

ATLAS III – Um Robô com Visão Orientado para Provas em Condução Autónoma

R. Cancela, M. Neta, M. Oliveira, V. Santos

{a17664,a20256,a16664}@alunos.mec.ua.pt, vsantos@mec.ua.pt

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

Resumo: Para responder aos requisitos da prova de Condução Autónoma do Festival Nacional de Robótica-ROBOTICA2005, uma equipa do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro concebeu de base um veículo autónomo que apresenta uma topologia similar à de um veículo automóvel comum, nomeadamente na tracção por diferencial mecânico e direcção do tipo *Ackermann*, dotando-o de capacidades de percepção baseada em visão artificial que lhe permitem a execução das provas com eficácia. São descritas as tecnologias escolhidas e os algoritmos desenvolvidos quer para a percepção quer para a navegação, com maior destaque para o sistema de visão, do qual se apresenta um grande nível de detalhe.

1. Introdução

O Festival Nacional de Robótica, desde a sua criação em 2001 [1] [2] [3], tem contado com uma prova actualmente designada por Condução Autónoma em que o objectivo subjacente é o de promover o desenvolvimento de veículos autónomos que percorram uma pista em forma de estrada onde existem diversos elementos de cariz rodoviário como passadeira, semáforo, túnel, zona de obras, etc. Não só as questões de velocidade são importantes, mas também a eficácia dos veículos é posta à prova e contabilizada para uma classificação final. Sair de pista, pisar a passadeira, não respeitar semáforos, estacionar fora da área reservada, entre outras, são acções penalizadas pelo regulamento. A Fig. 1 ilustra a pista e alguns elementos relacionados, onde o espaço entre linhas laterais tem uma largura média de 90 cm.

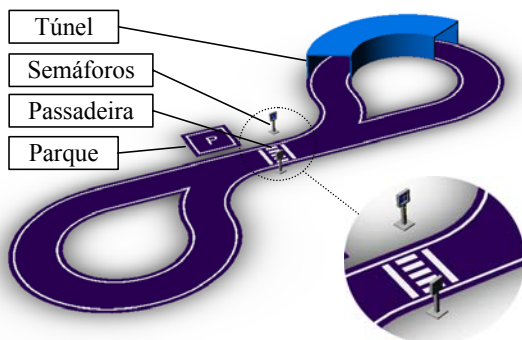


Fig. 1 – Pista da prova de Condução Autónoma com detalhe da passadeira e semáforos

Com o espírito de participar em concursos deste género para promover a robótica e a aprendizagem da engenharia [4], o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, por intermédio de alunos em projecto de fim de curso ou em actividade extracurricular, tem participado nesta prova desde 2002 e, para a edição de 2005, decidiu

optar por uma solução mecânica mais realista, baseada num veículo com tracção posterior mediante um diferencial mecânico e uma direcção do tipo *Ackermann*. Esta opção, descrita mais adiante, resultou de uma tentativa de dar mais realismo aos problemas de navegação autónoma que um veículo real terá, nomeadamente na sua manobrabilidade, que fica muito mais limitada do que algumas soluções tradicionais nestas competições (tipo triciclo), mas que oferece estabilidade acrescida na locomoção pelo número de pontos de apoio, em particular das duas rodas para a direcção. A tracção diferencial, já experimentada nas provas em 2003 e 2004 continuou a ser adoptada mas, desta vez, com um sistema mais compacto.

Este artigo descreve, com o pormenor que o espaço limitado permite, as soluções tecnológicas adoptadas bem como a abordagem para a percepção da pista, em particular das técnicas de visão artificial. Em resumo, podem enumerar-se os seguintes pontos principais das tecnologias usadas:

- Chassis em fibra de carbono;
- Tracção diferencial e direcção *Ackermann*;
- Controlo distribuído com microcontroladores (PICs) a ligarem o baixo nível (actuadores, sensores) à unidade principal (computador);
- Câmaras IEEE1394 e uma grande angular;
- Sistema operativo *Linux*, usando o ambiente de desenvolvimento baseado na filosofia *OpenSource* para visão (*OpenCV*) [5].

Nas secções seguintes, o artigo começa por descrever as unidades funcionais do sistema e a forma como foram implementadas. Segue-se depois uma secção dedicada à visão e aos algoritmos usados para detecção de pista, com descrições suficientes para que outros possam implementar o mesmo processo, e segue-se uma descrição dos algoritmos de navegação. Termina-se com alguns resultados, conclusões e perspectivas da plataforma desenvolvida.

2. Requisitos da plataforma

Num sistema autónomo, a percepção é elemento fundamental uma vez que soluções baseadas em hodiometria, se bem que possíveis, são irrealistas e contrariam também o espírito da competição. Assim, a percepção necessária em prova inclui a detecção da pista no espaço entre linhas laterais, a detecção da passadeira, dos semáforos, do túnel e, para a última etapa da prova, a zona de obras. O parque de estacionamento também pode carecer de percepção mas a sua localização é fixa (logo após a passadeira) e, portanto, tal como têm vindo a fazer a maioria das equipas, uma pequena manobra em malha aberta permite o estacionamento sem percepção.

A detecção e localização da pista será feita exclusivamente com visão, como descrito adiante. Isso inclui também a passadeira, embora um sensor adicional de infravermelho permita validar o momento em que se passa por cima dela, altura em que já não estará ao alcance das câmaras. A visão poderá também funcionar para a navegação no túnel e na zona de obras, mas dada a maior exigência das situações (em termos de segurança), a navegação nesses locais usará adicionalmente sensores analógicos de distância por infravermelho. Os semáforos serão obtidos exclusivamente com uma das câmaras, a da navegação ou uma dedicada.

Para a locomoção, a solução adoptada, tal como já adiantado, baseia-se em tracção posterior com diferencial mecânico e uma direcção anterior do tipo *Ackermann*. Esta solução de locomoção conta com um único motor para a tracção e um outro independente para a direcção. Esta forma de mecanização permite um controlo de direcção mais eficiente dado que essa tarefa se torna praticamente independente da velocidade e das inércias do veículo. O controlo é mais fácil porque as funções dos dois graus de liberdade estão desacopladas: um motor impõe a velocidade média do veículo, e outro impõe a direcção instantânea a tomar. Note-se que isto não sucede com sistemas de tracção e direcção diferencial acopladas, isto é, com um motor em cada uma das duas rodas de tracção. Não foram feitos cálculos rigorosos pela equipa, mas o sistema de tracção e direcção desacopladas é também mais eficiente do ponto de vista energético, já que não é preciso despender energia para contrariar os efeitos dos momentos de inércia nas mudanças de direcção.

As manobras previstas incluem obviamente mover-se para a frente mas, também, e embora em menor extensão, para a retaguarda. Com estes dois tipos básicos de manobra é possível todo um conjunto de possibilidades em situações mais complexas onde for possível tirar partido da percepção como, por exemplo, manobrar numa zona de obras onde o raio de curvatura seja mais pequeno do que aquele que o veículo pode fazer.

3. Unidades funcionais do sistema

3.1 A plataforma base

A plataforma base do robô baseia-se num *chassis* em fibra de carbono reforçado por travessas longitudinais e transversais em perfil de alumínio que tem como principais vantagens o baixo peso e a elevada rigidez possibilitando o suporte de todos os elementos mecânicos e de controlo necessários ao funcionamento do robô.

Foram desenvolvidos e construídos em ligas leves todos os elementos necessários à fixação das câmaras, das baterias, e de outros elementos, e também para reforçar a estrutura onde estão fixos os braços da suspensão traseira e dianteira.

No que diz respeito à distribuição de espaços foi dedicado algum cuidado à distribuição de componentes no *chassis*. A título de exemplo, as duas baterias presentes foram colocadas ao centro do *chassis* que, por serem os elementos de maior peso, permitem que o centro de massa se localize próximo do centro geométrico do robô.

3.2 Arquitectura de controlo do sistema

O sistema consiste num computador central que interage com o *hardware* por portas de comunicação standard: *firewire* para as câmaras e portas série RS232 emuladas sobre USB para as unidades periféricas baseadas em microcontroladores PIC (Fig. 2).

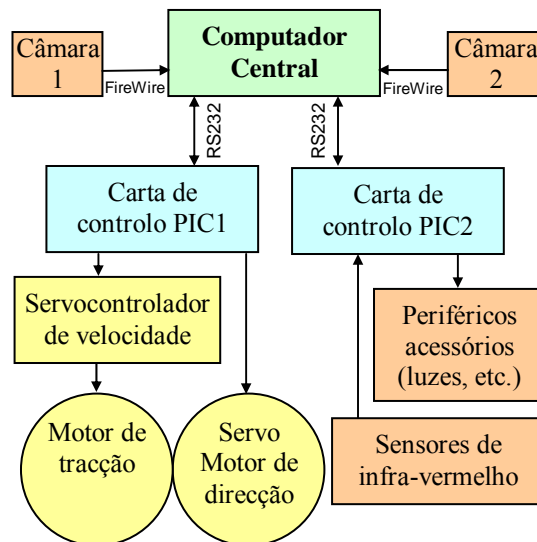


Fig. 2 - Arquitectura geral da plataforma

O computador central é um portátil baseado em tecnologia Intel *Centrino* de grande eficiência energética. Nele foi desenvolvido o sistema global de controlo e todo processamento dos dados recebidos.

Como intermediários entre o computador geral e os actuadores e sensores são usados dois microcontroladores PIC18F da MICROCHIP que comunicam com o computador via linhas série RS232.

3.3 A Direcção

Para que um veículo desta natureza curve sem esforços laterais das rodas, é necessário que cada roda percorra uma circunferência diferente, sendo que a roda interior à curva tem um percurso de menor raio que a roda exterior. A intersecção das perpendiculares a cada uma das rodas mostra o centro da curva descrita pelo veículo.

A geometria do sistema de direcção impõe diferentes ângulos às rodas para que percorram diferentes raios de viragem (Fig. 3). Este princípio, que rege o comportamento em curva dos sistemas de direcção dos veículos modernos, é atribuído a Langensperger em 1816, mas foi patenteado em 1817 por alguém com o nome Ackermann, que acabou por ficar ligado ao sistema [6].

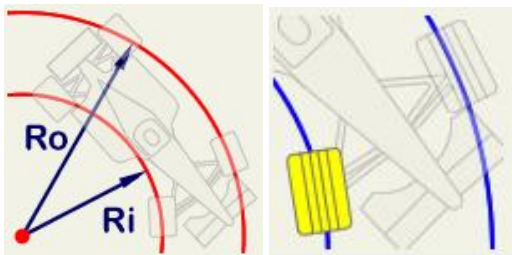


Fig. 3 - Raios de curvatura nas diferentes rodas [7]

Se ambas as rodas virassem o mesmo ângulo, então estariam efectivamente a seguir curvas diferentes ao longo da mesma curva da via, o que implicaria algum tipo de arrastamento de um dos pneus e consequente desgaste prematuro dos pneus bem como diminuição da capacidade de tracção. Assim se justifica a diferença de ângulos das duas rodas (Fig. 4).

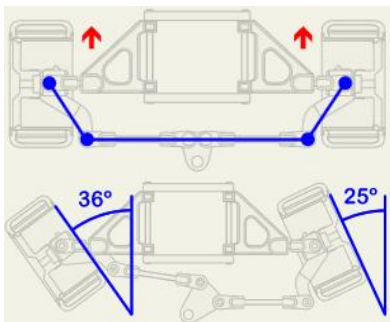


Fig. 4 - Os dois ângulos na direcção de Ackermann [7]

Para este projecto foi seleccionado um sistema específico baseado numa transmissão por pínhão-cremalheira. Este sistema, que era até há poucos anos o mais utilizado na indústria automóvel, e que tem vindo a ser progressivamente substituído por sistemas hidráulicos assistidos, baseia-se na conversão do movimento rotacional da coluna de direcção, imposto pelo condutor, no movimento linear de um tirante que, por sua vez, vai impor um ângulo às rodas de direcção.

O pínhão encontra-se montado na extremidade da coluna de direcção, ou no caso deste projecto, na extremidade do veio do servomotor actuante; este pínhão actua a cremalheira do braço que une as

rodas. Quando o veio da coluna de direcção rodar, impõe por meio do pínhão um movimento linear na cremalheira que, por sua vez, vai movimentar os tirantes onde estão montadas as rodas dianteiras.

Construtivamente, este sistema disponibiliza uma engrenagem de redução, minimizando o binário necessário para orientar as rodas e, por conseguinte, o veículo. A actuação da direcção é assegurada por um pequeno servomotor de posição controlado por PWM do tipo dos fornecidos pela FUTABA ou HITEC. A sua frequência de PWM é no entanto de 70 Hz contra os tradicionais 50 Hz usual nessas marcas.

3.4 A tracção e o diferencial mecânico

Já foram explicadas na secção 2 algumas razões para a adopção da transmissão posterior por diferencial, mas há mais vantagens ligadas a essa opção, nomeadamente pelas exigências de carácter dimensional dos órgãos mecânicos a utilizar, sobretudo tendo em conta a escala do protótipo. As razões que ditam esta escolha nos automóveis reais não se aplicam muito neste projecto, porque a gestão do espaço útil está aqui menos restringida, dado que não é preciso, por exemplo, ter habitáculos para ocupantes ou bagageira para mercadorias!

Os sistemas de transmissão convencionais implicam que a transmissão de potência seja feita de forma distribuída entre as rodas actuadas, ou seja, é feito de tal forma que um mesmo motor e sistema de transmissão consegue movimentar todas as rodas actuadas. Assim sendo, terá que existir um qualquer dispositivo que permita que as rodas possuam velocidades diferentes pois, caso contrário, para que o veículo pudesse curvar, uma das rodas, consoante a orientação da curva, teria que escorregar. Este comportamento, numa situação real com um veículo convencional, é algo que exige um elevado binário. O diferencial é o órgão mecânico responsável por esta importante funcionalidade. Este dispositivo, na sua versão convencional (o diferencial aberto), permite que as rodas actuadas possuam velocidades diferentes mas garante a entrega do mesmo valor de binário a ambas as rodas.

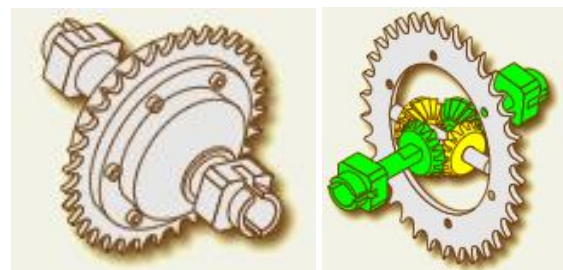


Fig. 5 – O Diferencial mecânico para a tracção [7]

Neste projecto foi utilizado um diferencial de planetários (Fig. 5) dadas as dimensões disponíveis para a sua integração. Este tipo de diferencial tem algumas limitações construtivas relativamente ao binário que admite mas, em contrapartida, as suas dimensões tornaram-no a única hipótese viável.

O diferencial mecânico foi acoplado a um motor MAXXON Motors de 120 W com uma relação de transmissão de 1:15. O motor é controlado em velocidade por uma carta servocontroladora proprietária fornecida também pela MAXXON Motors.

3.5 Unidade de energia

Foram utilizadas duas baterias de 12V ligadas em série por forma a obter 24V como a tensão de alimentação primária do sistema. As baterias são relativamente comuns, de tipo selado, possuindo 6700 mAh de capacidade cada uma.

Uns cálculos preliminares apontam para um consumo moderado de toda a electrónica (placas e sensores) que não ultrapassará os 500-750 mA sustentados. O servomotor de direcção tem picos de 2A mas terá um regime médio de consumo em torno de 1A ou menos. As câmaras apresentam consumos sustentados da ordem dos 400 mA cada. Finalmente, o componente mais exigente em termos energéticos é o motor de tracção: em prova pode ter picos de 10 A, mas um regime médio de 5A pode ser assumido.

Em resumo, esta análise aproximada indica, durante a navegação, um consumo sustentado de cerca de 7.5 A. Ou seja, um par de baterias poderá sustentar o sistema durante quase uma hora consecutiva sem parar.

Foram utilizadas duas unidades de regulação de tensão: um regulador 24-12 DC que disponibiliza até 10 A e é responsável pela alimentação de todos os sistemas, incluindo a segunda unidade de regulação que disponibiliza linhas reguladas e protegidas por fusível de vários potenciais eléctricos (de 6 a 12 V) através de simples reguladores de tensão comerciais.

O motor responsável pela tracção do veiculo usa uma alimentação de 24V directa das baterias mas protegida por fusível.

Para monitorar em tempo real o estado da unidade de energia, foi desenvolvida uma consola que dispõe de um voltímetro, que indica de forma aproximada o estado das baterias, e de um amperímetro que informa acerca do consumo instantâneo do sistema geral (excepção feita ao computador que tem alimentação própria).

3.6 Placas acessórias

3.6.1 Unidade de controlo de actuadores

Para o controlo de baixo nível de ambos os motores utilizados foi desenvolvido um sistema baseado num microcontrolador (PIC18F da MICROCHIP). Este sistema gera pulsos de largura variável (PWM) com base em instruções do nível de controlo imediatamente superior (PC).

O motor responsável pela tracção do veiculo é directamente controlado por uma carta dedicada com uma entrada analógica. O nível eléctrico para esta entrada é obtida por integração de uma onda PWM variável gerada pelo microcontrolador.

Relativamente ao controlo de baixo nível do actuator de direcção, um outro sinal em PWM proporciona o controlo em posição do servomotor.

3.6.2 Unidade sensorial

Os sensores de distância (Modelos GP2D12 da Sharp) fornecem indicações analógicas de distância e são usados na navegação no túnel e zona de obras. Para detecção do túnel é usado um sensor adicional do mesmo tipo apontado na vertical e permite a selecção do algoritmo de navegação adequado, ou seja, confirma a presença em túnel. O sensor de linha no pavimento (Sick WT170-P112) é um sensor digital que serve para a detecção de uma linha branca no pavimento. Será usado para monitorar a passagem pela passadeira.

As informações destes sensores são geridas por uma segunda placa baseada num microcontrolador PIC que faz a aquisição e disponibiliza os dados por linha série RS232 ao computador central.

Como já referido, foram utilizadas duas câmaras Fire-i da UNIBRAIN em ligação FireWire (IEEE1394). Uma faz uso de uma grande angular óptica (percepção da pista) e a segunda é usada para reconhecimento dos semáforos. As câmaras estão fixas em apoios que possuem os graus de liberdade suficientes para manualmente permitir um grande leque de orientações. Pela sua natureza (alto débito de informação, ligação especial, etc.) estão ligadas directamente ao computador central e não a quaisquer placas intermédias.

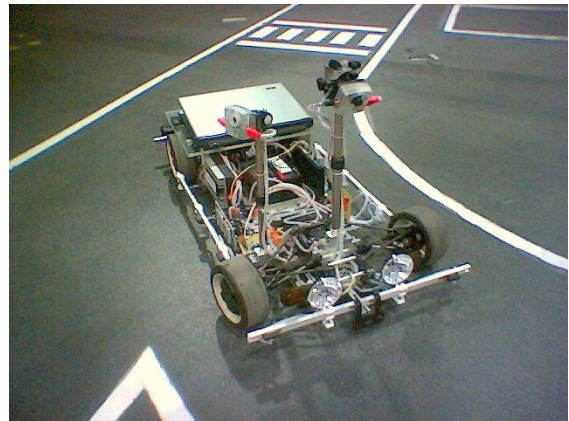


Fig. 6 - A plataforma em Fevereiro de 2005

4. Algoritmos de visão

Como já foi referido nos capítulos anteriores, o objectivo principal do robô é o de seguir uma pista. Para isso são utilizadas câmaras cujas imagens transmitidas ao programa principal terão que ser analisadas com vista à obtenção de duas informações finais: a **velocidade** e a **direcção** desejadas. Assim, é necessário obter as imagens e fazer um pré-processamento e depois extrair pontos e outras informações relevantes para a navegação.

4.1 Pré-processamento de imagem

A obtenção de imagem é um processo simples dado que são utilizadas funções pertencentes a *OpenCV* [5], uma biblioteca de funções e estruturas de dados desenvolvida pela INTEL em regime Open Source adequadas para aplicação em *Windows* ou *Linux* orientada para a visão por computador.

O pré-processamento de imagem vai um pouco mais além de uma simples binarização e de *smoothing* (*suavização*). De facto, com a experiência adquirida, foi possível perceber que a imagem nem sempre é a ideal para que se possam fazer buscas de linhas de pista com resultados totalmente seguros, confiando apenas numa simples binarização. Assim, optou-se por uma solução relativamente mais elaborada em que a dependência do limite de binarização e da geometria das linhas (por vezes muito distorcidas pelo efeito de grande angular das lentes) não tem influência decisiva.

A solução baseia-se na ideia de espaço permitido ou proibido. Pense-se que as linhas delimitam um espaço que o robô deve percorrer (o interior da pista) daquele que o robô deve evitar (o exterior). Estabelecem-se então três premissas para o processamento inicial:

i) Existe sempre conectividade entre as linhas da pista (Fig. 1), e logo nas imagens obtidas; ii) uma linha horizontal artificialmente colocada ao longo da imagem, e denominada horizonte, aparta a imagem de tal forma que todo e qualquer *pixel* de ordenadas inferiores a essa linha pertence ao plano do solo. Isto é, é preciso garantir que o horizonte artificial é colocado abaixo do verdadeiro horizonte; iii) as coordenadas de um ponto específico, denominado primeiro ponto semente, estão situadas dentro da pista, ainda que ambas as linhas laterais não sejam totalmente visíveis na imagem devido, por exemplo, a uma orientação desfavorável do robô ou à presença de uma curva.

Garantidas estas três condições, os passos do processo para o algoritmo desenvolvido ilustram-se

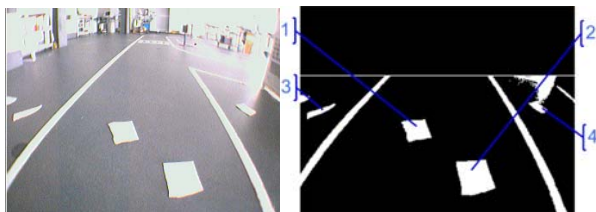
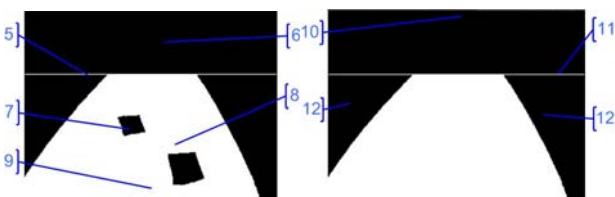


Imagem original e versão binarizada.



O horizonte artificial e o *fill_a* (ver texto). Colocação do horizonte, execução do *fill_b* (ver texto) e negação da imagem

Fig. 7 - Pré-processamento de imagens da pista

na Fig. 7 e são os seguintes:

a) Extracção de uma imagem (*imagem 1*), escolha do limite de binarização adequado (algoritmo de isodados ou afinação manual) e subsequente binarização. Obtém-se aqui a *imagem 2* da Fig. 7. Para que melhor se compreenda o funcionamento do algoritmo foram colocadas na pista folhas brancas de papel que irão funcionar como manchas parasitas que perturbam a percepção (mais tarde vão servir para detectar a passadeira). Existem quatro tipos possíveis de manchas, as que estão à esquerda da pista (*nº 3*), à direita (*nº 4*) ou no centro da pista. Desta situação devem ainda distinguir-se duas possibilidades: mancha no centro da pista sem conexão com o horizonte artificial (*nº 2*) ou com conexão com o mesmo (neste caso não ocorre esta situação).

b) Colocação do horizonte artificial numa ordenada pré-definida ou com base numa escolha de critérios automáticos (*nº 5*). Eliminação (passagem a preto) de todos os *pixels* da imagem com ordenada superior àquela do horizonte (*nº 6*)

c) Escolha do primeiro ponto semente com base em critérios automáticos (*nº 9*). Execução de uma propagação à segunda imagem da Fig. 7 após executado o passo b), denominado *fill_a*, a partir desse ponto (*nº 8*). Obtenção, não da imagem após executado o *fill*, mas sim duma outra imagem, em que apenas estão brancos os pontos que foram enchidos pelo *fill_a* (3ª imagem da Fig. 7). Repare-se que, com esta operação foram eliminadas as manchas colocadas fora da pista.

d) Colocação do horizonte artificial, desta vez na imagem 4 da Fig. 7, com a nuance de que o primeiro *pixel* (coluna zero) e o último (coluna largura da imagem 4) não são preenchidos (*nº 11*); ficam pontos de passagem para propagações seguintes.

e) Partindo de um novo ponto semente (*nº 10*), cujas coordenadas exactas não são de grande relevo, já que a única condição é pertencer à área superior ao horizonte que foi previamente apagada, há a execução de uma outra propagação, o *fill_b*, a partir do qual se obtém uma imagem. De referir que esta é de novo o resultado apenas da área enchida tal e qual aquela obtida a partir do *fill_a* (*nº 12*). Nesta operação são eliminadas as manchas colocadas no interior da pista.

f) Negação da imagem obtida no passo e) para a obtenção da imagem 4 da Fig. 7. De notar que todas as manchas existentes na imagem inicial foram anuladas, sendo esta a grande vantagem deste método.

Após a realização destes passos de pré-processamento pode dizer-se que a imagem obtida possui características relativamente independentes da imagem inicial, isto é, a simplicidade da abordagem introduz robustez e satisfará a grande maioria das imagens possíveis de obter nestas condições. Repare-se que a maioria das falhas na binarização é colmatada, pois uma qualquer mancha

branca é eliminada, quer estivesse dentro ou fora da pista. De referir que também a passadeira é eliminada neste processo, tendo que ser detectada com um outro processo que se descreve mais adiante.

A remoção da incerteza obtida com a aplicação deste processo permite uma muito maior fiabilidade do processo seguinte, a obtenção dos pontos relevantes na pista. O processo de propagação (*fill*), embora tradicionalmente seja tido como lento e consumidor de recursos, nas condições deste problema isso não foi notório dado que a taxa de imagens processadas por segundo ficou mesmo assim suficientemente elevada. Talvez contribua também para isso o facto de se usar um computador de tecnologia Centrino e as funções em *OpenCV* estarem optimizadas para este processamento.

4.2 Extração de pontos relevantes na pista

O objectivo desta fase é o de obter um ou mais pontos, chamados *pontos de destino* que irão funcionar como faróis para onde o robô deve ir.

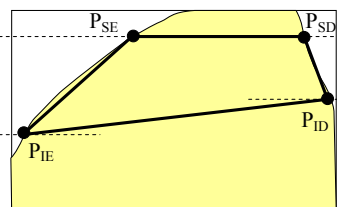


Fig. 8 – Quadrilátero dos pontos relevantes de pista

Para obter os pontos relevantes faz-se uma execução cíclica de buscas do primeiro *pixel* branco depois de encontrado um *pixel* preto em linhas pré-definidas da imagem. O ciclo irá percorrer as colunas designadas e, se não encontrar os valores esperados, irá executar uma busca na linha seguinte. Estas buscas são feitas quatro vezes. São assim encontrados, numa imagem ideal, quatro pontos de um quadrilátero que caracteriza os limites visíveis da pista (Fig. 8). Estes pontos serão chamados de ponto inferior esquerdo (P_{IE}) e direito (P_{ID}) e de superior esquerdo (P_{SE}) e direito (P_{SD}).

Todas as análises subsequentes são sustentadas pela informação contida na localização destes pontos (ou pela ausência dela). A partir daqui, a análise ramifica-se em várias direcções, num processo semelhante a uma tomada de decisões alternativas. Deste conjunto de, digamos, sugestões de direcções a tomar, será eleita posteriormente apenas uma, segundo uma outra entidade a quem compete a escolha da melhor sugestão. Passa-se agora à exposição das análises paralelas:

a) Cada análise possui uma condição de aplicação própria. A primeira, para ser aplicada, exige que sejam encontrados ambos os pontos inferiores (inferior esquerdo e inferior direito). Depois é encontrada a distância entre eles (norma do vector $\|P_{IE}-P_{ID}\|$). Uma vez que as buscas dos pontos são independentes, pode acontecer que as suas ordenadas sejam diferentes. Neste caso rebate-se a

distância obtida para obter um ponto virtual (P_1') com a mesma ordenada do que tiver um valor inferior de ordenada. Obtém-se depois um ponto intermédio que será designado de ponto de destino pela análise de ambos os inferiores e que será a media entre o ponto virtual P_1' e o P_1 oposto. Quando existem ambos os pontos superiores (P_{SE} e P_{SD}), a análise é semelhante à anterior;

b) A segunda análise é feita quando são obtidos ambos os pontos esquerdos. Neste caso, para o cálculo de um ponto de referência em pista tem que ser conhecida a largura da pista (em *pixels*) em função da linha em análise. Estes valores dependem da calibração da câmara sobretudo porque se trata de uma grande angular. Foi definida, por medição experimental, uma tabela que contém a informação de correspondência entre *pixels* e medidas geométricas da pista para algumas linhas. Calcula-se também o ângulo entre os pontos e a diferença entre este e o ângulo característico das linhas em recta (valor obtido por calibração). Assim, o ponto de referência em pista será muito simplesmente um ponto com a mesma ordenada do ponto inferior esquerdo, mas com uma abcissa que será compensada pelo valor interpolado com base na referida tabela, afectado de um factor de compensação que é função do desfasamento do ângulo calculado. Uma análise semelhante é executada para os pontos direitos, quando estes são detectados.

c) Uma outra análise é feita quando só é obtido o ponto inferior esquerdo. Neste caso, o ponto de referência em pista é função da largura de pista, sem afectação do ângulo de linha que não pode ser calculado por não haver ponto superior esquerdo. Uma análise semelhante é executada para o ponto inferior direito, quando este é detectado.

De referir que existe um algoritmo primário a quem compete decidir qual a análise adequada e cuja hierarquia corresponde à ordem pela qual se apresentaram as análises.

Se não detectar nenhum dos pontos, o processo não tem informação para tomar decisões e simplesmente não gera qualquer modificação em relação ao estado de navegação. A ordenada a que podem ser encontrados os pontos inferiores e superiores na imagem é limitada por um valor inserido na função.

4.3 Detecção da passadeira

A detecção da passadeira é feita de duas formas distintas. A primeira, e a mais simples, envolve a colocação de um sensor digital de infravermelho na zona dianteira do robô a apontar para o solo. Quando estiver posicionado sobre as linhas da passadeira o sensor é activado e envia um sinal para o microcontrolador que canaliza esta informação, segundo o protocolo definido, para o CPU central. Esta abordagem, apesar de muito fiável, não é eficaz a velocidades elevadas já que a detecção é feita sem

a antecedência necessária e mecanicamente não é possível garantir a imobilização instantânea dada a inércia do veículo (folgas, derrapagem, potência limitada do motor de tracção).

Assim, surgiu a necessidade de reduzir a velocidade quando se verifica uma aproximação à passadeira. É então necessário detectar a passadeira com base nas imagens obtidas, que é a única informação utilizável que o robô possui, já que não foi implementado nenhum sistema em malha aberta (hodometria ou navegação temporizada) para realizar a prova. O processo proposto é simples: as manchas (Fig. 7) detectadas no centro da pista podem ser consideradas como existência de passadeira dado que não são esperadas outros tipos de manchas entre as linhas da pista, excepto nesta situação de aproximação à passadeira.

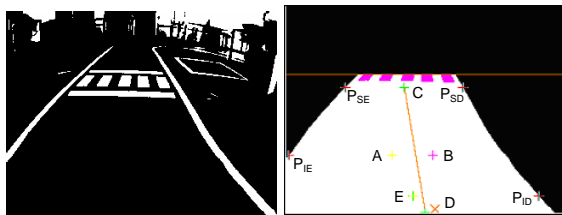


Fig. 9 - Detecção de passadeira usando "manchas". Imagem original binarizada (Esq). Pontos relevantes, direcção a tomar e detecção de passadeira. (Dir.)

Assim, a presença destes resíduos pode ser facilmente detectada (ver junto ao horizonte artificial na imagem 2 da Fig. 9) e será interpretada como a presença da passadeira, possibilitando o abrandamento para uma velocidade que permita ao robô parar na distância necessária. Em resumo, o sistema pode procurar manchas na pista e isolá-las no processo descrito na secção 4.1: se existirem manchas na pista, só podem ser da passadeira dado que outras não haverá! O aparecimento de manchas impõe uma redução de velocidade, tal como o desaparecimento das manchas retira essa inibição.

4.4 Extracção dos semáforos e uso da cor

Para interpretação dos símbolos mostrados pelos semáforos (Fig. 10) são usadas duas técnicas: a identificação pela cor e a identificação de forma. A identificação de cor é efectuada convertendo a imagem obtida pela câmara do semáforo para o modelo matemático de cor conhecido como HSV [5]. Ao contrário do modelo RGB, o HSV permite quantificar a cor numa única variável, a *Hue* (H) que traduz a matiz ou tonalidade. Há ainda a informação relativa à saturação da cor (S) e à intensidade de luz (V). Assim, a análise de cor é feita consultando os valores de H, S e V dos *pixels*.



Fig. 10 - As formas do semáforo (paragem, virar à direita, seguir em frente, última paragem, estacionar)

A primeira questão com que se depara é a extracção do fundo da imagem. O fundo é anulado com base numa condição que impõe uma saturação (S) relativamente elevada a cada *pixel* para que este não seja considerado fundo; isto significa extrair os *pixels* com cores mais "puras", processo facilitado pela natureza dos semáforos. Por outro lado, a análise de cor consiste numa simples comparação dos valores H de cada *pixel*. Neste processo criam-se duas imagens, que serão chamadas de filtro vermelho e filtro verde e que são, na verdade, cópias da imagem anterior (separada do fundo com base nos valores de S) em que cada *pixel* só é copiado se possuir os valores de H impostos. Distinguem-se assim a cor vermelha, a verde e também a amarela que se detecta por passar em ambos os filtros verde e vermelho simultaneamente. Na Fig. 11 pode ver-se o resultado da anulação do fundo do símbolo de "seguir em frente".

Assim, nos sinais da Fig. 10, vem o seguinte:

- Paragem – surge apenas no filtro vermelho; .
- Virar à esquerda – surge em ambos os filtros; .
- Seguir em frente – surge apenas no filtro verde;
- Última volta – surge em ambos os filtros mas com localização distinta;
- Estacionar – surge em ambos os filtros.

De notar que, só por identificação de cor, não é possível distinguir os símbolos virar à esquerda e estacionar. No entanto, as formas de última volta e estacionar são circunstanciais, donde se pudesse explorar essa facilidade e causalidade. Porém, para dar mais robustez ao sistema de detecção do semáforo, uma análise da forma permitirá certificar as conclusões obtidas pela análise de cor.

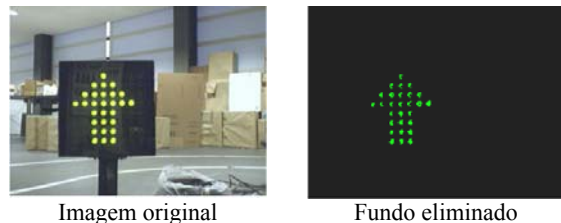


Fig. 11 – Eliminação do fundo na imagem do semáforo

4.5 Extracção dos semáforos e uso da forma

Obtida a mancha da forma do sinal como descrito na secção anterior, pode aplicar-se uma operação de envelope (*convex hull*) seguida de uma propagação (*fill*) a partir do centróide do objecto na imagem, e assim obter um corpo uniforme com uma certa relação com a geometria dos símbolos (Fig. 12, esq.). É também calculado o rectângulo de área mínima que envolve a região ocupada pelo símbolo do semáforo (Fig. 12, dir.). Imagine-se o símbolo para seguir em frente; na realidade trata-se de uma seta vertical orientada para cima. O centróide será deslocado para a ponta da seta, por essa apresentar maior largura do que a cauda. Tem-se então que o centróide está mais afastado da cauda do que da ponta da seta. Assim, o centro do referido rectângulo estará abaixo do centróide. Obtidos estes dois

pontos, basta calcular o ângulo do segmento de recta que os une e que indica a orientação da seta.

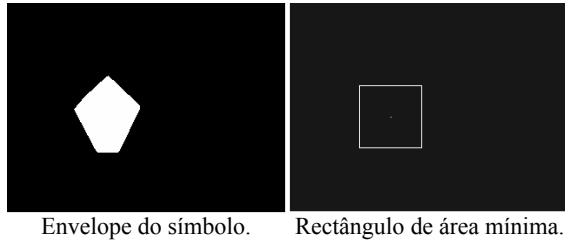


Fig. 12 – Análise de símbolos pela forma

O sinal de paragem e o de última volta têm invólucros convexos quadrados pelo que o afastamento entre os dois pontos não é significativo, sendo esse o critério para tomar a decisão de identificação.

5. A navegação

Obtidos os pontos relevantes (de referência) em pista, deve-se agora definir os processos de controlo do robô, mormente os valores instantâneos da direcção tomar e da velocidade linear.

5.1 Controlo para seguimento de pista

A informação final obtida pelo pré-processamento está condensada na imagem 2 da Fig. 9. Aí podem ver-se vários pontos de referência em pista (tantos quantas as análises paralelas que puderam ser validadas). Pode ver-se também um ponto no fundo da imagem de onde parte a linha, que representa a localização actual do robô. O controlo para seguimento de pista consiste em calcular o ângulo que deve ser imposto na direcção do robô de forma a que este se desloque do ponto actual para o ponto de referência. Este cálculo é feito de várias formas, ramificando-se também aqui a análise computacional efectuada. Procurar fixar uma única direcção das rodas dianteiras tal que levaria à posição desejada (ponto na pista) e com a orientação desejada (robô devidamente posicionado à chegada) não é teoricamente possível porque equivale a querer controlar três variáveis independentes no plano (x,y,θ) com apenas dois graus de liberdade do robô (dois actuadores independentes). Na Fig. 13 representa-se o ponto P para a nova posição desejada do eixo do robô. Isso implica um raio de curvatura R para uma direcção “média” das rodas frontais de um ângulo α . Da Fig. 13 verifica-se que:

$$\tan \alpha = D / R \quad (1)$$

Se o ponto P tiver coordenadas (x_1, y_1) no referencial localizado sobre a roda de direcção, então terá as coordenadas (x_1+R, y_1+D) nas coordenadas no referencial situado no centro instantâneo de curvatura (CIC). Isto é válido se o ponto P estiver à esquerda do eixo vertical de coordenadas (na metade esquerda da imagem, portanto). Se estiver na metade direita da imagem captada, então surge do lado direito do eixo vertical e nesse referencial, e o ponto P terá como abcissa o valor (x_1-R) , mas a ordenada

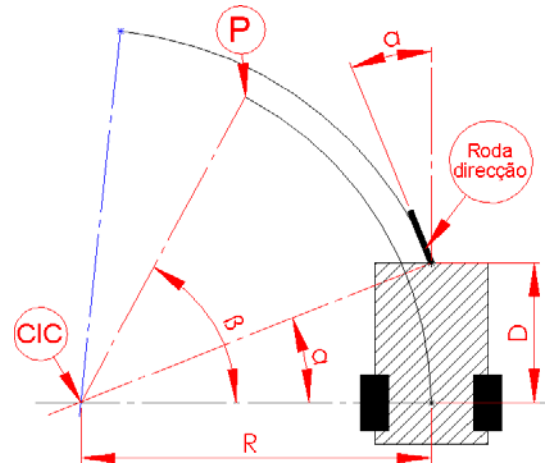


Fig. 13 - Trajectórias e ângulos. A roda de direcção tem o ângulo médio das direcções das duas rodas.

mantém-se. Em qualquer dos casos, a circunferência que contém P tem raio R e surge a equação genérica para os dois casos:

$$R^2 = (x_1 \pm R)^2 + (y_1 + D)^2 \quad (2)$$

que resulta na expressão final:

$$R = \mp \frac{(y_1 + D)^2 + x_1^2}{2x_1} \quad (3)$$

Em (3) a primeira solução é para o caso do ponto estar à esquerda do eixo vertical ($x_1 < 0$) e a segunda solução para caso de estar à direita ($x_1 > 0$). Se o ponto estiver sobre o eixo, isso corresponde a um raio infinito, ou seja, seguir em frente. Combinando as expressões (1) e (2), e atentando que o ângulo a tomar deve ser positivo quando x_1 é negativo e vice-versa, virá como solução para a direcção a tomar a seguinte expressão geral para qualquer valor de x_1 :

$$\alpha = \arctan \frac{-2Dx_1}{(y_1 + D)^2 + x_1^2} \quad (4)$$

Obviamente que este procedimento pressupõe que é feita uma correspondência entre *pixels* da imagem e os pontos no espaço físico, o que pode ser feito com uma calibração da câmara.

Todo este processo indica o ângulo teoricamente ideal para atingir um ponto na pista com uma única tomada de direcção. Naturalmente que isto não vai acontecer pelas irregularidades da percepção e da própria pista. A lei de controlo que se impõe como adequada seria mais complexa que o proposto em (4), devendo recorrer-se a uma perseguição de postura em que também a orientação de destino seria levada em conta [8]. Porém, e dado que a pista apresenta limites que impedem grandes variações de orientação, bem como as grandes dimensões relativas do robô, a solução baseada em (4) foi adoptada como suficiente. Assim, a lei de controlo é muito simples: a cada instante impõe-se a direcção que optimiza o posicionamento próximo na pista. Como o sistema mecânico impõe a direcção com grande velocidade e estabilidade (sem oscilações ou *overshoot* notórios), não se carece de uma lei de controlo de direcção com termos de ordem superior.

Quando a variação de direcção for “muito” grande, é sinal que há um grande erro de orientação. Nesse caso é recomendável diminuir a velocidade linear para tornar o sistema mais robusto. Uma lei do género da dada em (5) permite regular a velocidade linear em função da variação angular instantânea solicitada ($\Delta\alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i$):

$$v = v_{\max} \left(1 - \frac{|\Delta\alpha|}{\alpha_{\max}} \right) \quad (5)$$

5.2 Controlo em túnel e zona de obras

O robô está equipado com sensores de infravermelhos analógicos em ambos os lados. Um dos microcontroladores encarrega-se de ler os valores transmitidos pelos sensores e de enviar esta informação para o computador. Assim, o robô tem a noção da distância a que navega das paredes do túnel. Uma vez que existe um outro sensor semelhante apontado para cima, o sistema sabe quando é que se encontra dentro do túnel. A navegação neste meio específico, uma vez identificada, é uma simples busca de uma distância igual entre as distâncias lidas no lado direito e aquelas lidas no lado esquerdo do robô. A lei que controla o angulo de viragem é proporcional à diferença entre distâncias dos lados. Quanto à zona de obras, a filosofia é semelhante mas existem duas nuances. Os sensores não estão constantemente alinhados com os pinos e, por isso, a informação recebida tem validade de forma discreta e não contínua. Todavia, esta situação não interfere muito com o resultado final a baixas velocidades; tudo depende do espaçamento final dos pinos delimitadores. Mais ainda, quando não há pinos há espaço “infinito”, e essas medidas podem ser descartadas no controlo. A identificação da zona de obras, que não é viável com o sensor de topo, estará a cargo de um algoritmo de visão simples que procura a cor amarela característica dos pinos na região limítrofe do robô.

6. Conclusões e perspectivas

Este artigo descreve um conjunto de soluções técnicas e científicas que culminaram no desenvolvimento de uma plataforma robótica para a prova de Condução Autónoma do Festival Nacional de Robótica. Procurou-se utilizar componentes *standard* ou de fácil desenvolvimento e de custos controlados.

Em termos de contribuições originais neste trabalho, estão sobretudo os algoritmos de visão que se mostraram muito eficientes (15 a 20 imagens a cores de 320×200 *pixels* processadas por segundo). Essa contribuição surge sobre outras inúmeras contribuições que, embora menos relevantes do ponto de vista científico, foram imprescindíveis para o desenvolvimento da plataforma, e se referem a questões de concepção mecatrónica e também de adequadas práticas de engenharia.

Na altura em que se escreve este documento os resultados de navegação são muito bons no sentido em que a pista se cumpre com grande fiabilidade, mesmo em condições adversas de iluminação. O reconhecimento de semáforos apresenta de igual modo uma elevada taxa de sucesso, mas ainda se afinam parâmetros ligados a limiares de decisão e similares. O programa geral de controlo está em desenvolvimento e, como tal, não há ainda indicadores globais de desempenho.

Esta plataforma, tal como está apetrechada, tem dado boas provas durante o seu desenvolvimento e ensaios preliminares. Isto permite esperar que possa ser explorada futuramente como plataforma de investigação e desenvolvimento na área da navegação autónoma de robots, o que, por si só, já seria uma grande mais valia deste trabalho.

Estes resultados, mesmo se ainda não lacrados por uma longa história, criaram na equipa expectativas elevadas na participação da edição de 2005 do Festival Nacional de Robótica.

Nota de actualização

Aquando da submissão revista deste artigo em Abril de 2005, tinham sido introduzidos um travão mecânico de disco para travagens mais eficientes e uma unidade alternativa de potência para o motor de tracção [www.mec.ua.pt/robotics].

Referências

- [1] L. Almeida, J. Azevedo, C. Cardeira, P. Fonseca, P. Lima, F. Ribeiro, V. Santos, Festival Nacional de Robótica – ROBOTICA2001, *Robótica*, nº 45, 2º Trim. 2001, pp. 60-64 (ISSN: 0874-9019)
- [2] L. Almeida, J. Azevedo, M. Cunha, V. Santos, L. Seabra Lopes, ROBOTICA2002 – Segunda edição do Festival Nacional de Robótica, *Robótica*, nº 51, pp. 8-12, 2º Trim 2003. (ISSN: 0874-9019)
- [3] Lima, P., Sousa, J., Ribeiro, M. I., Cardeira, C., Custódio, L., - ROBOTICA2003 – 3º Festival Nacional de Robótica, *Robótica*, nº 52, pp.10-14, 3º Trim. 2003. (ISSN: 0874-9019).
- [4] Almeida, L., Azevedo, J., Cardeira, C., Costa, P., Fonseca, P. Lima, P., Ribeiro, F., Santos, V. October 2000. Mobile Robot Competitions: Fostering Advances in Research, Development and Education in Robotics. *Proc. of the 4th Portuguese Conference on Automatic Control, CONTROLO2000*, 4-6 October 2000, Guimarães, Portugal, pp. 592-597
- [5] OpenCV “Image Processing and Analysis Reference” www.cs.bham.ac.uk/resources/courses/robotics/doc/opencvdocs/ref/OpenCVRef_ImageProcessing.htm, consultado em Fev 2005.
- [6] WikiPedia, 2004, “Ackermann steering geometry” – www.wikipedia.org, consultado em Fev 2005.
- [7] RcTek, 2001, consultado em Fev 2005: www.rctek.com/handling/ackerman_steering_principale.html
- [8] Canudas de Wit, C., Siciliano, B., Bastin, G. - Theory of Robot Control, *Springer*, 1997.