

CYCLOP – robot autónomo baseado em CAN com sistema de visão

Luis Magalhães, Bruno Silva, Helder Lemos, Nuno Nunes,
José Luis Azevedo, Bernardo Cunha, Pedro Fonseca, Luís Almeida

Resumo – Neste artigo efectua-se uma breve descrição do robot *CYCLOP*, construído no âmbito de um projecto do Departamento de Electrónica e Telecomunicações (DET) da Universidade de Aveiro, com vista a participar nas provas do **ROBOTICA 2001 – Festival Nacional de Robótica (Portugal)** e no **FIST 2001 – Festival International des Sciences et Technologies (França)**.

Este projecto dá seguimento ao trabalho realizado em anos anteriores, em particular com o robot *CRAB*.

O *CYCLOP* caracteriza-se essencialmente por se basear numa arquitectura distribuída, assente sobre um barramento Controller Area Network (CAN), e por utilizar um sistema de visão constituído por uma WebCam, com processamento centrado num PC a correr um sistema operativo Linux.

Abstract – This paper presents a brief description of the *CYCLOP* robot developed at the Department of Electronics and Telecommunications (DET) of the Aveiro University, and aiming to participate in **ROBOTICA 2001 – Festival Nacional de Robótica (Portugal)** and in **FIST 2001 – Festival International des Sciences et Technologies (France)**.

The work around *CYCLOP* is based on the work carried out in previous years, particularly with the *CRAB* robot.

Some of the distinguishing features of the *CYCLOP* robot are a distributed architecture based on a Controller Area Network (CAN) and a WebCam-based vision system, whose processing core is a PC running a Linux OS.

I. INTRODUÇÃO

A participação do DET em competições robóticas, à parte a própria organização de competições, tem vindo a tornar-se cada vez mais frequente e usual, tendo sido iniciada em 1996. Em particular no ano de 2001, o DET esteve representado no concurso anual da AAAI – American Association for Artificial Intelligence (USA)¹, no RoboCup (USA)² e ainda no **ROBOTICA 2001 – Festival Nacional de Robótica (Portugal)**³. A participação no **FIST 2001 – Festival International des Sciences et Technologies (França)**⁴, embora planeada, acabou por não

se realizar devido ao cancelamento da prova pela organização.

O interesse destas participações tem sido já por várias vezes abordado [8][9] e prende-se com aspectos pedagógicos e mediáticos. Os primeiros dizem respeito não apenas a aspectos técnico-científicos, como a reutilização e integração de conceitos leccionados em disciplinas diversas e a investigação na área específica da robótica móvel, como também a aspectos sociais tais como o trabalho em grupo, o gosto por fazer e a adaptação a um mundo cada vez mais competitivo.

No caso particular deste artigo, o robot em causa foi desenvolvido para participar em dois eventos com competições de robótica, o **ROBOTICA 2001** e o **FIST 2001**. O primeiro realizou-se em Guimarães, de 25 a 28 de Abril, e representou a estreia em Portugal de um evento multifacetado dedicado à Robótica, com competições de dois níveis de complexidade e com um encontro científico. As competições deste evento, que se pretende organizar anualmente, estão repartidas por duas classes, a UIP para universidades e institutos politécnicos, e a ESP para escolas secundárias e profissionais.

O segundo evento é realizado anualmente em França desde 1994, tendo o DET participado regularmente desde 1996. É igualmente um evento multifacetado, com várias competições, demonstrações e outras actividades científicas. Destaque-se as competições das classes livre e monotipo onde, por várias vezes, o DET esteve representado. Infelizmente, e conforme referido atrás, a edição de 2001 acabou por ser cancelada. Contudo, este facto não alterou a decisão inicial de construção do robot de acordo com as respectivas especificações.

Assim, o robot *CYCLOP* foi construído com vista a cumprir as especificações das duas competições, **ROBOTICA 2001** na classe UIP e **FIST 2001** na classe livre, com o mínimo de alterações para transitar de uma para outra.

Neste artigo faremos uma breve descrição do robot *CYCLOP* que se sagrou vencedor da classe UIP no **ROBOTICA 2001**, tendo ainda recebido o Prémio de Engenharia daquela classe. Alguns subsistemas, devidamente identificados ao longo do texto, foram herdados do robot *CRAB* [1], construído para participação na classe livre do **FIST 2000** onde se classificou em 3º lugar, tendo sido distinguido com o Prémio Especial do Júri. Na secção II apresentamos um resumo das regras das duas competições referidas. Na secção III mostra-se a

¹ <http://www.cis.ksu.edu/~dag/aaai2001/hdcontest.html>

² <http://www-2.cs.cmu.edu/~robocup2001>

³ <http://www.robotica.dei.uminho.pt/robotica2001/>

⁴ <http://www.robotik.org/>

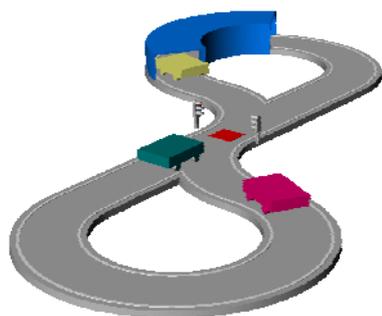


Fig. 1 - Pista do concurso Robótica 2001

decomposição em subsistemas bem como a descrição dos mesmos. Na secção IV aborda-se o controlo global do robot enquanto na secção V se conclui o artigo.

II. REGRAS DA COMPETIÇÃO

Conforme já referido, as especificações técnicas do robot *CYCLOP* foram deduzidas a partir das exigências dos regulamentos das competições classe UIP do ROBOTICA 2001 e classe livre do FIST 2001.

No primeiro caso, classe UIP do ROBOTICA 2001, o objectivo principal era percorrer o mais rapidamente possível uma pista preta aproximadamente em forma de oito, sinalizada por duas linhas delimitadoras brancas, à semelhança de uma estrada. Nesta pista existia também um túnel que deveria ser percorrido sem nunca se tocar nas suas paredes. No cruzamento central existia ainda um semáforo, replicado de ambos os lados da pista cujas indicações poderiam ser: vermelho para parar, verde para seguir pela esquerda e azul para seguir em frente. A zona de partida / chegada era coincidente com o cruzamento da pista e era sinalizada por um rectângulo pintado a vermelho (fig. 1).

No decorrer da prova os robots teriam de percorrer toda a pista duas vezes seguindo as direcções apontadas pelo semáforo, indicações essas que não eram conhecidas a priori. O arranque era dado pela passagem do semáforo de vermelho para verde ou azul. Na chegada o semáforo estaria também a vermelho instruindo o robot para parar. Nas restantes três passagens pelo cruzamento central o semáforo ficaria obrigatoriamente vermelho uma vez.

Nesta prova existiam várias penalizações relativas ao não seguimento da sinalética do semáforo, ao não confinamento da trajectória à zona delimitada pelas linhas, e outras.

No caso da classe livre do FIST 2001, o robot teria de seguir uma linha pintada no chão, ora branca sobre fundo preto ora preta sobre fundo branco, com cerca de 60m de comprimento. A linha formava um circuito fechado que teria de ser percorrido no menor tempo possível sendo a posição de partida / chegada, indicada por um troço de linha transversal, conhecida apenas no início de cada prova.

A prova continha duas dificuldades adicionais, por um lado uma rampa com cerca de 20% de inclinação colocada no percurso em posição desconhecida a priori e um conjunto de bolas de bilhar que deveriam ser recolhidas pelo robot e transportadas até ao final do trajecto. As bolas de bilhar estavam colocadas sobre pequenos pedestais cilíndricos estreitos (aprox. 4 cm), revestidos com material reflector de luz e colocados a 80 cm de distância da linha medidos na perpendicular a esta. As bolas deveriam ser recolhidas sem derrubar os respectivos pedestais.

III. DECOMPOSIÇÃO EM SUBSISTEMAS

O *CYCLOP* baseia o seu funcionamento numa arquitectura distribuída, cuja comunicação entre os diferentes módulos é efectuada por um barramento CAN (*Controller Area Network*) [3]. Os módulos interligados por CAN são baseados em placas controladoras do sistema CANivete [2] que permitem a carga de programas através da própria rede. Existe, contudo, um módulo baseado num PC portátil que é interligado aos restantes via ligação série RS232 através de uma *gateway* RS232-CAN [5].

O *CYCLOP* pode ser decomposto em quatro subsistemas físicos descritos adiante (fig. 2):

- Energia, Motricidade e Direcção (EMD);
- Sistema de Visão e Controlo Global (SV/CG);
- Interface Sensorial (IS);
- Gateway RS232-CAN (G).

O primeiro destes subsistemas (EMD) é essencialmente uma herança do *CRAB* [1][7], o predecessor do *CYCLOP*. É constituído por uma placa controladora CANivete juntamente com uma placa de interface aos motores. O segundo, o sistema de visão (SV), é baseado num PC portátil onde também é executado o controlo global do robot (CG). O terceiro, o sistema de interface sensorial (IS), está construído sobre uma placa controladora CANivete incluindo também uma outra carta de interface aos sistemas de detecção dos semáforos, da parede do túnel, da rampa, e de recolha de bolas de bilhar. O quarto subsistema, a *gateway* RS232-CAN (G), partilha a mesma placa controladora do subsistema IS.

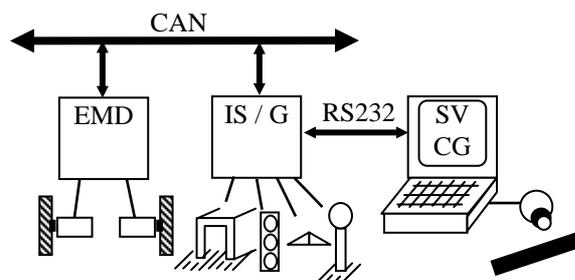


Fig. 2 - Subsistemas do CYCLOP

A. Energia, Motricidade e Direcção

A energia que permite o funcionamento do *robot* é exclusivamente eléctrica, obtida a partir de 3 baterias de 12 V colocadas na plataforma inferior do *robot*, sobre o eixo dos motores. Enquanto uma das baterias alimenta a parte de controlo, as restantes são usadas para alimentar o circuito de potência dos motores do *robot* [1].

O movimento do *robot* é assegurado por dois grupos motrizes independentes, cada um deles constituído por um motor, caixa redutora e roda. Os motores são de limpa-pára-brisas de carro, trazendo já a caixa redutora acoplada. A roda, com aproximadamente 16 cm de diâmetro, foi montada directamente sobre o eixo de saída da caixa redutora [1]. Embora a tensão de alimentação nominal dos motores seja de 12V DC estes foram sobrealimentados a 24V por forma a obter velocidades mais elevadas.

Directamente no eixo de cada motor foi montado um codificador incremental bifásico para permitir o controlo em malha fechada do respectivo grupo motriz.

Os movimentos de curva e rotação são obtidos fazendo girar as rodas a velocidades e/ou sentidos diferentes (direcção diferencial) [1].

A electrónica do subsistema EMD está confinada a duas placas: a placa controladora CANivete e uma outra placa adjacente com toda a electrónica para controlo de potência dos motores e leitura dos codificadores, assim como alguns sistemas de protecção necessários.

A placa CANivete é responsável, por um lado, pela execução do controlo local em malha fechada da rotação dos dois motores, e por outro pela interligação ao resto do sistema através da rede CAN.

Para o controlo dos motores adoptou-se o compensador desenvolvido para o *CRAB* [7]. Esta solução era fiável e robusta, o que permitiu economizar tempo, útil para o desenvolvimento de outros aspectos do projecto.

No que diz respeito à integração no sistema global, este subsistema desempenha o papel de escravo já que se limita a receber ordens de movimentação recebidas via CAN e geradas pelo software de controlo global que executa no PC. A única comunicação no sentido inverso, isto é emitida pelo próprio subsistema EMD, é, para algumas ordens de movimentação, a indicação da respectiva conclusão.

O protocolo de comunicação com o subsistema EMD bem como os métodos básicos de movimentação foram desenvolvidos especificamente para o *CYCLOP*. Os métodos adoptados para movimentar o *CYCLOP* foram de dois tipos, a saber: comandos de velocidade para cada motor (*setpoints*) e movimentos pré-definidos. No primeiro caso, mais simples, os *setpoints* recebidos da rede CAN eram aplicados aos motores usando o compensador de controlo em malha fechada referido atrás. No segundo caso, recebia-se da rede CAN uma mensagem com o identificador do movimento pré-definido a executar e a distância a percorrer, em milímetros ou em décimos de grau conforme o movimento fosse rectilíneo ou de

rotação. De seguida executavam-se todos os cálculos e medições do deslocamento de modo a percorrer as distâncias pedidas. Finalmente, e só para os movimentos pré-definidos, era enviada de volta para a rede CAN a confirmação de execução da tarefa pedida.

B. Sistema de Visão

O sistema de visão constitui a principal inovação do *CYCLOP* face ao seu antecessor *CRAB* que usava um *array* de sensores infra-vermelhos discretos para seguimento de linha. Este sistema é constituído por uma WebCam Philips USB ToUcam Pro PCVC740K e um LaptopPC com um CPU Pentium a 100MHz correndo o S.O. GNU/Linux RedHat 6.2 em kernel 2.4.3. A WebCam comunica com o PC pela porta USB e o PC com o resto do robot através da porta série RS232.

A WebCam foi colocada ora na parte central da frente do robot (FIST) ora sobre o lado esquerdo (ROBOTICA). Note-se que, neste último caso, embora a pista fosse sinalizada com duas linhas laterais, o robot orientava-se apenas por uma.

B.1. Sistema de processamento de imagem

Para efectuar o processamento de imagem optou-se por um S.O. do tipo GNU/Linux devido ao facto deste possuir uma filosofia de sistema aberto, facilitando assim o desenvolvimento de *software*. Além disso é um S.O. robusto, fiável e gratuito. A escolha de uma WebCam deve-se essencialmente ao facto de, apesar deste tipo de câmara ser muito vulgar e barato, apresentar uma qualidade de imagem suficiente para o projecto em causa. Além disso a imagem é fornecida em formato digital, pronta a ser interpretada por qualquer PC compatível.

A utilização do kernel 2.4.3 deveu-se ao facto de ser uma das primeiras a possuir *device drivers* para USB fiáveis. Além disso este kernel é um dos poucos que suporta a câmara em causa, tendo que se efectuar sobre ele um *patch* seguido de uma recompilação. Desta forma a WebCam funciona sem falhas, à maior taxa de aquisição possível, cerca de 30 frames/s.

B.2. Seguimento de Linha

Para o seguimento de linha optou-se pelo uso de um compensador proporcional-diferencial (PD), com a particularidade de utilizar amostragem espacial simultanea em dois pontos distintos. A janela de visão proporcionada pela câmara permite visualizar o chão imediatamente à frente do robot num comprimento e largura aproximados de 60 por 40 cm, respectivamente (fig. 3). A imagem obtida é analisada por forma a retirar uma medida do desvio actual do robot face à trajectória ideal ($kp1*D1+kp2*D2$) bem como uma medida da derivada desse desvio ($kd*(D2-D1)$). A utilização de um compensador PD permite obter um melhor efeito antecipativo das variações da trajectória, facilitando o respectivo seguimento.

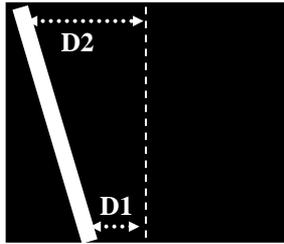


Fig. 3 - Medição dos desvios relativos à linha

Para calcular os desvios D1 e D2 em relação à trajetória ideal teve que se efectuar algum processamento sobre a imagem adquirida. Desta imagem são analisadas apenas duas linhas de *pixels* que são, primeiro, convertidas para um formato binário, usando um histograma para determinar o nível de decisão branco/negro. Posteriormente, estas linhas são correlacionadas com uma janela binária que representa a linha da pista centrada, na imagem. Os máximos desta correlação representam o desvio (D1 ou D2) da linha da pista captada pela imagem em relação à respectiva posição central (trajetória desejada).

A partir dos desvios obtidos e com base numa dada velocidade média, são calculadas as velocidades a aplicar a cada motor de modo a anular o erro observado (fig. 4). Os cálculos referidos são efectuados no PC que gera comandos de velocidade (*setpoints*) a serem enviados para o sistema EMD e aplicados aos motores.

Com este *setup* conseguiram-se obter taxas de aquisição de imagem próximas das 30 frames/s, permitindo ao *CYCLOP* seguir uma linha com 5cm de largura e curvas com 60cm de raio a uma velocidade média de 1,5 m/s.

C. Interface Sensorial

Por forma a cumprir as tarefas definidas nas respectivas especificações, o *CYCLOP* foi dotado de uma série de sensores e sistemas adequados. Alguns destes componentes são específicos para cada uma das provas (FIST e ROBOTICA) tendo de ser trocados para permitir ao robot competir numa e noutra. Nas descrições que se seguem é indicado entre parêntesis a prova para a qual o componente em causa é necessário.

C.1. Detecção de Zona de Paragem (ROBOTICA)

A zona de partida e chegada era assinalada por um

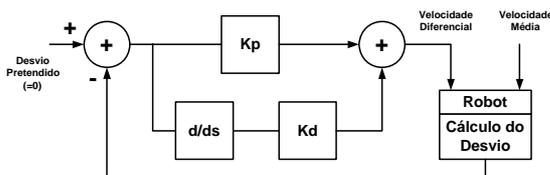


Fig. 4 - Compensador para seguimento de linha

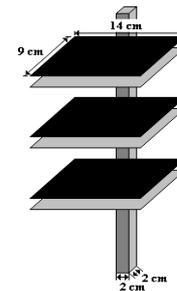


Fig. 5 - Sistema de detecção e discriminação do semáforo

quadrado vermelho a meio da pista. A sua detecção era feita por um par emissor-receptor digital de IV, colocados lado a lado. Este sensor estava colocado na frente do *CYCLOP* e perto do chão, tendo sido colocado dentro de um tubo negro e opaco por forma a minimizar as possíveis interferências da luz ambiental.

C.2. Detecção de Semáforo (ROBOTICA)

A detecção do semáforo foi efectuada através da percepção da posição das lâmpadas respectivas, quando acesas, independentemente da cor. O esquema seguido consistiu na construção de uma torre com 3 resistências foto sensíveis (*LDRs*) dispostas à altura das lâmpadas, apertadas entre placas não reflectoras, por forma a minimizar interferências luminosas, quer do exterior, quer das lâmpadas adjacentes (fig. 5). A utilização de placas em vez de tubos permite obter uma menor sensibilidade à orientação horizontal de cada *LDR* face à lâmpada respectiva. Este facto era importante por causa de alguma falta de precisão na posição de paragem do robot nos semáforos, essencialmente causada pela inércia deste.

As *LDRs* foram ligadas de modo a gerar sinais de tensão analógicos. Os 3 sinais resultantes foram directamente ligados a entradas analógicas do controlador do subsistema IS. O nível de decisão que permitia discriminar o estado aceso/apagado de cada lâmpada era estabelecido por *software*.

C.3. Detecção/Seguimento de Parede (ROBOTICA)

O seguimento de pista no interior do túnel foi efectuado com recurso a um sensor de distância, activo (par emissor / receptor), infravermelho e com saída analógica. Este sensor foi colocado na parte frontal esquerda do robot, por baixo da câmara do sistema de visão, sendo efectuado o seguimento do túnel apenas por uma das suas paredes. As medidas de distância à parede foram usadas para controlar a trajetória do robot tendo, também neste caso, sido usado um compensador PD mas com derivada temporal. Para facilitar o controlo da trajetória e evitar choques nas paredes do túnel usou-se, dentro deste, uma velocidade média inferior à usada no seguimento de linha.

A figura 6 mostra o par emissor / receptor usado para detecção e seguimento da parede do túnel. Note-se, em particular, o confinamento dos emissores entre placas não

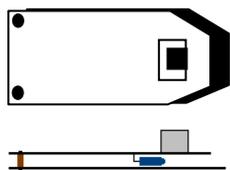


Fig. 6 - Sensor de seguimento de parede

reflectoras para colimar verticalmente o feixe e evitar reflexões indesejadas (e.g. do solo).

C.4. Sistema de Recolha de Bolas (FIST)

Conforme referido anteriormente, uma das dificuldades adicionais da prova da classe livre do FIST era a recolha de bolas de bilhar colocadas ao lado da pista, sobre pequenos e estreitos pedestais (postes) cilíndricos.

O sistema utilizado pelo *CYCLOP* para cumprir esta especificação é composto por 3 elementos: detector lateral de poste, detector traseiro de poste com barreira de IVs e uma garra colocada na traseira do robot. O controlo destes elementos é efectuado por uma máquina de estados executada na placa controladora CANivete do sistema IS.

O sistema de recolha de bolas foi, essencialmente, herdado do robot *CRAB* [1][7]. Foram, contudo, efectuadas alterações que permitiram obter um melhor desempenho, principalmente em termos de fiabilidade. Estas modificações centraram-se no detector lateral de poste e no software de controlo (i.e. máquina de estados).

C.4.1. Detector lateral de poste

Um dos problemas sentidos com o detector lateral de poste do *CRAB* foi a probabilidade relativamente elevada de falsa detecção, o que obrigava o robot a uma paragem e a completar em vão todo o comportamento de recolha de bola. A origem das falsas detecções prendia-se, essencialmente, com a reflexão do feixe IV em objectos para além do poste, em alguns casos até bastante afastados.

Assim, no *CYCLOP* utilizou-se uma técnica que permitiu reduzir o número de falsas detecções devidas a reflexões em objectos localizados a distâncias diferentes daquela prevista para os suportes de bolas. Esta técnica consta da utilização de feixes de IV cruzados (fig. 7), de menor intensidade, em substituição de apenas um feixe de

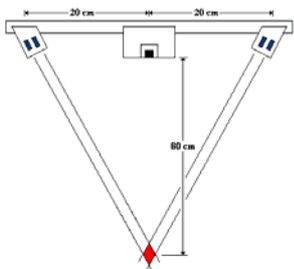


Fig.7 - Detector lateral de poste

grande intensidade. Utilizando o conhecimento da distância dos postes à linha é possível ajustar a orientação dos dois feixes de forma a que se cruzem a essa distância, na frente do sensor, fazendo com que nessa zona de intersecção a intensidade de luz IV reflectida seja máxima.

C.4.2. Máquina de estados para a recolha de bolas

O procedimento para recolha das bolas de bilhar é relativamente complexo e requer um bom planeamento dos movimentos por forma a minimizar o tempo de recolha e a tolerar as situações inevitáveis de detecção falsa de poste.

Após a detecção de um poste, o robot deverá parar, efectuar uma rotação de modo a orientar a traseira, onde está a garra, para o poste, deslocar-se em direcção ao poste com guiamento adequado, efectuar a correcção final de posição para preparar o movimento da garra, accionar a garra para recolher a bola, avançar até reencontrar a linha, rodar de forma a orientar-se no sentido correcto do percurso e retomar o seguimento da linha. Esta sequência de movimentos combina movimentos pré-definidos com movimentos reactivos de calibração que são executados utilizando os comandos de movimentação disponibilizados pelo subsistema EMD de energia, motricidade e direcção.

Um dos aspectos fundamentais da máquina de estados é garantir que todos os estados têm um tempo de vida limitado (i.e. um *timeout*). Assim, se na sequência de uma falsa detecção o robot iniciar o procedimento de recolha de bola, garante-se que o comportamento do robot não fica preso num estado intermédio, à espera de encontrar o poste que não existe de facto. Por exemplo, um estado em que o robot roda até detectar o poste com o detector traseiro, na ausência de poste poderia levar o robot a rodar infinitamente sobre si próprio. Como referido, estes comportamentos não tolerantes a falhas são evitados com a utilização de *timeouts* que forcem o robot a retornar à linha.

D. Gateway RS232 – CAN

O desenvolvimento de uma *gateway* RS232 – CAN (G) [5] surge da necessidade de disponibilizar um interface entre o sistema de visão (SV), constituído pelo conjunto PC/*webcam*, e os restantes subsistemas que, como já foi referido, comunicam por barramento CAN. Este interface é particularmente importante uma vez que através dele flui toda a comunicação entre o controlo global do robot (CG) e os subsistemas de motricidade e direcção (EMD) e de interface sensorial (IS).

A *gateway* é constituída por um software de comunicações, que executa na placa CANivete do subsistema interface sensorial (IS), e pelas respectivas portas série e CAN.

Um dos aspectos que foi necessário ter em conta é a diferença de velocidade de transmissão entre os dois lados da *gateway*, porta série - no máximo 19200bps e o

barramento CAN – até 1 Mbps. (19200bps e 122.88 Kbps, respectivamente, são os valores assumidos por defeito). Para permitir responder de forma bidireccional e com uma probabilidade reduzida de perda de informação, utilizaram-se duas técnicas. Por um lado, colocaram-se ao longo do ciclo principal do programa dos subsistemas IS/G vários pontos de *polling* (não bloqueantes) do estado de recepção de informação em ambas as portas. Por outro, utilizaram-se em ambos os lados *buffers* para sustentar a informação recebida por uma porta enquanto não era enviada para a outra.

Sendo a comunicação por RS232 relativamente menos fiável, pelo menos em comparação com a comunicação via CAN que apresenta uma série de mecanismos de fiabilização [3], desenvolveu-se também um protocolo para a comunicação série com vista a atenuar esta desvantagem. Basicamente, esse protocolo consta de encapsular a informação a ser enviada em tramas apropriadas, com vários campos de controlo que facilitam a detecção de erros.

A *gateway* permite ainda, através de tramas de controlo enviadas via RS232 para a placa CANivete, alterar as velocidades de transmissão das portas série e CAN.

IV. CONTROLO GLOBAL

O controlo global do *robot CYCLOP* é executado no PC e consta de um ciclo infinito que adquire a informação sensorial actual, calcula as compensações de trajectória ou os movimentos adequados, e gera os respectivos comandos de movimentação. Em termos de informação sensorial, o módulo de controlo global começa por pedir ao subsistema de visão uma nova medida de desvio da linha bem como o estado do respectivo seguimento, isto é, se houve perda súbita de linha, ou perda progressiva ou se a linha está dentro do campo de visão. De seguida envia uma ordem ao subsistema de interface sensorial para que amostre todos os sensores correntemente ligados e devolva o respectivo estado. No caso do ROBOTICA 2001 trata-se da detecção de túnel e distância da respectiva parede, detecção de cruzamento/chegada e detecção de semáforos. Para o FIST 2001 a informação sensorial é composta pela detecção lateral dos postes, desvio da garra face ao poste, detecção da rampa e detecção do fim de linha.

Após a recepção e interpretação de toda a informação sensorial, o módulo de controlo global comuta para um estado adequado. Conforme esse estado é enviado ao subsistema de energia, motricidade e direcção um comando de movimentação adequado. O conjunto de estados do controlo global é específico para cada competição. No caso do ROBOTICA 2001, o conjunto de estados era o seguinte: SEGUIR_LINHA, SEGUIR_TÚNEL, SEGUIR_EM_FRENTE, SEGUIR_EM_CURVA e VERIFICAR_SEMÁFOROS. Para o FIST 2001 o conjunto de estados utilizado é o seguinte: SEGUIR_LINHA, NA_RAMPA, APANHAR_BOLA e FIM.

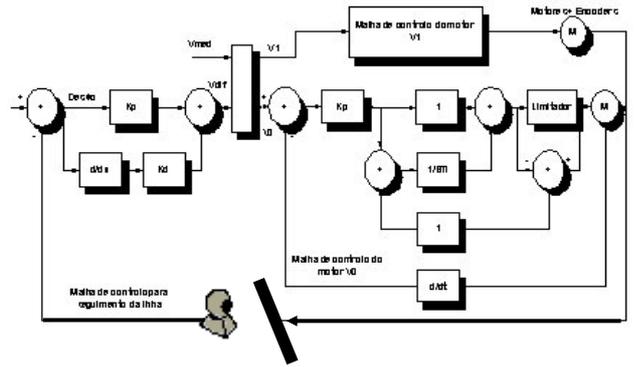


Fig. 8 - Seguimento de linha em malha fechada

O estado de SEGUIR_LINHA é comum a ambas as competições, embora o posicionamento da câmara seja diferente em cada caso, e corresponde ao estado mais comum no funcionamento normal do robot. Neste estado, é efectuado um controlo em malha fechada do seguimento da linha cujo esquema completo, isto é, integrando os módulos de visão, compensação do desvio e controlo em malha fechada da velocidade de cada motor, é representado na figura 8.

A máquina de estados referente à versão do FIST 2001 é representada na figura 9. Em cada estado é utilizada uma velocidade média adequada. Assim, por exemplo na versão do FIST 2001, quando a máquina de estados do controlo global entra no estado NA_RAMPA a velocidade média é reduzida de forma a evitar saltos e fazer perigar a integridade física do robot. Também no estado APANHAR_BOLA a velocidade média é substancialmente reduzida por forma a facilitar um alinhamento preciso com o poste. No início de funcionamento o robot entra directamente no estado SEGUIR_LINHA. Por seu lado, após detecção do final do percurso ou de perda de linha o robot transita para o estado FIM, em que se imobiliza até ser reiniciado.

Por sua vez, a máquina de estados da versão ROBOTICA 2001 é apresentada na figura 10. O início processa-se pelo estado VERIFICAR_SEMÁFOROS no qual o robot se mantém imobilizado enquanto o sinal *vermelho* estiver aceso. Após detecção de sinal *verde*, o robot transita para o estado SEGUIR_LINHA. O seguimento da linha tem, contudo, um caso particular devido ao facto da linha interior das curvas maiores ser

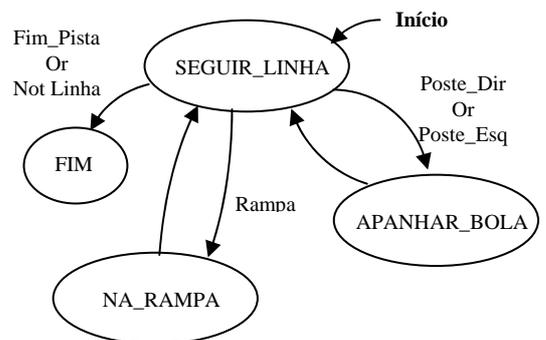


Fig.9 - Diagrama de estados da versão FIST 2001

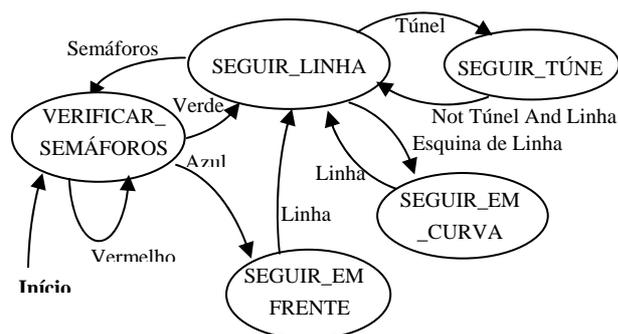


Fig.10 - Diagrama de estados de versão ROBOTICA 2001

descontínua em termos da direcção da pista (fig. 1). Assim, haverá uma altura em que é necessário apanhar a linha interior largando a exterior e vice-versa. No caso particular do CYCLOP, devido à localização da câmara sobre o lado esquerdo, a primeira situação ocorre sempre que é detectado sinal *azul* nos semáforos, levando o robot a transitar para o estado SEGUIR_EM_FRENTE. A segunda situação ocorre quando o robot se aproxima do cruzamento vindo da curva, em que é detectada uma esquina na linha. Neste caso, o robot transita para o estado SEGUIR_EM_CURVA que leva o CYCLOP a descrever uma curva suave com raio apropriado para facilitar a retoma da linha exterior.

Para além das situações particulares descritas atrás, se ao seguir linha o robot detectar um túnel, então transita para o estado SEGUIR_TUNEL no final do qual retoma o seguimento da linha. A prova termina com o semáforo em sinal *vermelho*, levando o robot a parar sem necessidade de criar um estado específico para esse fim.

V. CONCLUSÕES

Este artigo descreve de forma relativamente sucinta a composição e funcionamento do robot CYCLOP. Este robot foi construído de acordo com as especificações de duas competições, a classe UIP do ROBOTICA 2001 e a classe livre do FIST 2001. A respectiva arquitectura foi projectada de forma a permitir comutar entre as duas competições com o mínimo de alterações físicas. Em particular, não são necessárias nenhuma alteração ao nível do sistema de controlo, incluindo placas controladoras e de interface. A comutação de uma competição para outra requer apenas o reposicionamento e troca de alguns sensores e actuadores.

As características mais marcantes do CYCLOP são o guiamento por visão utilizando uma *WebCam*, a utilização de uma arquitectura distribuída com um barramento CAN e a utilização de um PC com sistema operativo Linux para a realização do processamento de imagem e controlo global do robot. A respectiva arquitectura inclui, para

além do PC, dois nodos baseados em microcontrolador, um responsável pelo controlo em malha fechada da velocidade dos motores e o outro pelo interface sensorial aos sensores específicos de ambas as provas.

Em termos de desempenho, o CYCLOP cumpre todas as especificações para que foi desenhado. Saliente-se o facto deste robot ter saído vencedor da classe UIP do ROBOTICA 2001 e ainda de ter sido distinguido com o Prémio Engenharia para aquela classe. O trabalho realizado na construção do software de controlo baseado no Sistema Operativo Linux foi ainda distinguido com um

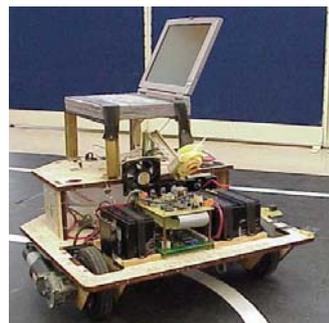


Fig.11 - Vista de frente do CYCLOP na versão FIST 2001

prémio no *IBM Linux Scholar Challenge* ao qual concorreram os primeiros 4 autores.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Abreu, T. Meireles, J.L. Azevedo, P. Fonseca e L. Almeida, "CRAB – Um robot caranguejo", Revista do DETUA, Setembro.
- [2] "CANivete – Manual do Utilizador", Micro I/O – Serviços de Electrónica Lda., 1999.
- [3] "CAN Specification Version 2.0", Bosch GmbH, 1991.
- [4] "80C51 Family Hardware Description", Philips Semiconductors, 1996.
- [5] "Gateway RS232 – CAN", N. Nunes, Setembro 2001
- [6] "P8xC592 - 8bit microcontroller with on-chip CAN", Philips Semiconductors, 1996.
- [7] T. Meireles e R. Abreu, "Sistema de comando de robot móvel baseado em CAN, Relatório de projecto", Departamento de Electrónica e de Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Setembro 2000.
- [8] Luis Almeida, Pedro Fonseca, José Luís Azevedo. "The Micro-Rato Contest: A popular approach to improve self-study in electronics and computer science". SMC 2000, IEEE Int. Conf. On Systems, Man and Cybernetics, Nashville, USA, Outubro 2000.
- [9] L. Almeida, J. Azevedo, C. Cardeira, P. Costa, P. Fonseca, P. Lima, F. Ribeiro, V. Santos. "Mobile Robot Competitions: Fostering Research, Development and Education in Robotics", CONTROLO 2000, APCA Conferência de Controlo Automático, Guimarães, Portugal, Outubro 2000.