

## SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS BASEADO EM FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

Armando Jorge Miranda de Sousa

Paulo José Cerqueira Gomes da Costa

António Paulo Gomes Mendes Moreira

*Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal*

**Resumo:** Na robótica móvel uma localização exacta é essencial para o correcto desempenho por parte dos Robots das tarefas que lhe estão destinadas. Este problema não é de resolução elementar principalmente quando se pretender evitar custos elevados. Neste artigo propomos uma método de localização baseado em imagens captadas por uma câmara presente no Robot e nas quais são identificados marcadores cujo posição é conhecida. Executam-se algumas simulações onde são testados algoritmos baseados no filtro de Kalman extendido e é verificada a viabilidade dos mesmos.

**Palavras chave:** Localização, Robôs Móveis, Filtro de Kalman Extendido

### 1. INTRODUÇÃO

A localização de robots móveis é motivo de intensa investigação científico-tecnológica. Existe uma grande diversidade de técnicas baseadas em diferentes princípios físicos e diferentes algoritmos para localização. A localização em ambiente estruturado socorre-se em geral de elementos externos que são denominados de marcadores. É possível utilizar marcadores naturais já existentes no ambiente para a localização. Outra possibilidade é acrescentar ao ambiente marcadores artificiais propositadamente para a localização do robot.

Alguns trabalhos utilizam medida de distância a marcadores naturais tal como paredes. Esta medida é frequentemente conseguida através de medida de distância por Laser [Jensfelt01], [Ribeiro96], [Arsenio98], [Mota00] ou com recurso a sonares

[Drumheller87], [Jensfelt98], [Aguilar02], [Girod01], [Tsai98], [Wijk00] e [Figueroa94]. A localização por Rádio Frequência é também uma solução que diversos autores exploram tal como nos trabalhos [Want92], [Hightower00] e [Chiang02]. As técnicas baseadas em sistemas de visão apresentam, hoje em dia, custos muito interessantes e é possível identificação de diversos elementos visuais da imagem. É possível, por exemplo, detectar e seguir lâmpadas do tecto e assim realizar a localização do robot móvel [Launay01], [Launay02]. O trabalho [Toyama95] estuda diversas hipóteses para o seguimento de elementos visuais presentes na imagem de um robot. Em [Segvic01] estuda-se a localização dentro de um ambiente confinado tal como um corredor, determinando a orientação do robot pelos contornos do corredor onde o robot se desloca. O trabalho [Kiry02] utiliza um Filtro de Kalman extendido para seguir diversos

marcadores artificiais dispostos de forma não estruturada. O trabalho [Bartelds02] propõe uma estratégia de localização a dois níveis em simultâneo: ajustes locais e estratégia global; este trabalho utiliza as linhas de um campo de futebol robótico da liga F2000 da Federação RoboCup. O método global estuda diversas localizações possíveis que se ajustem aos elementos (linhas) da imagem. O método global é utilizado quando o método local falha. O método local segue os elementos encontrados na imagem em Tempo Real. O método global procura afectar as linhas avistadas às linhas reais do campo, conhecidas antecipadamente.

O presente trabalho pretende localizar um robot móvel num ambiente estruturado unicamente através de visão. A motivação para tal tarefa advém da participação dos autores na liga F2000 do Futebol Robótico da Federação RoboCup. Nesta liga utilizase postes coloridos como marcadores artificiais de localização. Na actual configuração do sistema de visão que executa a medida, os postes são reconhecidos e é medida a distância e o ângulo ao poste. A informação de distância é de fraca qualidade e a informação angular é de elevada qualidade. Um ângulo e uma distância do mesmo poste não localiza univocamente o robot, i.e., não é possível determinar os valores  $(x, y, \theta)$  do robot no referencial do mundo. Um conjunto de medidas permite no entanto melhorar a actual estimativa de localização. Avistando diversos marcadores, a quantidade de informação disponível para localização aumenta e assim deve também a estimativa melhorar muito de qualidade. Para tal objectivo utiliza-se neste trabalho um Filtro de Kalman Extendido que permite fundir a informação proveniente da hodometria com a informação proveniente dos marcadores de localização (postes coloridos) para conseguir a convergência entre a estimativa do sistema e a localização real do robot. O presente trabalho baseia-se no sistema de medida actualmente existe para os robôs futebolistas descritos em [Costa99b] e [Costa99a].

## 2. MODELO DO ROBOT

Vamos considerar um robot com tracção diferencial e que não há escorregamento de qualquer tipo, nomeadamente lateral, ou seja, que a velocidade das rodas, no ponto de contacto com o chão é sempre perpendicular ao seu eixo [Costa99a].

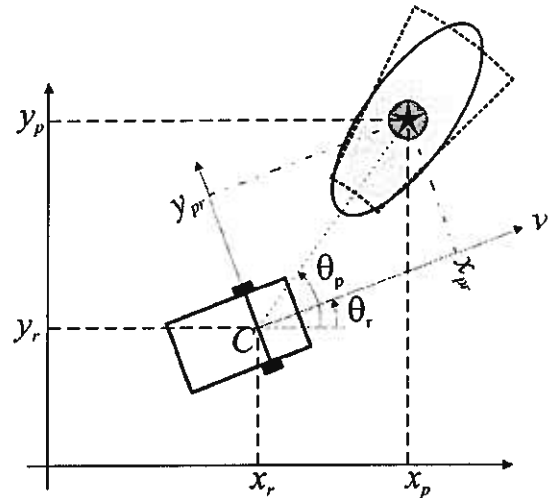


Figura 1 Representação gráfica do estado associado ao Robot

Consequentemente, o estado do Robot, em termos de posicionamento, pode ser dado por:

$$X(t) = [x(t) \quad y(t) \quad \theta(t) \quad v(t) \quad \omega(t)]^T \quad (1)$$

Em que  $x(t)$  e  $y(t)$  representam a posição do ponto C num plano,  $\theta(t)$  a atitude do Robot,  $v(t)$  a velocidade tangencial do ponto C e  $\omega(t)$  a velocidade angular, isto é, a velocidade de rotação do Robot segundo o eixo vertical que passa por C. Essencialmente recorrendo-se à hodometria podemos, medir  $v_1(t)$  e  $v_2(t)$  directamente, sendo as velocidades linear e angular dadas por:

$$v(t) = \frac{v_1(t) + v_2(t)}{2} \quad (2)$$

$$\omega(t) = \frac{v_1(t) - v_2(t)}{b} \quad (3)$$

sendo  $b$  é a distância entre os dois pontos de contacto. Este valor pode ser aproximado pelo da distância entre as rodas.

As equações da cinemática do Robot que nos permitirão simular o seu comportamento serão dadas por:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \cos(\theta(t)) \\ v(t) \sin(\theta(t)) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Numa primeira abordagem vamos considerar que a dinâmica das velocidades é desprezável e que portanto podemos considerar  $v(t)$  e  $\omega(t)$  como "entradas" de comando. Os valores numéricos utilizados neste artigo serão valores reais da equipa "5dpo-2000" de robôs futebolistas da liga média da Federação RoboCup de que os autores fazem parte. Actualmente as constantes de tempo dominantes nestes Robots estão na ordem dos 250 milissegundos o que se pode considerar bastante baixo para que a

dinâmica possa ser desprezada no problema em causa.

### 3. FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

Sendo o modelo da cinemática do Robot dado pela equação (4) e considerando-se que os sinais de controlo são constantes entre cada instante de amostragem, podemos escrever a equação de propagação do estado como [Gelb74]:

$$\frac{dX(t)}{dt} = f(X(t), u(t_k), t), \quad t \in ]t_k, t_{k+1}] \quad (5)$$

sendo  $u(t) = [v(t) \ \omega(t)]^T$

Cuja linearização em torno do ponto  $t=t_k$ ,  $X(t)=X(t_k)$  e  $u(t)=u(t_k)$  resulta em:

$$A^*(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v(t_k) \cdot \sin(\theta(t_k)) \\ 0 & 0 & v(t_k) \cdot \cos(\theta(t_k)) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Discretizando-se a matriz de transição de estado anterior obtemos:

$$\Phi^*(k) = \exp(A^*(k)(t_k - t_{k-1})) \quad (7)$$

Quando um Robot visualiza um marcador que se encontra na posição  $(x_p, y_p)$  obtém não as coordenadas absolutas mas sim as coordenadas relativas  $(x_{pr}, y_{pr})$  de um referencial centrado no próprio Robot, que se encontra na posição  $(x, y)$  e orientado segundo a orientação do mesmo (ângulo  $\theta$ ), como se ilustra na figura 1. Da relação entre estes dois sistemas de coordenadas obtemos as observações:

$$z(t) = h(X(t)) = \begin{bmatrix} x_{pr} \\ y_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_p - x) \cos(\theta) + (y_p - y) \sin(\theta) \\ -(x_p - x) \sin(\theta) + (y_p - y) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

e por diferenciação a matriz das observações:

$$H^*(k) = \begin{bmatrix} -\cos(\theta(t_k)) & -\sin(\theta(t_k)) & y_{pr}(t_k) \\ \sin(\theta(t_k)) & -\cos(\theta(t_k)) & -x_{pr}(t_k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

As equações do Filtro de Kalman Extendido utilizadas são as seguintes [Gelb74]:

i) Estimativa do estado no instante de tempo  $t=t_k$ ,

$X(k)$ , conhecendo-se apenas a estimativa do estado no instante de tempo  $t=t_{k-1}$ ,  $X(k-1)$  e o controlo  $u(t_k)$  será obtida pela integração numérica da equação (5).

ii) A propagação da covariância do estado é dada por

$$P(k^-) = \Phi^*(k)P(k-1)\Phi^{*T}(k) + Q(k) \quad (10)$$

em que  $Q(k)$  é a covariância do ruído da equação (5) estando relacionada com a adequação do modelo

utilizado.

Existindo uma observação executam-se também os seguintes passos:

iii) Cálculo do Ganho de Kalman:

$$K^{temp} = (H^*(k)P(k^-)H^{*T}(k) + R(k))^{-1} \quad (11)$$

$$K(k) = P(k^-)H^{*T}(k)K^{temp}$$

iv) Actualização da covariância do estado.

$$P(k) = (I - K(k)H^*(k))P(k^-) \quad (12)$$

v) Actualização do estado tendo em conta a nova observação.

$$X(k) = X(k^-) + K(k)(z(k) - h(X(k^-, t_k))) \quad (13)$$

### 4. RESULTADOS

Tal como referido anteriormente, as situações apresentadas aqui foram inspiradas em problemas ligados à liga média do RoboCup e nas experiências de jogo da equipa "5dpo-2000" [Costa99b]. Neste tipo de ambiente estruturado os robôs progridem no campo de dimensões de 5 por 10 metros observando marcadores colocados nos cantos. Para legibilidade restringe-se o problema a uma metade do campo de 5 por 5 metros.

Utilizando o sistema de eixos que passa pelo robot e pelo poste com base em dados reais, a estimativa do desvio padrão da observação dos marcadores em termos de distância do robot ao marcador é ( $sdv\_dist\_m^*distp$ ), i.e., o desvio padrão da medida é proporcional à distância. No caso da medida angular, tendo por base um valor  $sdv\_ang$  para o desvio padrão, então  $y_{pr} = sdv\_ang^*distp$  (ver figura 1).

$$R' = \begin{bmatrix} (sdv\_dist\_m^*distp)^2 & 0 \\ 0 & (sdv\_ang^*distp)^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Como o referencial das medidas deve ser absoluto, é necessário efectuar a rotação da actual orientação do robot. É então necessária uma rotação do referencial, no sentido dos ponteiros do relógio de um ângulo de:

$$\theta_p = \text{tg}^{-1} \left( \frac{y_p - y}{x_p - x} \right) - \theta \quad (14)$$

em que  $(x_p, y_p)$  são as coordenadas conhecidas do marcador e  $(x, y, \theta)$  é o estado do robot. A matriz de mudança de base será então dada por:

$$Rot = \begin{bmatrix} \cos(\theta_p) & \sin(\theta_p) \\ -\sin(\theta_p) & \cos(\theta_p) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sendo a mudança de base da covariância efectuada pela operação [Gelb74], [Welch02]:

$$R(k) = Rot * R' * Rot^T \quad (16)$$

Os valores utilizados nas simulações apresentadas foram  $sdv\_dist\_m = 0,1$  m/m e  $sdv\_ang = 0,06$  rad, valores considerados próximos da realidade. Na inicialização da matrizes de covariância P(k) e Q(k) utilizaram-se matrizes diagonais com iguais valores na diagonal, respectivamente  $10^{-3}$  e  $2*10^{-5}$ . A estimativa da observação utilizada na equação (12) é dada pela equação (8) e onde se adiciona ruído de acordo com o referido anteriormente.

Para testar o funcionamento global do sistema de posicionamento vai-se em primeiro lugar testar a convergência do Filtro de Kalman Extendido numa situação muito simples.

Nas figuras que se seguem a posição do robot e da estimativa são calculadas e mostradas a cada 40 ms. Em todas as situações o robot vê sempre um dos dois marcadores e o marcador em causa troca a cada 2 segundos. A posição real do robot é representada por um quadrado e as estimativas por círculos; o primeiro marcador é uma estrela de 5 pontas e o segundo uma estrela de 6 pontas.

É somado ruído gaussiano a todas as medidas de acordo com as considerações efectuadas anteriormente acerca das covariâncias das observações.

Conforme já foi referido, o desvio padrão do ruído na medida da distância ao marcador de é de 0,1 metro por metro (aumenta o ruído com a distância) e para o ângulo ao poste o desvio padrão é de 0,06 radianos. Estes valores são realistas para os robôs futebolistas "5dpo-2000".

Na figura 2 o robot permanece parado no estado (4, 0, 0) e a simulação parte de uma estimativa de (0, 0, 0). Observe-se como a estimativa converge para a posição real do robot ao longo do tempo. As comutações entre postes são bem visíveis pela quebra da direcção em que a estimativa converge. É fácil confirmar a convergência do estado estimado para o estado real. Na posição (4,0) o robot tem medidas de ângulos grandes para ambos os marcadores e também as distâncias são pequenas. Tal é favorável à obtenção de covariâncias baixas o mesmo é dizer que as medidas obtidas são boas e levam a uma elevada confiança na localização obtida.

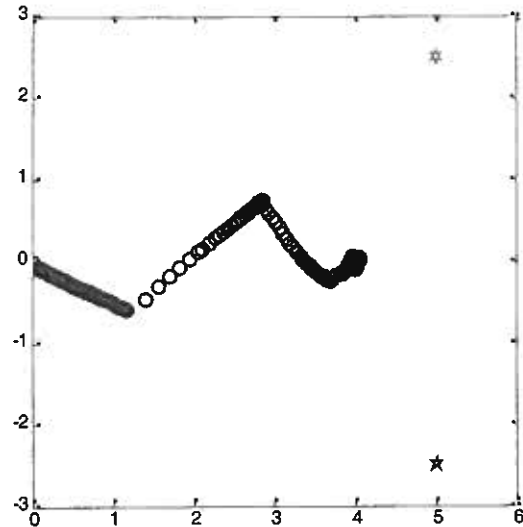


Figura 2 O robot permanece parado e a simulação converge depois de ter partido com uma diferença de 4 metros da situação real

De seguida considere-se a figura 3. Neste caso a estimativa do robot parte de (0,0,0) quando o robot parte de (2,-2,0). O robot move-se com velocidades que seguem distribuições gaussianas -  $N(\text{média}, \text{desvio padrão})$ .

$$v = N(1, 1) \quad [m/s]$$

$$\omega = N(0.5, 0.5) \quad [rad/s]$$

Observe-se como o robot parte de uma diferença entre a estimativa e a realidade de 2 metros e em pouco tempo consegue convergir. Com o passar do tempo o robot começa a afastar-se dos marcadores. Pouco depois o ângulo ao marcador número 1 começa a baixar e é sabido que a qualidade da medida nesta situação não é boa pelo que é compreensível a pequena divergência na estimativa. Pouco depois acontece o mesmo com o marcador 2 à medida que o robot se afasta deste marcador que está a tentar seguir. A convergência melhora quando o robot passa a observar de novo o primeiro marcador, mesmo com a distância elevada.

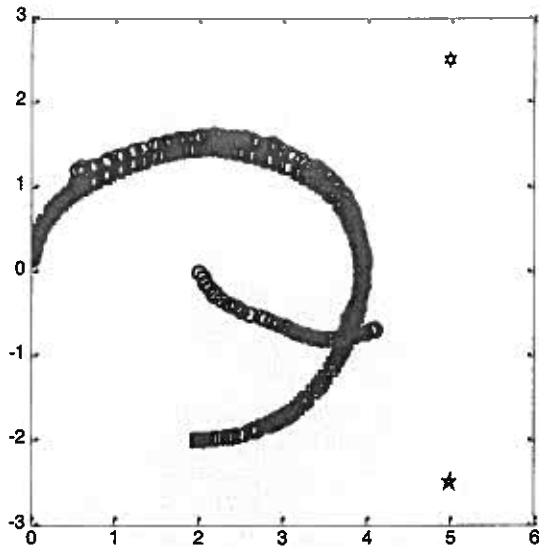


Figura 3 O sistema de localização consegue convergir mesmo com o robot em andamento

Um dos testes mais importantes para um sistema de localização é a sua robustez. É frequente existirem desvios nas medidas de hometria devido a embates e escorregamento mudando imprevisivelmente a posição real ou estimada do robot. Uma tal situação é mostrada na figura 4. Quando o robot passa perto da posição (3,1) existe um evento externo que muda instantaneamente todo o estado do robot (posição e atitude). A medida vai convergindo à medida que os postes vão comutando. A sequência de marcadores observados leva a uma convergência lenta mas que acaba por acontecer.

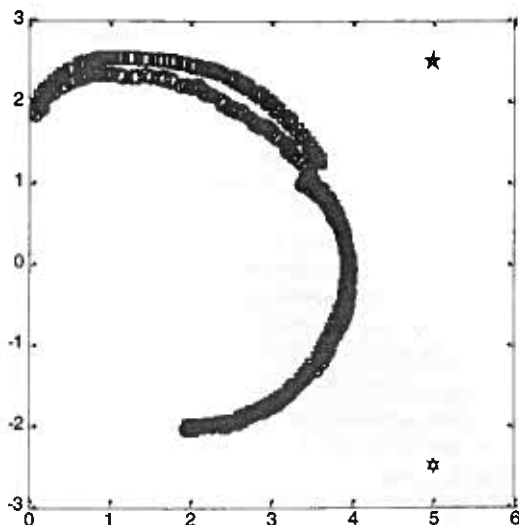


Figura 4 Funcionamento global perante um choque

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Dada a não linearidade do problema em questão, tornou-se necessário o recurso a um Filtro de Kalman Extendido. Não há portanto, à partida, garantias teóricas de optimalidade nem de convergência deste

método. Por isso, procuramos implementar um modelo de simulação que permite, debaixo de condições próximas da realidade verificar o desempenho desta técnica. Entre outros parâmetros que procuramos modelizar realisticamente encontra-se o erro crescente na medida da posição de um poste à medida que a distância entre o robot e o poste aumenta. Esse efeito também foi introduzido na nossa estimativa da covariância da observação para permitir um desempenho mais coerente do filtro. Um factor extremamente importante é a caracterização das covariâncias dos sinais presentes no sistema.

Os resultados da simulação confirmam que esta técnica é válida e promissora para os robôs corrigirem a sua localização. A fusão de dados relativos à hometria do robot móvel e dos marcadores do campo é conseguida existindo convergência mesmo após choques.

O método apresentado não faz uma localização absoluta instantânea mas medidas sucessivas levam a que o estado estimado convirja para o estado real do robot.

As técnicas apresentadas estão a ser implementadas na equipa de futebol robótico "5dpo-2000" de que os autores fazem parte.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Gelb74:** *A. Gelb, J. Kasper, Raymond Nash, Charles Price, Arthur Sutherland*, Applied Optimal Estimation The M. I. T. Press,, 1974
- Arsenio98:** *Artur Arsenio and M. Isabel Ribeiro*, Absolute Localization of Mobile Robots using Natural Landmarks 5th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS'98), Lisbon, September 7-10, 1998,, 1998
- Tsai98:** *Ching-Chih Tsai*, A localization System of a Mobile Robot by Fusing Dead-Reckoning and Ultrasonic Measurements IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Minnesota, USA, 1998,, 1998
- Kiriy02:** *Evgeni Kiriy, Martin Buehler*, Three-state Extended Kalman Filter for Mobile Robot Localization Tech. Report Centre for Intelligent Machines (CIM), McGill University, April 12, 2002,, 2002
- Launay02:** *Fabien Launay, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta*, A Corridors Lights based Navigation System including Path Definition using a Topologically Corrected Map for Indoor Mobile Robots Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3918-3923 (May 2002) ,, 2002
- Launay01:** *Fabien Launay, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta*, Vision-Based Navigation of Mobile Robot using Fluorescent Tubes The 10th International Conference on Advanced Robotics (Aug. 2001),, 2001
- Figueroa94:** *Figueroa, F., Mahajan, A*, A Robust Navigation System for Autonomous Vehicles using Ultrasonics Control Engineering Practice, Vol. 2, No. 1, 1994.,, 1994
- Welch02:** *Greg Welch e Gary Bishop*, An Introduction to the Kalman Filter Technical Report 95-041 - Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, EUA.,, 2002
- Hightower00:** *Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello and Roy Want*, SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength University of Washington CSE Technical Report 2000-02-02,, 2000
- Mota00:** *João Gomes-Mota, Maria Isabel Ribeiro*, Mobile robot localization on reconstructed 3D models Journal of Robotics and Autonomous Systems 31 (1-2) pp. 17-30, Elsevier Science, Abril 2000,, 2000
- Chiang02:** *Kai-Wei Chiang, Aboelmagd Noureldinn Naser El-Sheimy*, Multisensor integration using neuron computing for land-vehicle navigation Springer-Verlag 2003,, 2002
- Girod01:** *L. Girod, D. Estrin*, Robust Range Estimation Using Acoustic and Multimodal Sensing International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001),, 2001
- Drumheller87:** *M. Drumheller*, Mobile Robot Localization Using Sonar IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 9, n.2 ,, 1987
- Ribeiro96:** *Mª Isabel Ribeiro, João G. M. Gonçalves*, Natural Landmark based Localization of Mobile Robots Using Laser Range Data Proceedings EUROBOT 1996,,
- Jensfelt98:** *O. Vijk, P. Jensfelt and H. Christensen*, Triangulation based Fusion of Ultrasonic Sensor Data Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-98), Leuven, Belgium, May 16-20, 1998. IEEE Computer Society, 1998, ISBN 0-7803-4301-8, Volume 4,, 1998
- Wijk00:** *O. Wijk, H.I. Christensen*, Localization and navigation of a mobile robot using natural point landmarks extracted from sonar data Robotics and Autonomous Systems 31 (2000),, 2000
- Jensfelt01:** *Patric Jensfelt*, Approaches to Robot Localization in Indoor Environments Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia,, 2001
- Costa99b:** *Paulo Costa, António Moreira, Armando Sousa, Paulo Marques, Pedro Costa, Anibal Matos*, 5dpo Team Description Robocup 1999 - Robot World Cup Soccer Games and Conference, Stockolm, Sweeden, pp 85-89, 1999,, 1999
- Costa99a:** *Paulo José Costa*, Localização em Tempo Real de Múltiplos Robots num Ambiente Dinâmico Tese Doutoramento, Faculdade de Engª Univ. Porto,, 1999
- Want92:** *R. Want, A. Hopper, V. Falcao, J. Gibbons*, The active badge location system ACM Transactions on Information Systems - vol. 10, no. 1, Jan. 1992,, 1992
- Aguilar02:** *R.N. Aguilar, G.C.M. Meijer*, Low-Cost Ultrasonic Fusion Sensor for Angular Position Proceedings of SeSens 2002, November 29, 2002 - Veldhoven, the Netherlands ,, 2002
- Bartelds02:** *Robert Bartelds*, Real Time Vision Based Self-Localization Technical University of Delft, 4-4-2002,, 2002
- Segvic01:** *Sinisa Segvic e Slobodan Ribaric*, Determining the Absolute Orientation in a Corridor Using Projective Geometry and Active Vision IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 3, june 2001,, 2001
- Toyama95:** *Toyama, K., & Hager, G. D.*, Tracker fusion for robustness in visual feature tracking SPIE Photonics East, Philadelphia, PA, 2589,, 1995

## SISTEMA DE NAVEGAÇÃO E CONTROLO DE UM AGV POR VISÃO ARTIFICIAL

José Luis Lima, Paulo Costa, António Paulo Moreira

*FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

**Resumo:** Os veículos auto-guiados têm apresentado um crescimento elevado no número de aplicações. A visão artificial embebida num AGV, substitui o uso de sensores por vezes caros e permite um controlo eficaz. A aquisição de imagem a cores permite a distinção de diversos marcadores, semáforos ou controladores de tráfego. O veículo segue, em tempo real, um trajecto definido por linhas delimitadoras.

### 1. INTRODUÇÃO

A navegação de um robot móvel é dos sistemas mais importantes que consiste em “guiar” o veículo usando a informação recebida de sensores.

A visão artificial, como sensor, aliada ao controlo de um AGV permite obter um melhor conhecimento odométrico garantindo assim uma maior precisão do veículo e uma maior liberdade de movimento.

Na maior parte das aplicações de veículos autónomos, a localização e a orientação (postura) são critérios importantes e decisivos.

Uma vez “conhecida” a postura do robot, este pode seguir um caminho planeado ou desenhado. Tipicamente, é usado um modelo do mundo através dos sensores que equipam o veículo. Através do modelo e de equações que definem a dinâmica do robot, é possível controlar o movimento deste segundo um trajecto planeado.

A existência de linhas delimitadoras do trajecto a seguir no chão, facilita qualquer alteração pretendida de um possível utilizador.

A constituição do veículo de duas rodas motrizes independentes (Figura 1) permite movimentos lineares ou circulares que fornecem um bom desempenho e um controlo simples.

O uso de uma câmara de CCD a cores permite, em tempo real, a detecção de marcadores coloridos no percurso os quais garantem uma localização absoluta no espaço, o que consequentemente acarreta uma

maior precisão global na localização, e o controlo do percurso dependente de factores externos, como por exemplo semáforos ou seleccionadores luminosos de trajecto.

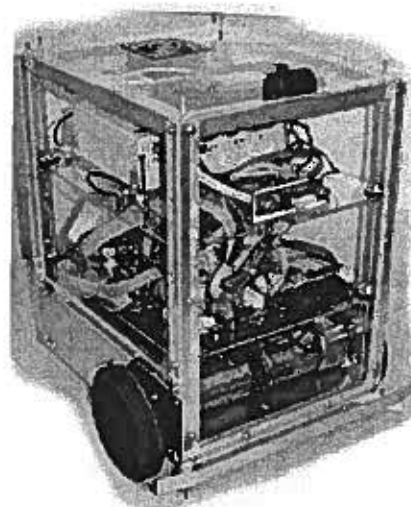


Figura 1

### 2. CONSTITUIÇÃO MECÂNICA

Mecanicamente, o AGV possui duas rodas motrizes localizadas nas partes laterais do robot que permitem um movimento linear ou circular em função da relação de velocidades da roda esquerda e direita. O raio das rodas permite determinar a relação velocidade/ binário actuado. O sistema de accionamento é constituído por dois motores CC com

caixa redutora integrada, que efectua uma tracção directa às rodas. Para o controlo de velocidade de cada roda ( $\omega_R, \omega_L$ ) é usada a modulação de largura de impulso (PWM) distinta para cada roda permitindo um controlo independente entre motores.

A câmara, colocada no topo do veículo, permite conhecer o trajecto a seguir assim como eventuais objectos ou marcadores existentes na pista. A distância desta ao chão e o ângulo deverão ser considerados podendo assim ser estimado o mapeamento pixel-mundo.

### 3. ODOMETRIA

O facto de cada roda possuir um *encoder* capaz de efectuar a leitura da sua velocidade e sentido permite, em tempo real, conhecer o espaço percorrido e a velocidade associadas a cada roda.

Cada *encoder* debita dois sinais (ch1 e ch2) desfasados no tempo com uma frequência proporcional à velocidade angular de cada roda. Os dois sinais desfasados permitem determinar o sentido de rotação da roda como ilustrado na Figura 2.

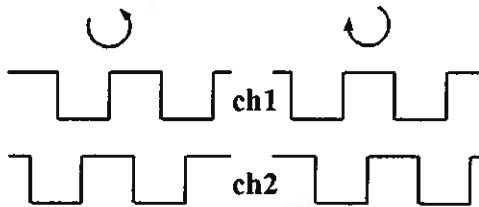


Figura 2

Assim, os *encoders* permitem estimar a velocidade, a posição e o ângulo com que o veículo se desloca.

$$\|\vec{v}\| = \|\tilde{\omega}_R + \tilde{\omega}_L\| \cdot K_1 \quad (1)$$

$$\|\vec{v}_{x[i]}\| = \|\vec{v}\| \cdot \cos(\theta_{[i]}) \quad (2)$$

$$\|\vec{v}_{y[i]}\| = \|\vec{v}\| \cdot \sin(\theta_{[i]}) \quad (3)$$

$$s_{x[t+1]} = s_{x[t]} + K_2 \cdot v_{x[t]} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$s_{y[t+1]} = s_{y[t]} + K_3 \cdot v_{y[t]} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$\theta_{[t+1]} = (\tilde{\omega}_R - \tilde{\omega}_L) \cdot K_4 \cdot \Delta t + \theta_{[t]} \quad (6)$$

A equação (1) indica o módulo da velocidade de deslocação do veículo. As equações (2) e (3) indicam o módulo das velocidades segundo os eixos ortogonais  $x$  e  $y$ . As equações (4) e (5) indicam a posição absoluta do veículo no mesmo sistema de eixos. Finalmente, a equação (6) indica o ângulo que o veículo faz com o eixo  $x$  (Figura 3).

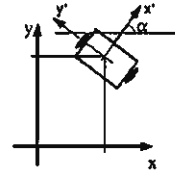


Figura 3

É certo que o deslizamento entre roda e chão poderá ser uma fonte de incerteza embora se possa minimizar usando materiais o mais aderentes possíveis e evitando variações bruscas das velocidades das rodas motrizes.

### 4. DINÂMICA DO SISTEMA

Sob o ponto de vista do controlo do sistema, pretende-se actuar essencialmente duas velocidades ( $\omega_R, \omega_L$ ) que irão garantir movimento ao sistema. De facto, e de um nível mais elevado, o controlo baseia-se em determinar as velocidades de deslocamento  $v$  e de rotação  $\omega$ . Estas velocidades permitem calcular as velocidades de accionamento da roda direita  $\omega_R$  e da roda esquerda  $\omega_L$ , como indicado nas Equações 7 e 8.

$$\omega_R = K_5 \cdot v + K_6 \cdot \omega \quad (7)$$

$$\omega_L = K_5 \cdot v - K_6 \cdot \omega \quad (8)$$

Para cada roda está implementado um controlo em malha fechada, PID (Figura 4).

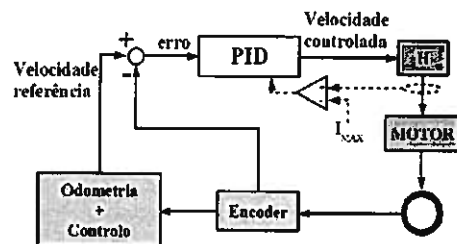


Figura 4

Um sensor de medida da corrente que percorre cada motor está implementado para prevenir correntes elevadas, por exemplo aquando de uma colisão com outros objectos que por lapso não foram detectados. Neste caso, como indica a Figura 4, a alimentação do motor é cortada evitando assim que o motor se danifique ou que a energia, tipicamente limitada, se



esgote rapidamente.

### 5. PROCESSAMENTO DE IMAGEM E CONTROLO DO VEÍCULO

Existem vários métodos de colocar câmaras num robot:

- Câmara fixa num determinada posição
- Câmara motorizada (associada a um motor)
- Múltiplas câmaras
- Câmara fixa e apontada para um ou mais espelhos

O método utilizado, corresponde ao primeiro apresentado e garante, neste caso, os requisitos pretendidos que são seguir uma pista delimitada por linhas. Sendo esta a finalidade, não se torna necessário adquirir imagens de outras zonas senão a parte dianteira do veículo onde decorre a imagem importante.

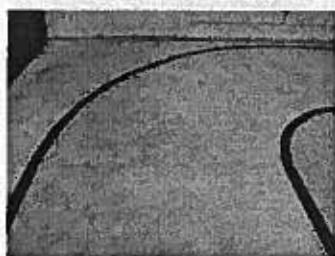


Figura 5

A imagem adquirida (Figura 5) é processada localmente através de um PC a bordo que garante o controlo do sistema em tempo real. A aquisição das imagens é efectuada a 25 frames/s. A cada chegada de uma frame, esta é processada localmente e determinada a velocidade linear e de rotação pretendida remotamente através de uma comunicação wireless, como ilustrado na Figura 6.

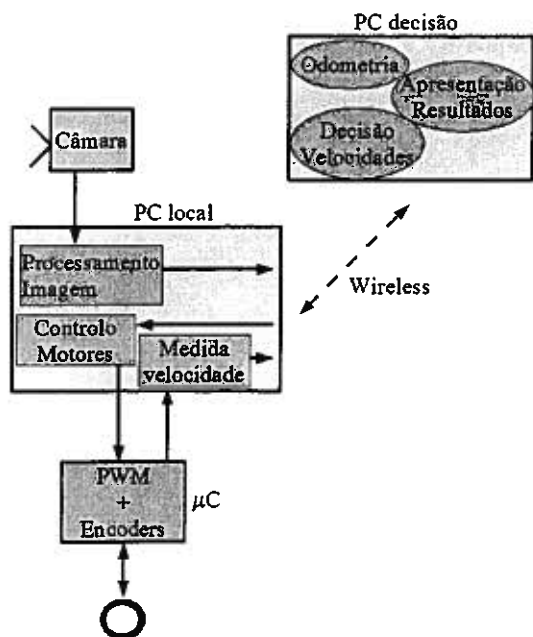


Figura 6

Existem diferentes câmaras que fornecem diversos formatos de imagem. Os mais conhecidos são o formato RGB e o formato YUV. O formato RGB com um resolução de 16 bits de cor foi o adoptado.

Pretende-se portanto, controlar o movimento do veículo de forma a que este siga autonomamente o trajecto desenhado. Assim, o algoritmo desenvolvido varre três linhas horizontais, estrategicamente colocadas, e determina os seis pontos de transição de tons (linha delimitadora da pista) que permitem a localização e controlo do AGV no interior da pista.

As velocidades dos motores direito e esquerdo ( $\omega_r, \omega_l$ ) são determinadas de tal forma que, para cada linha horizontal, o ponto situado a meio das transições coincida com o meio do ecrã.

Na realidade, as linhas horizontais não terão todas peso idêntico. A linha mais afastada do robot será menos importante para o controlo do movimento deste e a linha mais perto será a que possui maior importância, caso contrário o sistema pode apresentar uma certa instabilidade. Poder-se-á afirmar que a linha mais afastada do veículo serve para prever ou estimar a alteração da direcção à qual o robot irá ser sujeito dentro de um curto intervalo de tempo, ou num futuro próximo. No caso de uma linha não detectar a transição da pista, esta é ignorada e apenas são consideradas as outras duas visíveis. Na impossibilidade de se verificarem todas as transições o sistema adapta-se. Por exemplo, no caso de só ser visível uma transição (das seis disponíveis) o sistema tenta manter a distância que existia desse ponto ao centro da imagem, que tem vindo a ser determinado e memorizado. Assim garante-se que o sistema é bem comportado quando um eventual reflexo de luz torne impossível visualizar uma zona da imagem.

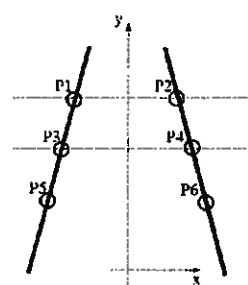


Figura 7

Conhecendo as coordenadas dos pontos 1 a 6 indicados na Figura 7, pode-se escrever a equação (10) que permite determinar a velocidade angular desejada.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= P_{1x} - P_{2x} \\ \omega_2 &= P_{3x} - P_{4x} \\ \omega_3 &= P_{5x} - P_{6x} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\omega = -k_7 \cdot \omega_1 - k_8 \cdot \omega_2 - k_9 \cdot \omega_3 \quad (10)$$

A velocidade de deslocamento linear poderá ser escrita como função da velocidade de rotação, uma vez que em curva o veículo deve-se deslocar mais lentamente do que em linha recta, à semelhança de uma situação real. Assim, a velocidade de deslocamento poderá ser calculada como se indica em (11).

$$v = A - \omega \cdot B \quad (11)$$

No instante em que começa a aparecer uma curva, a linha mais afastada dá o seu contributo e o veículo começa a rodar ligeiramente para o centro da curva de forma a conseguir efectuar a curva com uma velocidade maior. Caso este processo não seja efectuado, a curva não poderá ser descrita com a velocidade pretendida mas mais lenta. Um outro processo, menos eficiente e com aparência mais brusca, é atribuir vários níveis de velocidade linear dependendo da velocidade angular. Ora, este processo apresenta-se como pequenos arranques e travagens do veículo que acarretam desvios na odometria, uma vez que o deslizamento da roda no chão é pior no caso dos referidos "solavancos". Assim torna-se preferível o uso de uma variação da velocidade linear (aceleração) dentro de certos valores que faz parecer um arranque e uma travagem suaves.

Por outro lado, o uso de marcadores coloridos em zonas específicas da pista permitem identificar zonas definidas (posições absolutas) assim como controlar trajectórias através de semáforos colocados na bermagem da trajectória. Os semáforos podem permitir o arranque, paragem ou a decisão da direcção do movimento.

Um sistema de lógica *fuzzy* é usado para classificar a cor de cada pixel fazendo-os corresponder a grupos previamente calibrados para cada cor.

As cores dos marcadores, calibradas no AGV, são posteriormente detectadas aquando da sua passagem. Estes marcadores permitem "actualizar" a posição actual. O mapeamento pixel-mundo torna-se imprescindível, assim como as correcções da degradação da imagem adquirida, como por exemplo a distorção em barril.

Uma vez conhecido o trajecto a seguir, ou pela experiência adquirida pelo robot durante percursos anteriores, ou por coordenadas introduzidas, poderá ser aumentada a velocidade. Este facto é conseguido se o trajecto for aproximado a equações de rectas e curvas, que devidamente parametrizadas conferem ao robot uma dinâmica muito melhor, eficiente, mais rápida e imune ao ruído.

## 6. CONCLUSÕES

A navegação automática do veículo foi bem sucedida efectuando um correcto seguimento do trajecto. Para velocidades elevadas, o veículo perde o controlo, embora a sua postura continue a ser conhecida, podendo ser útil para um novo controlo. O facto de a velocidades elevadas o sistema perder o controlo deve-se ao sistema de processamento não possuir poder de cálculo suficiente. Mas, e na realidade, a velocidade de deslocamento, superior a 0.5m/s, é bastante satisfatória e supera o idealizado. O controlo por cor (semáforos), nomeadamente decisão de trajecto a seguir, arranque e paragem foram verificados com sucesso. Alguns pedaços da delimitação da pista foram apagados para verificar o comportamento do sistema aquando da detecção apenas de alguns pontos. O teste ao comportamento foi muito bem sucedido, e nos casos de serem escondidos todos os pontos, o veículo mantém, por breves instantes, o movimento que possuía, vindo a parar mais tarde por motivos de segurança.

## BIBLIOGRAFIA

*Paulo José Cerqueira Gomes da Costa*, "Localização em Tempo Real de Múltiplos Robots num Ambiente Dinâmico", Tese Doutoramento, FEUP, 1999.

*Carlos Machado, Sérgio Sampaio, Fernando Ribeiro*, "Image Processing Applied to a Robotic Football Team".

*Paulo Costa, Armando Sousa, Paulo Marques, Pedro Costa, Susana Gaio, António Moreira*, "5dpo Robotic Soccer Team for Year 2003".

*Carlos F. Marques, Pedro Lima*, "A Localization Method for a Soccer Robot Using a Vision-Based Omni-Directional Sensor".

*Estela Bicho, Luís Louro, Nzaji Hipólito, Sérgio Monteiro, Wolfram Erlhagen*, "Motion control of a mobile robot transporting a large size object in cooperation with a human: a nonlinear dynamical systems approach".

*Carlos Machado, Fernando Campos, Manuel Martins, Sérgio Sampaio, Fernando Ribeiro*, "Mechanics and Electronics os the Footballer Autonomous Mobile Robot".

*Pedro Lima, Andrea Bonarini, Carlos Machado, Fabio Marchese, Carlos Marques, Fernando Ribeiro, Domenico Sorrenti*, "Omni-Directional Catadioptric Vision for Soccer Robots".

*Fernando Ribeiro, Paulo Braga, Jorge Monteiro, Ivo Moutinho, Pedro Silva, Vitor Silva*, "New improvements of MINHO Team for RoboCup Middle size League in 2003".