

LÓGICA DIFUSA APLICADA À NAVEGAÇÃO DE UM VEÍCULO AUTÓNOMO

F. Cardoso, F. Fontes, C. Pais, P. Oliveira, M. I. Ribeiro
Instituto Superior Técnico (IST) e Instituto de Sistemas e Robótica (ISR)
Av. Rovisco Pais, 1 - 1096 Lisboa CODEX

Sumário

Este artigo descreve o desenvolvimento, teste e implementação de um sistema de navegação para Veículos Autónomos Guiados que combina a utilização de um controlador baseado em Lógica Difusa com um sistema de localização suportado numa câmara CCD que adquire a informação necessária para o reconhecimento de uma faixa branca colocada no solo.

Apresentam-se resultados experimentais que atestam a eficiência do sistema utilizado e apontam-se direcções para desenvolvimentos futuros.

1. INTRODUÇÃO

A locomoção é uma característica exigida para a realização de um grande número de operações realizadas em unidades industriais ou na área dos serviços. Por exemplo, o transporte de materiais ou produtos acabados entre células de produção de uma unidade industrial, a distribuição de encomendas num grande edifício, a vigilância de zonas potencialmente perigosas (p.e., parques de estacionamento) ou as operações de limpeza de grandes superfícies têm em comum a necessidade de locomoção e podem ser implementadas, com vantagens imediatas e evidentes, recorrendo a Veículos Autónomos.

Os *Automated Guided Vehicles (AGVs)* constituem uma solução típica para a realização desse tipo de operações nas áreas industriais e dos serviços. O uso de AGVs em ambientes fabris tem vindo a generalizar-se como reflexo da necessidade de uma disciplina crescente no fluxo de materiais substituindo os convencionais empilhadores e, nalgumas condições, os sistemas de tapetes e de cilindros rotativos. Em Portugal estão instalados alguns sistemas de AGVs, em número ainda muito

reduzido. Este tipo de Veículos Autónomos tem também sido utilizado na área dos serviços, referindo-se a existência de instalações em hospitais, portos e estações de caminho de ferro.

Nos Veículos Autónomos Guiados cuja instalação em unidades produtivas está mais generalizada, a navegação toma como base um conjunto de possíveis trajectórias definidas ao nível do solo por condutores eléctricos enterrados ou por faixas brancas pintadas. Nos dois casos anteriores a localização do veículo em relação à trajectória desejada é assegurada por sensores indutivos ou ópticos. Os controladores PID, com uso generalizado em aplicações de automação, são também os mais correntes nas versões comerciais dos AGVs.

A necessidade de melhores desempenhos associada a uma flexibilidade crescente tem conduzido a uma intensa actividade de investigação na área dos sistemas de navegação, [1], [2], combinando-se novas estratégias de controlo, [3], com desenvolvimentos efectuados ao nível dos sensores utilizados, [4]. A utilização de diferentes tipos de sensores e a aplicação de novas técnicas de controlo na navegação de Veículos Autónomos tem conduzido progressivamente a melhores desempenhos sem que tenha sido necessário um aumento da complexidade dos veículos utilizados.

O trabalho descrito neste artigo, ensaiado numa plataforma móvel de teste, evidencia a eficiência de um sistema de navegação baseado em regras difusas que é, simultaneamente, flexível, e de fácil implementação, em contraste com os sistemas tradicionais (indutivos), cuja instalação a nível do solo é muito conservativa.

Câmara CCD

A Câmara CCD está montada na zona frontal do veículo sobre o seu eixo longitudinal, fazendo um ângulo de 25° com a vertical (Fig. 3).

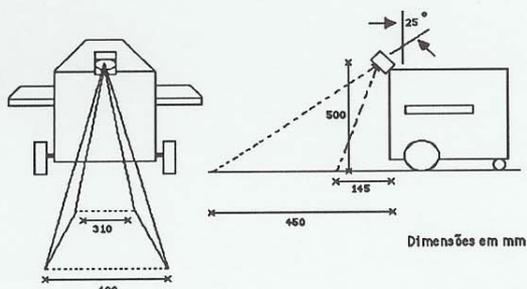


Fig. 3 - Colocação da Câmara CCD

A aquisição de imagem é efectuada através de uma placa específica (DT-IRIS), que obtém imagens constituídas por 512×512 *pixels* correspondentes a níveis de cinzento quantificados no intervalo [0, 255].

Através de uma operação de limiar é obtida uma imagem a preto e branco (níveis 0 e 255). O valor do limiar é definido por forma a que todos os pontos que não são realmente brancos sejam considerados zona de fundo, filtrando-se assim uma parte significativa do ruído existente na imagem original.

Através da observação de histogramas de imagens típicas, de que é exemplo o apresentado na Fig. 4, escolheu-se o valor de limiar que corresponde ao nível de cinzento 255, obtendo-se assim uma imagem a preto e branco cujos *pixels* da zona de fundo que não são realmente brancos, são transformados em preto. A escolha de um valor diferente do anterior para o limiar provocaria o aparecimento de *pixels* brancos na zona de fundo, podendo conduzir a possíveis erros de detecção da faixa branca e complicando substancialmente o algoritmo de identificação da referida faixa.

Piloto

O Piloto tem como função efectuar o cálculo dos valores de deriva do veículo em relação à faixa branca na zona próxima (**turn_angle**) e numa zona mais afastada (**speed_angle**). Estas grandezas constituem a informação de entrada do Controlador Difuso.

Para dois valores de distância d_1 e d_2 em relação à frente do veículo, determinados em função da velocidade máxima do mesmo, o Piloto calcula os

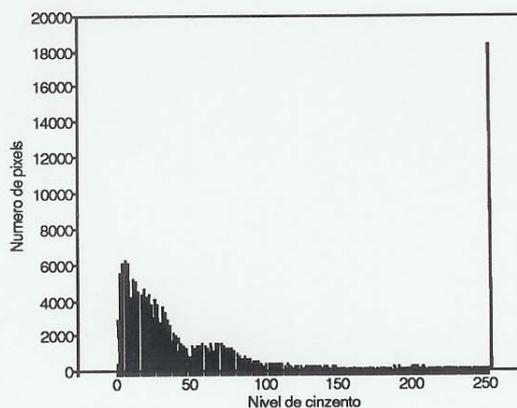


Fig. 4 - Histograma de uma imagem real

valores de **speed_angle** e **turn_angle** a partir da localização dos pontos médios da faixa branca às distâncias d_1 e d_2 respectivamente.

O valor de **turn_angle** é definido como o ângulo entre o eixo longitudinal da imagem adquirida e a recta definida pelo ponto médio da linha de imagem que corresponde à zona do espaço mais próxima do veículo e o ponto médio da faixa branca detectada na linha que corresponde à distância d_2 . De modo análogo se define o valor de **speed_angle** a uma distância d_1 do veículo (Fig. 5).

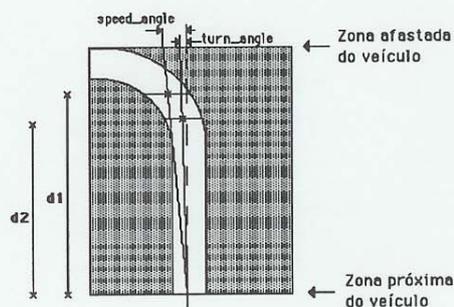


Fig. 5 - Definição de **turn_angle** e **speed_angle** numa imagem típica adquirida pelo Sistema de Visão

Como ficará claro na análise do controlador, o valor de **turn_angle** permite o controlo local do veículo enquanto **speed_angle** permite prever a topologia da trajectória futura justificando actuações ao nível da velocidade linear do mesmo.

Detector de Linhas

O Detector de Linhas procede à identificação do ponto médio da faixa branca às distâncias d_1 e d_2 .

Uma vez que o veículo se encontra em movimento podem ocorrer situações em que não seja possível identificar nenhum ponto da trajectória às distâncias d_1 e/ou d_2 ; por exemplo, pode acontecer que ao descrever uma curva, a identificação da faixa branca apenas seja possível em linhas da imagem que correspondem a distâncias diferentes de d_1 e de d_2 .

Na Fig. 6 encontram-se representadas duas imagens típicas adquiridas quando o veículo se aproxima de uma curva. São apresentadas duas situações distintas; na Fig. 6 a) é possível identificar a faixa branca à distância d_2 , mas não à distância d_1 ; na Fig. 6 b) a detecção não é possível para nenhuma das duas distâncias.

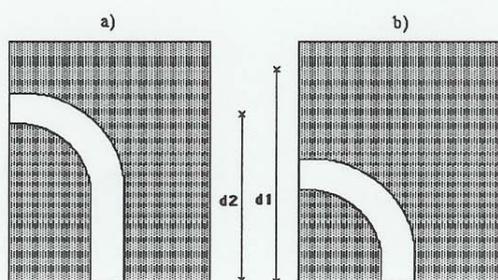


Fig. 6 - Situações particulares em que não é possível identificar a faixa branca às distâncias d_1 e/ou d_2

Nestas situações o Detector de Linhas recorre a um procedimento iterativo, descrito mais à frente, por forma a identificar a existência da faixa em linhas da imagem que correspondem, sucessivamente, a zonas mais próximas da parte frontal do veículo.

Em cada iteração o Detector de Linhas começa por analisar linhas da imagem a distâncias do veículo que são função dos valores em que, na iteração anterior, a faixa foi encontrada.

Admitindo que na iteração $k - 1$ a faixa branca foi identificada às distâncias d_1 e d_2 (com valores definidos *a priori*) na iteração k a busca inicia-se para as linhas a esta distância.

No caso de, na iteração k , a faixa branca não ser detectada nessas linhas da imagem o algoritmo analisa sucessivamente as linhas que correspondem a zonas mais próximas do veículo.

Dado que o tempo de processamento necessário para a detecção da faixa branca depende do número de linhas da imagem analisadas, esta busca sucessiva não é efectuada ao longo de

todas as linhas que compõem a imagem, sendo analisadas apenas as linhas que distam entre si 10 unidades, reduzindo-se assim o número de linhas a analisar e consequentemente o tempo de processamento. Em seguida apresenta-se, em pseudo-código, o procedimento implementado pelo Detector de Linhas.

```

INT Detector_de_Linhas (INT *ponto_médio, INT *linha, INT linha_inicial)
BEGIN
  linha=linha_inicial;
  WHILE (linha não é a última)
  BEGIN
    WHILE (não é o fim da linha)
    BEGIN
      IF (detecta faixa branca e (INT Reconhecedor_de_Padrões))
      BEGIN
        IF (detecta outras faixas brancas)
          Decisor_de_Rota();
        RETURN(faixa branca encontrada);
      END;
    END;
    linha = linha - 10;
  END;
  RETURN(faixa branca não encontrada);
END;

```

Pseudo-código do Detector de Linhas

Detectada a presença da faixa branca numa determinada linha da imagem é retornado ao Piloto o valor desta, assim como a localização do ponto médio da faixa identificada nessa linha.

É função do Piloto redefinir os valores das distâncias a partir das quais o Detector de Linhas deverá iniciar a busca na iteração $k + 1$. Se na iteração k , a faixa para o cálculo de **speed_angle** foi detectada na linha correspondente a uma distância d , então na iteração $k + 1$ a busca da faixa para o cálculo do mesmo ângulo inicia-se na linha $d_1 + x$, em que x tem o valor $\frac{d-d_1}{2}$. Note-se que para $x = 0$, $d = d_1$.

Procedimento análogo é implementado pelo Piloto para a distância a que na iteração seguinte se irá iniciar a busca para o cálculo de **turn_angle**.

O Piloto reduz assim o espaço de busca da faixa e, consequentemente, o tempo de processamento necessário para detecção da mesma.

Reconhecedor de Padrões

O Reconhecedor de Padrões tem como objectivo efectuar o reconhecimento da faixa branca, numa determinada linha da imagem fornecida pelo Detector de Linhas.

De forma a atingir o objectivo pretendido é examinado nessa linha o número de *pixels* brancos consecutivos, verificando-se posteriormente se esse conjunto de *pixels* pertence (ou não) à faixa branca.

O efeito de perspectiva resultante da colocação da câmara tem como consequência o facto de o número de *pixels* que caracterizam a espessura da faixa em linhas da imagem distintas não ser constante. Por observação de imagens reais verificou-se que

a espessura da faixa varia entre 23 a 34 *pixels* consecutivos na linha da imagem que corresponde à zona mais afastada do veículo (0.45m) e 33 a 38 *pixels* consecutivos, na linha correspondente à zona mais próxima (0.145m). Admite-se que a variação do número de *pixels* brancos é linear entre estes valores extremos.

Decisor de Rota

O Decisor de Rota é solicitado nas situações em que mais do que uma faixa é detectada em determinada linha da imagem, devido ao facto de o veículo se encontrar próximo de um cruzamento, entroncamento ou a imagem adquirida estar corrompida por ruído.

O algoritmo implementado, apesar de bastante simples, foi desenvolvido por forma a que o veículo siga a trajectória com a qual se encontra mais alinhado. Esta corresponde ao ponto médio da faixa branca identificada à distância mais próxima do eixo longitudinal da imagem adquirida (Fig. 7).

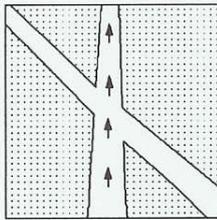


Fig. 7 - Decisão de Rota num cruzamento

4. CONTROLADOR DIFUSO

O Controlador Difuso recebe como variáveis de entrada *speed_angle* e *turn_angle*, fornecidos pelo Sistema de Visão e gera como saídas os valores de v_c (velocidade comum) e v_d (velocidade diferencial) que definem o comportamento pretendido para o veículo.

A estrutura do Controlador Difuso é a habitual [7] (Fig. 8), em que cada um dos blocos desempenha as seguintes funções:

- O *Interface de Fuzificação* converte os sinais numéricos de entrada *turn_angle* e *speed_angle* obtidos pelo Sistema de Visão em termos linguísticos das respectivas variáveis difusas de entrada **TURN_ANG** e **SPEED_ANG**, associados a um determinado valor de certeza.
- A *Base de Conhecimento* tem como função armazenar toda a informação sobre os Con-

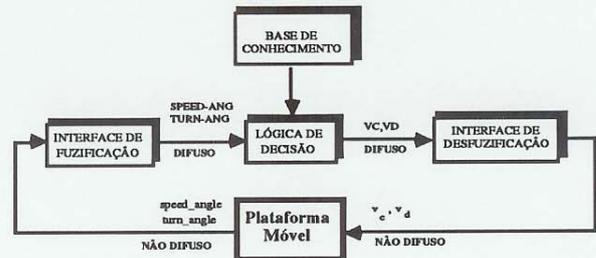


Fig. 8 - Controlador Difuso aplicado à Plataforma Móvel

juntos Difusos de cada variável de controlo e ainda informação sobre os métodos de “fuzificação” e “desfuzificação” utilizados. Esta base contém ainda as Regras Difusas utilizadas, as quais têm uma estrutura do tipo **IF SPEED_ANG TURN_ANG THEN VC VD** tendo sido definidas para assegurar que o veículo tenha o comportamento pretendido.

- A *Lógica de Decisão* tem como função aplicar as Regras Difusas de forma a obter o valor das variáveis linguísticas de saída **VC** e **VD**.
- O *Interface de Desfuzificação* gera os sinais numéricos de saída, v_c e v_d , como resultado da “desfuzificação” das variáveis linguísticas de saída **VC** e **VD**.

Variáveis linguísticas

De forma a que o veículo exiba o comportamento pretendido, as acções de controlo deverão condicionar o movimento do veículo de acordo com a informação fornecida por *speed_angle* e *turn_angle*. Uma vez que o controlo de velocidade é diferencial, o comportamento desejado é obtido por imposição de v_c e v_d . O valor de v_c é a velocidade comum do veículo supondo $v_d = 0$; v_d representa o incremento de velocidade da roda esquerda e o decremento de velocidade da roda direita, correspondendo ao raio da curva que o veículo deverá descrever.

O universo de discurso e os termos linguísticos da variável **SPEED_ANG** foram definidos por forma a permitir uma clara distinção entre a situação em que o veículo se encontra em linha recta (termo **ZE**) e a situação em que está a descrever uma curva (termos **NEG**, **POS**) (Fig. 9). A forma geométrica do termo linguístico **ZE** permite contabilizar os pequenos desvios em relação a uma trajectória rectilínea. Os ensaios efectuados permitem admitir que o veículo se está a deslocar segundo uma

linha recta sempre que se verifica a condição:
 $|\text{speed_angle}| \leq 15^\circ$.

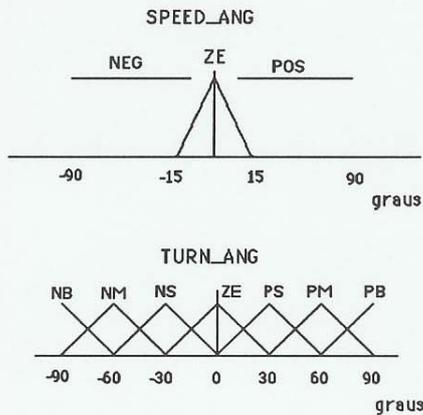


Fig. 9 - Variáveis linguísticas de entrada

A variável **TURN_ANG** permite caracterizar os desvios do veículo em relação a uma trajectória rectilínea. A utilização de sete termos linguísticos (PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB) (Fig. 9), representando um compromisso entre a precisão com que se caracteriza o valor de desvio e a complexidade do Controlador Difuso, revelou-se adequada para a implementação efectuada.

A variável difusa **VC** (Fig. 10) e o método de desfuzificação a ela associada (MAX) foram definidos de forma que o veículo tenha o comportamento pretendido, permitindo descrever curvas a uma velocidade constante e acelerar linearmente em recta de acordo com o valor de certeza inferido.

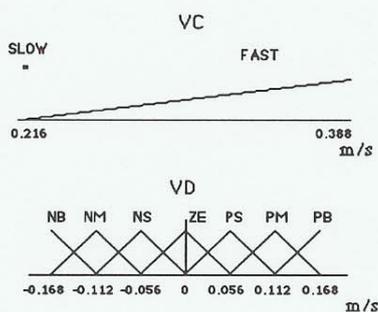


Fig. 10 - Variáveis linguísticas de saída

A variável **VD** (Fig. 10) permite definir o incremento/decremento de velocidade da roda esquerda/direita do veículo proporcionalmente ao valor do raio de curvatura a descrever. Este objectivo é atingido definindo **VD** de forma

muito semelhante à variável **TURN_ANG**. Com esta configuração e utilizando como método de desfuzificação o centro-de-área (COA) obtém-se um coeficiente de proporcionalidade de 0.43 entre o valor de **turn_angle** e v_d , verificando-se assim uma correspondência linear entre o valor de desvio em relação à trajectória a seguir e a velocidade diferencial a imprimir ao veículo.

Regras Difusas

O conjunto de regras difusas que caracterizam a estratégia de inferência do Controlador Difuso foi definido de forma que o comportamento do veículo seja o pretendido. Ao deslocar-se ao longo de uma trajectória rectilínea o veículo deverá acelerar/desacelerar em função do desvio em relação à trajectória ideal, podendo atingir uma velocidade máxima de 0.388m/s; ao longo de uma curva a velocidade do veículo deve permanecer constante e igual a 0.216m/s. Estes valores foram determinados com base nas restrições impostas pelas dimensões do veículo e pela topologia do circuito.

Em termos de regras difusas isto significa que **VC** deve ser "FAST" quando **SPEED_ANG** é "ZERO" e **TURN_ANG** é "PS", "ZE" ou "NS"; nos restantes casos a velocidade comum deve ser "SLOW".

As regras difusas utilizadas apresentam uma estrutura do tipo:

IF (SPEED_ANG, TURN_ANG) THEN (VC, VD)

O número de termos linguísticos das variáveis **TURN_ANG** e **SPEED_ANG** determinam um número máximo de 21 regras possíveis.

Na tabela seguinte encontra-se representado o conjunto de regras utilizado, obtendo-se uma redução do número de regras por utilização de algumas facilidades de descrição de que são exemplo, a utilização dos símbolos "," e "*", com significados "ou" e "qualquer que seja" respectivamente.

| Regra N | | SPEED_ANG | TURN_ANG | THEN VC | VD |
|---------|----|-----------|----------|-----------|----|
| 1 | IF | POS | PS, | | |
| | | NEG | PS | THEN SLOW | PS |
| 2 | IF | ZE | PS | THEN FAST | PS |
| 3 | IF | * | PM | THEN SLOW | PM |
| 4 | IF | * | PB | THEN SLOW | PB |
| 5 | IF | ZE | ZE | THEN FAST | ZE |
| 6 | IF | POS | ZE | | |
| | IF | NEG | ZE | THEN SLOW | ZE |
| 7 | IF | POS | NS, | | |
| | | NEG | NS | THEN SLOW | NS |
| 8 | IF | ZE | NS | THEN FAST | NS |
| 9 | IF | * | NM | THEN SLOW | NM |
| 10 | IF | * | NB | THEN SLOW | NB |

Conjunto de regras difusas

A análise das regras apresentadas permite verificar

a sua adaptação ao comportamento pretendido para o veículo.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na implementação efectuada **speed_angle** e **turn_angle** são adquiridos na mesma linha da imagem correspondendo a distâncias iguais da zona frontal do veículo, devido a limitações impostas pelo ângulo de abertura da câmara, *i.e.*, faz-se sempre $d_1 = d_2$. Tal é devido ao facto de a linha da imagem que corresponde à zona mais afastada do veículo representar uma distância real bastante reduzida, devendo a determinação de **turn_angle** ser efectuada nessa mesma linha. Caso contrário teriam que ser impostas restrições que limitassem a velocidade máxima do veículo, por forma a que na iteração seguinte o veículo não se encontrasse numa zona da pista não contemplada na imagem adquirida. Por outras palavras, o valor de **speed_angle**, que deveria ser definido a uma distância superior, é definido à mesma distância que **turn_angle**, uma vez que o conteúdo da imagem não permite obter informação sobre as zonas mais distantes.

Esta alteração em relação à estrutura inicialmente proposta tem como consequência uma degradação do comportamento do veículo sobretudo nas zonas de entrada e saída de curvas, uma vez que a detecção da aproximação a uma curva se efectua quando o veículo já se encontra muito próximo da mesma. Em contrapartida, possibilita a obtenção de velocidades comuns superiores às que se obteriam caso os valores de **speed_angle** e **turn_angle** fossem adquiridos em linhas da imagem distintas.

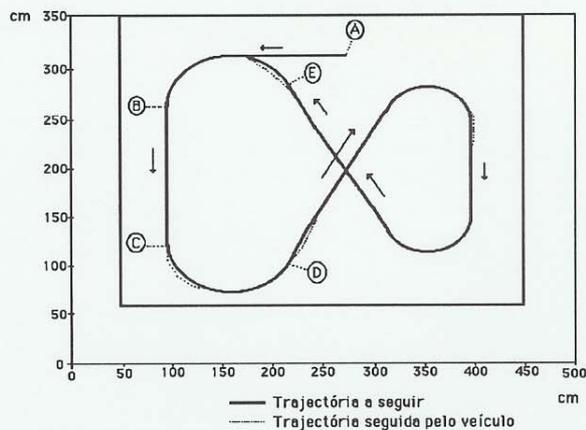


Fig. 11 - Trajectória real *versus* trajectória desejada

Na Fig. 11 representa-se uma trajectória real usada como teste do sistema e, sobreposta, a

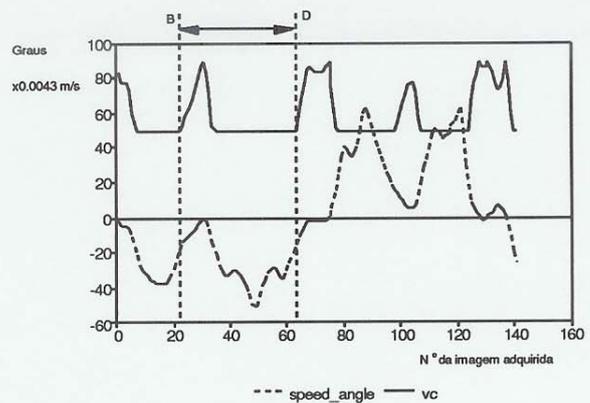


Fig. 12 - Evolução da velocidade comum

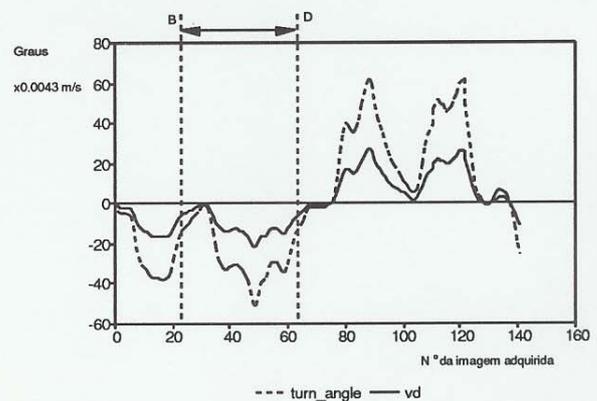


Fig. 13 - Evolução da velocidade diferencial

trajectória realmente seguida pelo veículo, sendo visíveis os desvios obtidos em relação a trajectória ideal (especialmente nas transições recta-curva e curva-recta). Estes desvios devem-se ao facto já mencionado anteriormente de **speed_angle** e **turn_angle** serem adquiridos na mesma linha da imagem.

Nas figuras 12 e 13 encontram-se representadas as evoluções das velocidades comuns e diferencial imprimidas ao veículo ao longo de uma volta com início no ponto A e fim em E, na trajectória descrita na Fig. 11. A zona assinalada corresponde ao troço de pista compreendido entre B e D.

A análise da zona assinalada na Fig. 12 evidencia o comportamento imposto ao veículo em termos de velocidade comum. Ao entrar numa zona de recta (B) o veículo acelera linearmente até detectar que se está a aproximar de uma curva, situação em que a redução de velocidade é linear; ao deslocar-se ao longo da curva (C→D) a velocidade comum permanece constante e igual ao valor mínimo pré-determinado.

Os valores assumidos pela variável **speed_angle** na Fig. 12 evidenciam se o veículo se está a deslocar ao longo de uma recta ($|\text{speed_angle}| \leq 15^\circ$),

ou uma curva à esquerda ou à direita, caso em que **speed_angle** assume valores compreendidos no intervalo $[-90^\circ, -15^\circ]$ ou $[15^\circ, 90^\circ]$ respectivamente.

A Fig. 13 permite constatar a proporcionalidade existente entre o valor de deriva do veículo em relação a uma trajectória rectilínea (**turn_angle**) e o valor da velocidade diferencial a impôr ao veículo.

A variável **turn_angle** assume valores distintos nas situações em que o veículo se desloca ao longo de uma recta ou de uma curva. No primeiro caso estes valores oscilam em torno de zero contabilizando pequenos desvios em relação à trajectória rectilínea a seguir. No segundo caso oscilam em torno de um valor médio que constitui uma medida do raio de curvatura da curva a descrever.

6. CONCLUSÕES

A concordância quase perfeita entre a trajectória do veículo e a trajectória ideal permite verificar a eficiência do Sistema de Controlo Difuso utilizando um reduzido número de regras. O problema dos pequenos desvios, verificados especialmente em situações de transição curva-recta, recta-curva, resultante da necessidade de aquisição de ambas as medidas de deriva à mesma distância do veículo, poderá ser facilmente resolvido através da utilização de uma câmara com um maior ângulo de abertura, ou através de um mecanismo que possibilite a rotação da mesma em torno de um eixo horizontal, permitindo a visualização de zonas mais afastadas do veículo.

Ao nível do Sistema de Visão é de salientar que o algoritmo implementado poderá apresentar alguma ineficiência em situações hostis de funcionamento, nomeadamente em ambientes fabris com sistemas de iluminação deficientes. Perante esta situação será recomendável recorrer à utilização de um algoritmo de análise de imagem mais eficiente ou à utilização de uma fonte de iluminação própria, associada ao veículo, por forma a que a zona frontal do veículo tenha uma distribuição de luminosidade homogénea, evitando-se assim problemas resultantes de reflexões.

Note-se contudo, que dado que se está a efectuar processamento em tempo real, se deve ter especial atenção no facto de que algoritmos de detecção muito sofisticados podem conduzir a tempos de processamento inoportáveis.

Apesar de não ter sido abordado o problema da detecção de colisões, este poderá ser tomado em consideração sem que para isso seja necessário introduzir grande complicação adicional no sistema

proposto.

O Sistema de Navegação implementado sendo simultaneamente, flexível, de fácil implementação e baixo custo, justifica a sua aplicação em substituição dos sistemas clássicos baseados na utilização de controladores PID.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] I. J. Cox; G. T. Wilfong, editors, "Autonomous Robot Vehicles", Springer-Verlag, 1990.
- [2] C. Resendes; R. Cabral; M. I. Ribeiro, "An Algorithm for the Steering Control of Mobile Robots", *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems'90*, Tsuchiura, Japan, July 1990.
- [3] U. Kramer, "On the Application of Fuzzy Sets to the Analysis of the System Driver-Vehicle-Environment", *Automatica* Vol. 21, No. 1, pp. 101-107, 1985.
- [4] M. A. Turk; D. G. Morgenthaler; K. D. Gremban; M. Marra, "VITS - A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, no. 3, May 1988.
- [5] S. Ishikawa; H. Kuwamoto; S. Ozawa, "Visual Navigation of an Autonomous Vehicle Using White Line Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, no. 5, September 1988.
- [6] M. K. Ciliz; C. Isik, "Fuzzy rule-based motion controller for an autonomous mobile robot", *Robotica*, Vol. 7, pp. 37-42, 1989.
- [7] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control: Fuzzy Logic Controller", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, no. 2, Mar/April 1990.