

# Tópicos introdutórios sobre robôs móveis

Luís Correia

Departamento de Informática - Faculdade de Ciências  
Universidade de Lisboa

25 de Setembro de 2006

## 1 Introdução

Apresentam-se conceitos básicos de robótica móvel, para iniciação ao tema. Os aspectos abordados limitam-se tendencialmente àqueles relacionados com as características de robôs de interior, simples, com rodas e de baixo custo. Descrevem-se sensores e actuadores simples, a que se junta uma breve iniciação ao controlo. Espera-se que este documento seja suficiente para permitir suportar a elaboração de experiências de iniciação à robótica móvel. É de realçar que se apontam apenas algumas das soluções mais usuais. Há muitas outras possibilidades de obter sensores baratos e, possivelmente, mais adaptados às necessidades de cada robô, com soluções imaginativas.

O principal livro de base usado como suporte a este texto é (Martin, 2000). A seguir ao título de cada secção indicam-se as partes do livro relevantes para o tema. Conceitos mais avançados podem ser explorados com recurso à bibliografia apresentada.

## 2 Sensores (Cap. 3)

### 2.1 Interruptor com mola (3.3)

Este é, certamente, o sensor mais simples que se pode conceber. Consiste, como o nome indica, num interruptor com uma mola. A mola mantém o interruptor normalmente desligado. Mas quando ele é pressionado liga. É um sensor de contacto, porque necessita de um contacto físico para detectar algo.

Os sensores de contacto são principalmente usados como sensores de colisão. Quando o robô toca em algum objecto, com um interruptor com mola, recebe um sinal binário assinalando a colisão. Muitas vezes estes sensores têm hastes presas, e situam-se na frente do robô, recebendo então a designação de “bigodes de gato” (*whiskers*).

### 2.2 Fotosensor (3.4.1)

Os fotosensores são sensores passivos (não emitem qualquer sinal para o ambiente) sensíveis à luz visível que incide sobre eles. Por vezes também se designam por células foto-eléctricas. Normalmente são capazes de dar uma resposta

variável numa determinada gama de valores, conforme a luminosidade detectada. Têm diversos usos: como detectores de luminosidade ou em sensores de interrupção de feixe. Neste último caso, estão acoplados a um emissor de luz e detectam a situação em que um objecto interrompe esse feixe de luz.

Há alguns sensores deste tipo que funcionam em infra-vermelhos. Permitem detectar a presença de pessoas, através do calor emitido pelo corpo humano.

### 2.3 Infra-Vermelhos activo (3.6.1 e 3.6.4)

É um caso particular de opto-sensores reflexivos. Têm dois componentes, um emissor e um receptor, ambos de radiação infra-vermelha, ou seja, de luz não visível, colocados no mesmo plano (fig. 1). O emissor produz um sinal infra-vermelho direccionado que é reflectido por obstáculos que se encontrem em frente e essa reflexão é captada pelo receptor. É utilizado, normalmente, como sensor de distância. Através da amplitude do sinal recebido é possível determinar a distância a que se encontra o obstáculo. É considerado um sensor activo, porque necessita perturbar o ambiente (emitindo radiação), ao contrário dos sensores passivos, que se limitam a ler grandezas físicas.

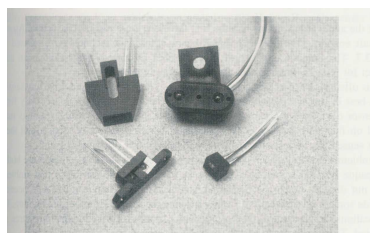


Figura 1: Sensores de infra-vermelhos activos.

Tal como a luz visível, os infra-vermelhos também não se reflectem igualmente em todas as cores e superfícies. Em particular, superfícies escuras e com acabamento mate reflectem muito pouco e, portanto, são detectadas com dificuldade por estes sensores. Além disso também são influenciados pela luz ambiente, natural e artificial, que têm quase sempre uma componente significativa de infra-vermelhos. É por isso um tipo de sensor que não consegue garantir uma precisão constante. Tem ainda um alcance limitado a cerca de 1m, para o caso de sensores bastante potentes. No entanto, dado o seu baixo custo e simplicidade de utilização, continua a ser uma solução muito vulgar.

### 2.4 Sensores de interrupção de feixe (3.7)

Este tipo de sensores não é mais do que uma adaptação do anterior. Neste caso, o emissor e o receptor, em vez de ficarem no mesmo plano, ficam colocados em frente um do outro. O receptor recebe continuamente a emissão, excepto quando se interpõe um obstáculo. Daí que se denominem de interrupção de feixe. Quando o feixe de raios infra-vermelhos é interrompido, detecta-se a presença de um objecto. É muitas vezes usado entre dois dedos de pinças de braços robóticos, para indicar que existe um objecto pronto a agarrar. Também pode ser usada, para o mesmo efeito uma montagem convencional (emissor e receptor co-planares, acoplados) frente a um reflector.

## 2.5 Codificadores de rotação (3.8)

Os codificadores de rotação são um caso particular de aplicação dos sensores de interrupção de feixe. Uma tira opaca, colada radialmente num eixo, ao interromper o feixe permite contar as rotações que o eixo faz. Normalmente, em vez de uma tira usa-se um disco com vários sectores radiais opacos intercalando outros transparentes, o que permite contar arcos de volta, aumentando a precisão do sensor (fig. 2). Quando usados em eixos de motores de rodas de um robô, permitem calcular distâncias percorridas e até trajectórias (ao virar, a roda externa da curva anda mais do que a interna).

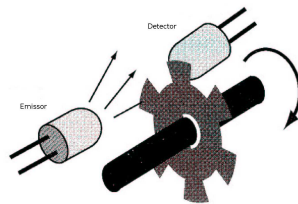


Figura 2: Codificadores de rotação (adapt. de Martin, 2000).

A medição de distâncias percorridas, ou de trajectórias recorrendo exclusivamente aos sensores próprios do robô denomina-se *odometria*. É um método simples, barato e quase sempre disponível. Tem a desvantagem de acumular erros (por derrapagem das rodas), o que torna inviável a representação de trajectórias grandes. No entanto, se for possível calibrar a posição do robô com frequência, este é um método de cálculo de posição do robô, navegação, que se pode revelar muito útil, precisamente por não necessitar de qualquer ajuda externa.

## 2.6 Ultra-sons

Já vimos que a medição de distâncias pode ser levada a cabo por sensores activos de infra-vermelhos. Uma alternativa é a utilização de sensores baseados em ultra-sons. São também sensores activos, mas neste caso usam ondas de pressão, ao contrário dos infra-vermelhos, que funcionam por radiação electromagnética. Estas ondas são em tudo semelhantes a ondas sonoras, só que usam frequências mais elevadas do que o ouvido humano está preparado para detectar. Por outro lado, como são ondas muito mais lentas, o processo de medição não é baseado na amplitude da onda recebida (o que sucede nos sensores de infra-vermelhos). Aqui, calcula-se a distância ao objecto mais próximo (na direcção para onde o sensor está orientado) a partir do tempo de ida e volta de um impulso sonoro.

É um tipo de sensores com um alcance maior do que os infra-vermelhos. Distâncias superiores a 2m são facilmente atingíveis mesmo por sensores muito básicos. São menos sensíveis ao ruído ambiente, mas têm limitações na precisão. Visto que são baseados em ondas de pressão, todos os materiais que absorvam bem o som reflectem muito pouco a onda de pressão e alteram significativamente as distâncias medidas. Por exemplo, cortinados espessos são virtualmente indetectáveis. Têm também uma dimensão relativamente grande, o que inviabiliza

a sua utilização em robôs de pequena dimensão. Em robôs de dimensão média são por vezes usados em conjunto com sensores de infra-vermelhos, aumentando bastante as capacidades de detecção de obstáculos do robô, visto que se complementam bastante bem.

## 2.7 Flexo-sensores (3.5.1)

Para medir flexão ou torção de partes flexíveis do robô pode usar-se um tipo de sensores, denominado flexo-sensores. Têm, normalmente, a forma de uma tira flexível, que não é mais do que uma resistência eléctrica. Ao dobrar a tira a respectiva resistência eléctrica altera-se, permitindo medir a deformação sofrida. São úteis, em robôs móveis, para sensores de contacto ou de medição de esforços significativos em alguma zona da morfologia do robô.

## 2.8 Outros

Se não nos limitarmos aos sensores de baixo custo e baixo consumo de energia, há muito mais possibilidades de melhorar a percepção de um robô. Podem referir-se, como alguns dos mais importantes, a Visão (pode ser estereoscópica), o “laser” (para medição de distâncias), GPS, o sistema de navegação inercial e sensores de odor, entre outros.

# 3 Actuadores (Cap. 4)

Os robôs móveis precisam actuar sobre o mundo. Para o fazer, usam actuadores, que, em geral, são motores eléctricos. Há essencialmente dois tipos de motores, que vamos analisar.

## 3.1 Motores DC (4.1)

A designação de motores “DC” decorre de serem motores de corrente contínua (*Direct Current*). Uma corrente contínua passa por espiras de cobre, e cria um campo magnético que interage com magnetos fixos. As forças geradas fazem girar o eixo do motor. É tipicamente usado em automóveis de pistas eléctricas, por exemplo.

Nestes motores, alimentados a uma tensão constante, a intensidade da corrente eléctrica é proporcional ao trabalho que o motor está a realizar. Isto significa que, quando a resistência é demasiado grande, o motor pára e consome o máximo de corrente. Esta característica é usada em robótica, para determinar situações em que um actuador se encontra bloqueado (ou impedido de completar o seu movimento). Por outro lado, este tipo de motores é pouco usado isoladamente (sem controlo auxiliar), precisamente por não garantir velocidade constante. Os motores descritos na secção seguinte ultrapassam essa limitação.

## 3.2 Servo-motores (4.4)

Os motores DC, acoplados a um conjunto de engrenagens reductoras, um codificador de rotação e electrónica de controlo da posição do motor, designam-se por *servo-motores*. O prefixo *servo* designa a capacidade de auto-regulação de

todo o sistema, que permite manter a posição do motor, com uma precisão relativamente elevada.

Este tipo de motores é muito comum em modelismo (para a direcção de automóveis, ou “flaps” de aviões, por exemplo). Quando o curso de rotação é limitado (a  $180^\circ$ , por exemplo) é fácil adaptá-los para permitir rotação contínua. Obtém-se assim um motor que pode ser usado para locomoção, com odometria (ver 2.5).

### 3.3 Engrenagens redutoras (4.2)

Os motores DC têm, tipicamente, uma velocidade muito elevada e um binário<sup>1</sup> muito reduzido. De modo a serem úteis em robôs é normalmente necessário que produzam mais força e tenham uma velocidade mais reduzida.

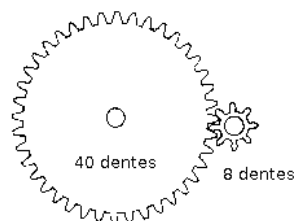


Figura 3: Uma redução de 5:1 (roda pequena de entrada).

Para esse efeito, usam-se engrenagens de rodas dentadas. Escolhendo adequadamente as dimensões (e número de dentes) de cada roda dentada é possível converter binário e velocidades. Por exemplo, uma roda com 8 dentes engrenada numa roda maior, com 40 dentes, realiza cinco voltas, para cada volta da roda maior (fig. 3). Diz-se que há uma redução 5:1 (cinco para um). Se a roda menor estiver no eixo de rotação do motor, então a roda maior tem um binário 5 vezes superior ao da roda menor e tem uma velocidade de rotação 5 vezes inferior. Podemos ainda fazer montagens em cadeia deste tipo de engrenagens, com efeito multiplicativo. Duas reduções em cadeia, de 3:1, são equivalentes a uma redução de 9:1.

## 4 Noções básicas de Controlo (Cap. 5)

O controlo de motores, em posição e velocidade (ou mesmo em aceleração) é complexo, sobretudo quando as massas envolvidas (do robô e dos motores) são importantes. No entanto, este problema já é resolvido, em muitos sistemas, pela electrónica associada aos motores, ou à base do robô. Do ponto de vista da programação podemos preocupar-nos apenas com o controlo de decisão do robô. No entanto é conveniente descrevermos algumas noções básicas de controlo, que podem ser úteis para ajudar a programar o controlo de decisão.

Suponhamos um servo-motor que deve manter uma posição. Se desviarmos o motor da sua posição (manualmente), o sistema de controlo deve compensar, ou seja, fazer rodar o motor para a posição inicial. Esta compensação será

<sup>1</sup>Binário é uma medida da força que um motor de rotação é capaz de desenvolver (mede-se em N.m - Newton metro).

tanto mais rápida quanto maior for a velocidade a que o motor rodar, ou seja, a potência aplicada ao motor (controlo *Proporcional*). Mas é fácil de imaginar que, se a potência aplicada for muito elevada, é possível que o motor passe pela posição nominal por excesso (sobrecompensação, ou ganho muito elevado).

Para compensar a sobre-compensação, por efeito de ganhos muito elevados no controlo Proporcional, junta-se uma componente ao controlo que diminui a potência de compensação, proporcionalmente à velocidade observada no motor (componente *Diferencial*, porque a velocidade é a derivada da posição, em ordem ao tempo). Este factor permite estabilizar mais rapidamente a convergência para a posição final do motor.

Por fim, pode juntar-se ainda uma componente que observa a posição estável do motor e a compara com a desejada. Quando existe um pequeno erro entre as duas, esta componente soma-o ao longo de um intervalo de tempo e aí produz um pequeno impulso de potência no sentido de corrigir essa pequena diferença de posição (componente *Integradora*).

Um controlador com estas três componentes, Proporcional, Integral e Diferencial, diz-se um controlador *PID*. Este tipo de controlo só se torna imprescindível se o robô tiver uma massa muito elevada ou se pretendermos que ele opere a velocidades elevadas. No entanto os princípios destes controladores são importantes para a programação do controlo de decisão.

## 4.1 Controlo Reactivo (5.4)

O controlo de decisão diz respeito a seleccionar uma de diferentes acções que o robô pode realizar, em função de alguns parâmetros.

Quando usamos um processo de controlo em que as acções são constantemente decididas em função das percepções obtidas pelos sensores do robô diz-se que o controlo é reactivo. É sobre este tipo de controlo que nos vamos deter com mais algum cuidado.

Em muitos modelos, bem sucedidos, subdivide-se o controlador do robô em diversos módulos, denominados *comportamentos*, responsáveis por aspectos específicos do controlo de decisão. Como os comportamentos têm, em geral, um funcionamento independente uns dos outros, é necessário um mecanismo para produzir o comando para os actuadores, em função das saídas dos vários comportamentos. Este processo de decidir o comando final designa-se por *arbitragem*. É a estes dois aspectos que se dedicam os parágrafos seguintes desta secção.

### 4.1.1 Veículos Braitenberg (2.4)

Vamos começar por analisar o modelo mais simples de controlo de decisão, em que existe uma ligação “directa” entre os sensores e os actuadores. Denominam-se veículos Braitenberg por a ideia ter sido apresentada originalmente por Valentino Braitenberg no interessante livro (Braitenberg, 1984). A figura 4 representa simbolicamente dois desses veículos e uma fonte de luz. Cada robô tem apenas dois fotosensores e considera-se que existe um motor associado a cada roda. Consideremos o caso do veículo da fig. 4A. Como o sensor mais próximo da luz é o da direita, produz um sinal maior do que o sensor da esquerda. Visto que cada sensor está ligado ao motor da roda do mesmo lado, neste caso a roda direita vai andar mais depressa do que a esquerda. Consequentemente, o robô vai virando para a esquerda, afastando-se da luz.

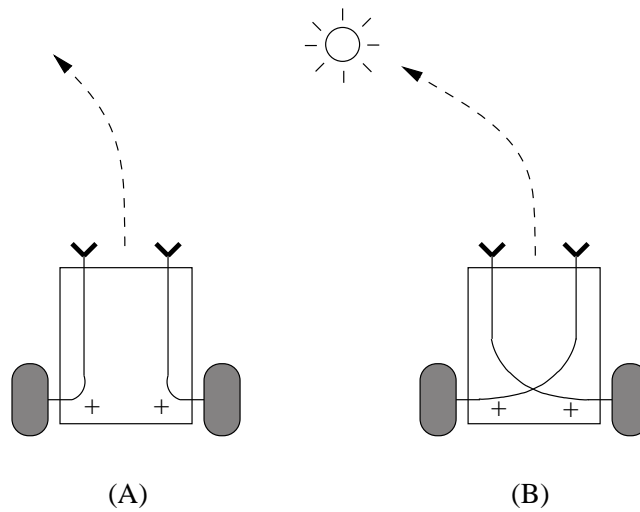


Figura 4: Veículos Braitenberg face a uma fonte de luz. (A) Veículo que “tem medo” da luz. (B) Veículo que “ataca” a luz.

O robô da fig. 4B tem uma única diferença, face ao anterior, que é trocar as ligações entre os sensores e as rodas. Aplicando o mesmo tipo de raciocínio, verifica-se que este robô se aproxima da luz. Vai andando cada vez mais depressa até passar pela luz. A partir daí diminui a velocidade.

Este tipo de montagens pode ser feito com vários tipos de sensores simultaneamente, dando origem a comportamentos complexos do robô. No entanto o processamento, ou a tomada de decisão, não existem, em modelos tão simples. Em seguida vamos ver como podemos incluir a decisão, mantendo os robôs simples.

#### 4.1.2 Comportamentos

Um *comportamento* é um módulo de “software” que produz acções, para um ou mais motores, em função dos dados dos sensores e do estado interno do robô. O controlo de decisão de um robô será tipicamente composto por um conjunto de módulos independentes que, em conjunto, produzem o comportamento global do robô.

Tomemos um exemplo de um comportamento elementar e essencial em qualquer robô móvel, que é um comportamento de Evitar Obstáculos (EO). Suponhamos ainda um robô com locomoção do tipo automóvel (rodas motoras e direcção independentes) com dois sensores frontais de distância, um orientado ligeiramente para a esquerda (sensor-E) e outro ligeiramente para a direita (sensor-D). Um comportamento possível seria (em pseudo-código):

```
Comportamento Evitar Obstáculos
  se sensor-E ou sensor-D detecta obstáculo próximo então
    pára
    recua
  enquanto sensor-E detecta obstáculo então
    vira à esquerda
```

```

    enquanto sensor-D detecta obstáculo então
      vira à direita
    pára
  senão
    se sensor-E detecta obstáculo então
      vira à direita
    se sensor-D detecta obstáculo então
      vira à esquerda

```

Vejamos alguns comentários sobre o comportamento. Em primeiro lugar, é de notar que este comportamento só é necessário se o robô estiver a avançar.

Há uma primeira parte que avalia se existe algum obstáculo frontal próximo. Se existir, pára o robô e depois recua (mudar de avançar para recuar pode ser muito brusco para os motores). Enquanto recua, vira a direcção para o lado em que detecta o obstáculo. Visto que a locomoção é do tipo automóvel, a frente do robô vai afastar-se do obstáculo. Quando este deixar de ser detectado pára o robô.

A segunda parte do comportamento só entra em acção se a 1ª parte não tiver sido activada e desvia-se apenas dos obstáculos, virando a direcção para o lado contrário ao obstáculo.

Repare-se que este comportamento pode funcionar isoladamente ou em conjunto com outros comportamentos. Se estiver isolado, o robô, não tendo outros comportamentos, está parado. Se aproximarmos um obstáculo do robô, quando o obstáculo estiver suficientemente próximo, observamos o robô a recuar e afastar a frente do obstáculo, até não o detectar mais. Nessa altura pára, retomando o estado em que estava inicialmente.

Se existirem mais comportamentos, este EO vai deixar o robô parado após evitar um obstáculo próximo. Mas isso não é um problema, porque outros comportamentos enviarão comandos de locomoção para retomar a marcha, em função dos sensores e respectivos estados. No de múltiplos comportamentos é necessário entrar em conta com a selecção da acção a enviar para os motores. Este problema é tratado adiante (em 4.1.4).

### 4.1.3 Padrões de Acção Fixos

Há um tipo de comportamentos, muito básico, que é útil considerar para situações tipificadas. São os comportamentos em que apenas existe uma monitoração inicial dos sensores. A partir do momento em que o comportamento é desencadeado, apenas se realiza um conjunto de acções sem monitoração sensorial. Chamam-se Padrões de Acção Fixos (PAF).

Como exemplo podemos tomar um comportamento de reposicionamento constituído pela seguinte sequência de acções: parar, rodar 180°, andar em frente. Estes comportamentos permitem realizar, de uma maneira simples, sequências de acções mais ou menos complexas. O facto de não serem monitorados pelos sensores desaconselha o seu uso em situações em que se deve garantir precisão na acção ou sucesso na sua realização. Mas em muitos casos podemos usar PAF, ou seja, não precisamos garantir exactamente o resultado correcto do sistema.



#### 4.1.4 Selecção de Acções

Há diversas maneiras de seleccionar quais os comandos a enviar para os motores, em arquitecturas de controlo com comportamentos. As mais habituais são a arbitragem e a combinação de acções.

A arbitragem pressupõe que, a cada comportamento, esteja associada uma prioridade. O mecanismo de selecção pura e simplesmente verifica, sequencialmente, a partir do comportamento mais prioritário, se um comportamento está activo. Se estiver é essa a acção enviada para o motor respectivo, senão passa ao comportamento seguinte em prioridade. É um processo de selecção muito simples e que permite resolver todos os problemas de selecção de acção, mas sem garantir optimização da selecção.

A combinação de acções tenta produzir uma acção que concilie as saídas de todos os comportamentos activos. Estes podem também estar prioritizados e, neste caso, a prioridade funciona como um peso que pondera a importância da acção produzida pelo comportamento. É um processo de selecção de acções que, embora ligeiramente mais complexo que o anterior, pode garantir uma selecção óptima da acção.

## 5 Nota final

Este documento apresenta apenas uma síntese de alguns aspectos mais importantes que permitam uma primeira abordagem aos robôs móveis. Em todos os assuntos, se limitou a apresentação ao essencial. Sendo pouco para trabalho em profundidade, deverá ainda assim dar pistas para como tratar os robôs e, sobretudo, deve ficar claro que existem muitas soluções alternativas, para sensores e actuadores, mas sobretudo para o controlo de decisão dos robôs. A imaginação pode ser muito produtiva em encontrar novas soluções.

## 6 Bibliografia

- Fred G. Martin, *Robotic Explorations: A Hands-On Introduction to Engineering*, Prentice Hall; 2000.
- Joe Jones, Daniel Roth, *Robot Programming : A Practical Guide to Behavior-Based Robotics*, McGraw-Hill/TAB Electronics; 2003.
- Joseph L. Jones, Anita M. Flynn, Bruce A. Seiger, *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*, AK Peters, Ltd.; 2nd edition, 1998.

### 6.1 Ligações

- Material de uma disciplina do MIT (ver em “Lecture Notes”, “Study Materials”) - <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-270January-IAP-2005/CourseHome/index.htm>
- Exemplos de construção de dispositivos com o Lego Mindstorms - <http://constructopedia.media.mit.edu/search.asp?catg=0&subcatg=0>
- Material de acompanhamento do livro “Introduction to Autonomous Mobile Robots” - <http://autonomousmobilerobots.epfl.ch/>

- Simulador do robô Khepera - <http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/khep-sim/>
- Simulador Webots (comercial, mas com uma versão para teste) - <http://www.cyberbotics.com/products/webots/>
- Simulador PlayerStage - <http://playerstage.sourceforge.net/>
- NetLogo, ambiente de programação de multi-agentes e visualização gráfica em linguagem Logo - <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

## **Bibliografia Avançada**

- Ronald C. Arkin, Behavior-Based Robotics, The MIT Press, 1998.
- Valentino Braitenberg, Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology, MIT Press, 1984.
- Luís Correia, Veículos autónomos baseados em comportamentos - um modelo de controlo de decisão; Tese de doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 1995.
- Gregory Dudek, Michael Jenkin, Computational Principles of Mobile Robotics, Cambridge University Press; 2000.
- Robin R. Murphy, An Introduction to AI Robotics, The MIT Press; 2000.
- Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, MIT Press, 2004.