

Auto-localização em pequenos robôs móveis e autónomos: O caso do robô Bulldozer IV

Frederico M. Santos¹, Valter F. Silva², Luís Almeida³
fred@isec.pt, vfs@est.ipcb.pt, lda@det.ua.pt

¹ Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra

² Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, Av^a do Empresário, 6000 Castelo Branco

³ DET/IEETA, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

Resumo - Este artigo descreve um sistema de localização de baixo custo para pequenos robôs autónomos e móveis. Este sistema foi desenvolvido para aplicação no robô Bulldozer IV, vencedor do concurso Micro-Rato 2001. O sistema combina informação azimutal absoluta com informação odométrica relativa e permite ao robô, após atingir uma zona alvo no interior de um labirinto desconhecido, regressar ao ponto de partida. No caso particular do desempenho no concurso, refira-se que este robô foi capaz, por duas vezes, de voltar à posição de partida e parar a menos de 20cm de distância desta após percorrer um trajecto com aproximadamente 25 metros de comprimento por entre vários obstáculos estáticos e dinâmicos. Este artigo apresenta uma breve discussão sobre as técnicas comumente usadas para percepção de localização em robôs móveis e autónomos. Seguidamente, é descrito o funcionamento do sistema de localização desenvolvido e a sua integração no sistema de navegação do robô Bulldozer IV. São ainda apresentados resultados experimentais que permitem caracterizar o desempenho do sistema de navegação em termos de distância final entre o ponto de paragem e o ponto de partida.

Abstract - This paper presents a low-cost self-localization system suitable for small mobile autonomous robots. This system was developed for the Bulldozer IV robot, which won the Micro-Rato 2001 contest. The system combines azimuth from an analog compass with odometry from an optical PC mouse and allows the robot, within an unknown maze, to return to the starting point after having reached a given goal. Concerning the performance in the referred contest, in 2 of 4 runs the robot succeeded in returning to the starting point with less than 20cm error after a path about 25m long through static and dynamic obstacles. This paper presents a brief discussion on the techniques commonly used to provide the notion of self-localization in mobile autonomous robots. Then, the developed self-localization system is described, as well as its integration in the navigational system of the Bulldozer IV robot. Finally, a set of experimental results is presented that allow characterizing the performance of the navigational / self-localization system in terms of final distance between the stopping point and the starting point.

I. INTRODUÇÃO

A percepção da localização em robôs móveis e autónomos é fundamental para permitir quer a optimização de percursos quer a definição de missões do tipo ir de um ponto A a um ponto B ou atingir um determinado alvo e regressar ao ponto de partida.

Para se obter essa percepção de localização vários têm sido os métodos propostos, desde baseados em mapas construídos pelo próprio robô, mapas pré-programados, reconhecimento de marcas espaciais com posicionamento pré-definido, e outros (ver secção seguinte). Tipicamente estes métodos apresentam algumas características menos desejáveis, e.g. serem computacionalmente exigentes, ou requerem um tempo exploratório considerável, ou serem inflexíveis, principalmente quando se pretende aplicá-los em robôs relativamente pequenos e de baixo custo e que funcionem em ambientes desconhecidos.

Para além dos aspectos atrás referidos, os métodos de localização baseiam-se, geralmente, em informação de posição absoluta ou de deslocamento relativo. No primeiro caso, é frequente a utilização de GPS (Global Positioning System) mas a resolução obtida com os receptores mais baratos (mínimo 5m) é insuficiente para muitas aplicações. Resoluções maiores só podem ser obtidas com receptores mais caros (e.g. receptores diferenciais). No que diz respeito a deslocamento relativo, é típica a utilização de odometria baseada em codificadores rotativos (*encoders*) incrementais acoplados às rodas. Contudo, estes sistemas resultam em erros cumulativos relativamente grandes causados por diversos factores tais como escorregamento das rodas ou variações no seu diâmetro.

Este artigo apresenta um sistema de localização de baixo custo, que fornece uma resolução adequada a navegar num labirinto desconhecido com 10 por 5 metros. O sistema combina informação azimutal absoluta, obtida a partir de uma bússola electrónica analógica, com informação odométrica relativa, obtida a partir de um odómetro óptico. Este sistema permite ao robô, após atingir uma zona alvo no interior do labirinto sinalizada por um farol de infravermelhos, regressar ao ponto de partida que não possui qualquer marca identificadora. O trajecto

de regresso é determinado por um conjunto de marcas virtuais estabelecidas no trajecto de ida, marcas essas definidas num sistema de coordenadas cartesianas cuja origem é a posição de partida e cujo eixo das abcissas está orientado a Norte.

Este sistema foi inserido no robô Bulldozer IV (figura 1), vencedor da edição 2001 do Concurso Micro-Rato [1]. No caso particular do desempenho no concurso, refira-se que este robô foi capaz, por duas vezes, de voltar à posição de partida e parar a menos de 20cm de distância desta após percorrer um trajecto com aproximadamente 25 metros de comprimento por entre vários obstáculos estáticos e dinâmicos.

O artigo apresenta uma breve discussão sobre as técnicas comumente usadas para percepção de localização em robôs móveis e autónomos. Seguidamente, é descrito o funcionamento do sistema de localização desenvolvido e a sua integração no sistema de navegação do robô Bulldozer IV. São ainda apresentados alguns resultados experimentais que permitem caracterizar o desempenho do sistema de navegação em termos de distância final entre o ponto de paragem e o ponto de partida.

II. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO

Utilização de mapas

Uma das soluções possíveis para a navegação num dado labirinto pré-conhecido é a introdução prévia do respectivo mapa no robô. O trajecto a ser seguido pode também ser introduzido no robô ou, por outro lado, pode ser o robô a planear o caminho a seguir. Lopes, Lau e Reis [2] descrevem um robô concorrente à edição de 1999 do Concurso Micro-Rato, em que o labirinto era conhecido a priori, que utilizava este processo com um misto de trajectória pré-programada e capacidade de planeamento para contornar obstáculos dinâmicos não previstos no mapa, e.g. outros robôs. A informação de posição em cada momento era obtida conjugando a distância ao farol de infravermelhos, sinalizador do objectivo, obtida através de um sensor analógico de infravermelhos, com a informação de uma bússola digital. Este método só pode ser aplicado



Fig. 1 - Robô Bulldozer IV.

em ambientes conhecidos *à priori* e é por isso inflexível. Contudo, as regras do concurso evoluíram por forma a inviabilizar esta opção já que o labirinto é agora desconhecido até ao momento de início de cada prova.

O mapa do labirinto pode, por outro lado, ser construído pelo próprio robô. Por exemplo, em [3,4,5,6] são descritos métodos de aprendizagem do meio. Esta aproximação requer algum tempo para a construção do mapa do labirinto, o que pode ser um obstáculo para a sua utilização no âmbito do Concurso Micro-Rato, já que o tempo de prova está, desde a edição de 2001, limitado a 4 minutos.

De qualquer forma, existem dois tipos diferentes de mapas: de grelhas, ou topológicos. Thrun [7] apresenta uma descrição e comparação pormenorizadas destes métodos. O primeiro é de planeamento complexo, embora de fácil percepção humana. O segundo permite um planeamento mais facilitado mas pode levar a caminhos não otimizados. Como exemplos de aplicação destas técnicas pode-se referir o robô descrito por Vale, Simões, Machado e Lima [3], que utiliza um mapa topológico, e o robô descrito por Burgard [6], que utiliza um mapa de grelhas.

Os mapas de grelha permitem, também, incluir a incerteza inerente à percepção de localização através, por exemplo, da utilização do sistema de localização de Markov [8,9]. Neste método, cada célula tem uma probabilidade associada para a presença do robô nessa posição. [6,9,10,11] apresentam robôs que usam sistemas de localização deste tipo.

Localização relativa em grupos

Outra forma de percepção de localização pode ser desenvolvida com vários robôs cooperativos. Neste caso, a localização de cada robô é determinada pela análise das suas posições relativas, as quais são comunicadas entre todos. Exemplos de sistemas deste género são descritos nos artigos [12,13].

Utilização de pontos de referência

Outra das técnicas de localização, também usada por animais e humanos, é o uso de pontos de referência, quer sejam absolutos ou locais [14]. Os pontos de referências locais podem ser obstáculos, marcas pré-definidas, faróis estáticos simples ou múltiplos. As referências absolutas podem ser o sol, as estrelas, o norte magnético, ou uma referência local cuja posição absoluta é conhecida. A utilização de múltiplos pontos de referência em simultâneo pode permitir a determinação da posição do robot por triangulação. O robô D. Dinis, 2º classificado na edição de 99 do Concurso Micro-Rato e descrito em [2] e [15], utilizava o farol (referência local) e o norte magnético (referência absoluta) para se localizar no labirinto. Duckett e Nehmzow [5] descrevem um sistema que utiliza vários marcros como referências locais.

Localização absoluta com GPS

Para a percepção da localização em robôs autónomos, uma das soluções mais fáceis é a utilização de um sistema GPS [11,16]. Através deste sistema é possível obter a posição absoluta do robô em relação à Terra. Actualmente estes sistemas têm um erro de 5 metros quando utilizados de forma independente ou alguns centímetros recorrendo a receptores diferenciais [16]. Estes receptores são demasiado volumosos e caros. Por outro lado, a resolução fornecida pelos receptores mais simples e baratos não é compatível com a aplicação no Concurso Micro-Rato devido às dimensões do labirinto (5 por 10 metros com passagens de 0,5 metros de largura).

Utilização de bússulas

Embora a utilização de bússolas electrónicas em robôs seja uma opção viável [17], poucos têm sido os casos, na prática, a recorrer a sistemas de localização baseados nesse tipo de dispositivos. No caso do Concurso Micro-Rato, um dos poucos exemplos é o robô D. Dinis, já referido atrás, que utilizava a bússola digital Vector 2X para se orientar relativamente ao farol e determinar a sua posição no mapa do labirinto, previamente inserido no robô [2].

Note-se, contudo, que uma bússola por si só não permite a realização de um sistema de localização já que apenas fornece informação azimutal. Assim, é necessária a conjugação com outras informações, tais como a distância percorrida.

Por outro lado, as bússulas apresentam uma susceptibilidade considerável a interferências externas, como por exemplo a proximidade de materiais ferromagnéticos ou as fugas magnéticas dos motores eléctricos usados para propulsionar os robôs. Para que o desempenho de uma bússola seja bom é necessário que o respectivo posicionamento dentro do robô seja suficientemente afastado dos motores, que estes sejam devidamente blindados, e que o ambiente de operação contenha poucos e pequenos, nenhuns se possível, materiais ferro-magnéticos.

Odometria

A odometria consiste na medição da distância relativa percorrida e é normalmente efectuada com recurso a codificadores rotativos (*encoders*) [18]. Em robôs com rodas são normalmente utilizados codificadores ópticos incrementais acoplados às rodas, por serem baratos, de reduzidas dimensões e mesmo de construção acessível [16,19].

A medição do percurso efectuada é uma informação frequentemente usada com fins de determinação da posição. Contudo, todos os sistemas odométricos caracterizam-se por um erro cumulativo que é função da distância percorrida. Por esta razão são normalmente usados em conjunto com outros métodos e requerem

calibração frequente, por exemplo através da identificação de referências absolutas.

Em particular, os codificadores acoplados mecanicamente às rodas apresentam as seguintes desvantagens:

- Existe escorregamento do sistema em relação ao solo, porque o robô pode patinar, particularmente no arranque, paragem e viragens;
- Fraca precisão. A resolução destes sistemas é dependente do diâmetro da roda, do acoplamento utilizado e da resolução do próprio codificador;
- Adaptação mecânica laboriosa. Em sistemas de pequenas dimensões a aplicação dos codificadores ao sistema de locomoção é minuciosa.

O SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DO BULLDOZER IV

O sistema de localização do robô Bulldozer foi desenvolvido por forma a ser barato e de simples instalação, mas tendo uma precisão adequada às especificidades do Concurso Micro-Rato 2001. Os sensores adoptados são uma bússola analógica e um odómetro óptico, interligados a um micro-controlador dedicado, um PIC16F877 [20]. Este micro-controlador é responsável pelo cálculo da posição e pelo interface com o robô.

A posição é calculada em coordenadas cartesianas sendo a origem do referencial a posição de partida e estando o eixo das abcissas alinhado com o Norte magnético. O cálculo da posição é obtido combinando a distância linear percorrida pelo robô (fornecida pelo odómetro) com a respectiva orientação instantânea (fornecida pela bússula).

No seu trajecto de ida até ao farol (zona de chegada) o Bulldozer IV vai estabelecendo um conjunto de marcas virtuais, chamadas faróis virtuais. A primeira dessas marcas é a posição de partida e as restantes correspondem a esquinas de obstáculos contornados. No percurso de regresso, o robô dirige-se para essas marcas, por ordem inversa, até atingir a posição de partida. Este sistema será descrito na secção seguinte.

Bússula

A bússula, uma Dinsmore 1655 [21], permite obter em cada instante a direcção do movimento, relativa ao Norte magnético, com uma precisão de 1°. Tem duas saídas analógicas que apresentam duas ondas sinusoidais em quadratura e que foram ligadas a duas entradas analógicas do micro-controlador. O cálculo do ângulo é efectuada de acordo com as indicações do fabricante. Contudo, por se ter verificado que as ondas referidas não estão exactamente em quadratura nem apresentam exactamente a mesma amplitude, são efectuada correcções em software, baseadas em testes práticos, para compensar as deficiências referidas.

Em relação às interferências externas, foram evitados componentes ferromagnéticos na construção do robô e teve-se o cuidado de colocar a bússola suficientemente afastada dos motores. Assim, e também devido à sua boa

blindagem magnética, a influência causada por estes era desprezável.

Odómetro óptico

O odómetro óptico é constituído por um rato óptico de PC (Microsoft Wheel Mouse Optical), que tem uma precisão de 1/16mm. Este componente tem uma resolução superior à dos ratos de esfera e baseia-se num circuito integrado HDNS2000 da Agilent [22]. Este circuito adquire 1500 imagens por segundo, comparando a actual com as últimas para determinar a direcção e a velocidade do movimento.

A interligação entre micro-controlador e rato é efectuada através da interface PS2 deste último. Os valores comunicados pelo rato são os deslocamentos em dois eixos ortogonais, X' e Y' , acumulados durante um determinado intervalo de tempo pré-programado, determinado pela frequência de envio de tramas PS2 com os respectivos valores. Os deslocamentos máximos em cada intervalo e a respectiva taxa de envio determinam a velocidade máxima que o sistema suporta sem introdução de erro por *overflow*. Utilizando uma frequência de 40 tramas por segundo, e sabendo que a precisão do rato é de 16 incrementos por milímetro e que entre cada trama enviada podem ocorrer 256 incrementos sem *overflow* (em cada sentido) pode-se obter uma velocidade máxima de 64cm/seg. Esta velocidade é suficientemente maior do que as velocidades tipicamente utilizadas no Concurso Micro-Rato.

A utilização de um odómetro óptico permite aumentar substancialmente a precisão da medição em comparação com os odómetros baseados em codificadores acoplados às rodas, já que não sofre escorregamento, medindo a distância efectiva percorrida pelo robô. Contudo, para garantir um funcionamento correcto, é necessário que haja uma boa aderência do rato ao solo. Por essa razão, este foi instalado sob o robô e fixado por meio de molas que o forçam o contacto com o solo (figura 2).

Cálculo da posição

O cálculo da posição do robô é efectuado com recurso a um referencial ortogonal, com o eixo das abcissas orientado para o Norte magnético. A posição de partida é assumida como a origem do referencial $O(0,0)$, sendo usadas duas variáveis que indicam a distância instantânea do robô à origem medida sobre cada eixo (X_i, Y_i).

A figura 3 ilustra o cálculo da actualização da posição após um deslocamento \vec{D} . A informação fornecida pelo

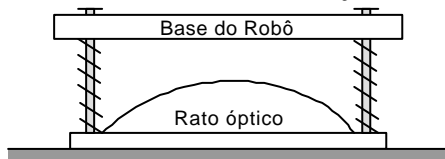


Fig. 2 - Fixação do rato óptico.

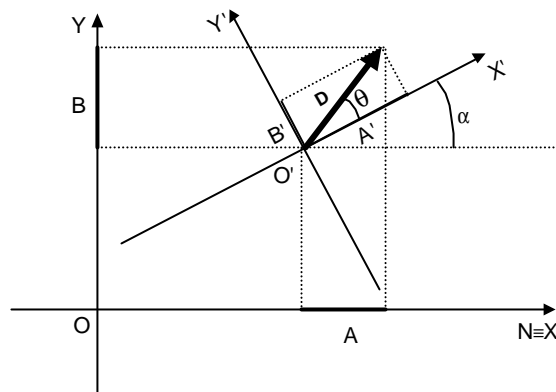


Fig. 3 - Cálculo da posição.

rato corresponde às componentes A' e B' do deslocamento \vec{D} sobre o referencial do robô, O' . Por seu lado, a bússula fornece o ângulo α entre o referencial do robô e o Norte, o qual é coincidente com o eixo das abcissas do referencial O centrado na posição de partida. As componentes (A, B) do deslocamento \vec{D} sobre o referencial O podem ser obtidas pelas expressões (3) e (4). Finalmente, as expressões (5) e (6) permitem actualizar a posição do robô (X_i, Y_i) no referencial O , a partir da posição anterior (X_{i-1}, Y_{i-1}) e das componentes (A, B) do deslocamento \vec{D} .

$$q = \arctan\left(\frac{B'}{A'}\right) \quad (1)$$

$$\|\vec{D}\| = \sqrt{B'^2 + A'^2} \quad (2)$$

$$A = \|\vec{D}\| \times \cos(q + \alpha) \quad (3)$$

$$B = \|\vec{D}\| \times \sin(q + \alpha) \quad (4)$$

$$X_i = X_{i-1} + A \quad (5)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + B \quad (6)$$

Erro de posição

Através das expressões (5) e (6) torna-se claro que este sistema de localização é relativo. Consequentemente, o impacto dos erros de medição, quer das componentes (A', B') quer de α , é incremental, tal como nos sistemas odométricos usuais. A figura 4 ilustra, de forma exagerada, o efeito da incerteza nas medições provenientes quer do rato quer da bússula. Contudo, a magnitude da incerteza é substancialmente reduzida quando comparada com sistemas de odometria baseados apenas em codificadores incrementais acoplados às rodas, permitindo que sejam efectuadas maiores distâncias para a mesma margem de erro. Este facto deve-se, por um lado à utilização de um rato óptico que permite medir o deslocamento real, e por outro à utilização de uma bússula que permite medir o desvio angular relativamente a uma referência absoluta, i.e. o Norte magnético.

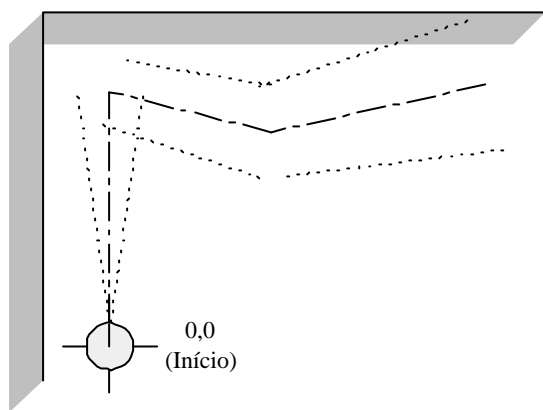


Fig. 4 - Erro de posição ao longo do tempo.

INTEGRAÇÃO NO BULLDOZER IV

O robô Bulldozer IV é, como o nome indica, o 4º numa série de robôs construídos para participar no Concurso Micro-Rato desde 1998. As 3 versões anteriores não dispunham de percepção de localização mas apenas de guiamento para um farol [23]. De facto, nas edições anteriores a 2001 o concurso apenas tinha como objectivo ir da zona de partida à zona de chegada, identificada por um círculo de chão preto com um farol de infra-vermelhos no centro, no menor tempo e com o menor número de penalizações (e.g. toques nos obstáculos). Contudo, na edição de 2001 foi acrescentado ao objectivo habitual um segundo objectivo de regresso à zona de partida, a qual não possuía nenhuma marca identificadora. Ao construir o Bulldozer IV para esta edição pretendeu-se utilizar a estrutura das versões anteriores com o mínimo de alterações para além da integração do sistema de localização. A figura 5 mostra a interligação entre a base das versões anteriores e o sistema de localização.

Base de hardware

A estrutura do Bulldozer IV assenta numa plataforma circular com dois motores controlados de forma diferencial. O conjunto sensorial é composto por 3 sensores de obstáculos, 2 sensores de farol instalados sobre uma cabeça rotativa e 1 sensor de área de chegada. O controlo

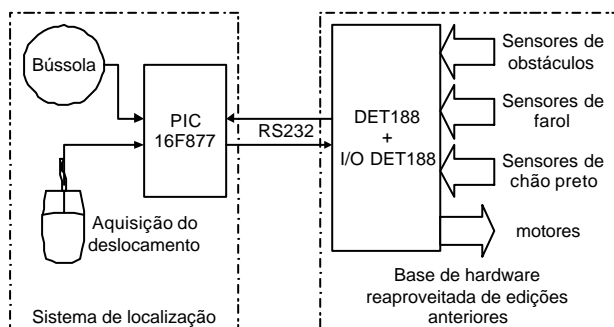


Fig. 5 - Estrutura de hardware do Bulldozer IV.

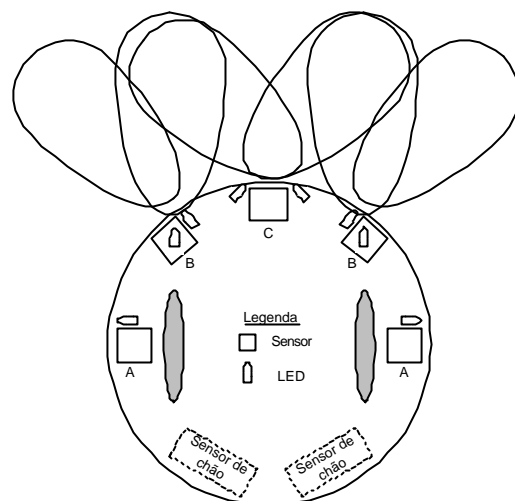


Fig. 6 - Implantação dos sensores de obstáculos.

é efectuado por um sistema (DET188) baseado no processador Intel 80C188 sendo o interface com os diversos periféricos (motores, botões, sensores, etc.) efectuado por uma placa de expansão específica (I/O 188).

A detecção de obstáculos, bem como da área de chegada, utiliza sensores activos de infra-vermelhos, isto é, com emissão de luz compatível. Em particular, os sensores de obstáculos usam iluminação suplementar para aumentar a eficiência da detecção. A figura 6 mostra a implantação destes sensores na plataforma do robô bem como as áreas de iluminação com infra-vermelhos para detecção de obstáculos.

Por outro lado, a detecção de farol é feita de forma passiva, usando sensores semelhantes montados num sistema de semi-rotação, com cerca de 270º de amplitude [24]. Um potenciómetro acoplado ao eixo permite determinar a posição angular dos sensores. O campo de visão destes sensores é dividido em 5 partes, conforme indicado na figura 7, de forma que a direcção angular fornecida assume valores de 1 a 5 apenas.

Navegação guiada por farol

O algoritmo utilizado pelas várias versões do Bulldozer para atingir a zona de chegada, sinalizada com o farol de infra-vermelhos, é apresentado na figura 8. Uma das

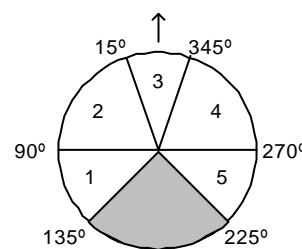


Fig. 7 - Campo de visão dos sensores do farol.

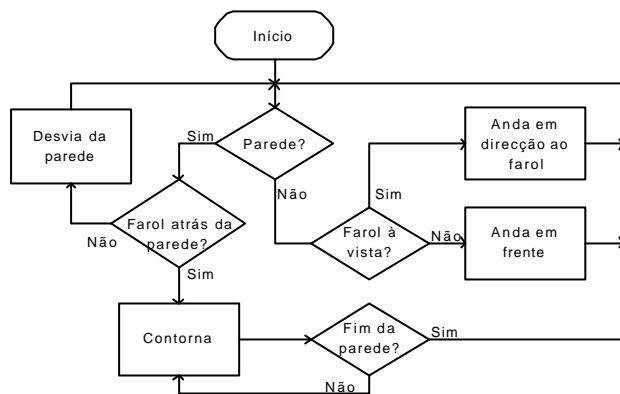


Fig. 8 - Algoritmo de navegação orientada por farol.

características interessantes deste algoritmo reside no facto do seguimento de paredes se iniciar apenas quando o farol se encontra por detrás destas, evitando que o robô comece a seguir uma parede desnecessariamente, por exemplo, a parede do labirinto. O seguimento termina quando o obstáculo acaba, ou seja, ao ser atingida uma esquina.

Este algoritmo foi implementado numa estrutura multi-tarefa suportada no kernel de tempo real ReTMiK fornecido pela organização e disponível em [1]. O kernel gere a execução de várias tarefas cíclicas, controlando automaticamente a sua activação. Assim, o utilizador apenas tem de especificar o código e frequência de activação a qual define a prioridade de cada tarefa segundo o critério *rate-monotonic*.

Integração do sistema de localização

Por forma a aproveitar ao máximo toda a estrutura das versões anteriores do Bulldozer IV, quer de hardware quer de software, o problema do regresso à posição de partida foi reformulado de modo a poder-se usar o mesmo algoritmo de navegação orientada por farol apresentado na figura 8 e que é executado no processador principal (DET188). Esta técnica consiste em utilizar um sistema de faróis virtuais, marcados no referencial cartesiano que tem origem na partida, durante o trajecto de ida até ao farol real.

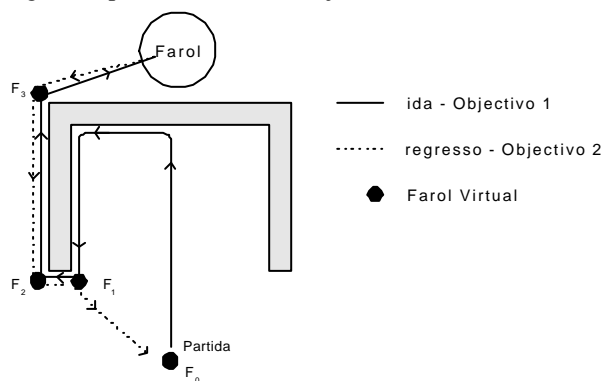


Fig. 9 - Exemplo de aplicação de faróis virtuais.

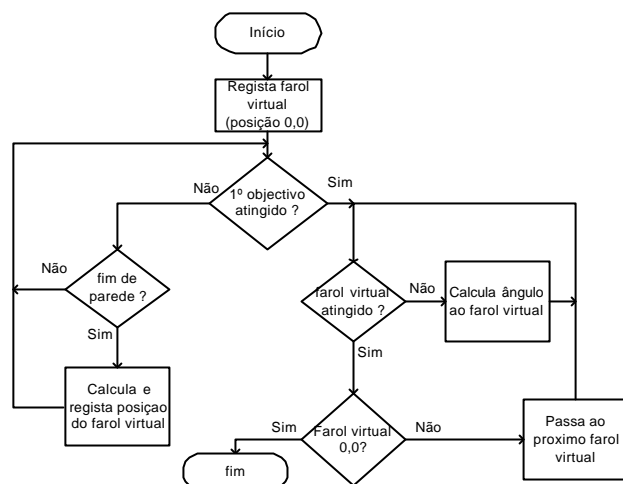


Fig. 10 - Gestão dos faróis virtuais.

A figura 9 ilustra o funcionamento do sistema de faróis virtuais. No arranque o robô marca o farol F_0 (0,0) e tenta atingir o farol real (área de chegada) Neste percurso são colocados no final de cada parede contornada os faróis F_1 , F_2 e F_3 . Ao ser atingida a área de chegada, o robô regressa à posição de partida tendo que passar por F_3 , F_2 e F_1 , dirigindo-se de seguida para F_0 .

Para atingir qualquer destes faróis virtuais, o robô usa o algoritmo da figura 8. Considera-se que um determinado farol virtual foi atingido quando o robô está dentro de um círculo com raio de $\approx 0.5m$ ($\approx 1m$ para o farol F_0 (0,0)) e a distância instantânea do robô ao farol virtual é maior que a calculada no momento anterior (i.e., inversão do sinal do gradiente de distância ao farol, de negativo para positivo). Isto permite que o robô se aproxime o máximo do ponto alvo mas fornece a flexibilidade necessária para o caso em que o farol virtual se encontra num ponto inacessível (e.g., num obstáculo), o que pode ser possível devido a erros acumulados. A gestão do sistema de faróis virtuais é efectuada pelo algoritmo apresentado na figura 10.

Este algoritmo é executado essencialmente no micro-controlador (PIC) do sistema de localização, mas sincronizado com as informações fornecidas pelo processador principal (188), e.g., fim de parede, zona de chegada atingida. Por outro lado, é o PIC que fornece a orientação angular do farol virtual que está a ser seguido em cada momento. Esta orientação é fornecida em sectores iguais aos utilizados no seguimento do farol real (figura 7) pelo que o algoritmo de seguimento do farol funciona sem qualquer alteração.

O cálculo da orientação de um farol virtual está ilustrado na figura 11 e é efectuado com recurso às expressões (7) e (8). Note-se que os índices r são relativos à posição do robô enquanto os índices f se referem à posição dos faróis virtuais.

A partir de (7) é possível obter θ que representa o ângulo medido do Norte magnético até à linha que une o robô ao farol virtual. Note-se, contudo, que a função *arccos* devolve um ângulo apenas entre 0 e π , sendo necessário

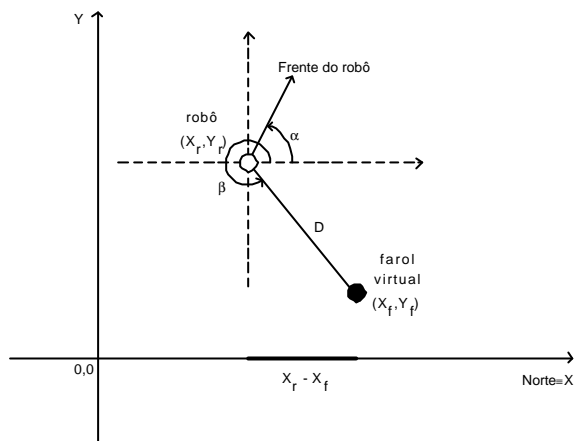


Fig. 11 - Cálculo da direcção do farol virtual.

fazer uma correcção para o caso do ângulo ser superior a π . Esta correcção é feita com a seguinte instrução:

$if(Y_f - Y_r < 0) \quad \mathbf{b} = 2 * \mathbf{p} - \mathbf{b}$

$$\mathbf{b} = \arccos\left(\frac{X_r - X_f}{\|\vec{D}\|}\right) \quad (7)$$

O ângulo que o eixo longitudinal do robô faz com o farol virtual é então dado pela expressão (8):

$$ang_farol = \mathbf{b} - \mathbf{a} \quad (8)$$

Este ângulo, ang_farol , permite saber em que direcção angular é que se encontra o farol virtual relativamente ao robô. Conforme referido atrás, esta informação é convertida para os sectores angulares descritos na figura 7. Estes sectores são enviados pelo sistema de localização para o processador principal (188), que os processa como se do farol real se tratasse. O envio desta informação apenas se realiza depois de atingida a zona de chegada e iniciado o regresso. Até então o PIC vai sendo informado dos vários eventos ocorridos, nomeadamente, o início da prova e o fim de parede para marcação dos faróis virtuais. Quando o robô atinge o farol F_0 (partida), ou a zona de segurança de 1m em torno deste, é enviado ao processador principal um comando de paragem. Se o farol F_0 não for atingido, o programa de controlo central do robô força a respectiva paragem momentos antes de expirar o tempo limite para a prova, que é de 4 minutos.

A figura 12 ilustra a comunicação entre o sistema de localização e o processador principal do robô onde se pode ver as indicações do 188 para o PIC para marcação de faróis virtuais (primeira parte) e o envio de sectores angulares do PIC para o 188 durante o regresso à partida (segunda parte).

Para terminar esta descrição refira-se que toda a programação do PIC foi efectuada em C com o compilador Hi-Tech PIC C da Ht-Soft. Em particular, usaram-se as funções trigonométricas que fazem parte da respectiva biblioteca matemática.

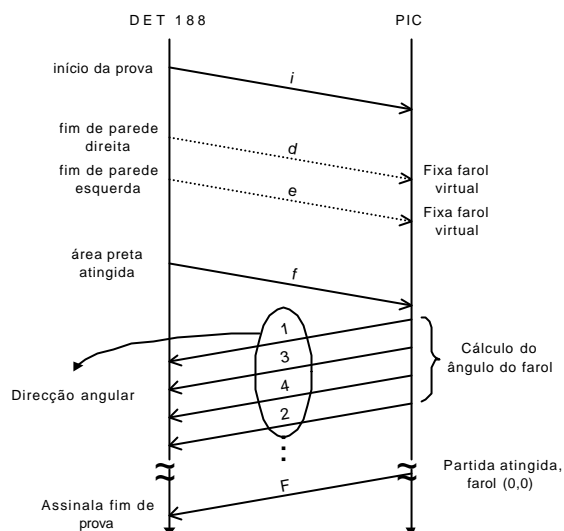


Fig. 12 - Comunicação entre o sistema de navegação (DET 188) e de localização (PIC).

RESULTADOS

O sistema adoptado para voltar ao ponto de partida revelou-se eficaz e de construção muito simples. A sua eficácia foi comprovada no próprio Concurso Micro-Rato 2001. O Bulldozer IV foi o único robô capaz de regressar ao ponto de partida. Nas quatro mangas disputadas pelo robô este conseguiu sempre atingir o farol e, em duas delas, voltou ao ponto de partida. Numa destas duas vezes o robô imobilizou-se virtualmente no ponto de partida, enquanto na outra ficou a cerca de 20 cm deste. Em ambos os casos, a distância total percorrida terá sido próxima de 25m, por entre vários obstáculos estáticos e dinâmicos (outros robôs).

Contudo, para melhor caracterizar o desempenho do sistema de localização numa perspectiva integrada, isto é, em termos da capacidade do robô de regressar ao ponto de partida, foram realizados vários testes experimentais em quatro situações de diferente complexidade de labirinto (configurações A a D). Os resultados são apresentados na figura 13. Em cada configuração foram efectuadas pelo menos dez partidas. O trajecto indicado em cada configuração é meramente ilustrativo de um trajecto provável. Os trajectos que de facto foram seguidos pelo robô variaram substancialmente em cada partida. Em torno da posição de partida é mostrado um círculo com 1 metro de raio que corresponde à zona de tolerância explicitamente definida no sistema, conforme referido atrás. Esta zona significa que o robô se imobilizará assim que, dentro dela, detectar uma inversão do sinal do gradiente de distância à partida.

O resumo dos resultados obtidos é mostrado na tabela 1. Por exemplo, na configuração A), a mais simples, o robô percorre cerca de 8,2m, regressando e imobilizando-se a uma distância média de 81,7cm do ponto de partida, com um desvio padrão de 25,5cm. Apenas em 2 partidas num

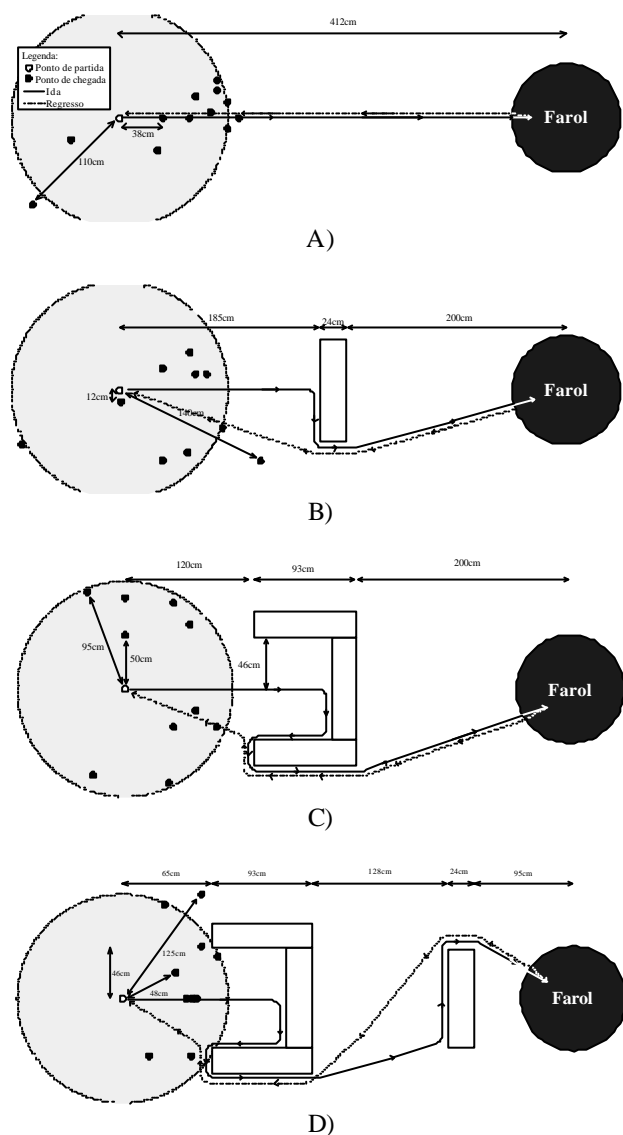


Fig. 13 - Configuração dos testes experimentais.

total de 12 o robot pára fora da zona de tolerância de 1m de raio. Os resultados são aproximadamente semelhantes para as 4 configurações, conforme se pode ver na tabela 1. Contudo, nota-se uma tendência para maior precisão, isto é, menor desvio padrão, quando o percurso é mais elaborado (configurações C e D). Este facto pode ser explicado por se utilizar uma velocidade de locomoção menor perante obstáculos, o que influencia positivamente a precisão da bússula.

De forma global é importante notar que as distâncias médias do ponto de imobilização à partida foram inferiores a 1m para todas as configurações e que em 43 partidas apenas em 5 (12%) o robot se imobilizou fora da zona de tolerância e, mesmo nesses casos, com um afastamento relativamente pequeno.

CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um sistema de localização que combina informação azimutal absoluta, obtida através de uma bússula, com informação odométrica relativa, obtida a

Tabela 1 – Sumário dos resultados experimentais

| Configuração | A) | B) | C) | D) |
|----------------------|------|------|-------|-------|
| Distância total (cm) | ≈824 | ≈842 | ≈1070 | ≈1250 |
| Distância máx. (cm) | 110 | 140 | 95 | 125 |
| Distância mín. (cm) | 38 | 12 | 50 | 48 |
| Distância média (cm) | 81,7 | 79,7 | 82,4 | 79,7 |
| Desvio padrão (cm) | 25,5 | 33,8 | 17,3 | 19,1 |
| #fora / #total | 2/12 | 2/11 | 0/10 | 1/10 |

partir de um odómetro óptico. A principal originalidade do sistema reside na utilização do odómetro óptico construído a partir de um rato óptico de PC. A combinação de um só odómetro com uma bússula parece também ser original. O tipo de odómetro referido permite reduzir substancialmente o escorregamento relativo ao solo típico dos odómetros comuns baseados em codificadores incrementais acoplados às rodas. Simultaneamente, o sistema é de fácil construção e económico, sendo adequado para robôs de pequeno porte.

O sistema de localização desenvolvido foi inserido no sistema de navegação do robô Bulldozer IV, dotando-o de capacidade de regresso à posição de partida num labirinto desconhecido com 10 por 5 metros, contendo obstáculos estáticos e dinâmicos (i.e. outros robots). Este sistema de navegação usa um conjunto de marcas virtuais, chamadas faróis virtuais, cujas coordenadas num sistema cartesiano são memorizadas no trajecto de ida até uma zona alvo e que são usadas como atractores, pela ordem inversa, no trajecto de volta ao ponto de partida.

Este sistema de localização, de apenas três componentes (processador, rato óptico e bússula) é adaptável a qualquer tipo de robô, desde que a superfície onde este se move seja plana e reflectora, de modo a permitir respectivamente, o deslizamento e funcionamento do rato.

O artigo mostra ainda um conjunto de resultados experimentais relativos ao sistema de navegação/localização. Em 4 configurações de obstáculos, com trajectos totais variando entre 8,2m e 12,5m, o robô foi capaz de regressar, imobilizando-se a uma distância média próxima dos 80cm do ponto de partida, dentro da zona de tolerância de 1m definida no próprio sistema. No total de 43 partidas, apenas em 5 o robot se imobilizou fora da zona de tolerância e mesmo assim, a uma distância relativamente próxima.

Para terminar, é de referir que o robô Bulldozer IV foi desenvolvido para participar no Concurso Micro-Rato 2001, tendo conquistado o 1º lugar bem como o Prémio Inovação. Em 2 das 4 mangas disputadas, o robô foi capaz de voltar à posição de partida com um erro inferior a 20 cm, após percorrer um trajecto com aproximadamente 25m por entre múltiplos obstáculos.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://microrato.ua.pt>, Concurso Micro-Rato da UA
- [2] L. Lopes, N. Lau and L.Reis, "Intelligent Control and Decision-Making Demonstrated on a Simple Compass-Guide Robot", Proc. of SMC 2000, IEEE Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Nashville, USA, 2000.

- [3] A. Vale, J. Simões, J. Machada and P. Lima, "Multi-Sensor Navigation Without an a Priori Map", Acta do Encontro Científico do Festival Nacional de Robótica, Guimarães, 2001.
- [4] T. Duckett and U. Nehmzow, "Knowing Your Place in the Real World", Proc. of Fourth European Conference on Artificial Life, University of Sussex, UK, 1997.
- [5] T. Duckett and U. Nehmzow, "Self-Localisation and Autonomous Navigation by a Mobile Robot", Proc. of Towards Intelligent Mobile Robots, Bristol, UK, 1999.
- [6] W. Burgard, D. Fox, D. Hennig and T. Schmidt, "Estimating the Absolute Position of a Mobile Robot Using Position Probability Grids", In: Proceedings of AAAI/IAAI, pp. 896 – 901, 1996.
- [7] S. Thrun, "Learning Maps for Indoor Mobile Robot Navigation. Artificial Intelligence", vol. 99, nº 1, pp. 21 – 71, 1998.
- [8] L. Kaelbling, A. Cassandra and J. Kurien, "Acting under uncertainty: Discrete Bayesian models for mobile-robot navigation", Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1996.
- [9] D. Fox, W. Burgard and S. Thrun, "Active markov localization for mobile robots", Proc. of Autonomous Systems, pp. 195 – 207, 1998.
- [10] D. Fox, W. Burgard, F. Dellaert and S. Thrun, "Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots", Proc. of AAAI/IAAI, pp. 393 – 399, 1999.
- [11] N. Roy, W. Burgard, D. Fox and S. Thrun, "Coastal Navigation – Mobile Robot Navigation With Uncertainty in Dynamic Environments", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol 1, pp. 35 – 40, 1999.
- [12] K. Kato, H. Ishiguro and M. Barth, "Identifying and Localizing Robots in a Multi-Robot System Environment", Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol 2, pp. 966 – 971, Kyongju , Korea, 1999.
- [13] D. Fox, W. Burgard, H. Kruppa and S. Thrun, "Collaborative Multi-Robot Localization", Proc. of the German Conference on Artificial Intelligence (KI), pp. 255 – 266, Germany, 1999.
- [14] U. Nehmzow, "Animal and Robot Navigation", The Biology and Technology of Intelligent Autonomous Agents (L. Steels), Nato/ASI series, NATO 920908, Springer Verlag, 1993.
- [15] L. Lopes, N. Lau and L. Reis, "D. Dinis: Um Robô com Sentido de Orientação", *Electrónica e Telecomunicações*, vol 2, nº 6, DET-Universidade de Aveiro, 1999.
- [16] H. Everett, "Sensors for Mobile Robots, Theory and Application", A K Peters Ltd, 1995.
- [17] Borenstein, J., H. Everett and L. Feng, "Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning", University of Michigan, 1996, see: www.eecs.umich.edu/~johannb/pos96rep.pdf
- [18] G. Avolio, "Principles of Rotary Optical Encoders", Sensors, pp. 10 – 18, April, 1993.
- [19] E. Wise, "Applied Robotics", Prompt Publications, 1999.
- [20] Microchip, "PIC 16F87x Data Sheet", Microchip Technology Inc, USA, 1999.
- [21] Dinsmore, "Datasheet of Analog Hall-Effect sensor; part no. 1655", Dinsmore Instrument Company, USA, 1998.
- [22] Agilent, "HDSN2000 Technical Data", Agilent Technologies Inc., 2000.
- [23] V. Silva, T. Silva and F. Santos, "Bulldozer: O Valor da Aleatoriedade", *Electrónica e Telecomunicações*, vol. 2, nº 6, pp. 804-805, DET-Universidade de Aveiro, 1999.
- [24] J. Capucho and J. Parente, "Detecção do Farol: Estudo para Aplicação no Robot Tripé II", *Electrónica e Telecomunicações*, vol 2, nº 6, pp. 806-807, DET-Universidade de Aveiro, 1999.