

Sistema de Visão Para *Robots* Móveis: o Caso do *Robot CharrUA*

Alexandre Santos, Pedro Leite, Ricardo Marau, Ana Sargento,
José Luís Azevedo, Bernardo Cunha, Pedro Fonseca, Luís Almeida

Resumo - Neste artigo é apresentada uma breve descrição de um *robot* desenvolvido para participar no ROBÓTICA 2003 – Festival Nacional de Robótica (Portugal), sendo dada uma ênfase particular ao sistema de visão.

Este trabalho culmina, em 2003, um processo de desenvolvimento evolutivo na área da robótica móvel, no qual o DET tem, desde 1996, investido um esforço significativo com o envolvimento permanente de docentes e de alunos não graduados. O *robot* descrito é baseado numa arquitectura distribuída, assente num barramento CAN (Controller Area Network), e utiliza um sistema de visão apoiado em três WebCam's. O controlo global está centrado num computador portátil a correr o sistema operativo Linux, o qual tem acesso, na mesma filosofia distribuída, a toda a informação sensorial e de actuação do *robot*.

Abstract – In this paper we describe a robot that has been developed to participate in the Portuguese Robotics National Contest - ROBÓTICA 2003 – Festival Nacional de Robótica, with a particular emphasis on the vision system.

This work stands out as the current top evolutionary phase of a continuous effort in the area of mobile robotics that has been carried out by the DET since 1996, with the permanent involvement of both teachers and under-graduated students. This robot is built on top of a distributed architecture, based on a CAN network, and uses a Vision System with three WebCams. The core of the robot global control is a Laptop PC running the Linux operating system. The distributed solution grants the overall control Laptop full access to the robot sensorial information and actuators nodes.

I. INTRODUÇÃO

Desde 1996 que o DET vem participando regularmente em competições nacionais e internacionais de robótica móvel. A importância deste envolvimento competitivo tem-se revelado particularmente significativo, não só pelas classificações que tem sido possível obter, mas principalmente pela componente pedagógica que lhe tem sido deliberadamente associada e pela motivação que tal envolvimento tem suscitado na criação de uma área multi-disciplinar de investigação directamente ligada a esta actividade.

No caso específico do *robot* descrito neste artigo, a sua concepção teve como principal objectivo a participação na competição na classe UIP (Universidades e Institutos Politécnicos) integrada no evento ROBÓTICA 2003, que

se realizou em Lisboa, de 9 a 11 de Maio do ano em referência.

O objectivo principal desta competição, a cumprir pelo *robot*, consiste em percorrer uma pista de fundo preto, delimitada por duas linhas brancas (simulando as condições semelhantes às encontradas por um automóvel numa estrada), no menor tempo possível (Fig. 1). O *robot* depara ainda com um conjunto de dificuldades suplementares, como sejam um semáforo junto a uma passadeira que fornece indicações de paragem ou direcção a seguir, ou um túnel no qual a navegação tem de ser efectuada em condições de iluminação distintas das encontradas no exterior e na ausência das linhas delimitadoras da pista.



Fig. 1 - Pista da classe UIP.

Ao longo deste artigo é feita uma descrição sucinta de um dos *robots* desenvolvidos na UA para participação nessa competição, de nome CharrUA (um acrónimo para *CHeap Autonomous Reliable Robot from Universidade de Aveiro*), na qual se destacam, em particular, aspectos da sua estrutura mecânica, os algoritmos de processamento de imagem para identificação dos sinais do painel sinalético e para seguimento da pista, as estratégias de aferição e calibração do compensador do sistema de guiamento do *robot* e ainda a estruturação e optimização do *software* de controlo global do *robot*.

II. ESTRUTURA MECÂNICA

Do ponto de vista mecânico, o *robot* está construído sobre uma estrutura tubular de alumínio semelhante a um *chassis* de automóvel, como pode ser observado na Fig. 2. Uma característica importante da estrutura mecânica deste *robot* é a sua flexibilidade que se traduz na facilidade de substituição de cada componente sem constrangimentos de espaço ou localização, ou na adição de novos componentes à estrutura já existente, ou mesmo na reconfiguração desses componentes com vista à utilização do *robot* em outras aplicações.

Na parte anterior dessa estrutura estão montados os motores eléctricos de tracção, enquanto que na parte posterior uma roda maluca funciona como ponto de apoio e sustentação do *robot*. Sobre o eixo dos motores (de modo a minimizar o momento de inércia), estão posicionadas 3 baterias de chumbo (12V / 7,2A/H) que asseguram a alimentação dos sistemas de potência e de controlo do *robot*.

Sobre a parte posterior do *robot* está colocado o computador de controlo global (um computador portátil) ao qual estão ligadas três câmaras que constituem o respectivo sistema de visão. Para suporte à fixação das câmaras existe uma estrutura mecânica que permite o ajuste tridimensional da sua posição relativamente ao *robot*. Por seu lado, a fixação da câmara a essa estrutura é feita através de uma rótula, o que permite o ajuste fino do respectivo campo de visão.

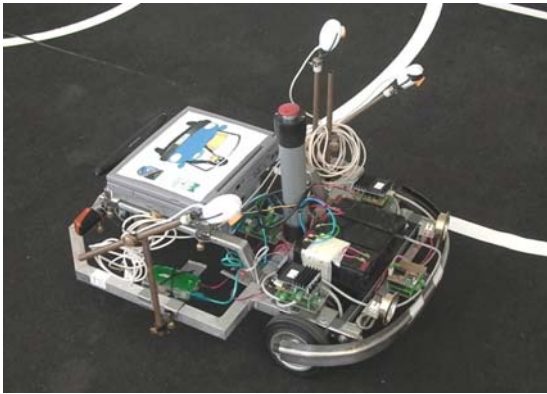


Fig. 2 - Foto do CharrUA.

São ainda partes integrantes da estrutura mecânica do *robot*: um sistema de faróis para ajuda à navegação em zonas com deficiente iluminação (e.g. dentro do túnel da competição); um conjunto de farolins para indicação de mudança de direcção e de paragem; um interruptor para paragem de emergência.

III. DECOMPOSIÇÃO EM SUB-SISTEMAS

O CharrUA baseia o seu funcionamento numa arquitectura distribuída, constituída por cinco módulos independentes ligados entre si por um barramento CAN (Controller Area Network), cada um dos quais responsável por executar uma determinada tarefa ou conjunto de tarefas (Fig. 3). Cada um destes módulos é construído por duas placas interligadas: uma genérica que contém um microcontrolador (PIC16F876 da MicroChip [5]) e respectivas interfaces de comunicação (CAN e RS232); uma específica, desenvolvida de acordo com a funcionalidade desejada, e que permite a interface com sensores, motores, etc. Assim, dois desses módulos são responsáveis pelo controlo em malha fechada da velocidade dos dois motores de tracção, outros dois funcionam como interface de entrada/saída para sensores e actuadores. Um último módulo funciona como *gateway* entre o barramento CAN e a porta RS232 do PC, ou seja,

permite a integração do PC como um nodo do sistema distribuído.

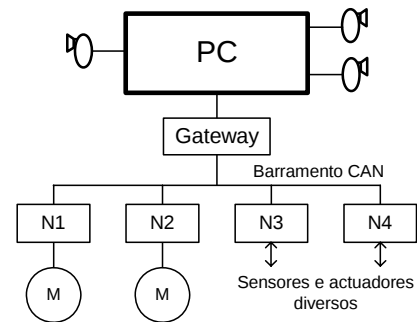


Fig. 3 – Arquitectura de comando e controlo do *robot*.

O PC é o responsável pelo controlo global do *robot*. A partir da informação sensorial obtida através das câmaras (e restantes sensores), o PC efectua o processamento principal e actua, através do envio de comandos, sobre o sistema de tracção. Assim, o *robot* pode ser decomposto em dois sub-sistemas fundamentais:

- Sistema de Visão (SV)
- Controlo motriz (CM)

As secções seguintes descrevem cada um destes sub-sistemas, com maior ênfase no sistema de visão, uma vez que o sistema de controlo motriz é praticamente idêntico ao herdado do seu antecessor, o *robot* CRAB [1].

A. Sistema de Visão

O sistema de visão é constituído por três *WebCams* Philips USB ToUcam Pro PCVC740K ligadas através de um Hub USB a um LaptopPC. Este último, na solução implementada, baseia-se num CPU Pentium 133 MHz com 48MB de memória RAM, a correr o S.O. GNU/Linux Mandrake 8.1.

O reduzido angulo de abertura das lentes das *WebCams* utilizadas ($\approx \pm 15^\circ$) torna pouco viável a utilização de uma única câmara, posicionada no centro do *robot*, para visualização simultânea de ambas as linhas delimitadoras da pista (uma câmara única, colocada no centro do *robot*, teria que estar a uma altura superior a 1.5 metros para se ter uma imagem completa da pista). Optou-se assim pela utilização de duas câmaras direccionadas individualmente para cada uma dessas linhas, encontrando-se a terceira *WebCam* posicionada por forma a permitir a observação do painel sinalético. Devido a limitações do Laptop utilizado, apenas é possível, em cada instante, captar a imagem proveniente de uma das três câmaras.

A.1. Identificação do símbolo do Painel Sinalético

O painel sinalético apresenta, no decurso da prova, um de cinco símbolos possíveis, caracterizados por uma determinada forma e por uma de três cores: vermelho, verde ou amarelo (Fig. 4). O quinto símbolo (que pretende representar a bandeira de chegada) é uma excepção, por

apresentar em alternância duas imagens baseadas nas cores verde e vermelha.



Fig. 4 - Sinais do painel sinalético.

A identificação, pelo *robot*, do símbolo apresentado, é baseada num algoritmo que extrai um conjunto de características morfológicas da imagem através das quais é possível determinar a forma do mesmo. Este algoritmo desenrola-se em quatro fases de processamento distintas:

- obtenção de um bitmap por segmentação diferenciada na componente cromática da imagem;
- aplicação de um filtro passa baixo com ganho elevado;
- obtenção do mapa de energia da imagem resultado, determinação do centro de massa do símbolo a identificar e isolamento do mesmo;
- determinação do valor dos parâmetros morfológicos a avaliar e identificação por critério de maioria do símbolo apresentado.

No exemplo que a seguir se descreve é possível observar o resultado de cada uma dessas fases e caracterizar com mais detalhe cada uma delas. Na imagem RGB (QSIF 160x120) [3] usada no exemplo (Fig. 5) foi deliberadamente introduzido um objecto de cor laranja (uma bola) por forma a simular condições extremas de ruído na zona cromática de interesse. Saliente-se que é um pressuposto do algoritmo utilizado a não existência, na imagem capturada, de outro objecto com energia semelhante ou superior ao do símbolo a detectar. Tal pressuposto pode ser considerado válido em condições normais de prova, em particular se se atender ao facto de o símbolo apresentado no painel sinalético ser formado por um conjunto activo de fontes luminosas.

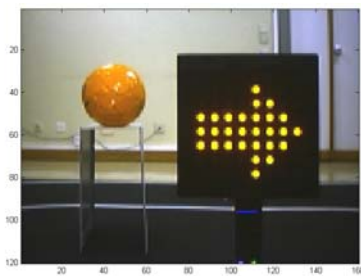


Fig. 5- Imagem capturada.

Fase 1

A primeira fase do algoritmo, que se destina a obter uma versão binária da imagem por segmentação, apoia-se em dois pressupostos fundamentais: por um lado, a luz emitida pelos leds que compõem o símbolo, corresponde a áreas de elevada energia na imagem. Por outro lado, estes leds emitem luz numa banda do espectro visível que vai

do infra-vermelho ao verde, mas que tem energia praticamente nula na banda do azul; em compensação, toda a zona da imagem que envolve o símbolo é iluminada com luz branca, reflectindo assim uma significativa quantidade de azul. É assim efectuado um primeiro tratamento da imagem na qual se eliminam todos os pixels com energia na componente azul superior a um nível pré-definido – 30% da energia máxima da imagem. A imagem resultado é por sua vez reduzida a um bit/pixel, por *thresholding* estático das componentes verde e vermelha, retendo apenas os pixels com energia nestas componentes superior a 90% do valor máximo. O resultado é o bitmap que é possível observar na Fig. 6. Note-se a mancha bem visível correspondente ao ruído artificialmente introduzido.

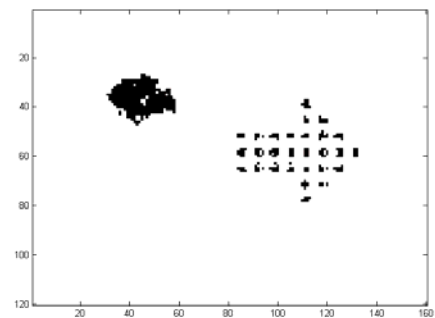


Fig. 6 - Imagem binária após a fase 1.

Fase 2

Na segunda fase do algoritmo, por forma a obter um padrão uniforme que corresponda ao símbolo a detectar, é aplicada uma técnica de *image growing*. O ruído que possa estar presente na imagem corresponde, geralmente, a pequenas manchas uniformes, enquanto que o símbolo a detectar é constituído por uma colecção de manchas, uniformemente distribuídas no espaço, correspondentes aos LED's do painel sinalético. O objectivo é assim fazer propagar para a sua vizinhança cada pixel com energia não nula, por forma a preencher o espaço entre leds da imagem original. Para o efeito é aplicado um filtro passa baixo de ganho elevado – 25 – com saturação a um bit, por convolução da imagem obtida da fase anterior com uma matriz de 5x5 pixels de coeficiente unitário. O resultado pode ser observado na Fig. 7

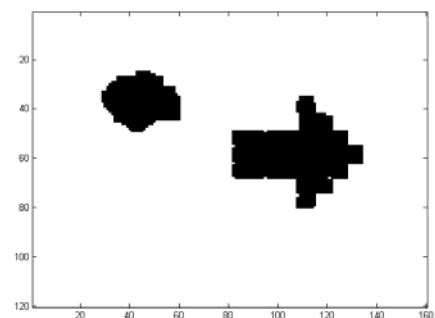


Fig. 7 - Imagem após o processamento da fase 2.

Fase 3

Na fase três, e estabelecendo uma analogia entre a área ocupada por cada objecto presente na imagem e a energia que lhe corresponde, procura obter-se um critério de filtragem que permita isolar o símbolo a identificar das manchas de ruído que eventualmente o envolvam. Para o efeito é aplicado à imagem um novo filtro passa-baixo de ganho elevado, por convolução da mesma com uma matriz de 40x40 pixels com coeficientes unitários.

Obtém-se assim um mapa que relaciona cada pixel da imagem com a energia da sua vizinhança na proximidade da componente contínua (Fig. 8). O plano correspondente ao nível de *thresholding* pode ser observado na Fig. 8, verificando-se facilmente que a energia do *blob* correspondente à bola laranja se encontra sempre abaixo desse plano. Garante-se desta forma que, na imagem resultante, a mancha sobranete pertence necessariamente ao símbolo a detectar. O centro de massa dessa mancha, por outro lado, corresponderá ao centro geométrico do símbolo, o que permite isolar, na imagem visível na Fig. 7, o símbolo pretendido, retendo apenas os pixels que têm vizinhança não nula com aquele que corresponde a esse centro geométrico.

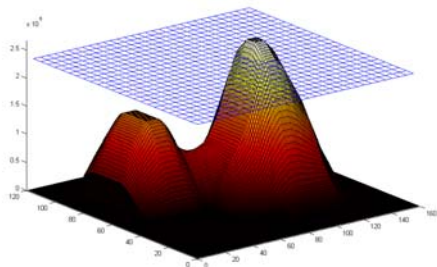


Fig. 8 - Superfície de energia da imagem.

Fase 4

Na última fase, e com o objectivo de efectuar a determinação, através da forma, do símbolo apresentado, procura obter-se um conjunto limitado e suficiente de parâmetros que o caracterizem morfologicamente. Para tal, a imagem é dividida horizontalmente em dois sub-bitmaps nos quais se não inclui, deliberadamente, uma faixa central constituída por 12 linhas em torno da ordenada do centro geométrico do símbolo. Compensa-se desta forma o erro cumulativo na determinação desse centro geométrico que possa ter resultado da natureza discreta das operações efectuadas nas fases anteriores. Em cada um desses sub-bitmaps é determinada, por observação de todas as linhas que o compõem, a largura máxima do símbolo, correspondente a um *array* contíguo de pixels não nulos. O resultado são dois valores que caracterizam a largura máxima superior e inferior do símbolo, respectivamente designadas por *LS* e *LI* (Fig. 9a). O mesmo processo é aplicado por divisão vertical da imagem em dois sub-bitmaps, com o objectivo de

determinar as alturas máximas das componentes esquerda (*AE*) e direita (*AD*) do símbolo (Fig. 9b).

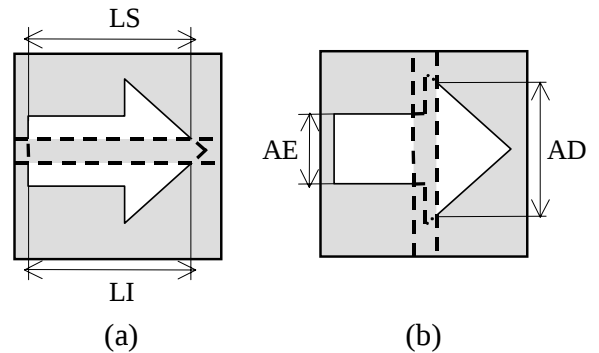


Fig. 9 - Esquema para determinar a morfologia.

Por comparação das dimensões relativas destes quatro parâmetros é possível identificar qualquer um dos cinco símbolos. As condições relacionais que determinam a identificação encontram-se sintetizadas na Tabela 1, sendo que a verificação das igualdades é determinada para intervalos de validação de ± 4 pixels, por forma a acomodar erros acumulados das fases anteriores.

Símbolo	Condição
Seta Cima	$LS > LI \ \& \ AE = AD$
Seta Direita	$LS = LI \ \& \ AE < AD$
Seta Esquerda	$LS = LI \ \& \ AE > AD$
Cruz	$LS = LI \ \& \ AE = AD$
Bandeira	$LS = LI \ \& \ AE = AD$

Tabela 1 - Condições de detecção de símbolo.

As condições de detecção da cruz e da bandeira são, como se pode observar, as mesmas. pelo que, para as distinguir, se determina a largura do símbolo na ordenada do centro geométrico do mesmo, o qual, no caso da cruz é significativamente menor do que *LS*.

A.2. Seguimento de Linha

Como referido anteriormente, o guiamento do *robot* é baseado num sistema de visão constituído por duas câmaras, cada uma delas direccionada para uma linha delimitadora da pista.

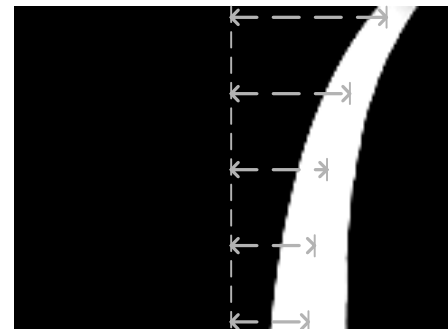


Fig. 10 - Limite da pista, visto pelo *robot*, com identificação das linhas da imagem utilizadas na medição do desvio.

As câmaras de guiamento estão posicionadas de modo a obter-se uma imagem correspondente a uma área com cerca de 45 cm de largura e 70 cm de comprimento, imediatamente à frente do *robot* (a distância entre a frente do *robot* e o eixo onde estão colocados os motores de tracção é aproximadamente 25 cm).

A partir dessa imagem, pode medir-se o desvio da trajectória do *robot* (referenciada a uma linha recta no centro da imagem) relativamente à linha delimitadora da pista observada através da câmara. Em situação de alinhamento o desvio calculado será nulo, sendo então a missão do sistema de guiamento compensar a trajectória do *robot* de modo a anular o desvio, actuando com comandos de velocidade sobre cada um dos motores de tracção.

Para a obtenção do desvio do *robot* são processadas cinco linhas horizontais da imagem, igualmente espaçadas, tal como representado na Fig. 10. A metodologia utilizada para o cálculo do desvio, bem como o pré-processamento da imagem necessário para esse efeito, podem ser encontrados em [2].

Do processamento de cada uma das cinco linhas resulta o desvio, nessa zona da imagem, entre a posição do *robot* e a linha que ele deve seguir. Ponderando cada um destes cinco desvios obtém-se um desvio equivalente, que é posteriormente utilizado como entrada para um compensador proporcional-integral-diferencial (PID). O desvio equivalente d pode então ser expresso pela seguinte fórmula:

$$d = \frac{\sum k_i d_i}{\sum k_i}$$

com $k = [1 \ 2 \ 4 \ 7 \ 11]$

Para aferir o funcionamento do compensador implementado, e desse modo caracterizar o comportamento do *robot* em termos de guiamento, mediu-se a resposta do *robot* em duas situações distintas: 1) resposta do *robot* a uma variação brusca de trajectória, sem no entanto haver descontinuidade; 2) resposta a uma variação brusca da trajectória, com descontinuidade. Estes dois cenários de teste estão caracterizados na Fig. 11.

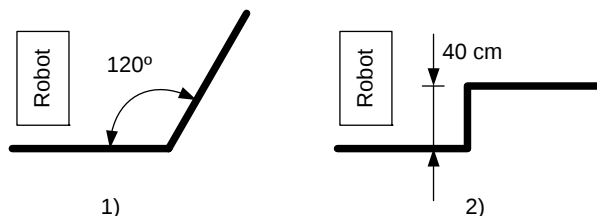


Fig. 11 – Cenários de teste para medição da resposta do sistema de guiamento do *robot*.

Os resultados observados nos cenários de teste 1 e 2 estão representados nos gráficos da figura Fig. 12 e da Fig. 13, respectivamente, tomando como referência o

desvio medido (em centímetros) na linha intermédia da imagem, a três velocidades: 1.1 m/s, 1.3 m/s e 1.5 m/s.

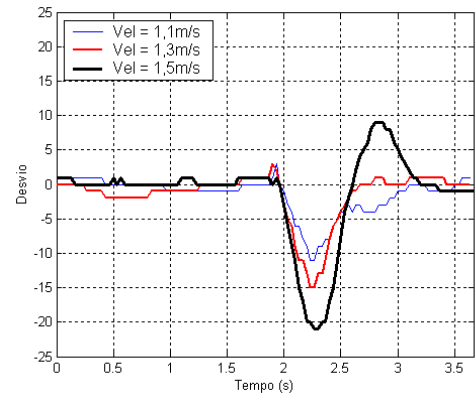


Fig. 12 – Resposta do *robot* a uma mudança de trajectória (cenário de teste 1).

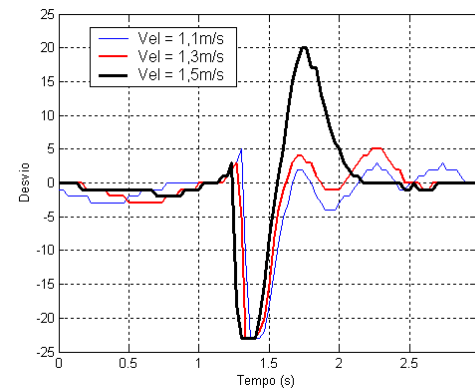


Fig. 13 - Resposta do *robot* a uma mudança de trajectória (cenário de teste 2).

A.3. Detecção de Entrada de Túnel

O túnel, colocado sobre a zona curva da pista, tem cerca de 3,5 metros de comprimento, 1,20 m de largura e 1 m de altura. O seu interior é pintado de cor branca e a entrada é formada por um bordo, também branco, de 5cm de largura. Dentro do túnel as linhas delimitadoras da pista são interrompidas, tal como se mostra na Fig. 14. Essa interrupção resulta numa descontinuidade espacial nas transições preto/branco, que é aproveitada pelo *robot* para identificar a entrada do túnel.



Fig. 14 - Imagem da entrada do túnel vista pelo *robot*.

No interior do túnel o seguimento deixa de ser feito por uma linha branca e passa a ser feito pela transição de cor existente entre a parede do túnel branca e o chão preto. Os desvios são calculados usando o mesmo método do seguimento de linha. Como o *robot* não pode tocar nas paredes do túnel, deve agora seguir mais afastado da transição que observa, sendo então adicionado um *offset* aos desvios calculados.

A.4. Detecção da Passadeira

A detecção de aproximação à passadeira é feita pela análise da quantidade de branco da imagem (Fig. 15). A existência de áreas brancas, nas quais se não incluem a linha delimitadora, é quantificada e o seu valor comparado com um nível de *threshold* pré-definido. A obtenção de um valor superior a esse *threshold* determina que a passadeira se encontra na proximidade do *robot*. Esta informação é apenas usada para fazer diminuir a velocidade do *robot*, sendo a detecção da passadeira propriamente dita, para efeitos de paragem, efectuada por um sensor de infra-vermelhos colocado na parte posterior do *robot*.



Fig. 15 - Imagem da passadeira vista pelo *robot*.

B. Controlo de Velocidade dos Motores de Tracção

Os motores utilizados no *robot* são motores DC da marca Maxon alimentados a 24V. Os grupos de tracção incluem ainda uma caixa redutora (26:1) e um codificador incremental bifásico de 500 P/R.

O controlo global do sistema de tracção é implementado em duas camadas distintas:

- uma de baixo nível, assegurada por um nodo CAN com placa de potência; a este nível o controlo de velocidade é obtido por modulação PWM, cujo duty-cycle é determinado por um compensador proporcional integral a partir da informação obtida dos codificadores [1].
- uma de alto nível, implementada no computador portátil, que, com base no sistema de visão, desencadeia os comandos que são distribuídos à camada de controlo de baixo nível.

IV. CONTROLO GLOBAL DO ROBOT

O controlo global do CharrUA é executado pelo computador portátil. Este trata a informação sensorial proveniente do sistema de visão e dos diferentes módulos

do sistema e actua em conformidade gerando tramas de comando, enviadas através da *gateway* RS232-CAN para os módulos actuadores (contolo de velocidade dos motores). O processamento efectuado pelo PC inclui os seguintes algoritmos: seguimento de linha, identificação do sinal do painel sinalético, aproximação e detecção da passadeira, e detecção e navegação no túnel. A execução casuística de cada um destes algoritmos obedece a uma máquina de estados que, na versão Robotica2003, corresponde ao diagrama apresentado na Fig. 16.

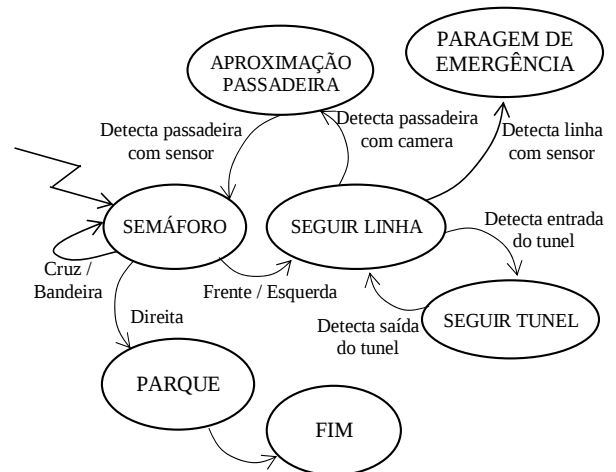


Fig. 16 - Diagrama de estados do sistema de controlo global do *robot*.

Este diagrama de estados determina ao mais alto nível o comportamento que o *robot* deve adoptar em prova de acordo com as regras da competição [4].

Resumidamente, o *robot* deve dar duas voltas completas à pista, identificando adequadamente a sinalética que lhe é fornecida, parar, sempre que a indicação seja essa, na zona da passadeira, e parquear, no final da prova, numa zona para tal reservada.

A navegação sobre a pista (estado SEGUIR_LINHA) inclui a detecção da entrada do túnel, a detecção de aproximação à passadeira e ainda a detecção de saída extemporânea da pista, determinando a passagem para um estado de paragem de emergência.

Refira-se finalmente que a implementação do sistema de controlo global e algoritmos associados, embora parcialmente herdado de versões anteriores do *robot*, foi completamente re-estruturada e optimizada, tendo em vista dois aspectos fundamentais: optimização da *performance* do processamento de modo a suportar o tratamento de 30 imagens por segundo; a construção de uma estrutura de suporte modular que permita uma evolução futura simples e consistente.

V. CONCLUSÕES

Este artigo descreve de forma sucinta os aspectos estruturais e funcionais mais relevantes do *robot* CharrUA. Este *robot* cumpre todas as especificações da classe UIP do Festival Nacional de Robótica, edição de

2003, sendo de salientar que a sua estrutura mecânica e electrónica, modular e expansível, foi herdada da versão que o precedeu, o *robot* CAPICUA (vencedor da classe UIP da edição de 2002 do mesmo festival, tendo ainda recebido o prémio especial do júri desse ano).

Este artigo salienta os desenvolvimentos efectuados ao nível de três vertentes fundamentais:

- algoritmo de processamento de imagem para identificação dos sinais do painel sinalético apoiado numa metodologia de reconhecimento de forma;
- implementação de estratégias de aferição e calibração do compensador do sistema de guiamento do *robot*;
- estruturação e optimização do *software* de controlo global do *robot*.

Em termos de desempenho, o *robot* CharrUA cumpriu integralmente as especificações da competição em que participou tendo saído vencedor da mesma.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Abreu, T. Meireles, J. L. Azevedo, P. Fonseca, L. Almeida, "CRAB – Um *robot* caranguejo", Universidade de Aveiro, Revista do DETUA, Vol. 3, Nr. 2, pp. 125-132, Outubro de 2000.
- [2] L. Magalhães, B. Silva, H. Lemos, N. Nunes, J. L. Azevedo, B. Cunha, P. Fonseca, L. Almeida, "CYCLOP – *robot* autónomo baseado em CAN com sistema de visão", Universidade de Aveiro, Revista do DETUA, Vol. 3, Nr. 5, pp. 454-460, Janeiro de 2002.
- [3] Keith Jack, Video Demystified, 3rd Edition, Technology Publishing, ISBN 1-878707-56-6.
- [4] Sítio do Robótica2003: <http://robotica2003.ist.utl.pt/>
- [5] Sítio da MicroChip: <http://www.microchip.com>