
UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO PARA UM ROBÔ MÓVEL BASEADO EM ODOMETRIA E MARCOS NATURAIS

Clauber Gomes Bezerra*
clauber@dca.ufrn.br

Pablo Javier Alsina*
pablo@dca.ufrn.br

Adelardo Adelino dantas de Medeiros*
adelardo@dca.ufrn.br

*Departamento de Engenharia de Computação e Automação - DCA
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Natal, RN, Brasil

ABSTRACT

This paper presents a hybrid localization system for wheeled mobile robots. The system is based on odometry and natural landmark. The landmarks are a grid of straight line in the environment's floor. The Hough transform is utilized to detect this particular kind of landmark from digital images. Some heuristics are associated to this transform due to real time constraints. In order to reduce the landmark finding time, a mapping between odometry errors and their correspondent image region is done. Thus, the Hough transform is applied to this bounded region, reducing the processing time.

KEYWORDS: mobile robot, localization, odometry, natural landmark, Hough transform.

RESUMO

Este artigo apresenta um sistema híbrido de localização, para um robô móvel com rodas em ambientes interiores, baseado em odometria e reconhecimento de marcos naturais. Os marcos adotados são linhas retas, formando uma grade bi-dimensional, definidas pelo piso do ambiente onde o robô irá navegar. Para a detecção deste tipo de marco, a partir de imagens digitais, é utilizada a transformada de Hough, associada a heurísticas que permitem a sua aplicação em tempo real. Em particular, para reduzir o tempo de busca dos marcos, propomos mapear erros de odometria em uma região da imagem capturada que possua grande probabilidade de conter o marco procurado.

PALAVRAS-CHAVE: robô móvel, localização, odometria, marcos naturais, transformada de Hough.

1 INTRODUÇÃO

A navegação, um dos principais problemas da robótica móvel, pode ser descrita como o processo utilizado pelo robô, para mover-se em seu ambiente de trabalho, geralmente povoado de obstáculos, de uma posição e orientação iniciais para uma posição e orientação finais. Neste processo, o robô deve percorrer um caminho realizável pelo mesmo, obedecendo as suas restrições cinemáticas e quando necessário desviando de obstáculos. Durante esse trajeto, o robô deve ser capaz de identificar constantemente sua localização (posição e orientação) dentro do ambiente, o que é feito através do uso de sensores que coletam informações a respeito do ambiente.

Os métodos de localização de robôs móveis podem ser classificados em duas grandes categorias: métodos de localização relativa e métodos de localização absoluta (Borenstein, Everett and Feng, 1996; Borenstein, Everett, Feng and Wehe, 1996). Os métodos de localização relativa utilizam as localizações obtidas em instantes anteriores para estimar a localização atual do robô, como a odometria por exemplo. Porém, a odometria pode gerar erros que se propagam cumulativamente com o tempo (Valgas, 2002), o que torna este método ineficiente quando utilizado isoladamente.

Já os métodos de localização absoluta, utilizam apenas as informações atuais dos sensores para determinar a localização do robô em relação a um referencial fixo absoluto. Uma localização absoluta pode ser obtida através do reconhecimento de marcos no ambiente, que apesar de não gerar erros cumulativos, pode necessitar de um tempo de processamento bem maior do que o uso de odometria.

Vários são os trabalhos existentes na literatura envolvendo a localização de robôs móveis (Lages, 1998; Se et al., 2001; Clerentin et al., 2002; Lora et al., 1997; Lora et al., 1998). A maioria deles utiliza um método de localização relativa,

geralmente odometria, em conjunto com um método de localização absoluta, para corrigir periodicamente a posição relativa do robô. Nos trabalhos que utilizam odometria, poucos são os que se preocupam em analisar como se propaga o erro a medida que o robô se desloca no ambiente (Mächler, 1998; Valgas, 2002; Kelly, 2000; Kelly, 2001).

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um sistema de localização, para um robô móvel com rodas em ambientes interiores. O sistema é baseado em odometria e na detecção de marcos naturais no ambiente. A partir da odometria, obtém-se uma localização aproximada do robô em determinado instante e periodicamente, a partir de imagens capturadas por uma câmera digital, são detectados marcos no ambiente para obter uma localização absoluta do robô, corrigindo o erro de odometria.

Os marcos são detectados através da transformada de Hough para retas, utilizada devido as características dos marcos escolhidos, que são linhas retas definidas pelas bordas do piso do ambiente no qual o robô deverá navegar. Para acelerar o tempo de processamento das imagens é utilizada a informação de odometria, através de um mapeamento do erro estimado deste método em uma região de busca do marco na imagem.

2 ODOMETRIA

O método de odometria utiliza sensores, *encoders* óticos por exemplo, que medem a rotação das rodas do robô e a partir do modelo cinemático deste calcula a sua posição e orientação, através da integração dos movimentos do robô a partir de um referencial fixo. Em uma plataforma com acionamento diferencial, utilizada neste trabalho, as medidas de odometria são feitas utilizando dois *encoders* incrementais, cada um deles acoplado a um dos motores. A partir desses *encoders* é possível medir as rotações da roda correspondente, permitindo assim determinar a localização do robô. As variáveis cinemáticas de uma plataforma robótica com acionamento diferencial são ilustradas na figura 1, de acordo com a seguinte nomenclatura:

- b é o comprimento do eixo do robô;
- r_e e r_d são os raios das rodas esquerda e direita do robô, respectivamente;
- ω_e e ω_d são as velocidades angulares das rodas esquerda e direita do robô, respectivamente;
- v_e e v_d são as velocidades lineares das rodas esquerda e direita do robô, respectivamente;
- v é a velocidade linear do robô;
- ω é a velocidade angular do robô.

Aproximando o movimento executado pelo robô por um arco de circunferência, como mostrado na figura 2, onde r é o seu raio de giro, teremos que as suas velocidades linear e angular serão:

$$v = \frac{v_d + v_e}{2} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_e}{b} \quad (2)$$

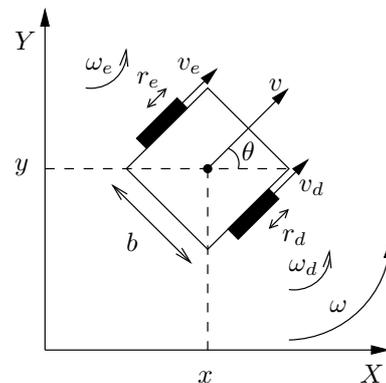


Figura 1: Modelo cinemático do robô.

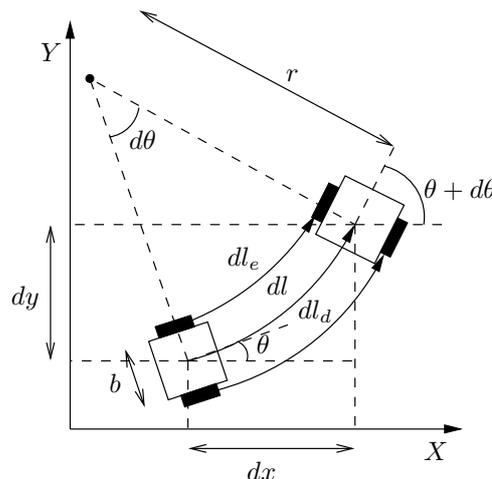


Figura 2: Movimento infinitesimal do robô.

Considerando que o movimento mostrado na figura 2 é executado em um intervalo de tempo infinitesimal dt , podemos decompor aproximadamente o deslocamento linear do robô, dl nas suas componentes horizontal (dx) e vertical (dy). Essas componentes e o deslocamento angular $d\theta$ do robô, serão:

$$\begin{aligned} dx &= dl \cos \theta = v dt \cos \theta \\ dy &= dl \sin \theta = v dt \sin \theta \\ d\theta &= \omega dt \end{aligned}$$

Discretizando essas três equações, teremos:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v \Delta t \cos \theta(t) \quad (3)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v \Delta t \sin \theta(t) \quad (4)$$

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \omega \Delta t \quad (5)$$

Considerando N_d e N_e o número de pulsos lidos nos *encoders* direito e esquerdo respectivamente e N_{res} a resolução dos *encoders*, que indica o número de pulsos em um giro da roda, o deslocamento de cada roda do robô será:

$$\Delta l_d = \frac{N_d}{N_{res}} 2\pi r_d \quad \Delta l_e = \frac{N_e}{N_{res}} 2\pi r_e$$

Utilizando essas equações, teremos que as velocidades lineares de cada roda serão:

$$v_d = \frac{N_d}{N_{res}} \frac{2\pi r_d}{\Delta t} \quad (6)$$

$$v_e = \frac{N_e}{N_{res}} \frac{2\pi r_e}{\Delta t} \quad (7)$$

Substituindo agora, as equações 6 e 7 nas equações 3, 4 e 5, utilizando as equações 1 e 2, podemos obter a localização do robô em relação a um referencial inicial, acumulando-se as distâncias percorridas pelo mesmo e as variações de orientação a cada instante de tempo, de acordo com as equações:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{\pi(N_d r_d + N_e r_e)}{N_{res}} \cos \theta(t) \quad (8)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\pi(N_d r_d + N_e r_e)}{N_{res}} \text{sen} \theta(t) \quad (9)$$

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \frac{2\pi(N_d r_d - N_e r_e)}{b N_{res}} \quad (10)$$

3 ERROS DE ODOMETRIA

A odometria está sujeita a erros, que fazem com que a localização obtida seja apenas uma estimativa da localização exata do robô em um dado instante. Como esta técnica determina a localização atual do robô, com base no acúmulo das informações obtidas em instantes interiores, um erro em determinado instante compromete as medições dos instantes seguintes. Esse problema poderia ser contornado caso a média dos erros fosse zero, assim a integração ajudaria a reduzir o erro. No entanto, esses erros são polarizados, ou seja, possuem média diferente de zero. Os erros de odometria podem ser classificados como erros sistemáticos e erros não-sistemáticos (Valgas, 2002; Borenstein, Everett and Feng, 1996).

Os erros sistemáticos são aqueles causados por imperfeições no modelo cinemático do robô, tais como uma medida incorreta dos raios das rodas do robô ou do comprimento do seu eixo. Esse tipo de erro, ocorre durante toda a navegação do robô e se acumula constantemente, gerando grandes distorções na determinação da sua localização. Já os erros não-sistemáticos são imprevisíveis, causados por situações que surgem inesperadamente, como por exemplo terrenos irregulares, objetos inesperados no chão, escorregamento das rodas, etc.

Devido aos erros de odometria, a localização do robô calculada a partir dos *encoders* possui um possível erro associado, que aumenta juntamente com a distância percorrida pelo robô. Para corrigir esse erro, é comum a utilização de um método de localização absoluta, em conjunto com a odometria, de forma a zerar periodicamente os erros de odometria acumulados. um exemplo de método de localização absoluta, é a utilização de marcos visuais no ambiente, que será discutida na próxima seção.

4 LOCALIZAÇÃO BASEADA EM MARCOS

Marcos são características distinguíveis, que um robô pode reconhecer em seu ambiente a partir dos dados coletados

por seus sensores. Geralmente os marcos estão em posições fixas e conhecidas em relação ao referencial do ambiente. As informações dos sensores são utilizadas para reconhecer os marcos e determinar as suas posições com relação ao referencial do robô. Conhecendo a posição dos marcos com relação ao referencial do ambiente e com relação ao referencial do robô, é possível determinar a posição do robô com relação ao referencial do ambiente.

Os marcos podem ser artificiais, quando introduzidos no ambiente com a finalidade de auxiliar na navegação do robô ou naturais, quando já se encontravam no ambiente antes do surgimento do problema de navegação. Neste trabalho, utilizaremos como marcos naturais um conjunto de linhas retas, formadas pelas arestas do piso do ambiente onde o robô irá navegar. Adotando o referencial do ambiente $\{w\}$, mostrado na figura 3, onde os marcos são paralelos aos eixos X e Y e se situam no plano $z = 0$. Os pontos destas retas podem ser representados da seguinte forma:

$$\text{Retas horizontais: } (x, y, z) = (x, k_x, 0) \quad (11)$$

$$\text{Retas verticais: } (x, y, z) = (k_y, y, 0) \quad (12)$$

onde k_x e k_y são valores constantes, que identificam cada reta.

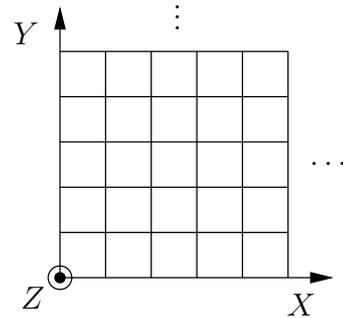


Figura 3: Grade formada pelo piso do ambiente.

Para identificar esses marcos, é utilizada uma câmera digital embarcada no robô, que fornece imagens em escala de cinza do ambiente. Como esse tipo de sensor fornece uma grande quantidade de informação a respeito do ambiente, é necessário saber aproximadamente a localização atual do robô, o que é obtido através da odometria, para que apenas uma região da imagem onde provavelmente se encontra o marco seja analisada, possibilitando desta forma reduzir o tempo de processamento do método.

O referencial da câmera $\{c\}$, possui o eixo z_c alinhado com o eixo óptico, formando um ângulo α com o plano do chão, já o eixo x_c é paralelo ao mesmo plano, figura 4. Considerando ainda que $\{c\}$ está posicionado a uma altura h , fixa com relação ao plano do chão e que sua localização em relação a $\{w\}$ é dada por (d_x, d_y, θ) , podemos escrever as coordenadas do sistema da câmera em função das coordenadas do referencial do ambiente $\{w\}$ como sendo:

$$X_c = T X_w \quad (13)$$

onde:

5 A TRANSFORMADA DE HOUGH

$$\begin{aligned}
 X_c &= [x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T \\
 X_w &= [x \ y \ z \ 1]^T \\
 T &= \begin{bmatrix} -s_\theta & c_\theta & 0 \\ c_\theta s_\alpha & s_\theta s_\alpha & c_\alpha \\ c_\theta c_\alpha & s_\theta c_\alpha & -s_\alpha \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &\quad \left. \begin{aligned} &(s_\theta d_x - c_\theta d_y) \\ &(-c_\theta s_\alpha d_x - s_\theta s_\alpha d_y - c_\alpha h) \\ &(-c_\theta c_\alpha d_x - s_\theta c_\alpha d_y + s_\alpha h) \\ &1 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned}$$

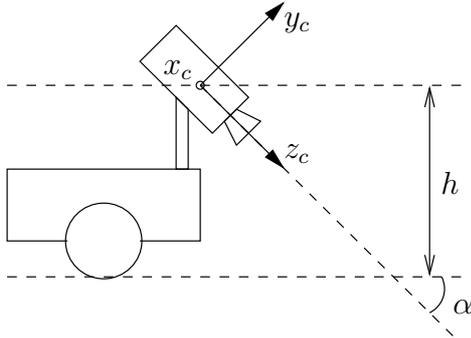


Figura 4: Referencial da câmera no robô.

Para determinar a localização do robô, é detectado um marco na imagem constituído por duas retas perpendiculares, uma vertical e outra horizontal. Sabendo que a projeção de um ponto em $\{c\}$ na imagem é dado pelas equações (Gonzalez and Woods, 2000; Jain, 1989):

$$x_i = \frac{\lambda}{z_c} x_c \quad ; \quad y_i = \frac{\lambda}{z_c} y_c$$

onde λ é a distância focal da câmera e (x_i, y_i) é um ponto da imagem. Podemos deduzir, utilizando a equação 13, que as retas 11 e 12 podem ser representadas respectivamente na imagem como:

$$\begin{aligned}
 y_i &= a_1 x_i + b_1 \\
 y_i &= a_2 x_i + b_2
 \end{aligned}$$

onde:

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= \frac{-c_\theta h}{(c_\alpha k_x - c_\alpha d_y + s_\theta s_\alpha h)} \\ b_1 &= \frac{\lambda(s_\alpha k_x - s_\alpha d_y - s_\theta c_\alpha h)}{(c_\alpha k_x - c_\alpha d_y + s_\theta s_\alpha h)} \\ a_2 &= \frac{-s_\theta h}{(-c_\alpha k_y + c_\alpha d_x - c_\theta s_\alpha h)} \\ b_2 &= \frac{\lambda(-s_\alpha k_y + s_\alpha d_x + c_\theta c_\alpha h)}{(-c_\alpha k_y + c_\alpha d_x - c_\theta s_\alpha h)} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Conhecendo-se os valores de a_1 , b_1 , a_2 e b_2 , pode-se determinar a localização de $\{c\}$ com relação a $\{w\}$ resolvendo esse sistema de equações em função de d_x , d_y e θ .

Devido as suas características, o método escolhido para identificar os marcos no ambiente é a transformada de Hough (Duda and Hart, 1972). Esta transformada, é um método utilizado para detectar em uma imagem digital, uma classe de formas geométricas conhecida e que pode ser representada como uma curva paramétrica. No caso de retas, é feito um mapeamento entre o espaço cartesiano (X, Y) e o espaço de parâmetros (ρ, ϕ) em que a reta é definida.

Em uma imagem digital, a transformada de Hough é utilizada após um pré-processamento da mesma, limitando o número de *pixels* processados. No sistema proposto é feita uma binarização, de forma que são processados apenas os *pixels* cujo nível de cinza se encontra abaixo de um limiar.

A transformada de Hough utiliza a representação normal de uma reta, que proporciona um espaço de parâmetros finito e com seus limites conhecidos, ao contrário da representação tradicional de uma reta¹. A representação normal é dada pela equação:

$$\rho = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (15)$$

Os parâmetros ρ e ϕ representam respectivamente, o comprimento do vetor, que passa pela origem, normal a reta e o ângulo formado entre esse vetor e o eixo X , conforme mostra a figura 5.

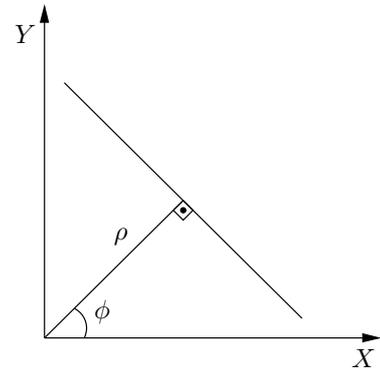


Figura 5: Representação normal de uma reta.

Cada reta no plano cartesiano pode ser representada por um único ponto no plano de parâmetros, correspondente aos parâmetros dessa reta. A transformada de Hough consiste em calcular, para cada ponto analisado, os parâmetros de todas as possíveis retas que passam por ele. Com isso, para cada um desses pontos, o conjunto de todos os pares de parâmetros calculados formará uma senóide no plano de parâmetros, de acordo com a equação 15. Repetindo esse processo para todos os demais pontos do plano cartesiano, obteremos várias senóides no plano de parâmetros (uma para cada ponto do plano cartesiano). A interseção dessas senóides, indicará uma co-linearidade entre pontos no plano cartesiano, sendo que o ponto de interseção corresponderá aos parâmetros ρ e ϕ da reta que passa por esses pontos co-lineares.

Para exemplificar o método de Hough, considere o conjunto

$$^1 y = ax + b$$

de pontos mostrado na figura 6(a). Para um ponto A , o conjunto dos parâmetros calculados formam uma senóide no plano de parâmetros, da mesma forma ocorre para os pontos B, C, D, E e F , como pode ser visto na figura 6(b). As senóides formadas se intersectam em vários pontos, indicando uma co-linearidade entre pontos do plano cartesiano. A identificação da reta consiste em determinar o ponto do espaço de parâmetros que possui o maior número de intersecções, nesse exemplo o ponto p , que corresponde aos parâmetros da reta mais visível na imagem (formada pelos pontos A, B, C e D).

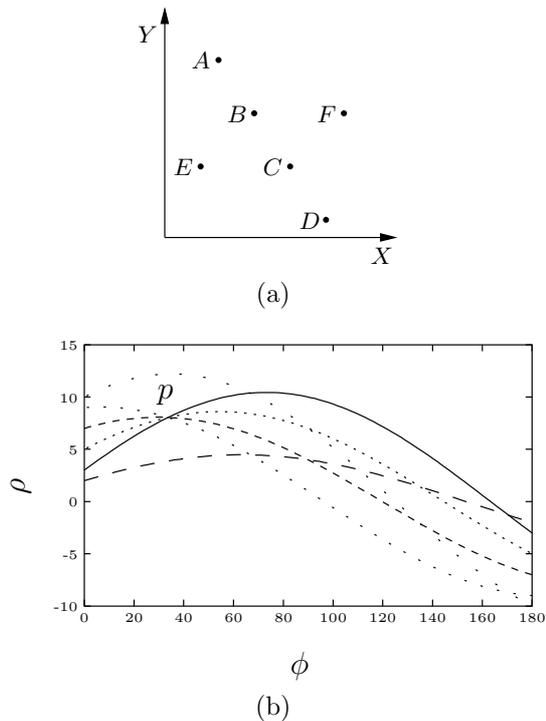


Figura 6: Exemplo de detecção de uma reta. (a) pontos no plano cartesiano e (b) Intersecção das senóides calculadas no plano de parâmetros.

Em termos computacionais, o espaço de parâmetros é quantizado na forma de uma matriz acumuladora, cujo elemento de maior valor corresponde aos parâmetros da reta que possui o maior número de *pixels* alinhados na imagem. Dessa forma, para cada *pixel* processado da imagem, percorre-se todos os ângulos ϕ da matriz e calcula-se o valor correspondente de ρ através da equação 15, incrementando-se o elemento correspondente da matriz. Após o processamento de toda a imagem, procura-se pelo elemento da matriz com o maior valor, que representa a reta mais visível na imagem.

Na figura 7 é mostrado o resultado da aplicação da transformada de Hough pelo sistema de localização em uma imagem. Como pode ser visto, para determinar a localização do robô são detectadas duas retas perpendiculares, o que implica na busca de dois máximos na matriz acumuladora. O tempo total de processamento da imagem foi de $460ms$, o qual é muito alto para a aplicação. Daí surge a necessidade de incorporar ao sistema informação adicional, baseada em um conjunto de heurísticas que associadas a transformada de Hough possibilitará uma detecção mais rápida dos marc.

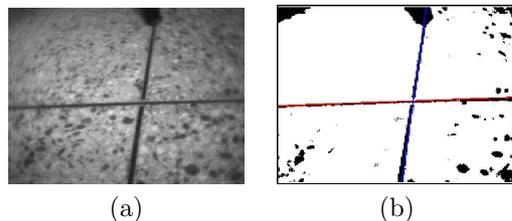


Figura 7: Comparação entre (a) a imagem original adquirida e (b) a imagem com o resultado da identificação das retas.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Para a implementação do sistema, foi utilizada uma plataforma robótica com acionamento diferencial, construída utilizando um kit da linha Lego Mindstorms (Min, 2002), conforme pode ser visto na figura 8. O robô é equipado com dois sensores de rotação, cada um deles acoplado a um dos motores, medindo as rotações dos mesmos. O cálculo da localização atual do robô foi realizado em um PC, utilizando as equações 8, 9 e 10. Para realizar esse cálculo, foi utilizado um protocolo de comunicação entre o PC e o robô via infra vermelho, o qual permite a leitura do estado dos sensores de rotação. A tabela 1 mostra os parâmetros do modelo de odometria da plataforma utilizada.

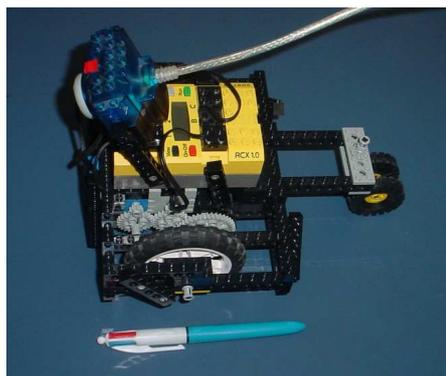


Figura 8: Robô utilizado no experimento.

b	r_e	r_d	N_{res}
135mm	40,8mm	40,8mm	16x3x5x3

Tabela 1: Parâmetros do robô.

Além disso, o robô é equipado com uma câmera digital, que capta periodicamente imagens do ambiente para a detecção dos marc e correção da localização atual do robô, através da transformada de Hough. Para verificar a necessidade de correção do erro de odometria, a plataforma utilizada foi submetida a uma mesma trajetória retilínea repetidas vezes. Utilizando a média dos valores obtidos, pode-se verificar a evolução temporal do erro linear da posição (x, y) do robô obtida pela odometria, que é mostrado na figura 9. Esse erro foi calculado utilizando a localização real do robô, obtida através de um sistema de visão global.

Como pode ser visto, de acordo com a evolução temporal do erro, justifica-se a utilização do método proposto para a localização absoluta baseada em marc naturais. Para verificar a eficácia do método, uma localização abso-

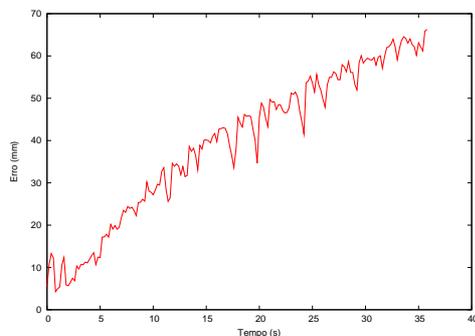


Figura 9: Erro de posição do robô ao percorrer uma trajetória retilínea.

luta estimada para o robô foi determinada, utilizando uma imagem de um marco capturada a partir de uma localização conhecida do robô $(x, y, \theta) = (80\text{cm}, 75\text{cm}, 45^\circ)$. Os parâmetros para as retas nas imagens foram obtidos, a partir dos quais a localização absoluta estimada foi calculada: $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\theta}) = (80.6, 74.3, 45.3^\circ)$. Como podemos observar, obtemos um erro de posição de 0.81cm e de orientação de 0.3° , o que justifica a correção dos erros de odometria mostrados na figura 9, através do método proposto.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema capaz de corrigir erros de odometria em um robô móvel, a partir da detecção de marcos naturais em ambientes interiores. A transformação de Hough se mostrou suficientemente robusta para a detecção das retas que compõem os marcos. Os resultados experimentais mostraram que a posição absoluta estimada a partir dos marcos apresenta um erro da ordem de 0.81cm, o que demonstra a viabilidade do método proposto para a correção dos erros de odometria. Correntemente estão sendo implementadas técnicas baseadas em heurísticas para acelerar o processamento das imagens dos marcos, nas quais os erros de odometria são mapeados numa região de interesse da imagem onde está localizado o marco. Além disso, é proposto também a utilização de uma abordagem probabilística, onde apenas uma porcentagem dos *pixels*, escolhidos aleatoriamente, dessa região de interesse são processados, o que permite reduzir o conjunto de pontos sobre os quais opera a transformada de Hough

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da CAPES.

REFERÊNCIAS

- Borenstein, J., Everett, H. R. and Feng, L. (1996). “where am i?” sensors and methods for mobile robot positioning, University of Michigan.
- Borenstein, J., Everett, H. R., Feng, L. and Wehe, D. (1996). Mobile robot positioning: Sensors and techniques, *journal of Robotic Systems* **4**(14): 231–249.
- Clerentin, A., Delahoche, L., eric Brassart and Cauchois, C. (2002). Mobile robot localization based on multi

target tracking, *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 13–18.

- Duda, R. and Hart, P. (1972). Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures, *Communications of the ACM* **15**(1): 11–15.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. E. (2000). *Processamento de Imagens Digitais*, Editora Edgar Blücher.
- Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall.
- Kelly, A. (2000). Some useful results for the propagation of error in vehicle odometry. Technical Report CMU-RU-TR-00-20.
- Kelly, A. (2001). Linearized systematic error propagation in vehicle odometry, *International Conference on Intelligent Robotics and Systems*.
- Lages, W. F. (1998). *Controle e estimação de Posição e Orientação de Robôs Móveis*, PhD thesis, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Lora, F. A. S., Hemerly, E. M. and Lages, W. F. (1997). Estimação em tempo real de posição e orientação de robôs móveis utilizando sensores com diferentes taxas de amostragem, *Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 453–458.
- Lora, F. A. S., Hemerly, E. M. and Lages, W. F. (1998). Sistema para navegação e guiagem de robôs móveis autônomos, *SBA Controle & Automação*, Vol. 9, pp. 107–118.
- Mächler, P. (1998). *Robot Positioning by Supervised and Unsupervised Odometry Correction*, PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Min (2002). LEGO Mindstorms. Available at <http://mindstorms.lego.com>.
- Se, S., Lowe, D. and Little, J. (2001). Local and global localization for mobile robots using visual landmarks, *International Conference on Intelligent Robotics and Systems*.
- Valgas, J. H. (2002). *Uma metodologia de correção dinâmica de erros de odometria em robôs móveis*, Master’s thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.