

# Uma Viagem ao Mundo dos Robots

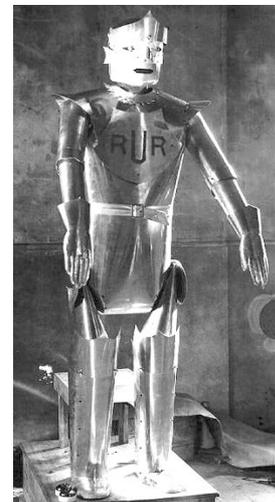
**Maria Isabel Ribeiro**

Instituto de Sistemas e Robótica  
Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais, 1  
1049-001 Lisboa  
mir@isr.ist.utl.pt

## Introdução

A palavra *robot* entrou já no nosso quotidiano, mas é pertinente que perguntemos o que é um *robot* e quais são as suas origens. Desde sempre os homens sonharam com a construção de máquinas que os ajudassem no seu trabalho ou que fossem fonte de entretenimento. Um dos primeiros robots foi a Clepsidra ou relógio de água, com figuras móveis, projectado no ano 250 a.c. por Ctesibius de Alexandria, um físico e inventor grego. Leonardo da Vinci, um dos mais notáveis pintores do Renascimento, foi também um dos grandes expoentes do projecto e construção de máquinas, cujos desenhos são, em muitos casos, percursos dos sistemas actuais. Leonardo da Vinci deixou esquemas de estruturas mecânicas humanóides, de máquinas voadoras, de sistemas de propulsão de helicópteros, de máquinas engenhosas para escavar canais em rios.

A palavra *robot* tem origem na palavra checa *robota* que significa trabalho forçado ou trabalho escravo e foi usada, pela primeira vez, pelo escritor checo Karel Capek na sua peça teatral RUR, Rossum's Universal Robots, apresentada em 1921. Nesta peça, os robots eram estruturas mecânicas articuladas com aparência humana, que se rebelavam contra os seus criadores. Esta visão malévola foi modificada, algumas décadas depois, pelo escritor russo Isaac Asimov, que com os seus escritos ficcionistas revolucionários, ajudou a cimentar uma nova visão dos robots, em que estes eram apresentados como criaturas benévolas, sob controlo humano. Os robots de Asimov seguiam as Três Leis da Robótica que ele mesmo enunciou, em 1942, na sua obra *Runaround* [Asimov]:



Lei 1 – Um robot não deve fazer mal a um ser humano, ou por omissão, permitir que um ser humano sofra algum dano.

Lei 2 – Um robot deve obedecer às ordens dadas pelos humanos, excepto se essas ordens puserem em causa a primeira lei.

Lei 3 – Um robot deve proteger a sua existência desde que essa protecção não comprometa a satisfação das duas primeiras leis.

## O que é um robot ?

Embora o uso de máquinas e de dispositivos automáticos remonte a tempos antes de Cristo, o primeiro robot industrial só foi utilizado em 1961 numa fábrica da General Motors nos Estados Unidos. Era um manipulador robótico da Unimate, com a forma de um braço humano, que fazia soldadura no chassis dos automóveis na linha de montagem. Desde essa altura têm vindo a ser desenvolvidos robots, com graus de autonomia diversos, múltiplas formas e aplicações.



Figura 1 – Robots industriais

Na Figura 1 apresentam-se robots industriais com características diferentes. Os dois à esquerda são manipuladores com funções de paletização e de soldadura. À direita representam-se um AGV (*Automated Guided Vehicle*) e um LGV (*Laser Guided Vehicle*) que fazem o transporte automático de materiais em fábricas. Contrariamente aos manipuladores, que têm a base fixa, os AGVs e os LGVs movem-se em todo o ambiente de trabalho. Os AGVs seguem um conjunto de trajectórias definidas no pavimento (um fio condutor enterrado no chão ou uma faixa colorida pintada no chão) e os LGVs podem navegar por todo o espaço livre.

Os robots podem ter aspectos, dimensões e aplicações muitos diferentes das clássicas aplicações industriais como se ilustra na Figura 2. O robot Alice tem todas as componentes para ser autónomo (rodas, motores, sensores, processador) embora seja de reduzidas dimensões. A cadeira de rodas robotizada Wheellesley pode viajar de modo semi-autónomo em ambientes interiores ou exteriores estruturados. O utilizador indica a direcção pretendida para o movimento e o robot executa, sem intervenção humana, a detecção e contorno de obstáculos e o seguimento da direcção pretendida. O Roomba, da iRobot, é um robot aspirador que faz o trabalho sozinho sem partir objectos frágeis assentes no chão e sem cair pelas escadas abaixo se os seus donos viverem num duplex. O Helpmate da Pyxis Corp move-se autonomamente em hospitais transportando refeições, medicamentos e roupa suja. Deste modo liberta o pessoal auxiliar e de enfermagem para tarefas mais directamente relacionadas com os doentes. O Helpmate desloca-se ao longo dos corredores desviando-se das pessoas e de outros obstáculos fixos ou móveis e recorre ao elevador, que chama através de ligação por infravermelhos, para mudar de piso.



Figura 2 – Robots com diversas aplicações

Todos os exemplos de robots móveis apresentados movem-se através de rodas em ambientes planos. No entanto, há inúmeras aplicações em ambientes externos e irregulares em que os robots têm que ter capacidade para vencer declives elevados ou mesmo degraus o que exige estruturas articuladas de rodas, lagartas ou patas como representado na Figura 3.



RAPOSA – IdMind, ISR/IST, Portugal



Shrimp – EPFL, Suíça



QRIO – Sony, Japão

Figura 3 – Robots com diversos sistemas de locomoção

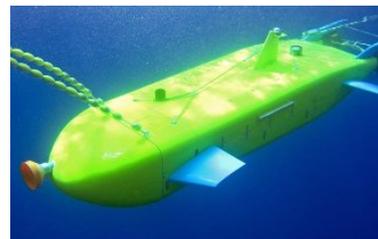
Todos os exemplos anteriores referem-se à operação em ambientes terrestres, em que a locomoção é feita em contacto com o solo. Também há robots aéreos, conhecidos como UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), embarcações autónomas que se deslocam à superfície dos oceanos e robots submarinos autónomos, os AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*), como ilustrado na Figura 4.



Helicóptero semi-autónomo – ISR/IST, Portugal



Delfim (catamarã autónomo) – ISR/IST, Portugal

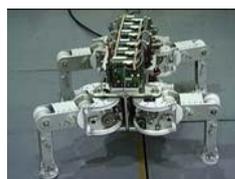


AUV Infante – ISR/IST, Portugal

Figura 4 – Robots aéreos e oceânicos (de superfície e submarinos)



ASIMO, humanóide da Honda – Japão



Titan VIII, robot com patas - Tokyo Inst. of Technology, Japão



AIBO, cão robot, Sony – Japão



Mão robótica – Univ. Colorado, USA



Paro, robot foca – AIST, Japão

Figura 5 – Robots humanóides e com forma de animais e mão robótica

Com os avanços tecnológicos recentes e o aumento das aplicações robóticas, em particular na área dos serviços, do entretenimento, do apoio a idosos e deficientes e na medicina, surgiram robots com formas antropomórficas e de animais (mamíferos e insectos) ou ainda adaptados a aumentar as capacidades sensoriais e motoras dos humanos. Na Figura 5 representam-se o humanóide ASIMO da Honda, o robot quadrúpede Titan VIII, uma mão robótica, o cão robótico

AIBO da Sony e o robot foca PARO desenvolvido pelo Intelligent Systems Institute do Japão para fins terapêuticos.

Robots construídos seguindo a mesma estrutura geral dos humanos são referidos como robots antropomórficos ou humanóides. Em ficção, os robots que não se distinguem dos humanos são vulgarmente designados por andróides. Embora os andróides estejam para além da tecnologia actual, são muito comuns robots antropomórficos ou robots com características antropomórficas. Aliás, o grande desafio da comunidade científica que participa nas competições robóticas do *RoboCup* é que em 2050, uma equipa de robots futebolistas humanóides vença a equipa humana de futebol campeã do mais recente campeonato do mundo, de acordo com as regras da FIFA.

### Definição de robot

A diversidade de exemplos apresentados permite perceber que não existe uma definição de robot que seja universalmente aceite. No entanto, há um conjunto comum de componentes que esta diversidade de robots partilha, como por exemplo sistemas de locomoção, sensores e sistemas de processamento. Assim, e de acordo com o *Robotics Industries Association*,

**um robot** é um dispositivo mecânico articulado reprogramável, que consegue, de forma autónoma e recorrendo à sua capacidade de processamento:

- obter informação do meio envolvente utilizando sensores,
- tomar decisões sobre o que fazer com base nessa informação e em informação a priori,
- manipular objectos do meio envolvente utilizando actuadores.

## Como funciona um robot móvel

Independentemente do meio (terrestre, aéreo ou submarino) em que operam, os robots móveis funcionam segundo princípios comuns e suportados num conjunto de blocos básicos. Apresentam-se esses blocos básicos e o modo como interagem entre si para que os robots executem com êxito as missões que lhes são atribuídas. Excluem-se desta análise os manipuladores, que têm base fixa e põe-se ênfase nos robots móveis terrestres.

### Sistemas de Locomoção

A locomoção é o processo que possibilita que um robot móvel ou veículo se mova. Em robots móveis terrestres a locomoção está suportada em rodas, patas, lagartas, ou combinações destas, por exemplo, rodas e patas. Uma grande maioria de robots móveis terrestres têm apenas rodas, mas mesmo assim, o seu número, tipo e localização determinam características de manobrabilidade muito diversas. Estas características são expressas no modelo cinemático do robot que relaciona as velocidades de rotação das rodas com as velocidades linear e angular do veículo num referencial global.

O robot da Figura 6-a) tem duas rodas motoras, i.e., associadas a motores, e uma roda livre para apoio da estrutura. Com velocidade igual nas duas rodas o robot desloca-se segundo uma linha recta e roda para a direita se a velocidade da roda esquerda for maior do que a da roda direita. No entanto, não pode mover-se transversalmente, ou seja, e dito em linguagem corrente, não pode andar de lado. Para andar de lado, tem que fazer manobras. O mesmo sucede quando, com o nosso automóvel (que não tem exactamente a estrutura cinemática da Figura 6-a)), pretendemos estacionar num lugar com dimensões pouco maiores do que o nosso carro. Seria desejável (mas não é possível) poder alinhar o veículo com o lugar e depois movê-lo transversalmente. Os robots com estas restrições dizem-se não-holonómicos. É também este o caso da cadeira de rodas robotizada (Figura 2), embora fosse muito útil que ela pudesse mover-se lateralmente especialmente em zonas apertadas.

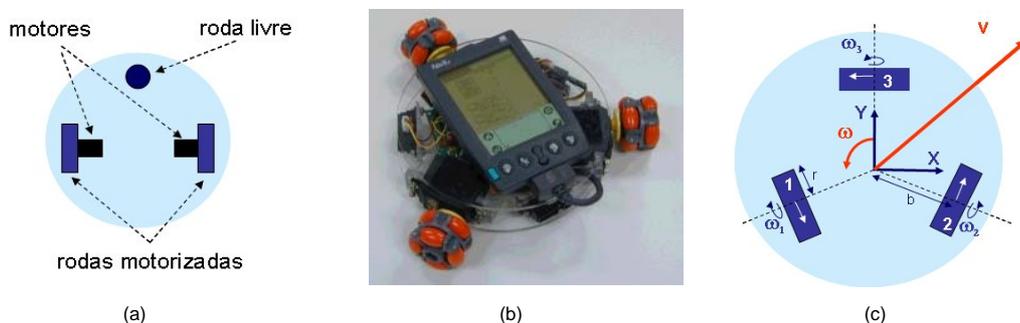


Figura 6 – a) robot não holonómico, b) robot holonómico (PalmPilot Robot Kit - CMU, USA)  
c) esquema de robot holonómico.

Por outro lado, o robot da Figura 6-b) é holonómico, i.e., pode movimentar-se em qualquer direcção e, simultaneamente, ir rodando em torno do seu ponto central. As três rodas, cada uma das quais acoplada a um motor, estão associadas a eixos que fazem entre si ângulos de  $120^\circ$  (Figura 6-c). Os oito roletes laranja inseridos no corpo da roda são passivos, i.e., não estão associados a nenhum motor, mas como rodam livremente, permitem que a roda não ofereça resistência a uma deslocação na direcção definida pelo seu eixo de rotação.

O problema do controlo de movimento deste robot é colocado do seguinte modo:

Qual deve ser a velocidade angular de cada roda ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$ ) para que o robot se movimente com uma velocidade linear  $v$  e uma velocidade angular  $\omega$  em relação ao seu ponto central?

O problema tem solução trivial para casos simples. Para que o robot rode sobre o seu ponto central com velocidade angular  $\omega$  e não tenha translação ( $v = 0$ ), todas as rodas devem ter a mesma velocidade angular,  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ . Qual será, neste caso, a velocidade angular  $\omega$  do robot? Se  $\omega_1 = \omega_2 = -0.5 \omega_3$  o robot não roda sobre o seu ponto central ( $\omega = 0$ ) mas apenas se desloca com movimento de translação segundo o eixo X indicado na Figura 6-c). Um bom exercício, que se deixa ao cuidado do leitor, é o de calcular, para este caso, o valor da velocidade de translação.

## Motores e Energia

O tipo de motores e o fornecimento de energia a todos os sistemas que dela necessitam, (motores, actuadores, sensores, computadores, sistemas de comunicações) são aspectos fundamentais no projecto de robots. Os motores mais usuais em robots móveis são eléctricos mas, por exemplo no helicóptero da Figura 4, usa-se um motor de combustão. Os sistemas de energia estão intimamente relacionados com a autonomia que se pretende para os robots e ainda com o meio em que eles actuam. O fornecimento de energia eléctrica é comum ser feito através de baterias de chumbo, de LI-Ion, de LiCD ou de LiMH, entre outras hipóteses. As habituais fontes de alimentação portáteis serão provavelmente e num futuro, substituídas por pilhas de hidrogénio. Os robots de Marte, por exemplo, usam uma fonte de energia alternativa; têm painéis solares que constituem uma fonte inesgotável de energia, durante o dia marciano.

## Percepção, Navegação e Actuação

Aos robots são atribuídas missões dependentes das aplicações para que estão vocacionados, que os tornam úteis na sua operação em sociedade. Por exemplo, “dirigir-se para a cratera Endurance, em Marte, e recolher uma amostra do solo” pode ser uma missão para um dos robots *Spirit* ou *Opportunity* que pousaram em Marte no início de 2004. A um robot de companhia (*companion robot* em designação anglo-saxónica) pode pedir-se “vai à cozinha buscar uma lata de Coca-Cola e deixa-a em cima da mesa da casa de jantar”. Um robot aéreo autónomo pode ter alocada a missão de “fazer a vigilância de uma zona costeira, percorrendo-a ao longo de trajectórias paralelas afastadas de 100 metros” e um robot futebolista pode “detectar a bola, aproximar-se dela e chutar para a baliza do adversário”.

Embora estas missões apresentem uma grande diversidade, todas são executadas, genericamente, através de um ciclo composto por

Percepção → Navegação → Actuação

O robot, com o sistema de locomoção, motores e energia move-se num ambiente total ou parcialmente conhecido ou mesmo desconhecido e que pode ser dinâmico (pode haver pessoas ou outros objectos, p.e., robots em movimento). Para o fazer de modo seguro, por exemplo, para detectar obstáculos à sua frente, tem que adquirir, analisar e interpretar informação do ambiente circundante. É a fase da **Percepção** que lhe dá conhecimento do mundo que o rodeia. A fase seguinte é a **Navegação**. O robot localiza-se e, sabendo onde está e para onde deve ir, calcula como lá pode chegar, ou seja define o caminho que deve seguir. Para o seguir de modo correcto e seguro, contornando obstáculos inesperados detectados na fase de Percepção, é preciso controlar devidamente os motores. É a fase da **Actuação**. À medida que o robot se desloca, o ambiente circundante vai sendo diferente pelo que, para o correcto funcionamento do robot, o ciclo Percepção -> Navegação -> Actuação está sempre em execução como se indica no diagrama de blocos da Figura 7.

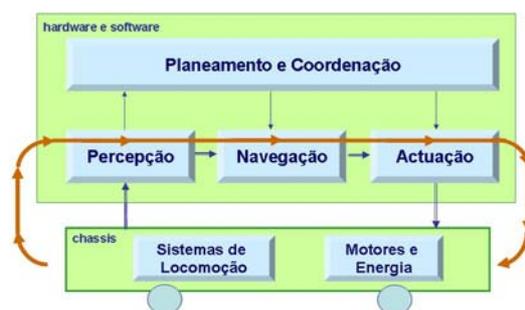


Figura 7 – Arquitectura funcional básica de um robot

O bloco de **Planeamento e Coordenação**, que é executado vulgarmente no computador de bordo, é responsável pela decomposição das missões alocadas em tarefas elementares e em acções e pela coordenação do funcionamento de todos os blocos do robot para a correcta execução das missões planeadas. Funciona como o maestro de uma orquestra cujos músicos são os blocos básicos de Percepção, Navegação e Actuação e aos quais são dadas indicações de execução (quando actuar, como actuar, etc.).

### Percepção

Há órgãos e mecanismos internos num ser humano que indicam o seu estado de saúde. Os cinco sentidos permitem, por outro lado, que nos apercebamos das características do ambiente que nos rodeia. Os robots móveis, para operarem correctamente, também precisam de ser capazes de avaliar o seu estado interno (por exemplo, o nível de cargas das suas baterias, a distância percorrida num intervalo de tempo) e de recolher informação sobre o ambiente circundante (por exemplo a distância aos obstáculos mais próximos).

A percepção funciona nos robots como os sentidos nos humanos, e baseia-se nos dados recolhidos por sensores. Sensores são dispositivos que medem grandezas físicas. Em robótica móvel os dados sensoriais são usados para suportar a movimentação ou para a execução das tarefas cometidas aos robots. Para apoio à movimentação são comuns codificadores (*encoders*) relativos que fornecem informação sobre o movimento das rodas, sistemas inerciais e GPS (*Global Positioning System*) todos usados, de modo diverso, para determinar a localização do robot. É ainda muito frequente a utilização de sensores laser e de ultra-som (sonares) e câmaras de visão cuja informação permite, entre outras funções, detectar obstáculos, recolher informação para a construção de mapas locais do ambiente e localizar objectos. A Figura 8 representa os sensores atrás referidos instalados no robot ATRV-Jr do Instituto de Sistemas e Robótica/IST.

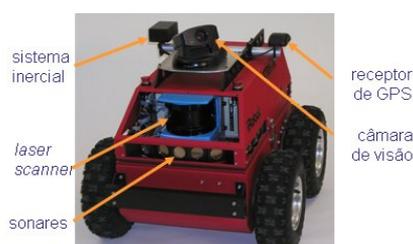


Figura 8 – Sensores de apoio à movimentação no ATRV-Jr

Um dos sensores que se tem vindo a vulgarizar no apoio à navegação de robots móveis, em particular na detecção de obstáculos, é o laser associado a um mecanismo de varrimento, conjunto conhecido por *laser scanner*. O laser mede distâncias, usando o princípio de funcionamento do tempo de voo (*time-of-flight*).



O *laser scanner* utiliza-se para avaliar o espaço livre em torno do robot através da medida da distância aos obstáculos presentes no ambiente circundante. O sensor emite um feixe de luz estruturada que viaja no espaço. Quando este feixe encontra um obstáculo é reflectido de modo difuso e parte da luz regressa, sendo detectada pelo sensor que calcula o tempo de voo do feixe. Este tempo é proporcional, através da velocidade de propagação da luz no ar, à distância percorrida pelo feixe que é o dobro da distância do robot ao obstáculo que produziu a reflexão. Fazendo deflectir o feixe horizontalmente através de um mecanismo de varrimento, é possível avaliar o espaço livre segundo um determinado ângulo.

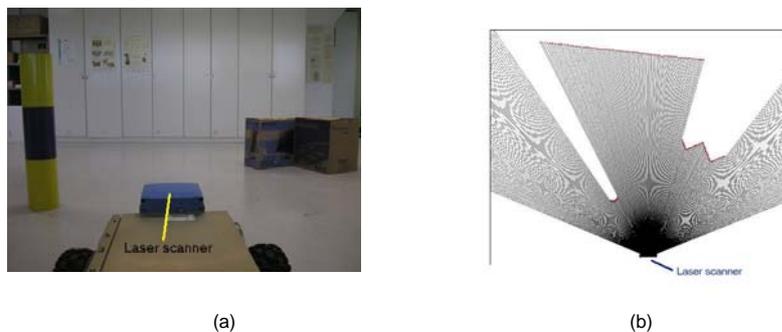
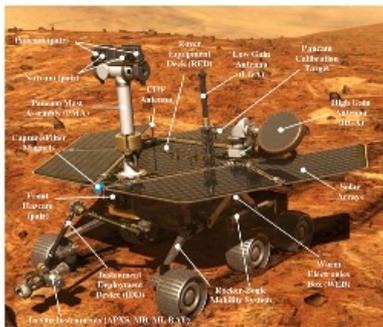


Figura 9 – Resultados experimentais com um *laser scanner*

A Figura 9 apresenta resultados experimentais da percepção do ambiente à frente de um robot usando um *laser scanner* que tem uma resolução angular de  $0.5^\circ$ . O ambiente real da Figura 9-a) está visto na perspectiva do sensor instalado no robot. Na Figura 9-b) cada segmento de recta representa uma direcção segundo a qual o feixe de luz é emitido a partir do *laser scanner*. O comprimento do segmento representa a distância livre na direcção correspondente. Fazendo uma análise dos resultados experimentais segundo um varrimento da esquerda para a direita, percebe-se claramente a detecção do poste cilíndrico sobre a esquerda do robot (porque na direcção a que o poste está as distâncias aos obstáculos são menores), depois detecta-se uma zona plana que corresponde aos armários do laboratório, ao fundo. As caixas de cartão sobre a direita na Figura 9-a) são claramente visíveis nas medidas de distância, sendo perceptível a topologia da sua disposição. O *laser scanner* fornece, para cada varrimento, um conjunto de números que representam a distância aos obstáculos segundo a direcção correspondente. Assim, sabe-se a distância do robot ao poste cilíndrico e às caixas de cartão o que pode ser usado, na navegação, para definir trajectórias que evitem estes obstáculos.

Os sensores de ultra-som ou sonares (acrónimo de **SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging) também são sensores de distância cujo princípio de funcionamento é, também, o tempo de voo. As

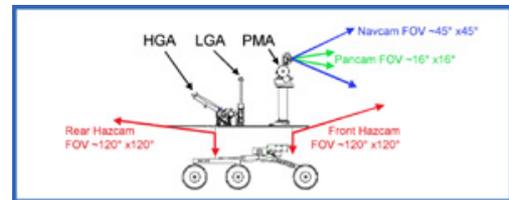
ondas emitidas são, neste caso, ondas acústicas com uma velocidade de propagação no ar de 340m/s.



a) Sensores do Spirit e Opportunity



b) Câmaras Panorâmicas e de Navegação



c) Sistema de visão e antenas (HGA, LGA, PMA) dos robots



d) Imagem panorâmica 3D da Cratera Endurance obtida pelas câmaras de Navegação do Opportunity  
Figura 10 – Sensores dos robots *Spirit* e *Opportunity* e imagem panorâmica 3D

Os sensores instalados a bordo não servem apenas para ajudar na movimentação segura dos robots. Por exemplo, um dos objectivos do envio para Marte dos robots *Spirit* e *Opportunity*, [MarsRovers], foi perceber de que modo a existência de água, no passado, influenciou o ambiente do planeta vermelho ao longo dos tempos. E embora a sonda europeia *Mars Express* já tenha detectado gelo em Marte, os sinais da sua existência no passado também poderão ser encontrados em rochas, minerais e formas geológicas, particularmente naquelas que só se podem formar na presença de água. Este é o motivo pelo qual estes robots estão equipados com uma colecção de sensores e dispositivos (p.e., espectrómetro, magnetes) para estudar a composição das rochas e do solo e analisar a composição das poeiras do ambiente (Figura 10-a). É vulgar a instalação, em robots, de sensores químicos (p.e., detectores de gases) e câmaras térmicas para tarefas de busca e salvamento, sensores de pressão para a manipulação segura de objectos frágeis, microfones, sensores de tacto, etc.

Em muitos seres vivos, incluindo nos humanos, a percepção do ambiente circundante é feita através do sentido da visão [Lexicultural]. Muitos robots estão equipados com câmaras de visão que são sensores que captam imagens onde cada ponto (pixel) tem uma cor que depende dos objectos observados e da iluminação. A noção de distância consegue-se, neste caso, recorrendo a duas câmaras. É a visão estéreo que permite perceber a forma tridimensional dos objectos a partir das imagens adquiridas pelas duas câmaras. Repare o leitor que nós também temos dois olhos e que é esse facto que nos permite perceber o mundo a três dimensões, i.e., a ter noção de profundidade. Se taparmos um olho, ainda somos capazes de ter uma noção, ainda que difusa, de profundidade mas ela advém da aprendizagem que fomos fazendo ao longo da vida.

Os robots *Spirit* e *Opportunity* estão equipados com 8 câmaras de visão. As quatro *Hazard Cam* são câmaras fixas colocadas duas à frente e duas na retaguarda (Figura 10-c) e que são usadas para detectar obstáculos no solo durante a progressão do robot. Há dois sistemas de visão estéreo instalados numa torre com movimento de rotação (Figura 10-b). Duas câmaras, com abertura elevada, constituem o sistema *NavCam* que suporta a navegação através da construção de mapas 3D do ambiente (Figura 10-d). O sistema estéreo de câmaras panorâmicas, *PanCam*, com abertura semelhante à do olho humano permite aos controladores, em terra, terem acesso ao que veriam e ao modo como veriam se estivessem em Marte. O movimento de rotação da torre permite capturar dados à volta do robot e com eles construir imagens panorâmicas como a representada na Figura 10-d). Com estas imagens enviadas para terra através dos sistemas de comunicação, os operadores do Centro Espacial da NASA podem definir objectivos e/ou possíveis trajectórias para futuras missões.

Foram dados exemplos de diversos sensores, com princípios de funcionamento diferentes e que adquirem grandezas distintas. Mas a percepção não é apenas a aquisição de dados sensoriais (sensoriamento) mas engloba também os aspectos da extracção e interpretação da informação recolhida pelos sensores Este é um aspecto importante que nós, humanos, fazemos sem realmente nos apercebermos disso. Uma imagem adquirida por uma câmara de visão instalada num robot é um conjunto de números, i.e., a intensidade luminosa associada a cada pixel está representada por um número. De que modo é que o robot usa esses números para extrair a informação relevante para a tarefa que está a realizar, i.e., para perceber o ambiente? Por exemplo, de que modo se apercebe da existência de obstáculos, de espaço livre à sua volta, etc. Os números que constituem a imagem são introduzidos no computador de bordo, processados por um algoritmo de processamento de imagem para, por exemplo, extrair as arestas (zonas da imagem em que há descontinuidade na intensidade) como se ilustra na Figura 11. Os algoritmos de processamento que correm no processador de bordo dependem do objectivo para o qual se pretende usar a informação visual, por exemplo, detectar a porta por onde o robot terá que passar, detectar a bola vermelha ou identificar a baliza do adversário num jogo de futebol robótico, detectar a rocha pousada no solo de Marte e que é preciso analisar de perto.

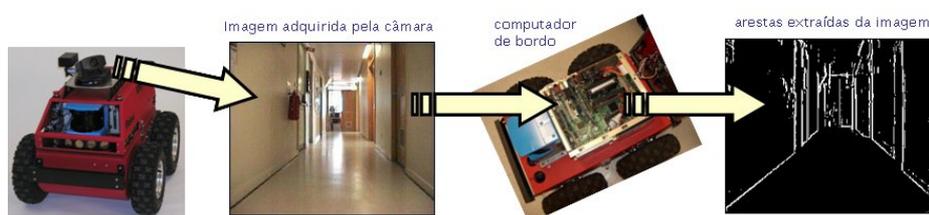


Figura 11 – Extracção de arestas em imagem adquirida por câmara de visão em robot

Outro exemplo da necessidade de processamento, com um cão futebolista da Sony, está ilustrado na Figura 12. Uma das tarefas de qualquer futebolista, mesmo que seja robot, é detectar a bola e aproximar-se dela. Nesta figura, à esquerda, representa-se uma cena da situação vista por um observador exterior de altura mediana. O cão-robot AIBO e a bola estão

claramente num plano inferior. A imagem seguinte foi obtida pela câmara de visão instalada no focinho do cão. Como seria de esperar o ponto de vista está mais perto do nível do chão e a bola colocada para a esquerda do observador, que agora é o cão. Com esta imagem o AIBO não consegue, ainda, saber onde está a bola. Precisa de interpretar a imagem. Para isso faz a segmentação de cores no computador de bordo, obtendo o resultado mostrado na figura da direita em que são destacados os pontos da imagem (*pixels*) com cor avermelhada face a todos os outros representados a cinzento. A partir daqui é imediata a detecção da bola. Alguns pontos esparsos marcados como sendo avermelhados correspondem aos pés do humano que se vê na figura e a um robot terrestre (o ATRV Jr da Figura 11), mais ao fundo, estacionado no laboratório.



Figura 12 - Detecção de bola por cão-robot AIBO da Sony

Outro aspecto incluído na percepção é a fusão sensorial, que responde à pergunta sobre o modo como se extraem conclusões sobre o ambiente circundante a partir da integração da informação fornecida por sensores diferentes. Não é verdade que nós portugueses, para “ver um objecto”, usamos os sentidos da visão e do tacto? Quando o fazemos estamos a integrar (fundir) a informação visual com a informação do sensor de contacto que é o nosso tacto. Essa integração é feita no cérebro, a nossa unidade de processamento, equivalente ao computador de bordo nos robots. E os robots também podem “sentir uma mesma realidade” usando câmaras de visão, laser, sonar, sensores de infra-vermelhos, etc. Cada um destes sensores tem potencialidades e limitações. Por exemplo, uma câmara de visão apercebe-se da cor, mas de nada serve num ambiente às escuras. O laser e o sonar funcionam independentemente das condições de iluminação do ambiente, mas o laser não detecta vidros. Por outro lado o sonar detecta vidros, mas tem uma grande incerteza angular uma vez que o feixe sonar é muito largo. A fusão sensorial tira partido das potencialidades de cada sensor, colmatando as limitações de uns com as potencialidades de outros, e conduzindo a uma percepção do ambiente que é mais rica do que a que seria obtida usando um único sensor.

### Navegação e Actuação

A percepção dá ao robot o conhecimento do mundo circundante. A **Navegação** usa esse conhecimento para responder a três perguntas básicas

**Onde estou?      Para onde vou?      Como chego lá?**

Estas são exactamente as perguntas que os humanos formulam quando, por exemplo, fazem turismo numa cidade que não conhecem. Usualmente identificamos a nossa posição num mapa (onde estamos), antes de iniciar um passeio a pé até à Catedral (para onde queremos ir) que queremos visitar. Planeamos o caminho a seguir, normalmente escolhendo o mais rápido (estamos a otimizar um critério – o tempo do percurso), e iniciamos a caminhada. Se uma das ruas do plano inicial estiver em obras, impossibilitando a passagem de peões, escolhemos uma rua paralela e retomamos o caminho planeado assim que possível. Ao longo do caminho vamos usando as placas toponímicas para saber/confirmar onde estamos, i.e., localizamo-nos e vamos progredindo na nossa caminhada.

De que modo é que o robot responde a estas perguntas?

**ONDE ESTOU?** – Como posso determinar a minha posição com base naquilo de que me apercebo do mundo e do conhecimento que me transmitiram à partida? Este é o problema vulgarmente conhecido como **Localização**. Localizar<sup>1</sup> é determinar a posição do robot relativamente a um determinado referencial. Para localizar usam-se as observações adquiridas pelos sensores instalados nos robots móveis.

Sabendo a posição inicial e medindo a deslocação de cada roda num intervalo de tempo, obtém-se uma estimativa da localização, ao fim desse intervalo de tempo, usando a metodologia “sei onde estava e sei o que andei e como andei, pelo que sou capaz de calcular onde estou”. É uma localização com medidas relativas, conhecida como odometria. Mas a odometria tem erros que se vão acumulando ao longo do tempo. O leitor perceberá que, por exemplo num robot com a cinemática indicada na Figura 6-a), poderá acontecer que as duas rodas tenham exactamente a mesma velocidade e conseqüentemente os sensores associados a cada uma delas indiquem que percorreram a mesma distância, mas que o robot não se tenha deslocado segundo uma linha recta. Para isso basta que o piso seja irregular e que uma das rodas tenha passado por cima de um objecto deixado no solo (p.e., uma pedra), ou por um buraco.

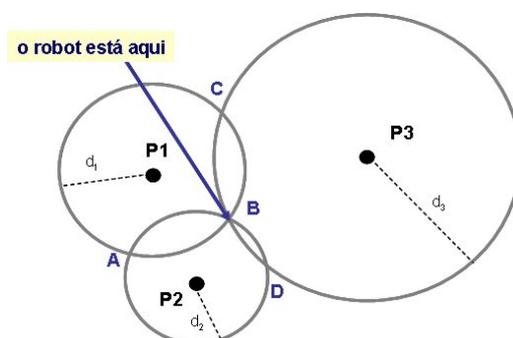


Figura 13 – Princípio da trilateração

<sup>1</sup> De modo geral, num robot móvel terrestre, localizar é determinar uma posição (x,y) e uma orientação ( $\theta$ ) num determinado referencial. Neste texto apenas se fala em posição.

As técnicas de localização absoluta fornecem indicação da localização do robot num referencial fixo, independentemente do conhecimento *a priori*. A mais vulgarizada é a **trilateração** em que a localização é baseada em medidas da distância a balizas ou faróis (*beacons*) colocados em posições conhecidas. Admita-se que, numa fábrica, há três postes em posições conhecidas que, em corte horizontal, estão representadas pelos pontos P1, P2 e P3 da Figura 13 e que o robot está dotado de um *laser scanner*. Se com base nas medidas laser o robot tiver avaliado que está à distância  $d_1$  do ponto P1, então só poderá estar sobre uma circunferência centrada em P1 e de raio  $d_1$ . Se uma segunda medida indicar que está à distância  $d_2$  de P2, as duas informações permitem concluir que só pode estar nos pontos A ou B da Figura 13. No entanto, só com duas medidas de distância, há ambiguidade na determinação da posição do robot. Uma terceira medida, a distância  $d_3$  a P3, permite desambiguar e determinar a posição do robot. Parece simples, é geometria, mas não fornece a posição real do robot! Fornece, apenas, uma estimativa da posição com erro devido às incertezas associadas. De facto, as posições de P1, P2 e P3, que se assumiram como exactas, têm seguramente pequenos erros. Por outro lado, o laser scanner tem uma resolução angular e em profundidade finitas e as suas medidas podem conter ainda pequenos erros que são função da reflectância do material que reflectiu o feixe de luz. O conversor analógico - digital que converte as medidas de distância (analógicas) em sinais digitais, usados pelo computador de bordo nos cálculos, tem uma resolução finita. Todas estas fontes de erro são responsáveis pelo erro na avaliação da posição do robot, embora haja técnicas para minimizar os seus efeitos.

A trilateração é o princípio básico de funcionamento da localização por GPS. No sistema de **GPS** (*Global Positioning System*) os pontos/balizas em posições conhecidas são constituídos por satélites, em órbitas quase circulares a alguns milhares de quilómetros da terra, estando o sistema projectado de tal forma que em qualquer ponto da superfície terrestre se recebe o sinal de, pelo menos, 4 satélites. Com os sinais recebidos desses satélites, um receptor (instalado no robot) avalia a distância aos mesmos e, a partir delas, avalia a posição estimada do robot. O sistema actual está baseado numa constelação de 24 satélites lançados pelos Estados Unidos. Está previsto que o sistema Europeu de navegação por satélite, Galileo, composto por 30 satélites, esteja operacional em 2008, [GPS-Galileo].

**PARA ONDE VOU?** **COMO CHEGO LÁ?** O robot está localizado e sabe qual é a posição final que pretende alcançar. O caminho que deverá seguir é calculado num bloco de **Planeamento de Caminho** (Figura 15-a) implementado no computador de bordo e deve satisfazer um critério de optimalidade. Pode escolher-se, por exemplo, o caminho mais curto, o caminho que passa a igual distância dos obstáculos conhecidos, o caminho mais rápido, o caminho com menos curvas. Muitas vezes, associado ao caminho planeado, também se especifica o perfil de velocidades com que o robot deverá seguir o caminho, obtendo-se assim a trajectória desejada.

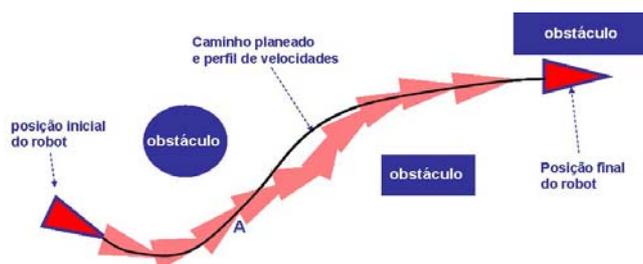


Figura 14 – Planeamento e seguimento de trajectória

Na Figura 14 representa-se a preto a trajectória planeada entre as posições inicial e final do robot, atendendo ao conhecimento existente da posição dos obstáculos. Sabendo o caminho a seguir, é necessário segui-lo ou seja, é preciso conduzir o robot garantindo que ele segue a trajectória planeada e que, simultaneamente, detecta e evita obstáculos inesperados. É a fase da **Condução** que se integra nos restantes blocos da Navegação como indicado na Figura 15-a). Na ausência de obstáculos inesperados e com o conhecimento do perfil de velocidades calculado no bloco de Planeamento de Caminhos, poderá perguntar-se para que é preciso a Condução. Não bastará impor às rodas as velocidades necessárias para seguir a trajectória planeada? Se isso for feito, o que muito provavelmente irá acontecer é que progressivamente o robot se vai desviando da trajectória planeada, como se ilustra a partir do ponto A na Figura 14.

Pense o leitor que está a conduzir um automóvel e que pretende seguir ao longo de uma linha branca pintada no chão numa recta com uma grande extensão. Será que após colocar o veículo alinhado com a faixa branca não precisa de rodar mais o volante? Para quem tenha experiência de condução é evidente que vai ser preciso fazer pequenos ajustes, porque o veículo tem tendência a ir-se afastando da linha branca. Os motivos podem ser vários, incluindo a diferente pressão nos pneus, as irregularidades do piso e a existência de buracos. Enquanto condutores, o nosso sistema cognitivo percebe que existe um erro entre a trajectória desejada e a trajectória real. Para que o erro se anule, rodamos o volante, e rodamo-lo mais ou menos consoante o erro é grande ou pequeno. Este ciclo é o de um sistema de controlo. Aqui o controlo é manual, porque feito pelo condutor.

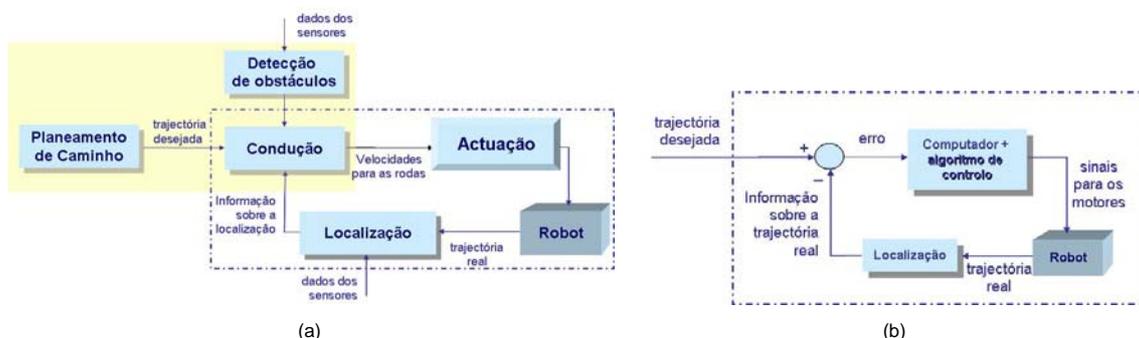


Figura 15 – a) Planeamento de trajectória e condução b) Condução e Actuação como um anel de controlo implementado em computador, na situação de ausência de obstáculos inesperados

Nos sistemas de controlo automático, como no robot, acontece aquilo que está representado na Figura 15-b). O robot segue ao longo de uma trajectória (é a trajectória real) cujo

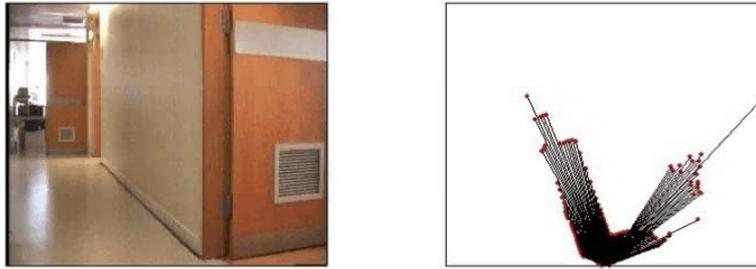
conhecimento é dado pelo bloco de Localização. Por outro lado, o bloco de Planeamento de Caminho calculou a trajectória desejada pelo que é possível comparar as duas e calcular desvios de execução, designados como o erro. No computador de bordo está implementado um algoritmo que, a partir do conhecimento do erro, calcula os sinais que devem ser enviados para os motores associados às rodas para levar o erro para zero, i.e., para fazer com que a trajectória real convirja para a trajectória desejada. O computador implementa a Condução e a Actuação. Ao fim de alguns ciclos do sistema em anel fechado da Figura 15-b) o erro vai para zero, como é claro na trajectória da Figura 14 a partir do ponto A.

A explicação anterior pressupõe que há um caminho planeado (com no base no conhecimento de um mapa) que os blocos de Condução e Actuação fazem seguir, o que exige a Localização. No entanto, há situações que não requerem o planeamento de um caminho *a priori* e/ou a localização do robot num referencial global. Ao humanoíde da Figura 16-a) foi dada a missão de “detectar a bola, dirigir-se para ela e chutar” pelo que não precisa de saber em que posição está na sala. Precisa apenas de se localizar relativamente à bola.

Há também situações de navegação que não requerem conhecimento *a priori* do mapa do ambiente. Ao robot móvel da Figura 11 foi dada a missão “desloca-te segundo a direcção em que encontres mais espaço livre à tua frente”. O robot não conhece nenhum mapa do ambiente, nem há nenhum caminho planeado *a priori*. Está equipado com uma câmara de visão e um *laser scanner*. As medidas de distância obtidas por este último são as únicas usadas para suportar a movimentação. As imagens da câmara de visão apenas servem para que os observadores externos percebam o que se está a passar. No computador de bordo, e a partir das medidas de distância de um varrimento de 180° do *laser*, calcula-se o maior ângulo para o qual as medidas distância são todas superiores a um limiar de segurança. A direcção do movimento seguinte aponta para o meio desse ângulo. A Figura 16-b) apresenta, à esquerda, uma imagem do ambiente que o robot tem à sua frente e, à direita, os dados recolhidos pelo *laser scanner* nessa situação. O robot, que vinha navegando ao longo de um corredor, acabou de “ver” à sua direita uma porta aberta, o que o fez desviar para a direita. Isto justifica que nesta situação esteja a apontar aproximadamente para a bissetriz do ângulo formado pelo corredor e pela abertura da porta. Com base nesta percepção do ambiente, o robot continua o seu movimento pela sua esquerda, ao longo do corredor.



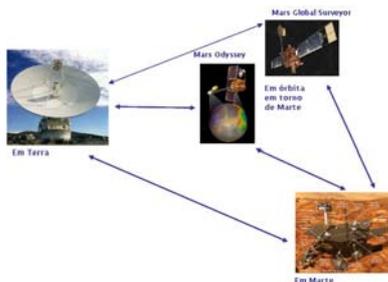
(a)



(b)  
Figura 16 - a) Navegação sem localização absoluta b) Navegação sem caminho planeado

## Comunicações

Uma componente importante em robots móveis autónomos, semi-autónomos ou teleoperados é a comunicação com operadores humanos situados remotamente ou com outros robots, no caso de missões realizadas por equipas de robots. De modo geral, os robots enviam dados e recebem instruções através dos canais de comunicação.



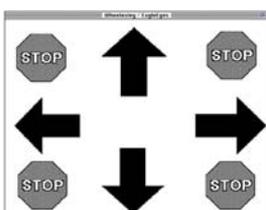
Soubemos que os robots *Spirit* e *Opportunity* sobreviveram ao impacte em Marte porque enviaram um sinal para Terra, ou seja, comunicaram com Terra. Sem comunicação não teríamos acesso à beleza das imagens que têm enviado, nem os cientistas teriam dados sobre a composição das rochas e do solo, recolhidos pelos sensores a bordo e enviados para Terra.

A comunicação com os robots de Marte faz-se através de ondas electromagnéticas. Este mesmo canal de comunicação é usado para que os operadores, em Terra, enviem para Marte especificações para novas missões ou instruções para apoio à navegação. Por exemplo, com base na imagem da cratera Endurance que apresenta declives que poderiam fazer perigar a integridade dos robots (Figura 10-d) os operadores indicaram pontos de via numa trajectória segura que o robot depois seguiu autonomamente. O *Spirit* e o *Opportunity* recebem e enviam dados de/para Terra directamente ou através das sondas 2001 *Mars Odyssey* e *Mars Global Surveyor*. A vantagem de usar estas sondas como pontos intermédios de comunicação é que os robots estão mais próximos das sondas (cerca de 400Km) do que da Terra (170 a 320 milhões de Kms) o que significa que consomem menos energia a comunicar com as sondas do que com a Terra. Por outro lado, as sondas têm a Terra no seu campo de visão/comunicação durante mais tempo do que os robots, no solo de Marte.

Os robots de Marte apresentam um elevado grau de autonomia, mas há robots móveis cujo funcionamento é totalmente (ou quase totalmente) controlado remotamente por um operador humano. Assim aconteceu aos robots que entraram nas torres do *World Trade Center*, em Nova Iorque, após o colapso da estrutura. Os robots funcionaram como os “olhos remotos” das equipas de resgate, mas sob o controlo remoto das equipas no exterior.

## Interface com o utilizador

Os robots são desenvolvidos para ajudarem os humanos na realização de tarefas repetitivas, pesadas ou em ambientes hostis ou perigosos, o que exige muitas vezes a existência de uma interface entre o robot e o utilizador. Através desta interface o robot disponibiliza os dados que recolheu através dos seus sensores e recebe comandos/instruções de alto nível. Os comandos podem ser digitados por um especialista através de um teclado ou de um ecrã táctil (*touch-screen*), mas também podem ser dados através de voz ou de gestos. O desenho e as funcionalidades disponíveis na interface são tanto mais exigentes quanto menos especialistas forem os utilizadores. É o caso dos *companion robots*, dos robots adaptados a pessoas com deficiências ou ainda dos robots de entretenimento, que cooperam com pessoas que, geralmente, de robótica nada sabem.



Interface para o EagleEye

Na cadeira de rodas robotizada Wheelesley (Figura 2), a interface do utilizador foi desenhada para acomodar o sistema *EagleEye*, desenvolvido no Boston College, EUA. O *EagleEye*, associado ao ecrã aqui reproduzido, permite a uma pessoa controlar o movimento da cadeira através de 5 eléctrodos colocados à volta dos olhos.

Estes eléctrodos registam o electro-oculograma (EOG) que é um conjunto de sinais eléctricos que variam de acordo com o ângulo dos olhos na cabeça. Com este sistema, olhar para a direita faz actuar a seta para a direita do ecrã e a cadeira de rodas move-se para a direita. Olhar para cima actua a seta para cima e faz a cadeira mover-se em frente. Para emitir um destes comandos o utilizador tem que fixar o olhar numa destas direcções por umas fracções de segundo. O utilizador pode ainda, através do movimento dos olhos e da cabeça, actuar os botões de STOP.

Para além destes comandos que iniciam o movimento e são emitidos a partir do sistema neuromotor do utilizador, as metodologias de robótica móvel implementadas na cadeira de rodas permitem que, sem nenhuma intervenção externa, sejam detectados e evitados obstáculos, atravessadas portas ou zonas apertadas, por exemplo.

## A robótica e as neurociências

A interface anterior está integrada num sistema robótico controlado através de sinais fisiológicos recolhidos de um operador humano. A intervenção da robótica como ferramenta de aplicação em neurociências tem sido um campo activo de investigação nos últimos anos, apresenta inúmeros desafios científicos e elevadas potencialidades de aplicação.

Em neurociências tem-se assistido, nos últimos anos, ao desenvolvimento de modelos sofisticados de controlo motor, sensorial e de percepção em animais e humanos. Por outro lado, a robótica acolhe o desenvolvimento de máquinas que incorporam modelos teóricos cada vez mais complexos e que usam as mais avançadas tecnologias. Existe assim claramente uma complementaridade entre estas duas ciências que pode ser explorada com benefícios mútuos.

De facto, os modelos desenvolvidos por neurocientistas podem ser usados por roboticistas na construção de máquinas biomiméticas com elevado desempenho. Por outro lado, os neurocientistas podem usar essas máquinas para testar os seus modelos de funções do cérebro. Nasceu assim uma nova ciência designada por Neurorobótica, com um campo muito vasto de aplicações, de que são exemplos:

- Aumentar capacidades sensoriais (ouvido, visão),
- Restaurar capacidades sensoriais e motoras perdidas, explorando a actividade nervosa ou muscular residual de membros paralisados ou amputados,
- Explorar a possibilidade de aumentar as capacidades sensoriais e motoras dos humanos em geral, e não apenas de pessoas deficientes.

Têm sido feitas experiências exploratórias de activação de mãos robóticas do tipo da representada na Figura 5, em pessoas amputadas. O esquema básico de funcionamento está representado na Figura 17.

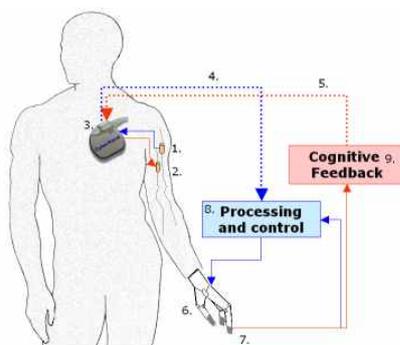


Figura 17 - Esquema básico de funcionamento de uma mão robótica num amputado (projecto Cyberhand, coordenado pela Escola Superior de Sant'Anna, Itália)

## Os nossos amigos robots

A robótica e as metodologias que lhe estão associadas, como por exemplo a visão por computador, têm inúmeras aplicações em campos muito diversificados. A mais vulgarizada e com uso há mais tempo é a robótica industrial. São correntes robots a fazerem transporte automático de materiais em fábricas, a intervirem em processos de produção, p.e., em embalagem na indústria farmacêutica ou em paletização na indústria de refrigerantes, a fazerem pintura, soldadura e assemblagem na indústria automóvel.

Porém, nas últimas décadas, têm surgido aplicações ditas não convencionais, dos robots de serviços cuja penetração no mercado é cada vez maior. Mais recentemente, os robots de entretenimento têm também vindo a revelar-se como uma área em forte expansão. As aplicações dos robots de serviços são variadas, e nelas se incluem,

- Robots domésticos,
- Robots de apoio a idosos e deficientes,
- Robots de entretenimento,

- Robots e robótica médica,
- Robots de busca e salvamento,
- Robots companheiros / robots sociais,
- Robots guias em exposições,
- Robots agricultores (apanha de frutos, sulfatização, corte de relva),
- Robots de limpeza (domésticos, limpeza de vidros, limpeza de piscinas),
- Robots de exploração marinha ou de planetas,
- .....

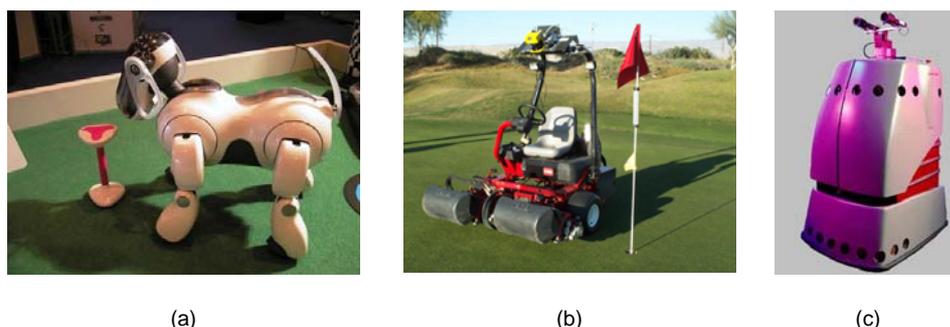


Figura 18 - Robots de serviços e/ou de entretenimento: a) Cão AIBO da Sony, b) Robot cortador de relva, c) robot Minerva, guia em museus e exposições

A Figura 18 apresenta o AIBO, cão robótico da Sony, que tem capacidade de reconhecer vozes humanas, responder a comandos de voz e aprender com o seu dono. Nos campeonatos mundiais de robots (*RoboCup*) e nos Festivais Nacionais de Robótica decorrem competições de futebol robótico em que os jogadores são estes robots. O robot cortador de relva, desenvolvido pela *Toro Company* dos Estados Unidos, está preparado para operar de modo autónomo num campo de golf durante o dia ou durante a noite funcionando com um princípio semelhante ao do robot aspirador doméstico representado na Figura 2. No campo da limpeza em ambientes adversos, estão desenvolvidos robots para a limpeza de fundos de piscinas e de vidros em estruturas de edifícios de difícil acesso humano. A Minerva (Figura 18-a) actua como guia em museus e exposições. Dotada de mecanismos de navegação autónoma, movimentase de forma segura entre os visitantes do museu sem chocar com eles. Chama os visitantes para visitas guiadas e mantém-lhes o interesse pelo *tour*. Conduz os visitantes ao longo do percurso e vai dando explicações sobre os objectos expostos chamando-os para junto de si.

O robot foca, Paro, representado na Figura 5, é um animal doméstico artificial usado como meio de terapia social em lares de idosos japoneses, com benefícios psicológicos e sociais evidentes. É conhecido o isolamento a que os idosos se remetem mesmo residindo no mesmo lar e ainda os benefícios que a convivência com animais domésticos pode induzir no relacionamento mútuo entre as pessoas. Ter cães, gatos e pássaros (reais) em lares de idosos tem vantagens claras mas é fonte de alergias e de propagação de doenças. Os animais domésticos artificiais não têm estes inconvenientes podendo exibir comportamentos semelhantes aos animais reais. O Paro tem 7 actuadores para mover os olhos, o pescoço, as barbatanas dianteiras e traseiras. Os sensores de tacto estão nos bigodes e espalhados por

todo o corpo, debaixo da pele artificial, semelhante à das focas. Dispõe ainda de registadores de som. Com base nos dados adquiridos pelos seus sensores de tacto e de som e de um sistema de geração de comportamentos, o Paro exhibe diversos tipos de comportamentos (p.e., piscar os olhos, abanar as barbatanas, abanar a cabeça, emitir sons, virar a cabeça para a direcção de um som e aprender com o dono) que são função do passado recente do seu “convívio” com os idosos.

Os nossos amigos robots também nos ajudam na exploração oceanográfica, na exploração de planetas, na detecção de fogos e em tarefas pesadas e perigosas.

Os robots, ou de um modo mais alargado os dispositivos que integram sistemas automáticos incorporando metodologias robóticas, têm vindo a entrar no nosso quotidiano. Para esta disseminação contribuíram decisivamente os avanços na área dos computadores e das comunicações. Num futuro não muito longínquo **a nossa vida vai ser populada por robots** ou por dispositivos robóticos que nos apoiarão na diversidade das nossas actividades diárias, pessoais e profissionais.

## **Afinal, o que é a robótica?**

No início desta viagem apresentou-se uma definição de robot. É uma definição formal, hermética, muito associada à componente mecânica e ao controlo de movimento.

Mas afinal, o que é um robot? Será que após esta viagem, os leitores ficaram com uma ideia diferente, mais alargada, sobre o que é a robótica? Afinal, o que é a robótica?

A robótica é uma ciência multidisciplinar que aglutina muitas outras áreas científicas. Funciona como o cimento que liga vários blocos que concorrem para que os robots operem correctamente. Esses blocos são a Física, a Matemática, a Mecânica, a Teoria do Controlo, a Electrónica, a Energia, os Computadores, o Processamento de Sinal, a Visão por Computador, as Comunicações, a Inteligência Artificial, a Biologia, as Neurociências e muitas outras áreas científicas aqui não explicitamente indicadas.

## Agradecimentos

Aos meus colegas Alberto Vale, Pedro Lima, António Pascoal, José Santos-Victor, Carlos Silvestre, João Sequeira do Instituto de Sistemas e Robótica/IST e Norberto Pires da Universidade de Coimbra que me facultaram algumas imagens dos seus trabalhos de investigação.

## Sugestões de Leitura

[Arkin] Ronald Arkin, *Behavior-Based Robotics*, MIT Press, 1998.

[Asimov] Isaac Asimov, página na Internet, <http://www.asimovonline.com/>

[Dudeck] Gregory Dudeck, Michael Jenkin, *Computational Principles of Mobile Robotics*, Cambridge University Press, 2000.

[GPS-Galileo] Galileo, European Satellite Navigation System,  
[http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/galileo/index\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm)

[Lexicultural] Enciclopédia Nova Activa Multimédia, editora Lexicultural, volume de Tecnologias, 2004.

[MarsRovers] Página do Jet Propulsion Laboratory (JPL), <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/>

[McKerrow] Phillip J. McKerrow, *Introduction to Robotics*, Addison Wesley, 1991.

[R. Siegwart] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, MIT Press, 2004.