada é:

$$F = \frac{T \cdot \eta}{R}, \quad \text{onde } \eta \text{ é a eficiência do conjunto cremalheira-engrenagem}$$

(usualmente da ordem de 90%) e R é o raio da engrenagem.

Mesclando as duas equações anteriores temos:

$$F = \frac{K_T \cdot I_a \cdot \eta}{R}$$

Problemas:

- K_T e a resistência de armadura R_a variam com a temperatura.
- Ruídos na escova do motor e variações na resistência da escova (para motores com escova; para motores sem escova não existe este tipo de problema mas o custo é muito alto)

Obs.: O procedimento descrito não é um verdadeiro sensor de força, sendo a força inferida da corrente do motor, nunca medida. Este procedimento é na verdade um método para manter uma força desejada sobre um objeto. Em algumas aplicações isso pode ser suficiente (por exemplo, pegar sempre objetos do mesmo tipo), entretanto, em outras aplicações será necessário medir a força real sendo aplicada a um objeto.

b) Usando um LVDT:

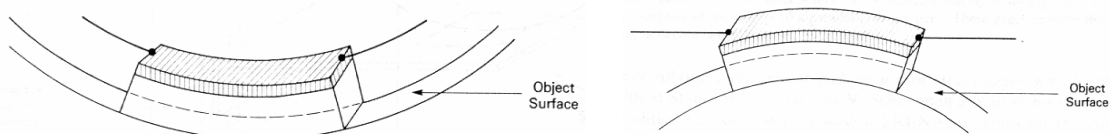
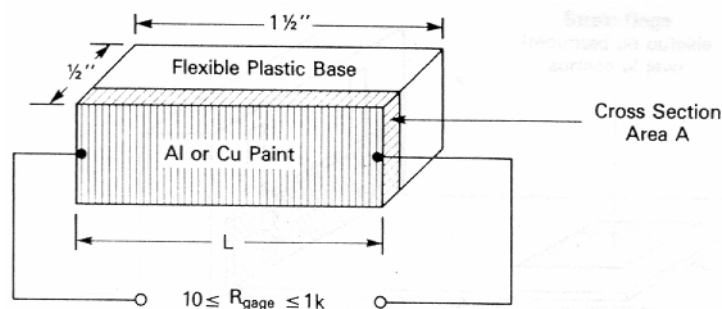
Uma forma de se fazer isso é usar um LVDT, que pode medir precisamente posições lineares. A relação força-deslocamento para um LVDT acoplado a uma mola é:

$F = K \cdot x$, onde K é a constante da mola e x o deslocamento sobre uma posição de equilíbrio.

Problemas: Além das dificuldades de usar um LVDT (alto custo, necessidade de calibração e sensibilidade com a temperatura), a constante de mola K também varia com a temperatura. O LVDT também só mede a força em uma direção.

c) Usando Strain Gages

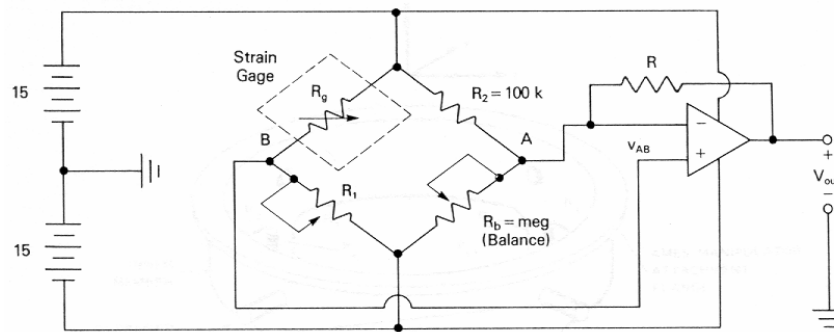
É um dos métodos mais simples de medir força (ou pressão) exercida sobre um objeto. Os strain gages podem detectar a deflexão dos dedos de carga do robô quando uma força é aplicada. O princípio fundamental de operação é que uma deformação mecânica produz uma mudança de resistência, que está relacionada com a força aplicada. Um simples strain gage consiste de uma base de plástico (ou outro material flexível, não condutor) cuja superfície superior está coberta por uma fina camada de material condutor (por exemplo, alumínio ou cobre) [4].



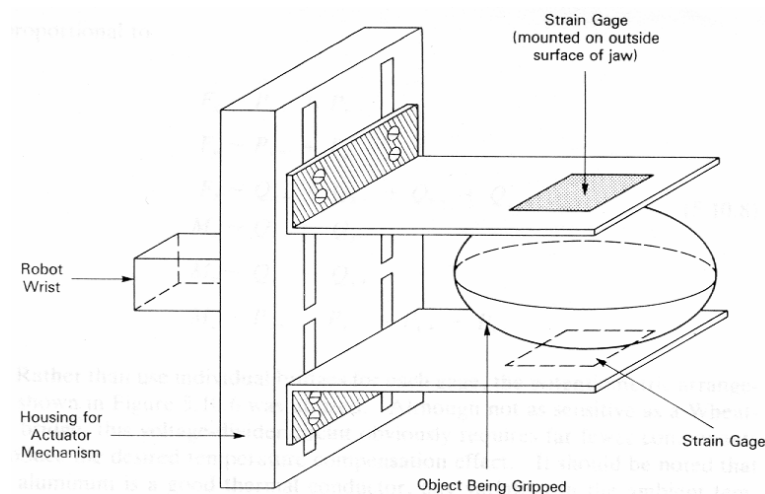
Se a camada condutiva tem uma seção transversal A uniforme, então a resistência do sensor é:

$$R_g = \frac{L}{\sigma \cdot A}, \text{ onde } \sigma \text{ é a condutividade do material condutor, e } L \text{ é o comprimento.}$$

Para detectar a variação na resistência deste sensor, é usado uma “Ponte de Wheatstone” para produzir uma tensão de saída como resultado da variação de tensão.



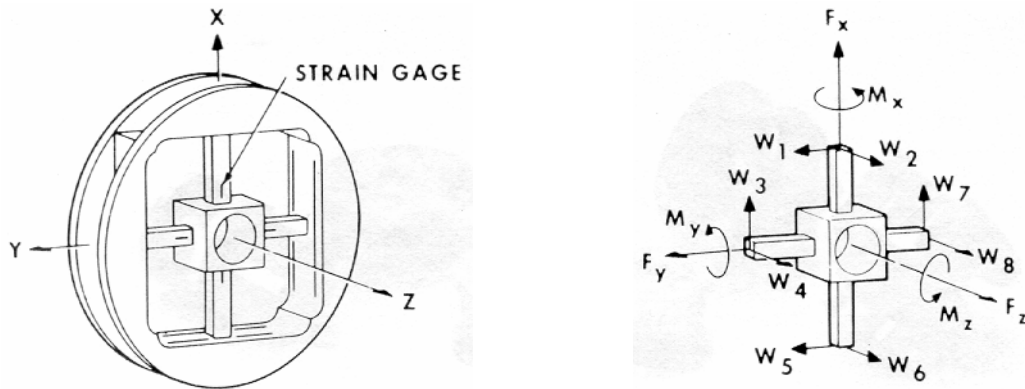
Se a ponte está balanceada, tal que $R_g \cdot R_b = R_1 \cdot R_2$, a tensão de saída $V_{AB} = 0$. Qualquer variação em R_g causada por deformação do strain gage desbalanceará a ponte e fará com que $V_{AB} \neq 0$. Através da aplicação de uma força conhecida ao objeto, o sistema pode ser calibrado, ou seja, o valor de V_{AB} pode ser diretamente relacionado com a força aplicada. Em robótica, estes dispositivos podem ser colocados na parte posterior dos dedos de uma carga.



Quando os dedos começam a agarrar o objeto, a deflexão resultante é captada pelos strain gages.

▪ Sensor de Munheca (ou Punho)

Quando os strain gages são montados entre a garra do robô e sua extremidade, eles são denominados sensor de munheca (ou de punho). Um sensor de munheca comumente usado em robótica possui oito pares de strain gages montados sobre quatro barras de deflexão; um a cada lado da barra [4].



Os strain gages colocados na face oposta das barras são conectados a pontes de Wheatstone, e suas saídas são proporcionais às componentes normais das forças aos planos dos strain gages; esta conexão diferencial proporciona uma compensação automática da temperatura. Como os oito pares dos strain gages são orientados normais aos eixos X, Y e Z do sistema de forças, os três componentes de força F e os três componentes do momento M podem ser determinados, somando ou subtraindo as tensões de saída. Isto pode ser feito por pré-multiplicar a leitura do sensor por uma matriz de calibração. Assim,

$$F = R_F \cdot W, \text{ onde}$$

$$F \equiv (\text{Forças, momentos}) = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$$

$$W \equiv (\text{Leituras do sensor}) = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_f)^T$$

e

$$R_F = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{18} \\ r_{61} & \dots & r_{68} \end{bmatrix} \text{ onde } r_{ij} \neq 0 \text{ são os fatores necessários para a conversão dos valores das leituras do sensor } w \text{ (em volts) para força/momento (em newton-metro).}$$

Para o sensor de munheca do exemplo, a matriz de força resolvida R_F (ou matriz de calibração do sensor) é:

$$R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{13} & 0 & 0 & 0 & r_{17} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 & r_{34} & 0 & r_{36} & 0 & r_{38} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 & 0 & r_{48} \\ 0 & r_{52} & 0 & 0 & 0 & r_{56} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} & 0 & r_{65} & 0 & r_{67} & 0 \end{bmatrix}$$

Os valores desconhecidos da matriz R_F são obtidos aplicando-se uma força conhecida ao sensor.

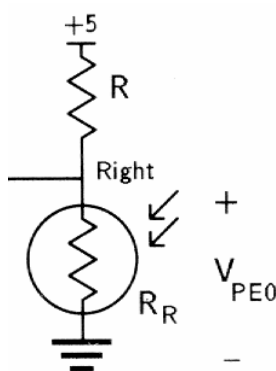
SENSORES EM ROBÔS MÓVEIS

Embora muitos dos sensores comentados durante o curso também podem ser utilizados nos robôs móveis, além dos robôs manipuladores, existem outros tipos de sensores que são basicamente utilizados em robôs móveis. Alguns deles são:

1) Sensores Óticos

Podem permitir ao robô comportamentos tais como: esconder-se num lugar escuro, mover-se em direção a uma fonte de luz, etc. Sensores de luz simples podem ser fotoresistores, fotodiodos ou fototransistores.

- Os fotodiodos são simplesmente resistências variáveis, cuja resistência varia em função do nível de luz ambiente [3].

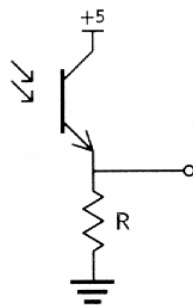


Um bom compromisso entre sensibilidade e faixa de nível de luz consegue-se atribuindo a R o mesmo valor que a resistência do fotoresistor quando exposta a um nível de luz na metade da faixa de níveis de luz no ambiente no qual o robô deve operar.

$$V_{OUT} = \frac{R_R}{R + R_R} \cdot 5$$

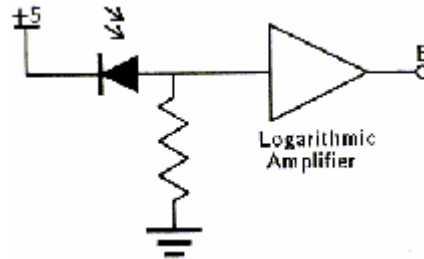
Para interfacear um sensor fotoresistivo com um microcontrolador, é necessário implementar um conversor A/D, pois a saída do sensor é analógica e a entrada do microcontrolador é digital. O único componente presente neste circuito é um resistor que tem como função limitar a corrente para proteção do microcontrolador e do fotoresistor

- Os fototransistores são mais sensíveis à luz do que os fotoresistores [3].



- Os fotodiodos também possuem grande sensibilidade à luz, produzindo um sinal linear sobre uma ampla faixa de níveis de luz, e possuem também resposta rápida a mudanças na iluminação. Entretanto, Para interfacear um fotodiodo com um microcontrolador, deve-se utilizar um amplificador operacional logarítmico, pois o fotodiodo produz uma resposta linear para uma faixa muito larga de níveis de iluminação.

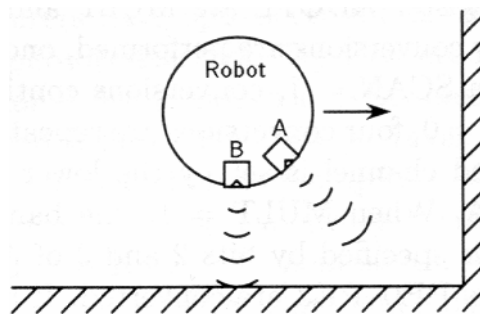
Assim, como o nível de iluminação da luz do sol é muito superior ao nível de uma luz artificial, utiliza-se um amplificador logarítmico para aumentar a sensibilidade a pequenas mudanças na intensidade de luz quando o robô está em um ambiente escuro, e diminuir a sensibilidade em um ambiente iluminado.



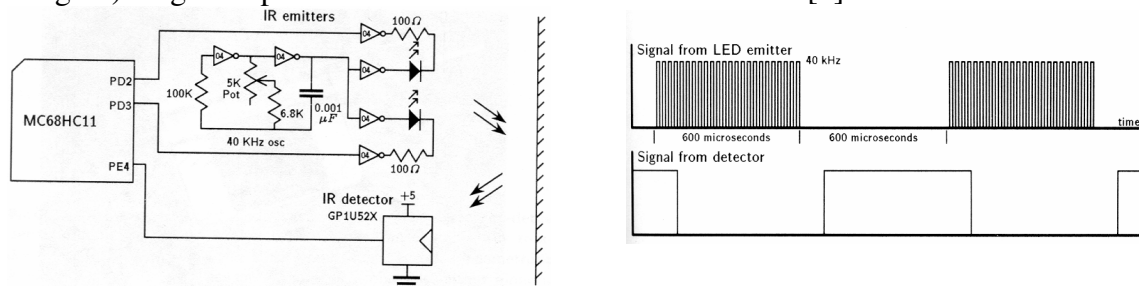
Exemplo de fotodiodo com amplificador integrado: TSL250 (Texas) [3]

- Sensor de Proximidade Ótico

Podem ser utilizados para detectar objetos próximos ao robô, como também para implementar outro tipo de comportamento tal como seguir paredes. Utiliza-se nesta caso dois sensores: um apontando diretamente para a parede e outro apontando em um ângulo de 45°.



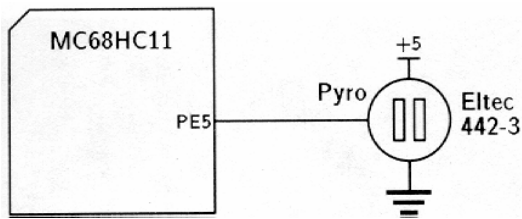
Quando nenhum dos dois sensores detecta um obstáculo, o robô gira para a direita, procurando a parede. Quando somente o sensor B detecta algum obstáculo, o robô se move para a frente. Quando o sensor A detecta um obstáculo, sozinho ou juntamente com o sensor B, o robô gira à esquerda. O circuito abaixo mostra uma configuração que permite interfacear este tipo de sensor com o microcontrolador. Para isto, utiliza-se um circuito composto por um oscilador (para produzir um trem de pulsos), que é ligado aos emissores infravermelhos através de um buffer (7404), que também tem a função de isolamento e proteção. O comando de emissão do trem de pulsos é dado pelo microcontrolador através das portas PD2 e PD3, as quais também estão ligadas aos emissores através de buffers (7404). Por fim, a saída do detetor (que já é digital) é ligada à porta de entrada PE4 do microcontrolador [3].



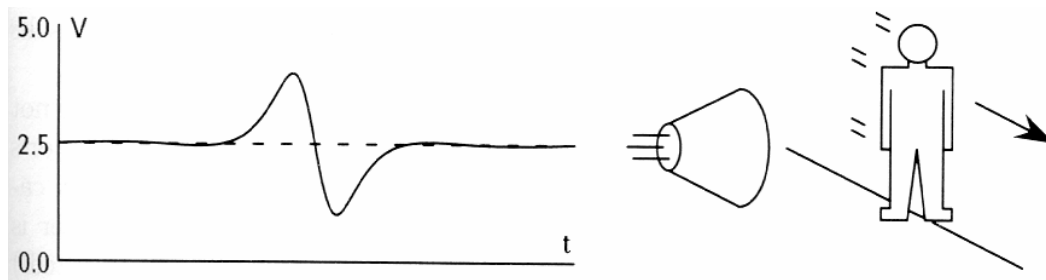
Exemplo de chip detector: GP1U52X (Sharp) [3].

- Sensores Piroelétricos

Permite ao robô móvel interagir com seres humanos. A saída deste tipo de sensor muda quando ocorrem pequenas variações na temperatura do sensor. O elemento ativo é o cristal de Tântalo-Lítio, e existe uma indução de carga quando o cristal é aquecido. Os sensores piroelétricos de baixo custo são otimizados para detectar radiação na faixa de 8 – 10 μm , que é a faixa de energia infravermelha emitida pelos seres humanos. São usados como sensores de movimento de pessoas ou como alarme contra intrusos.



Este tipo de sensor de Eltec possui dois cristais, sendo que a saída do sensor é a diferença de tensão entre os cristais, a qual é amplificada. Quando ambos cristais estão à mesma temperatura, o sensor produz um sinal que permanece estável em aproximadamente 2,5V. [3]



Sinal de saída para uma pessoa andando da esquerda para a direita . Ocorre o inverso para uma pessoa caminhando da direita para a esquerda [3].

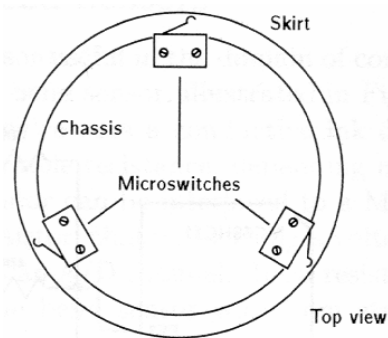
- Câmaras de Vídeo

Com a diminuição de preço e peso das câmaras de vídeo, elas estão sendo usadas cada vez mais em robótica. O grande problema continua sendo o processamento da imagem, que exige computação intensiva, isto implica em processadores mais caros e pesados a bordo do robô móvel. Uma solução é transmitir a imagem para que seja processada fora do robô, por exemplo, através de cabos, embora o ideal seja um transmissor de vídeo, que já existem a baixo preço e pequenas dimensões.

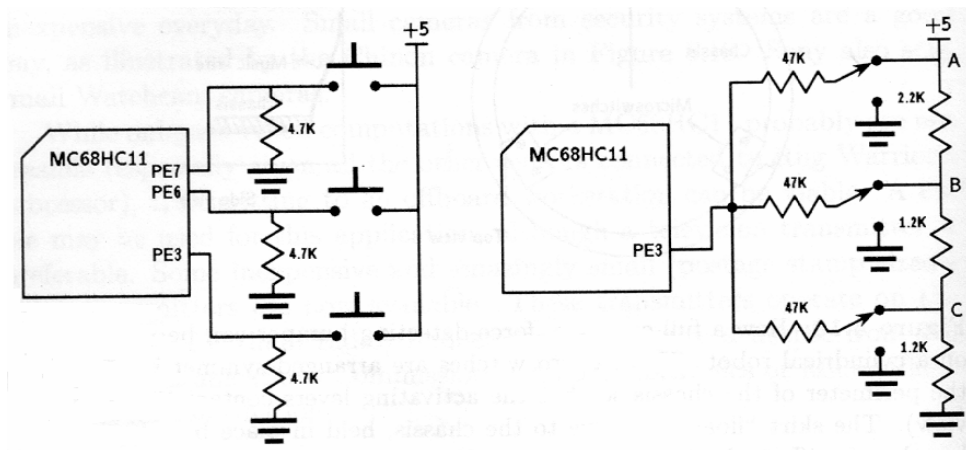
2) Sensores de Força

Em robôs móveis a patas, utilizam-se comumente sensores de força baseados em “strain gages” colocados nas patas do robô, de forma a medir a força exercida sobre o solo, garantindo assim o contato firme com o mesmo.

Outro tipo de sensor classificado como sensor de força é o micro-interruptore. Estes pequenos interruptores podem ser adaptados ao pára-choques do robô para sinalizar quando o robô se choca com um obstáculo e onde está o obstáculo em relação ao robô. Esta informação permite ao robô escapar do obstáculo [3].

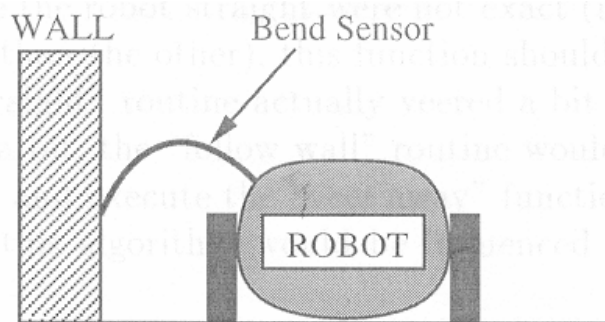


Os microinterruptores são montados de tal forma que, quando o robô se choca com um objeto, um ou dois interruptores serão acionados, indicando a posição relativa entre o robô e o objeto. O circuito que realiza a interface entre os micro-interruptores e o microcontrolador é o mostrado abaixo.



- Sensor de Curvatura

É outro tipo de sensor usado para detecção de choques com obstáculos. Este dispositivo utiliza uma tinta condutora depositada entre dois eletrodos para proporcionar uma resistência variável, dependendo do grau de curvatura. Pode ser interfaceado com um microprocessador da mesma forma como feito para um fotoresistor. A resistência total muda por um fator de 3 a 5 entre o sensor reto e máxima curvatura [3].



Vista traseira do robô.

3. Sensores Acústicos

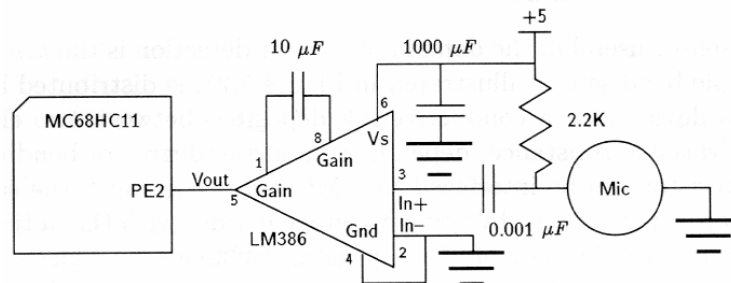
Dentro deste tipo de sensores, encontram-se os microfones, que permitem que o robô interaja com seu operador, e os sensores ultra-sônicos que ajudam ao robô a detectar e evitar obstáculos.

- Microfones

Um comportamento que pode ser implementado num robô é mover em direção a um ruído, atender a um determinado padrão sonoro, ou localizar a posição da fonte sonora em um ambiente.

O circuito utilizado para interfacear este tipo de sensor é mostrado abaixo. A saída do amplificador é conectada a uma das entradas analógicas do 68HC11 (PE2). Um dos problemas em utilizar microfones para reconhecimento de voz é a necessidade de se ter uma taxa de amostragem alta (em torno de 40 kHz) para que o sinal possa ser adequadamente reconstruído e processado. Outro problema significativo com o uso do microfone é a necessidade de amostrar o sinal bastante frequentemente. Se o robô deve detectar um aplauso ou um assobio ele deverá amostrar o sinal em uma frequência duas vezes superior à mais alta frequência que ele pode detectar. Isso pode requerer todo o tempo de microprocessador, podendo ser necessário dedicar um microprocessador somente para a tarefa de monitorar o microfone.

Outra questão importante é proteger o microfone para que ele não detecte o ruído do motor como se fosse o padrão sonoro definido [3].



- Sensores de Ultra-Som

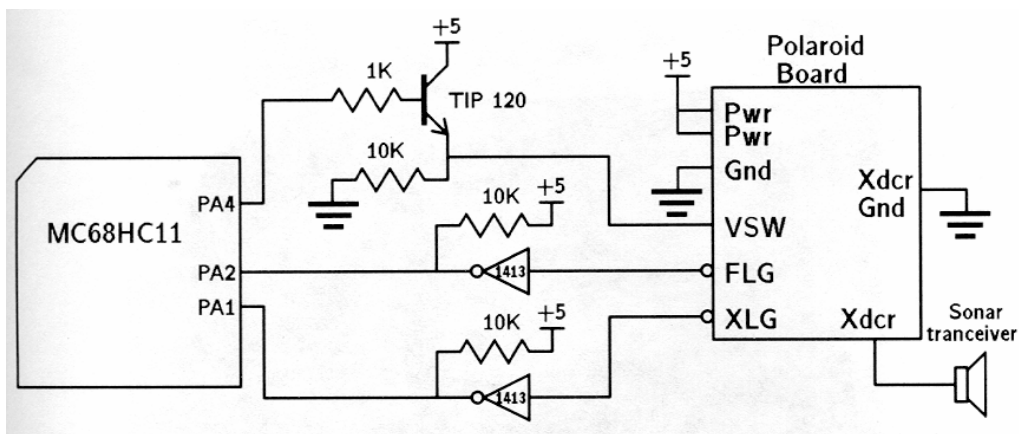
Estes sensores podem proporcionar informação de distância, através da medida do tempo de vôo entre a excitação do transdutor e a recepção do eco. Com esta informação, o robô pode detectar obstáculos, navegar em um ambiente, localizar objetos, e construir mapas do ambiente onde ele opera. Um circuito para fazer a interface entre o sensor ultra-sônico e o microcontrolador consiste em um oscilador para gerar os pulsos ultra-sônicos e um transistor para funcionar como driver de corrente na emissão. Para a recepção, é necessário utilizar um amplificador (pois o sinal de eco detectado tem nível muito baixo), um retificador de meia onda (para eliminar a parte negativa do sinal de eco e permitir a conexão com uma das portas analógicas do microcontrolador, que só pode receber sinais de 0 a 5V), e um filtro passa baixa (para

extrair a envoltória do sinal de eco e diminuir a frequência de amostragem necessária para uma reconstrução adequada do sinal).

O sensor de ultra-som da polaroid é um dos sensores mais utilizados em robôs móveis. No circuito abaixo, o sinal VSW é enviado pelo microprocessador para início da emissão de pulsos de excitação do transdutor por parte da placa de polaroid. Existe um tempo de latência entre o pulso de início e a excitação real do transdutor, por isso, o sinal XLG indica quando o transdutor realmente foi excitado. Neste momento o microprocessador inicia a contagem do tempo de vôo da onda acústica. O sinal FLG indica ao microprocessador a chegada do eco. Neste momento o microprocessador pára

a contagem do tempo. A distância ao objeto refletor é dada então por: $d = \frac{V_s \cdot t_{v\acute{o}o}}{2}$,

onde V_s é a velocidade do som no ar e $t_{v\acute{o}o}$, o tempo de vôo da onda ultra-sônica. A velocidade do som varia com a temperatura ($V_s \approx 331.6 + 0.61 \cdot T$) e por isso deve-se utilizar também um sensor temperatura para medir a temperatura ambiente e compensar a variação da velocidade do som [3].

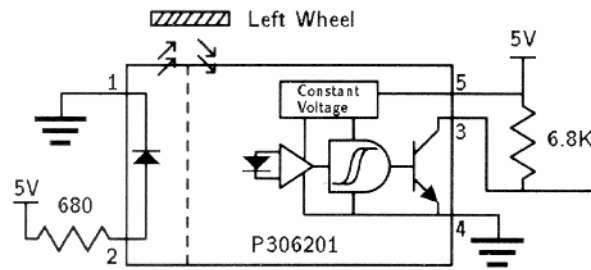


SENSORES INTERNOS

Para conhecer a posição e orientação do robô dentro do ambiente onde opera, são necessários sensores que proporcionem esta informação.

- Os encoders medem a posição ou a taxa de rotação do eixo ao qual ele está acoplado (velocidade do motor); podem fornecer esta informação através de um código, que corresponde a uma orientação particular do eixo (encoders absolutos) ou através de um trem de pulsos (encoders incrementais).

Uma implementação de encoders comumente utilizada emprega um fotoreflator, em que a luz é emitida desde um LED, dirigida a uma roda listrada, sendo a luz refletida captada por um fototransistor. Um exemplo de fotoreflator é o chip P306201A da Hamamatsu.



Chip P306201A da Hamamatsu [3].

- Giroscópio

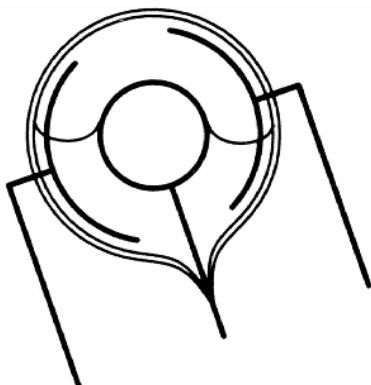
Este sensor utiliza o princípio de conservação do momento angular para manter um ou mais eixos internos apontados em uma mesma direção quando a parte exterior do giroscópio translada e gira. Um giroscópio acoplado a um robô permite determinar tanto a velocidade de giro do robô como quanto ele girou com relação a um sistema de coordenadas fixo. Um exemplo de giroscópio é fabricado por Futaba; ele utiliza como entrada um sinal PWM fornecido pelo microprocessador e fornece como saída um pulso com largura aumentada ou diminuída, dependendo da faixa de giro.

- Sensor de Inclinação

Permite ao robô saber se ele está em nível ou inclinado com relação a uma superfície plana. Existem vários tipos de sensores de inclinação que fornecem o ângulo relativo entre o corpo do robô e o vetor de gravidade. Entre eles, um sensor simples e relativamente barato é o interruptor de mercúrio, que consiste de uma pequena ampola de vidro contendo dois ou mais contatos e uma gota de mercúrio. Dependendo se o sensor está inclinado ou não, a gota de mercúrio fechará ou abrirá o circuito [3].



Um sensor de inclinação eletrolítico é um tipo de inclinômetro que tem dois ou mais eletrodos imersos em um fluido condutor. A condução entre os eletrodos é função da orientação do sensor com relação à gravidade; este sensor proporciona um sinal analógico proporcional ao seu grau de inclinação.



A quantidade de condução entre o eletrodo central e cada um dos dois eletrodos externos é determinada pelo grau em que o eletrodo externo está imerso no fluido eletrolítico [3].

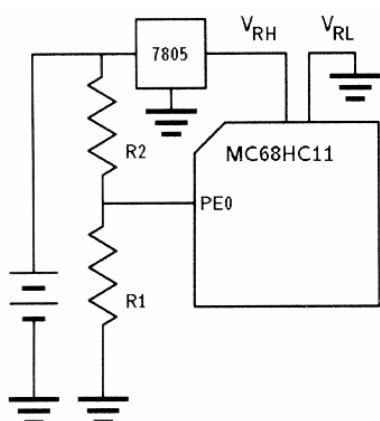
- Bússola

A bússola proporciona uma forma de o robô obter informação absoluta sobre sua orientação. Em áreas abertas, as bússolas são muito confiáveis, e uma vez calibradas para o norte magnético, são também precisas. Entretanto, para ambientes fechados a utilidade das bússolas são mais questionáveis. Os campos magnéticos dos cabos elétricos, as partes metálicas de uma construção, e até os componentes metálicos do próprio robô podem produzir grandes erros na leitura da bússola. Erros típicos estão na ordem de $\pm 45^\circ$.

Outros tipos de sensores importantes para um robô móvel são aqueles que informam ao robô quando é o momento de recarregar sua baterias, quando o motor está sobre aquecido, ou quando um componente não funciona corretamente. Estes sensores são também denominados proprioceptivos.

- Sensor de nível de Bateria

Este sensor indica ao robô quando é o momento de retornar ao posto de recarregamento de bateria ou de restringir operações que consomem muita energia.



Uma das implementações deste sensor é a mostrada na figura e pode ser utilizado se o microprocessador é alimentado com uma fonte regulada [3].

$$V_{OUT} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{BMÁX}$$

Se escolhermos $V_{OUT} = 5V$ e conhecido o valor máximo da bateria, $V_{BMÁX}$, os valores de R_1 e R_2 podem ser obtidos atribuindo-se um valor a uma das incógnitas; o valor de $R_1 + R_2$ deve ser escolhido tal que seja alto o suficiente para que não drene mais corrente do que a consumida pelo resto do circuito, e pequena o suficiente comparada com a impedância interna do conversor A/D do microcontrolador. Deve-se também saber o nível de tensão da bateria quando ela está quase descarregada. Se V_{OUT} for menor ou igual a este valor, é o momento de recarregar a bateria.

- Sensor de Corrente

Uma forma confiável de determinar se o robô está bloqueado com um obstáculo é monitorar a corrente usada para acionar os motores. Se todos os outros sensores falham em detectar uma colisão iminente, o robô se chocará com o obstáculo. Nesta situação, as rodas pararão de girar e a corrente dos motores alcançará um valor máximo. Assim, o sensor de corrente funciona como um detector de colisão de último recurso.

Uma forma de detectar a corrente do motor é inserir uma pequena resistência ($\approx 1\Omega$) em série com o motor, amplificar a tensão através do resistor, e medir a tensão com um dos canais A/D do microprocessador. O software que monitora a corrente do motor não deve responder muito rapidamente, já que cada vez que o robô acelera após uma parada, a corrente do motor tipicamente atinge um valor máximo, diminuindo à medida que o robô se move normalmente.

- Sensor de Temperatura

Este tipo de sensor permite a monitoração da temperatura interna do robô. Isso permite proteger o microprocessador, os motores e as baterias. Alguns chips de acionamento de motores já vêm com sensores de alta temperatura embutidos (Ex.:IR8200).

MOTORES E ATUADORES

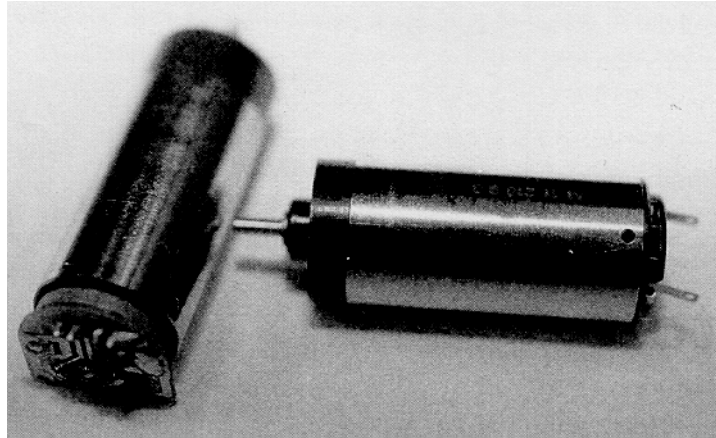
Os robôs utilizam motores para realizar seus movimentos: girar suas rodas, movimentar seus braços, garras etc. Os principais motores utilizados nos robôs são motores CC. Os motores AC são pouco utilizados em robôs móveis porque as fontes de alimentação destes são normalmente baterias CC.

Os principais tipos de motores CC existentes são os motores com ou sem escovas, motores com ou sem redução, motores de passo, etc. Os motores CC apresentam problemas pois estes giram a altas velocidades e possuem baixo torque, e os robôs móveis normalmente se locomovem a baixas velocidades e necessitam de alto torque, mas estes problemas podem ser resolvidos utilizando-se um conjunto de engrenagens para se obter uma redução de velocidade e aumento do torque.

O sentido de giro de um motor CC depende da polaridade da tensão aplicada em seus terminais. Uma inversão de polaridade implica uma inversão no sentido de giro. Quanto à velocidade de rotação do motor CC, ela depende da amplitude da tensão aplicada aos seus terminais. Quanto maior a tensão aplicada, mais rapidamente o motor gira.

Motor de Passo CC

Um motor de passo é um tipo de motor CC que possui 6 ou 8 terminais. Aplicam-se sinais a estes terminais para energizar sequencialmente pares de bobinas, de modo que a cada momento o rotor é atraído para um setor diferente, provocando o giro. A frequência de envio destes sinais determina a velocidade do motor, a fase entre os sinais determina o sentido de giro e o número de sinais determina a posição do motor.



Exemplo de motor de passo CC [4].

Servo-Motor

É um tipo de motor CC que possui três terminais. Dois deles para alimentação e mais um para o controle de posição do motor. Um servo-motor, além de um motor DC simples, incorpora um conjunto de engrenagens, limitadores de fim de curso, um potenciômetro para realimentar a posição do motor e um circuito integrado para o controle da posição do robô. O funcionamento de um servo-motor consiste em uma vez estabelecida uma posição na qual ele deve permanecer (através do terceiro terminal), o circuito de controle gira o motor até a posição comandada e o mantém parado até que uma nova posição seja comandada. Caso se tente tirar o motor da posição estabelecida, a leitura de posição do potenciômetro vai ser alterada e o circuito de controle irá aumentar a corrente no motor, tentando trazê-lo de volta para a posição comandada. Este tipo de motor não é adequado para o acionamento das rodas de um robô móvel, pois ele possui limitadores de fim de curso que não permitem que ele gire continuamente. No caso de se remover os limitadores de fim de curso, estes motores podem ser empregados para o acionamento de rodas de robôs móveis. Quanto à aplicação de servo-motores para acionar as juntas de robôs com patas, eles são perfeitamente adequados.



Exemplo de servo-motor [4].

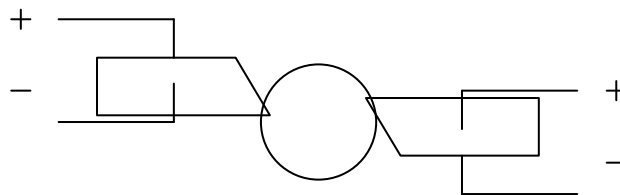
Motores com e sem Escovas

Para que ocorra a rotação do rotor de um motor DC, é preciso que a corrente que percorre o enrolamento seja alternada. Para que isto ocorra, a corrente DC fornecida pela bateria que alimenta o robô deve ser convertida em AC. Esta conversão é denominada *comutação*. No caso dos motores DC tipo escova, a comutação é feita mecanicamente através de um conjunto de escovas que permitem que os terminais da bobina do rotor deslizem entre os contatos da bateria à medida que ela gira. Os motores DC sem escova executam a comutação eletronicamente através de sensores de posição e um controlador microprocessado. Os motores tipo escova são mais comuns e baratos do que os motores sem escova. Estes possuem vantagens sobre aqueles, tais como redução do atrito do rotor, o que permite um menor aquecimento e aumento da vida útil do motor, além de reduzir a produção de interferência RF. Por outro lado, os motores do tipo sem escova exigem um circuito de controle mais complexo, para se obter a comutação eletronicamente.

Existem outros tipos de motores com novos princípios de funcionamento que estão sendo utilizados em robótica. Alguns exemplos estão descritos abaixo:

- Motores Piezelétricos

Um motor piezelétrico é um tipo de motor que se baseia na principal característica das cerâmicas piezelétricas, que consiste em se deformar quando é submetida a um potencial elétrico. Através de uma montagem adequada (conforme a figura abaixo, onde os dois polígonos são cerâmicas piezelétricas e o círculo ao centro é o rotor do motor), esta deformação pode ser utilizada, por exemplo, para girar o rotor de um motor. Em contraste com um motor eletromagnético, os motores piezelétricos giram em menores velocidades e com torque maior, o que dispensa a utilização de engrenagens para redução. Ou seja, os motores piezelétricos podem ser menores e mais leves do que os eletromagnéticos.



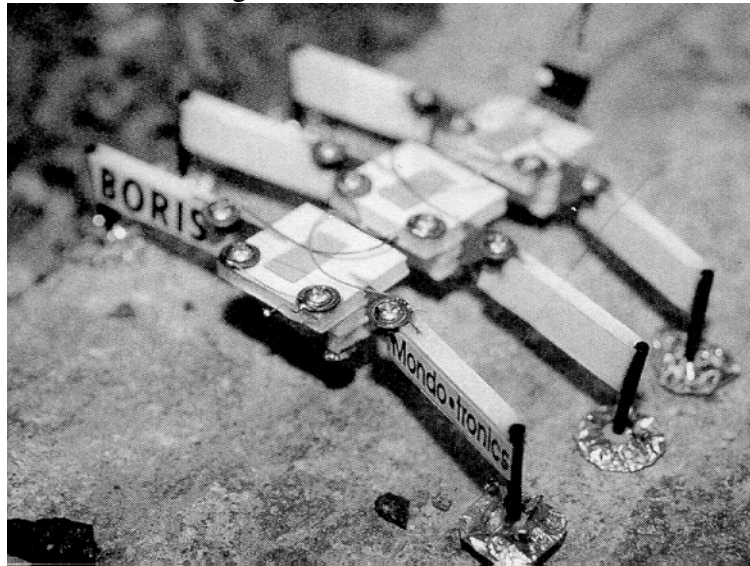
- Motores Eletrostáticos

São motores muito pequenos (na escala de um fio de cabelo humano), que funcionam pelo princípio de atração das cargas. Pela alternância do sinal das cargas entre o rotor e o estator, ocorre o movimento. Só são realizáveis em dimensões minúsculas porque as forças eletrostáticas só são relativamente fortes em escalas muito reduzidas.

- Ligas de Memória - SMA (Shape Memory Alloy)

As ligas de memória mudam sua forma de maneira reversível, à medida que são aquecidas ou resfriadas. Elas podem ser utilizadas para construir patas de um pequeno robô móvel. Aquecendo um fio composto por este tipo de liga (através da passagem de corrente), ele encolhe, fazendo que a pata se erga. Quando não passar mais corrente pelo

fio, ele se resfria, fazendo com que ele volte à sua forma original, abaixando a pata. Os fios devem ser conectados às patas de modo que quando a metade das patas estejam erguidas a outra metade se mova para trás. Alternando este procedimento entre os dois conjuntos de patas, o robô conseguirá se mover.



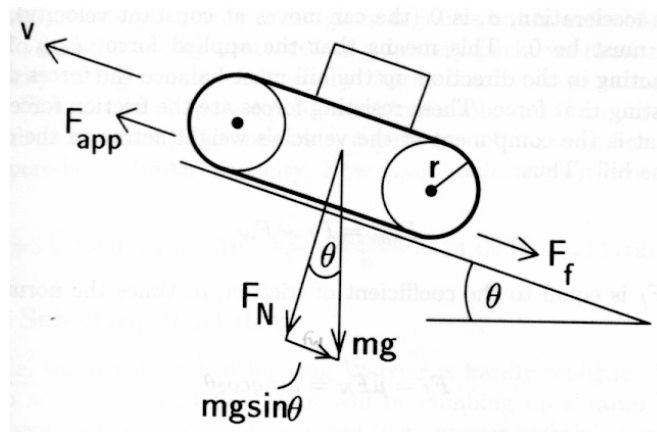
Exemplo de robô baseado em ligas de memória [4].

- Cottonlike (Fibras de Algodão)

A última novidade em termos de atuadores são fibras que se assemelham às de algodão e que funcionam de maneira similar a músculos artificiais. Adicionando soluções ácidas ou básicas, estes atuadores podem encolher ou se expandir em até 1000 vezes o seu volume original, com força e velocidade semelhantes às dos músculos humanos.

Dimensionamento de um Motor

Mostraremos como pode ser feito o dimensionamento e a escolha do tipo de motor adequado para um robô móvel. Por exemplo, vamos considerar que o robô pesa 650 g e será projetado para subir rampas de até 30° de inclinação, com velocidade de 0.15 m/s, como mostrado na figura abaixo.



Considerando que o robô possui duas rodas acionadas independentemente por dois motores CC, através da figura podemos calcular a potência necessária pela seguinte equação:

$$P_m = F_{aplicada} \cdot v = (F_{atrito} + F_p) = mg(\mu \cos \theta + \sin \theta)v$$

Considerando o coeficiente de atrito $\mu = 0.3$, obtém-se:

$$P_m = (0.65 \cdot 9.8)(0.3 \cos 30^\circ + \sin 30^\circ)(0.15) = 0.73W$$

Para super-dimensionar os motores, de modo a compensar a incerteza associada ao valor do coeficiente de atrito e outros fatores não considerados, multiplicaremos o resultado obtido por 3, resultando em $P_m = 2.1W$. Uma vez que serão utilizados 2 motores, cada um deles deve ter uma potência aproximada de 1W.

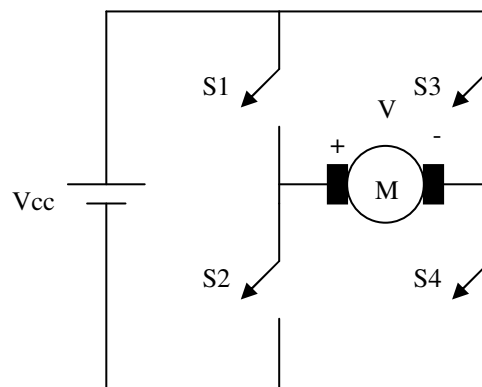
Se é necessário conhecer a eficiência máxima de um motor desconhecido (η_{max}), é suficiente medir a corrente a vazio (I_0) e a corrente com rotor bloqueado (I_s), e aplicar a seguinte fórmula:

$$\eta_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_s}}\right)^2$$

ACIONAMENTO DE MOTORES (PONTE H E SINAL PWM) E CONTROLE DE MOTORES

Como foi visto no item anterior um robô possui muitos motores CC em sua estrutura, por isso é necessário interfacear os motores com microprocessadores para que se consiga controlá-los com eficiência. Por esta razão, foram criados vários circuitos capazes de realizar este interfaceamento, como a ponte H e o controlador PI. Os exemplos abaixo mostram como funcionam :

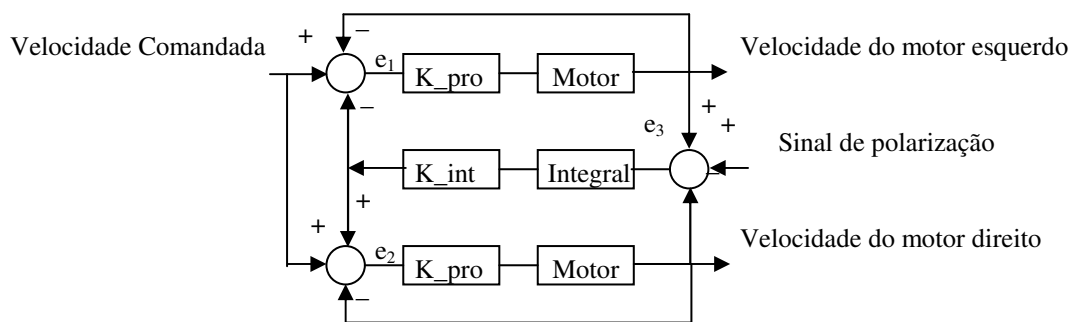
Uma ponte H é uma topologia de circuito muito utilizada para interfacear um motor DC e um microprocessador. Esta topologia consiste de quatro chaves que são controladas pelo microprocessador e determinam a direção na qual a corrente passará pelo motor. A mudança no sentido da corrente permite inverter o sentido de rotação do motor. A figura abaixo ilustra a topologia da ponte H. Quando o microprocessador comanda as chaves S1 e S4 a se fecharem e mantém as outras duas abertas, a corrente passa pelo motor da esquerda para direita (sentido positivo). Quando as chaves S2 e S3 são fechadas e as outras abertas, a corrente é revertida e o motor gira no sentido oposto. Deixando as quatro chaves abertas ao mesmo tempo, o motor gira livremente, enquanto que se as quatro chaves forem fechadas ao mesmo tempo o motor é forçado a parar.



Utilizando um sinal PWM para controlar a abertura e fechamento das chaves que compõem a ponte H, é possível controlar a velocidade do motor, uma vez que ele responde ao valor RMS do sinal PWM. Um sinal PWM consiste simplesmente em uma onda quadrada, cujo ciclo de trabalho pode ser variado, resultando em diferentes valores médios (e RMS) de tensão.

A ponte H é necessária para inverter o sentido de rotação do motor, mas principalmente porque o microprocessador não tem condições de suprir a corrente necessária para acionar o motor. Se tentarmos conectar diretamente o microprocessador ao motor, o microprocessador será danificado. Desta forma, utilizando a ponte H com transistores de potência para desempenhar o papel de chaves eletrônicas, é possível fornecer a corrente necessária para o acionamento do motor, ficando o microprocessador responsável apenas pelos sinais de controle. SGS Thompson L293D e Motorola MPC1710A, são dois exemplos típicos de CIs baseados em pontes H.

O controlador PI se faz necessário ao invés de se utilizar simplesmente um controlador proporcional porque ele permite assegurar que quando o robô for comandado a seguir em linha reta, os dois motores realmente vão girar a uma mesma velocidade. O esquema abaixo ilustra como um controlador PI pode controlar a velocidade das rodas de um robô de maneira eficiente:



Os valores das constantes K_{pro} (proporcional) e K_{int} (integral) são escolhidos de tal forma que se eles forem muito elevados, o sistema terá um tempo de resposta maior, no entanto se os valores forem demasiadamente altos, o sistema pode tornar-se instável (os motores aceleram e diminuem, mas nunca atingem a velocidade desejada). No caso de se utilizar constantes muito pequenas, o sistema terá um tempo de resposta cada vez menor, até que se torne instável. Para a determinação dos valores das constantes é necessário fazer um estudo da estabilidade do sistema, através de uma das técnicas de controle clássico (ex. Diagramas de pólos e zeros). Valores que poderiam ser utilizados seriam por exemplo: $K_{pro} = 1$ e $K_{int} = 0.1$. Pode-se notar que normalmente o valor da constante proporcional é bem maior do que o da constante integral.

Utilizando o controlador PI é possível comandar o robô para que ele faça curvas. Para isto serve o sinal de polarização que é adicionado à diferença de velocidade entre os motores direito e esquerdo, resultando no erro e_3 , que é integrado, multiplicado por K_{int} e realimentado com sinal positivo na velocidade do motor direito e sinal negativo na velocidade do motor esquerdo. No caso de um sinal de polarização positivo, o motor direito terá sua velocidade aumentada e o esquerdo, reduzida, fazendo com que o robô descreva um arco para a esquerda. Caso o sinal de polarização seja negativo, o robô descreverá um arco para a direita.

Baterias, Reguladores de Tensão, Reguladores de Chaveamento, Conversores CC-CC, Proteção de Circuitos, Isolamento, Redução de Ruídos

Baterias

Uma bateria é um dispositivo capaz de armazenar energia química e liberá-la na forma de energia elétrica. As características de uma bateria são: possibilidade de recarga, densidade de energia (máxima quantidade de energia por unidade de massa ou volume), quantidade de energia armazenada na célula (geralmente em A.h, ou mA.h), tensão de operação (dada pelos elementos químicos utilizados), resistência interna, taxa de descarga (varia com a resistência interna), “shelf life”, ou seja, a medida de quão rapidamente a bateria perde a carga sem ser utilizada, e dependência da temperatura.

Como foi dito no parágrafo anterior as características para a escolha de baterias são: capacidade de ser recarregada, densidade de carga, voltagem, capacidade, e resistência interna, além de peso, disponibilidade e custo. Das baterias recarregáveis (Níquel – Cádmio, Hidreto de Níquel Metal e chumbo ácido), as baterias de NiCd, são indicadas para a maioria dos usos, porque são disponíveis em vários tamanhos, têm baixa resistência interna (o que possibilita uma descarga rápida), são seladas (não havendo risco de derramamento de material contaminante no interior do robô) e são relativamente baratas em relação às NiMH (que apresentam melhores características), e mais leves do que as de chumbo-ácido. Em contrapartida, estas baterias têm restrições operacionais para operação em grupo, apresentam uma baixa densidade de energia (comparável com as de chumbo ácido). Além disto, as baterias de NiCd possuem um “efeito de memória”, assim se forem recarregadas sem estarem completamente descarregadas, a nova carga da bateria não será total. Por exemplo, se uma bateria com 50% da carga for recarregada, a nova carga adquirida pela bateria será de 50%. Por possuir resistência interna pequena, as baterias de NiCd possuem alta corrente de curto circuito, o que pode causar danos ao isolamento da bateria e até incêndio. Um circuito recarregador de bateria de níquel-cádmio poderia ser um circuito bem simples, basicamente um transformador abaixador de tensão com um circuito retificador de meia onda com um resistor em série, que deve ser suficiente para limitar a corrente na bateria em cerca de 1/20 da capacidade da bateria em A.h. Por exemplo, se a bateria for de 600mAH, a corrente de carga deve ser limitada a 30mA.

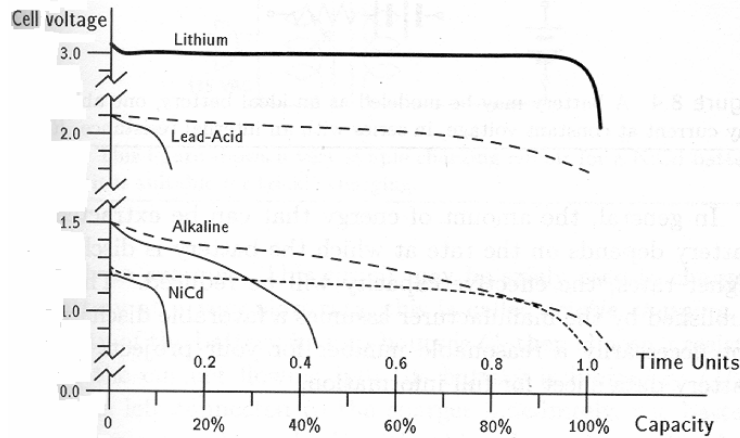
A seguir estão listadas algumas características das baterias de ácido-chumbo, zinco-carbono, alcalina, lítio, mercúrio, níquel-cádmio, hidreto de níquel-metal, prata e ar-zinco.

Tipo	Recarregável ?	Densidade de Energia (W.h/kg)	Voltagem da Célula	Capacidade Típica (mA.h)	Resistência Interna(ohms)	Comentários
Chumbo-Ácido	Sim	40	2.0	1.2 – 120 Ah	0.006	Disponibilidade
Zinco-Carbono	Não	75	1.5	6000		Barata, mas obsoleta
Alcalina	Atualmente Sim	130	1.5	1400 - 10000	0.1	Célula primária mais comum
Lítio	Atualmente Sim	300	3.0	1800 - 14000	0.3	Boa densidade de energia, mas alto custo
Mercúrio	Não	120	1.35	190	10	
Níquel-Cádmio	Sim	38	1.2	500 - 4000	0.009	Pequena resistência interna e grande disponibilidade
Hidreto de Níquel-Metal	Sim	57	1.3	1100 – 2300		Melhor densidade de energia do que NiCd, porém são caras
Prata	Não	130	1.6	180	10	
Ar-Zinco	Não	310	1.4			Alta densidade de energia, porém não muito disponível, tamanhos limitados

A tabela abaixo lista as baterias em termo de suas densidades de carga, medida em W.h/kg:

Tipo de bateria	Densidade de energia (Wh/kg)
Ar-Zinco	310
Lítio	300
Alcalina	130
Prata	130
Mercúrio	120
Carbono-Zinco	75
NiMH	57
Chumbo-ácido	40
NiCd	38

A de lítio possui a melhor característica, com a tensão mantendo-se praticamente constante com a queda da capacidade (carga), e do tempo. A tensão fornecida pelas baterias alcalinas, Chumbo-Ácido e NiCd diminui pouco com o estado de carga da bateria, e diminui muito com o tempo.



Curva de descarga de vários tipos de bateria.
 A curva tracejada mostra a tensão de saída versus capacidade da bateria e a
 Linha contínua mostra a tensão versus tempo [6].

A tabela abaixo mostra um resumo das capacidades e tempo de retenção de carga de diferentes baterias.

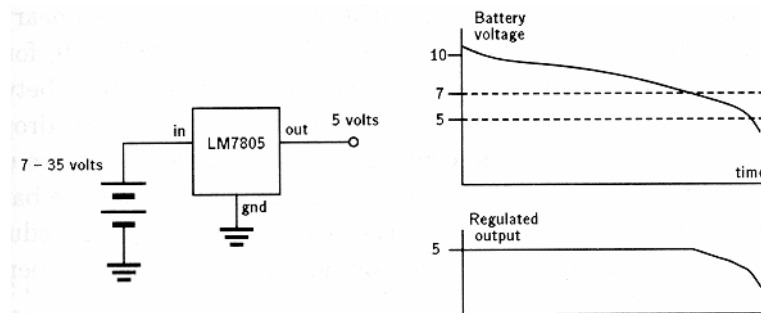
Tipo de bateria	Capacidade	Tempo de retenção de carga	Curva de descarga
Lítio	300	Curva de descarga, alto tempo retenção de carga em vazio (cerca de 10 anos)	Plana
Alcalina	130	Bateria mais comum, curva de descarga inclinada, resistência interna muito baixa e muito caras	
Prata	130	Curva de descarga muito plana	
Mercúrio	120	Curva de descarga muito plana	
Carbono-Zinco	75	menor densidade de energia entre as não recarregáveis	
NiMH	57		
Chumbo-ácido	40		
NiCd	38		

Reguladores de Tensão

Os reguladores de tensão são dispositivos que servem para fornecer uma tensão constante para o circuito, mesmo que a tensão de entrada varie sobre uma ampla faixa, e compensando o efeito da redução da tensão fornecida pela bateria à medida que se descarrega. Um regulador linear é um dispositivo que normalmente possui 3 terminais: alimentação (que deve sempre ser alguns volts maior do que a tensão de saída desejada), terra e tensão de saída. Alimentando o regulador linear com uma tensão dentro da faixa de operação, a tensão de saída permanecerá sempre constante.

Um regulador linear como o LM7805, mantém uma tensão de saída de 5V para tensões de entrada variando na faixa de 7V – 35V. Se a tensão de entrada for menor do que 7V, a tensão de saída não se mantém regulada. Existe um outro regulador, o

LM2940CT-5.0, que no caso de uma variação da tensão de entrada entre 5.5V e 26V, a saída se mantém regulada em 5V. A sua vantagem em relação ao LM7805 é que para se obter uma tensão regulada, a tensão de entrada necessária para um LM2940CT-5.0 só precisa ser 0.5V maior do que a tensão de saída (5V), enquanto que para um LM7805, este valor tem que ser ao menos de 2V. Esta característica acarreta uma menor dissipação de potência pelo regulador.



Tensão de saída da bateria e tensão de saída do regulador [6].

Conversores CC-CC

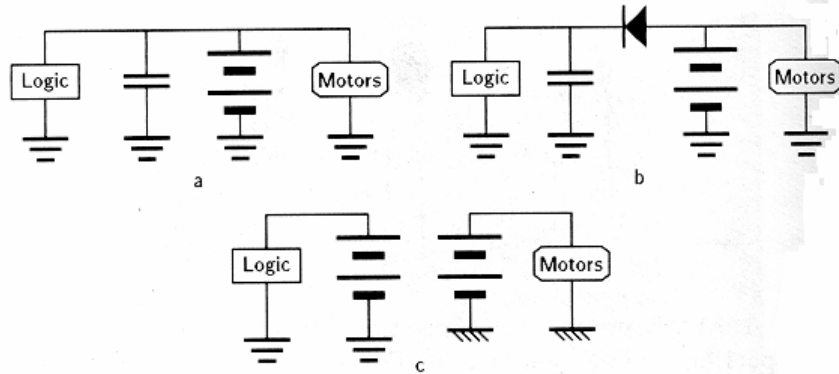
Em um robô móvel são necessários vários níveis de tensão (+5V, -12V, +12V, +24V), enquanto que uma bateria só fornece um nível de tensão. Utilizando-se um conversor CC-CC, podem-se obter todos os níveis de tensão necessários, inclusive aqueles maiores do que o nível de tensão fornecido pela bateria ou de polaridade invertida. Os conversores CC-CC podem ser construídos usando dois princípios diferentes: o primeiro é um conversor tipo fonte de carga, que funciona com a carga de capacitores em paralelo e a descarga destes em série, para gerar uma tensão maior, ou conectando o capacitor com polaridade invertida para produzir uma tensão negativa a partir de uma fonte positiva; o segundo é um regulador de chaveamento que funciona através do princípio da indução de tensão provocada pela interrupção instantânea de corrente no indutor, o que provoca a indução de tensões elevadas (inclusive maiores do que a da bateria). Desta forma, através de um esquema de chaveamento e filtragem adequado, é possível se obter os níveis de tensão desejados. Um regulador de chaveamento é um tipo de regulador de tensão mais eficiente do que os reguladores lineares, pois possui uma eficiência muito maior (normalmente acima de 80%). Sua principal desvantagem é o custo elevado.

Proteção de Circuitos, Isolamento, Redução de Ruídos

Muitas vezes é necessário isolar a parte lógica, motores e sensores em um robô. O isolamento é necessário porque os motores produzem interferência tanto nos circuitos lógicos quanto nos sensores. Além disso, alguns tipos de sensores, como ultra-som, por exemplo, também podem produzir interferência em circuitos lógicos, sendo prudente isolá-los também.

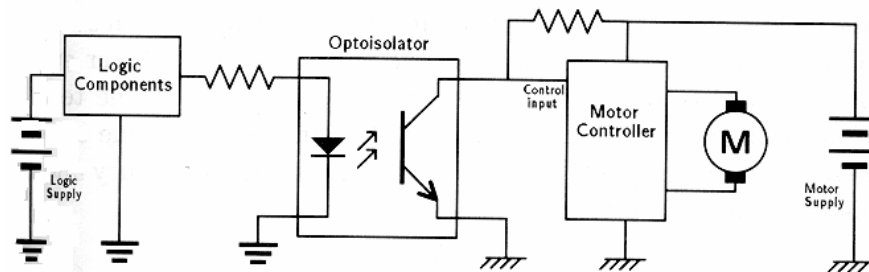
Os motores usados nos robôs móveis causam picos de tensão quando passam por uma seção do comutador. Para evitar que isto aconteça, pode-se utilizar os seguintes procedimentos: colocar a bateria entre o motor e a parte lógica. Além disto só é necessário regular a tensão para alimentar os circuitos lógicos. Caso isto não seja suficiente para evitar problemas de funcionamento no circuito, uma maneira de solucionar o problema é colocar um capacitor em paralelo com o circuito lógico e um diodo entre a bateria e o circuito lógico. Uma medida mais drástica e eficiente seria a utilização de fontes de alimentação distintas. Um último recurso, é utilizar um isolador

ótico, o que permite um verdadeiro isolamento entre o circuito lógico e os motores. Um isolador ótico serve para que seja possível obter um real isolamento entre o circuito lógico e os motores. Exemplos de chips comerciais são: 4N25, 4N28 e 4N30.



Configurações possíveis para alimentação do circuito:

- (a) Bateria entre o motor e a parte lógica com um capacitor em paralelo para regular e tensão,
- (b) capacitor em paralelo com o circuito lógico e um diodo entre a bateria e o circuito lógico,
- (c) Fontes de alimentação distintas [6].



Isolação através de isolador ótico [6].

Para evitar os transitórios provocados por variações de estado nos chips digitais. O valor aconselhado é de $0.1\mu\text{F}$. Ter um único ponto de terra no circuito significa que todos componentes conectados à referência estejam de fato na mesma tensão. Para isto, deve-se evitar que no circuito existam loops de terra, caso contrário, campos magnéticos espúrios irão induzir diferentes níveis de tensão ao longo do loop de terra.

ESTRATÉGIAS DE PROGRAMAÇÃO

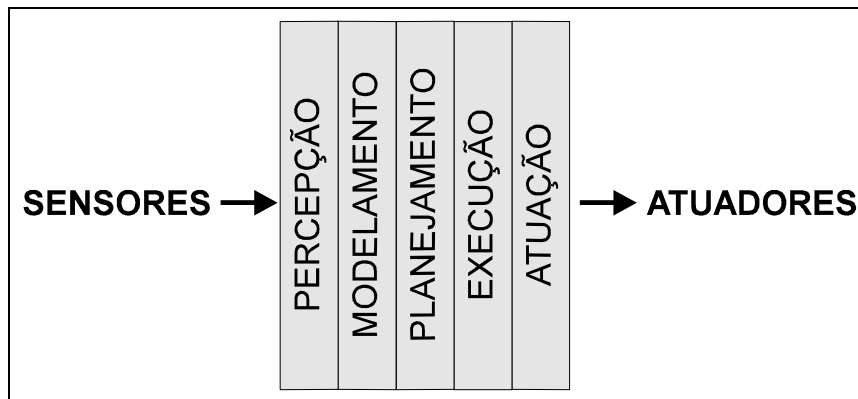
Existem três estratégias de programação normalmente utilizadas para que um microcontrolador possa responder a eventos externos em tempo real. A primeira estratégia é chamada “polling” e consiste em um loop que fica verificando a porta de entrada do microcontrolador para ver se um determinado evento ocorreu; a outra é “interrupção”, e consiste em programar o microcontrolador para que seja gerada uma interrupção do programa em execução quando um determinado evento ocorrer em uma entrada específica; a terceira estratégia se chama “input capture” e consiste em utilizar um recurso disponível em alguns processadores, o qual permite capturar o valor do contador sempre que um determinado evento ocorrer na entrada especificada pela programação.

TÉCNICAS DE CONTROLE

A arquitetura de controle de um robô pode ser do tipo tradicional, baseada em comportamentos, reativa ou híbrida.

- **Arquitetura Tradicional**

Nas arquiteturas tradicionais, inicialmente os dados são coletados de todos os sensores de maneira que seja possível construir um modelo consistente do “mundo real”. Este modelo deve incluir informações a respeito das dimensões, formas, posições e orientações de todos os objetos presentes na área de operação do robô móvel. Na maioria das vezes, o modelo ou mapa do “mundo” é programado na memória do robô antes que ele entre em funcionamento, o que torna a sua operação limitada àquele ambiente que ele “conhece”. Neste caso, os sensores são utilizados apenas para localizar em que ponto do mapa o robô se encontra. Uma vez disponível o modelo do “mundo” de operação do robô, ele passa a utilizá-lo para planejar seqüências de ações que têm por objetivo final executar uma determinada tarefa. Por fim, o plano formulado é executado enviando os comandos apropriados para os atuadores.



Arquitetura tradicional para o controle de robôs móveis

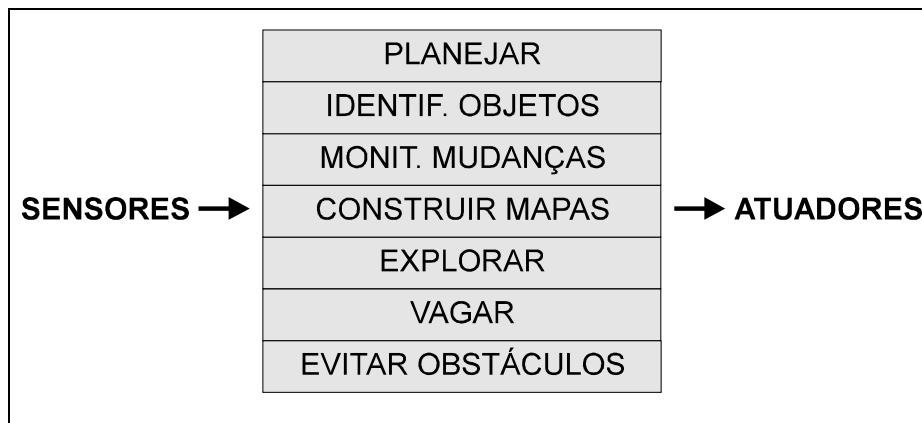
Os problemas associados com esta arquitetura são:

- Requer alta capacidade computacional para processamento dos dados obtidos dos sensores a fim de gerar o modelo do mundo, e grande capacidade de memória para armazenar os resultados obtidos.
- Para que se tenha um planejamento confiável é necessário que se tenha um modelo muito preciso do mundo, o que requer sensores de alta precisão e calibragem cuidadosa, o que é caro e nem sempre possível.
- Dado que se tem um modelo do mundo, pode-se fazer um planejamento de ações e então executá-las. Porém se o processo de planejamento for demasiado lento e o mundo sofrer alguma modificação, quando o robô for executar as ações planejadas ele não obterá sucesso. Quanto maior o tempo devotado a resolver conflitos entre os dados dos sensores, a refinar o modelo do mundo e a otimizar o planejamento, maior o tempo entre o sensoramento e a ação.

- **Arquitetura Baseada em Comportamentos**

Comportamentos são camadas de um sistema de controle que trabalham em paralelo sempre que são disparadas pelos sensores apropriados. Cada comportamento, é composto por um ou mais módulos, que são freqüentemente denominados de *agentes*.

Utilizando uma técnica de controle clássica o robô tenta utilizar as informações dos diversos sensores para montar um modelo do “mundo real”, que será utilizado para o planejamento das ações. No caso de uma abordagem baseada em comportamentos, o robô passa a reagir às mudanças do ambiente (os sensores acionam os diversos comportamentos), sem a necessidade de uma representação do “mundo real”. Dessa forma, verifica-se que a utilização de uma técnica de controle tradicional implica um hardware mais poderoso do que no caso de se utilizar uma técnica de controle baseada em comportamentos, uma vez que nesta última dispensa-se o processamento necessário para a construção do modelo e o planejamento de ações.



Arquitetura baseada em comportamentos

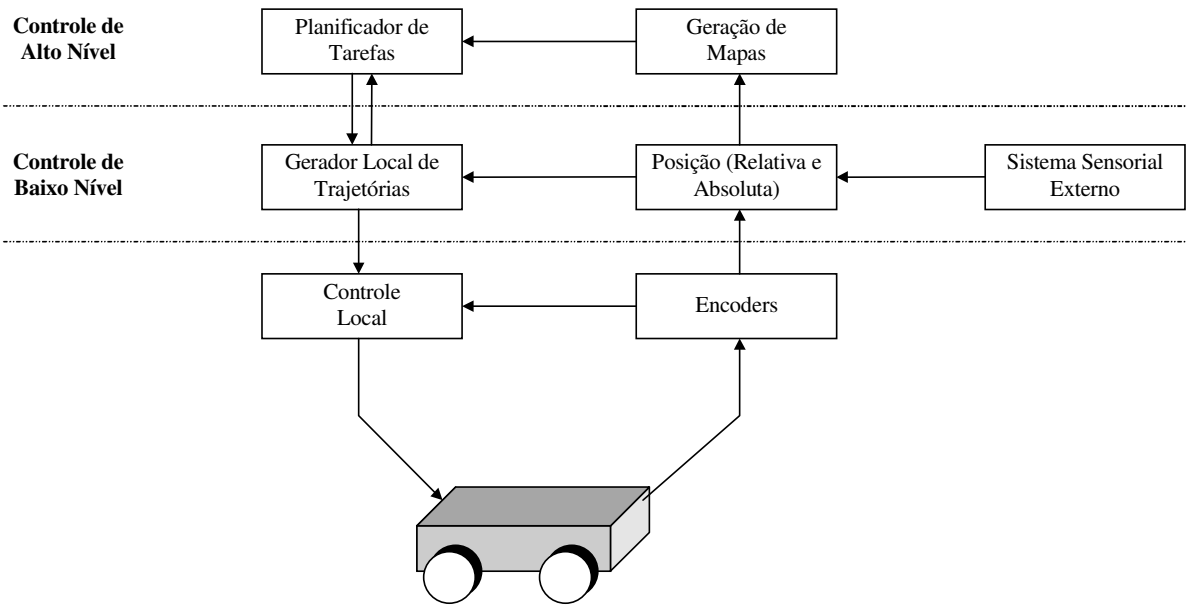
Em uma arquitetura de controle baseada em comportamentos, não existe a noção de um comportamento chamando um outro comportamento como uma sub-rotina. Ao contrário, todos os comportamentos são executados em paralelo, no entanto, comportamentos de níveis mais altos têm o poder de suprimir temporariamente comportamentos de níveis inferiores. Quando os comportamentos de níveis mais altos não estão mais sendo disparados por uma dada condição sensorial, eles param de suprimir os comportamentos de níveis inferiores e estes assumem o controle. Dessa forma, essas arquiteturas são inerentemente paralelas e os sensores interagem diretamente com todas as camadas de comportamentos. Cada comportamento por sua vez, interage diretamente com os atuadores. Nas arquiteturas baseadas em comportamentos não existem estruturas de dados unificadas ou modelos do “mundo geométrico”. Isto permite que estas arquiteturas de controle possam ser implementadas utilizando recursos computacionais mais simples do que no caso das arquiteturas de controle clássicas. As arquiteturas baseadas em comportamentos também permitem que novas camadas de comportamentos possam ser adicionadas ao sistema sem que haja a necessidade de reconfigurá-lo. Enquanto em uma arquitetura de controle clássica existe o problema de dados sensoriais conflitantes, em uma arquitetura de controle baseada em comportamentos este problema é substituído pelo problema dos comportamentos conflitantes, ou seja, substitui-se a fusão sensorial pela fusão de comportamentos.

Entretanto, as arquiteturas de controle baseadas em comportamento apresentam os seguintes problemas:

- Problemas ao arbitrar os diversos comportamentos que compõem estes tipos de arquiteturas, ou seja, trata-se de que o robô escolha, de seu repertório de comportamentos, o conjunto mais apropriado de ações motoras para satisfazer as metas que deve alcançar e responder a estímulos externos. No entanto, por incorporarem memória e pré-processamento dos sinais fornecidos pelos sensores, as arquiteturas baseadas em comportamentos podem evitar a ocorrência de conflito de comportamentos.
- Problemas na incorporação de novos comportamentos, pois à medida que se incorporam novos comportamentos, a complexidade do sistema aumenta. Portanto, no momento de incorporar um novo comportamento ao sistema, deve-se ter em conta tanto as ações de controle que realizam os níveis de comportamento inferiores como as saídas que eles produzem sobre os atuadores.
- Problemas na especificação de objetivos, já que estes tipos de arquitetura são fechadas, no sentido de que todas as funções do robô estão, de certa forma, pré-programadas. O sistema está projetado de tal forma que é difícil para um usuário definir de uma maneira flexível a série de tarefas que o robô deve realizar.

As arquiteturas reativas, da mesma forma que as baseadas em comportamentos, são distribuídas e se compõem de um conjunto de comportamentos que trabalham concorrentemente, sem necessidade de um planejador. No entanto, em contraste com as arquiteturas baseadas em comportamentos, as arquiteturas reativas são menos “poderosas”, pois as baseadas em comportamentos incorporam memória e um pré-processamento do sinal sensorial. Um sistema reativo, portanto, executa tarefas de baixo nível, assegurando a “sobrevivência” do robô.

As arquiteturas de controle híbridas apareceram mais recentemente. Elas foram desenvolvidas com o objetivo de superar as limitações próprias das arquiteturas de controle consideradas anteriormente. As arquitetura de controle híbridas integram considerações de controle clássico (alto nível) e de controle baseado em comportamentos (baixo nível) em uma estrutura coerente: um sistema reativo executa tarefas de baixo nível e um planejador estabelece tarefas de mais alto nível. Estas arquiteturas dividem o sistema em duas ou mais partes independentes que se comunicam entre si. Os processos de baixo nível se encarregam da integridade do robô em cada instante, enquanto que o planejador seleciona uma série de ações a executar no futuro em função da tarefa designada. Esta estrutura de controle é descrita na figura a seguir.



- **Exemplos de Implementação de Comportamentos**

Abaixo estão descritas estruturas de controle que realizam dois comportamentos: um chamado "estacionar" para permitir a um robô um engate com uma tomada de recarregamento de baterias, sendo guiado por sensores de infravermelho localizados junto à tomada, e outro comportamento chamado "evitar", que permita ao robô desviar de possíveis obstáculos detectados por sensores de ultra-som.

O módulo *evitar* contém o código que implementa um simples comportamento reflexivo. Se a distância lida pelos sensores ultra-sônicos à frente do robô indica uma distância muito pequena, o comportamento *evitar* pára o movimento do robô nesta direção. Se um obstáculo for detectado em outra direção, o comportamento *evitar* gira o robô até que o sensor traseiro tenha a menor leitura de distância, e então manda o robô seguir em frente. Se todos os sensores indicam uma distância maior que um determinado valor, o comportamento *evitar* não faz nada.

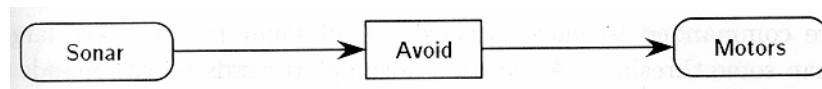


Diagrama de blocos representando o módulo evitar [6].

O comportamento *estacionar* é responsável por levar o robô até uma estação de recarga sempre que o nível de carga das baterias cair abaixo de um certo limiar. Neste caso, os dados dos sensores ultra-sônicos, infravermelhos e do indicador de nível da bateria são utilizados como entrada para que o comportamento *estacionar* possa atingir seu objetivo. Quando o nível da bateria cai abaixo do limiar estabelecido, o comportamento é ativado, e utilizando os detectores infravermelhos para localizar a estação de recarga, que por sua vez está marcada por emissores infravermelhos, e os sensores ultra-sônicos para evitar obstáculos, exceto a estação de recarga, o comportamento *estacionar* envia os comandos apropriados para os atuadores do robô.

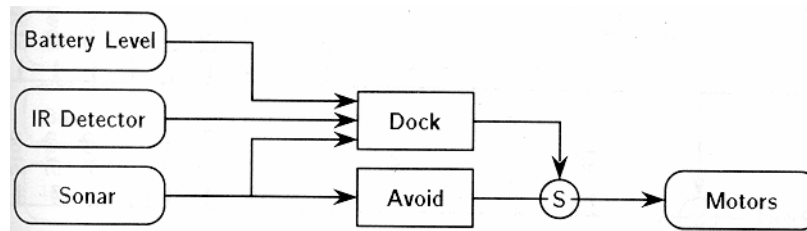


Diagrama de blocos representando o comportamento estacionar [6].

- **Linguagens para Programação de Comportamentos**

Pode-se utilizar qualquer linguagem que permita programar a execução de várias tarefas em paralelo. Alguns exemplos de tais linguagens são Interactive C (IC), *concurrent C* e C++. A vantagem de se utilizar IC para programar arquiteturas de controle baseadas em comportamento consiste exatamente no fato de que ela suporta um ambiente multi-tarefa, já dispondo de facilidades para manipulação de processos e a disponibilidade de um *scheduler*, o que libera o programador de ter de se preocupar de prover mecanismos para que os comportamentos devolvam o controle para o *scheduler* (*cooperative multitasking*).

Entretanto, ao ser o microcontrolador é um dispositivo inerentemente linear, não é possível criar uma arquitetura paralela nesse dispositivo, o que se pode obter na realidade é um pseudo-parallelismo, ou seja, um programa denominado *scheduler* dá exclusivo controle do processador a um processo por um breve período de tempo, e então passa o controle ao próximo processo e assim por diante. A cada processo é permitido utilizar o processador por um curto período de tempo a intervalos regulares, o que é conhecido como multi-tarefa.

Para implementar este "parallelismo" usando linguagem Interactive C é preciso supor uma estratégia do tipo *cooperative multitasking*: o *scheduler* consiste apenas de um loop infinito, no qual ele chama cada comportamento. Ao menos uma vez a cada loop, o *scheduler* chama uma função *Arbitrate* para passar mensagens e resolver conflitos entre comportamentos. Esta rotina poderia ser da seguinte forma:

```
void main( )
{
start_process(motor_driver( ));
start_process(vagar( ));
start_process(seguir( ));
start_process(evitar_obstaculo( ));
start_process(escapar( ));
start_process(Arbitrate( ));
}
```

É suposto que cada comportamento possui duas variáveis globais, uma para armazenar a mensagem de saída para controle dos motores e outra indicando que existe uma nova mensagem a ser enviada. Na seguinte função, que implementa uma arbitragem entre os diversos comportamentos, quando múltiplas saídas são direcionadas para a mesma entrada, as que ocorrem por último sobrescrevem (suprimem) as anteriores. Desta forma, os comportamentos de mais alto nível são colocados por último, para suprimir as saídas dos comportamentos de nível mais baixo. No exemplo

abaixo, o comportamento escapar possui o mais alto nível entre todos os comportamentos.

```
void arbitrate( ){  
while(1){  
if(flag_vagar == 1){  
entrada_motor = saida_vagar;  
}  
if(flag_segur == 1){  
entrada_motor = saida_segur;  
}  
if(flag_evitar == 1){  
entrada_motor = saida_evitar;  
}  
if(flag_escapar == 1){  
entrada_motor = saida_escapar;  
}  
}  
}  
}
```

Problemas ainda não resolvidos na área de robôs móveis

Alguns exemplos de problemas ainda não resolvidos no campo dos robôs móveis são os seguintes:

Navegação: os robôs móveis ainda têm capacidade de navegação muito limitada. Os robôs baseados em arquiteturas reativas são mais robustos e computacionalmente mais simples do que os que se baseiam nas arquiteturas de controle clássicas, no entanto muitos se perguntam que tipo de atividade prática eles podem realizar, ou ainda, consideram-nos pouco flexíveis. Será que não é realmente necessário que o robô disponha de um modelo do mundo? Será que a fusão sensorial pode ser realmente dispensada? Uma possível resposta a estas perguntas são as arquiteturas de controle híbridas, que tentam extrair o que de melhor existe nas arquiteturas de controle clássicas e baseadas em comportamentos.

Reconhecimento: o reconhecimento de marcas naturais em ambientes não estruturados é um desafio que limita o desenvolvimento das arquiteturas de controle clássicas. Além disso, o reconhecimento de objetos permitiria uma maior flexibilidade na operação dos robôs móveis (o desempenho de novas tarefas ou a criação de novos comportamentos).

Aprendizagem: a utilização de algoritmos de aprendizagem se apresenta como uma alternativa aos programas cada vez mais complexos, necessários ao aumento da capacidade de operação dos robôs móveis. Mas que tipo de coisas seria interessante para um robô aprender? Poderia um robô aprender a calibrar os seus sensores? Poderá um robô aprender comportamentos novos ou mais eficientes?

Robôs Miniatura: a construção de robôs cada vez menores, até se chegar ao ponto de um robô que consista em um único chip, contendo processador, memória, sensores, atuadores e baterias é uma das áreas em que se têm envidado esforços constantes e alguns progressos têm sido obtidos. Uma vez amadurecida, esta tecnologia permitirá a construção de robôs muito mais baratos.

Cooperação: Com o barateamento da construção de robôs, e a possibilidade de se construir robôs com um único chip, pode-se começar a pensar em colônias de robôs que

trabalhando em cooperação possam cumprir tarefas que um único robô não poderia executar, ou executá-la de forma mais eficiente. No MIT, existem pesquisas a esse respeito. Lá, um exercito de pequenos robôs foram programados para executar uma mesma tarefa. A medida que iam progredindo, o seu programa de controle associava uma idéia de recompensa, como um animal que recebe comida ao aprender um truque. De alguma forma, os robôs “perceberam” que trabalhando em conjunto os resultados eram maiores e eles recebiam mais “recompensa”. Um outro exemplo de cooperação, é o campeonato de futebol de robôs, que mais do que uma brincadeira, é um verdadeiro laboratório de robótica.