

NAVEGAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS COM DESVIO DE OBSTÁCULOS: IMPLEMENTAÇÃO DE DESVIO TANGENCIAL MODIFICADO

ALEXANDRE S. BRANDÃO*, MARIO SARCELINI FILHO*, TEODIANO F. BASTOS FILHO*

*UFES - Universidade Federal do Espírito Santo
DEL - Departamento de Engenharia Elétrica
Vitória, Espírito Santo, Brasil

Emails: {abrandao, mario.sarcinelli, tfbastos}@ele.ufes.br

Abstract— This work presents a switching controller for position and orientation embedded in an obstacle avoidance algorithm based on tangential escape. The algorithm proposed presents modifications to provide more safety to the robot during its navigation, such as the possibility to circumvent obstacles that are impossible to be circumvented when using the conventional algorithm. A laser scanner was used to get local maps of the environment the robot is navigating in, during the execution of the required task.

Keywords— Mobile Robots, Laser scanner, Tangential escape, Obstacles avoidance

Resumo— Este trabalho apresenta um controlador chaveado de posição e orientação final incorporado a um algoritmo de evasão de obstáculos baseado no desvio tangencial. Contudo, o algoritmo proposto apresenta modificações que fornecem maior segurança ao robô móvel durante sua navegação e a possibilidade de transpor obstáculos intransponíveis quando usando o algoritmo de desvio tangencial convencional. Foi utilizado um sensor de varredura laser para mapear o ambiente de navegação durante a execução da tarefa.

Palavras-chave— Robôs móveis, Sensor laser, Desvio tangencial, Desvio de obstáculos

1 Introdução

Por definição, robô móvel é uma máquina automática capaz de se mover em ambientes sem a necessidade de intervenção humana. Provido de sensores e atuadores, ele se torna apto a interagir com o ambiente em que é posto a navegar. Dotado, freqüentemente, de um grau de inteligência previamente programado e um sistema de controle de movimentos, ele executa atividades também programadas em busca de um objetivo específico.

O ambiente no qual o robô navega é normalmente classificado como estruturado ou semi-estruturado. No primeiro caso, o ambiente é bem conhecido e o movimento do robô pode ser previamente planejado. No outro caso, não se tem o conhecimento completo do ambiente de navegação, sendo necessário incorporar estratégias para transpor possíveis obstáculos (Patiño y Carelli, 2004).

Durante a construção de um robô móvel tentamos nos espelhar nas características intrínsecas do ser humano, o qual é capaz de navegar em ambientes em busca de um objetivo, desviando de obstáculos e consumindo o mínimo de energia. No entanto, existe um enorme desafio em fazer com que a máquina em desenvolvimento navegue com segurança até um alvo, realizando tarefas de reconhecimento do ambiente onde está trafegando, aprendendo situações anteriormente vivenciadas e, quando necessário, cooperando com outros robôs para realização da tarefa proposta.

Quanto a sua forma de raciocínio, um robô móvel pode ser do tipo deliberativo ou reativo. Um robô dotado de um raciocínio deliberativo deve primeiramente obter as informações de seus sensores para construir o mais fielmente possível

o mapa do mundo em que irá navegar. Por sua vez, um robô dotado de um raciocínio reativo não requer informações prévias do mundo em que está prestes a navegar, impossibilitando a construção de um mundo virtual, e, portanto, o planejamento prévio das ações.

Este trabalho envolve o desenvolvimento de um controlador chaveado de posição e orientação agregado a um algoritmo de evasão de obstáculos baseado na técnica de desvio tangencial (Ferreira, 2004; Pereira, 2006). O controlador proposto foi utilizado para navegação de robôs móveis em ambientes semi-estruturados e utilizou-se um sensor de varredura laser para mapear estes ambientes.

2 Modelo Cinemático do Robô Móvel

Neste trabalho foi utilizado um robô móvel a rodas tipo unicycle, cujo modelo cinemático é dado por

$$\{ \dot{x} = \nu \cos \varphi, \quad \dot{y} = \nu \sin \varphi, \quad \dot{\varphi} = \omega \}, \quad (1)$$

onde x e y são as coordenadas do ponto localizado no centro do eixo que une as rodas do robô móvel e φ é a orientação do veículo em relação à coordenada x . As ações de controle ν e ω representam, respectivamente, as velocidades linear e angular do robô.

3 Controlador de Posição e de Orientação

O objetivo a ser atingido por um robô móvel quando ele é posto a navegar pode ser, por exemplo, mapear um espaço de trabalho, atingir uma

posição alvo, orientar-se em relação a um objeto no ambiente, dentre outros.

Em se tratando de tarefas de determinação de posturas, o robô móvel deve atingir uma posição no espaço com uma orientação predeterminada.

3.1 Controlador de Posição

O controlador desenvolvido nesta subsecção é denominado controlador de posição, pois o robô móvel deve partir de uma posição inicial (origem), navegar até um ponto alvo (destino) e lá permanecer estático. Isto quer dizer que os erros de posição

$$\begin{cases} \tilde{x} = x_d - x \\ \tilde{y} = y_d - y \end{cases}, \quad (2)$$

devem tender a zero com o tempo, onde x_d e y_d são as coordenadas do ponto alvo.

A Fig. 1 ilustra a situação do controle de posição, apresentando as variáveis ρ e θ , que são, respectivamente, o erro de posição e de orientação do robô em relação ao alvo. Estas variáveis são definidas como

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2} \\ \theta = \arctan \frac{\tilde{y}}{\tilde{x}} \end{cases}. \quad (3)$$

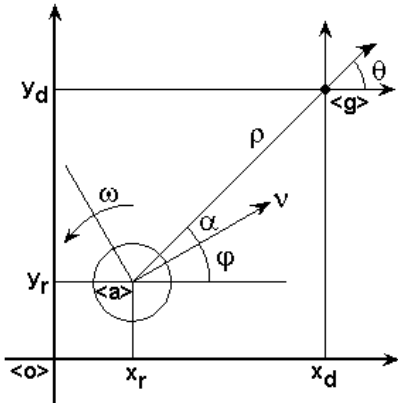


Figura 1: Sistema de coordenadas para controlador de posição final

Escrevendo o modelo cinemático apresentado na Eq. (1) em coordenadas polares, tem-se

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -v \cos \alpha \\ \dot{\alpha} = v \frac{\sin \alpha}{\rho} - \omega \\ \dot{\theta} = v \frac{\sin \alpha}{\rho} \end{cases} \quad (4)$$

Para o controlador de posição, segundo Secchi (1998), o ponto de equilíbrio é dado por

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

e deve-se garantir que

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \alpha \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ para } t \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Considerando a função candidata de Lyapunov radialmente ilimitada, dada por

$$V(\rho, \alpha) = \frac{1}{2}\rho^2 + \frac{1}{2}\alpha^2, \quad (7)$$

é possível provar a estabilidade global e assintótica do controlador de posição.

Tomando a derivada temporal da Eq. (7) e substituindo a Eq. (4), tem-se

$$\dot{V}(\rho, \alpha) = -\rho v \cos \alpha + \alpha \left(v \frac{\sin \alpha}{\rho} - \omega \right). \quad (8)$$

Definindo as ações de controle (Secchi, 1998) como

$$\begin{aligned} v &= v_{max} \tanh \rho \cos \alpha \\ \omega &= k_{\omega} \alpha + v_{max} \frac{\tanh \rho}{\rho} \sin \alpha \cos \alpha, \end{aligned} \quad (9)$$

obtém-se substituindo Eq. 9 em Eq. 8 que

$$\dot{V}(\rho, \alpha) = -v_{max} \rho \tanh \rho \cos^2 \alpha - k_{\omega} \alpha^2 < 0, \quad (10)$$

para $v_{max}, k_{\omega} > 0$. Logo, está demonstrada a estabilidade assintótica no ponto de equilíbrio acima mencionado. No entanto, é possível verificar que há uma singularidade quando ρ se anula, isto é, quando o robô atinge o alvo, pois os estados $[\alpha \ \theta]^T$ se tornar indeterminados. A fim de contornar esta situação é definido um entorno δ sobre o ponto de equilíbrio, de tal modo que, quando o robô se encontra dentro deste entorno assume-se a conclusão da tarefa de posicionamento. Neste trabalho, para situação de equilíbrio foi adotado $\rho < \delta < 30mm$.

3.2 Controlador de Orientação

Em situações na qual o robô móvel é dotado de uma garra, este extremo operativo deve estar orientado em relação ao objeto a ser agarrado. Neste contexto, o desenvolvimento abaixo propõe um controlador de orientação, o qual deve rotacionar o robô até um ângulo desejado, e mantê-lo nesta postura. Tal controlador segue o desenvolvimento proposto em (Toibero *et al.*, 2006).

Considerando o erro de orientação, tem-se

$$\tilde{\varphi} = \varphi_d - \varphi. \quad (11)$$

Do modelo cinemático do robô móvel apresentado na Eq. (1), tem-se que

$$\dot{\varphi} = \omega. \quad (12)$$

Considerando que a orientação desejada φ_d seja constante, tomando a derivada temporal da Eq. (11) e utilizando a Eq. (12), tem-se

$$\dot{\tilde{\varphi}} = -\omega. \quad (13)$$

Propõe-se a função candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\varphi}) = \frac{1}{2}\tilde{\varphi}^2, \quad (14)$$

a fim de garantir a estabilidade assintótica global do ponto de equilíbrio $\tilde{\varphi} = 0$. Tomando a derivada temporal da Eq. (14) e considerando a Eq. (13), tem-se

$$\dot{V}(\tilde{\varphi}) = -\tilde{\varphi}\omega. \quad (15)$$

Através das ações de controle (Toibero *et al.*, 2006) dadas por

$$\begin{aligned} \nu &= 0 \\ \omega &= \omega_{max} \tanh \tilde{\varphi}, \end{aligned} \quad (16)$$

obtem-se

$$\dot{V}(\tilde{\varphi}) = -\omega_{max}\tilde{\varphi} \tanh \tilde{\varphi} < 0, \quad (17)$$

para $\omega_{max} > 0$. Assim, a estabilidade assintótica do controlador está assegurada.

4 Evasão de Obstáculos

4.1 Desvio Tangencial

Este controlador foi proposto e implementado em (Ferreira, 2004) e (Pereira, 2006), utilizando-se sensores ultra-sônicos e um sensor de varredura Laser, respectivamente, a fim de fornecer as informações sobre o ambiente.

A técnica em questão denomina-se *Desvio Tangencial*, cujo fundamento é evitar obstáculos mediante a execução de trajetórias tangenciais a estes. Uma vez que há um obstáculo no caminho em busca do ponto de destino, para transpô-lo é gerado um alvo virtual temporário, que deverá ser atingido pelo robô. Quando o algoritmo de desvio verifica a ausência de obstáculos, o alvo real é retomado e o robô retoma sua trajetória em busca deste.

A Fig. 2 ilustra a técnica de desvio tangencial. Quando um objeto é detectado, através das medidas do sensor de varredura laser, encontra-se o ponto mais próximo ao obstáculo e seu ângulo β em relação à orientação do robô. Em conjunto com o erro de orientação do robô α , é definido o ângulo de giro γ necessário para rotacionar o alvo de modo que o alvo virtual esteja numa situação em que a trajetória a ser seguida em sua busca seja tangente ao obstáculo. O ângulo de giro γ é definido por

$$\begin{cases} \gamma = \beta - \alpha - 90^\circ, & \text{se } \beta \geq 0 \\ \gamma = \beta - \alpha + 90^\circ, & \text{se } \beta < 0. \end{cases} \quad (18)$$

A rotação do alvo, considerando somente o plano de navegação XY , é realizada por

$$X_v = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} X_r, \quad (19)$$

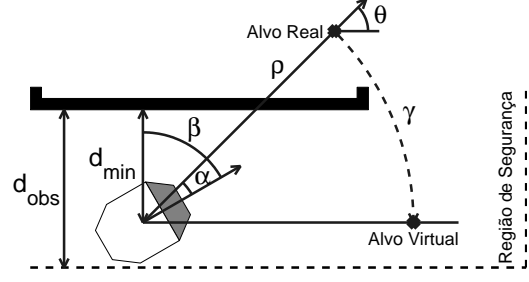


Figura 2: Desvio Tangencial - Determinação do ângulo de rotação.

onde X_r e X_v são o alvo real e o alvo virtual, respectivamente, e são definidos por

$$X_r = [x \ y]^T \text{ e } X_v = [x_v \ y_v]^T.$$

Então, os erros de posição no plano de navegação passam a ser dados por

$$\begin{cases} \tilde{x} = x_v - x \\ \tilde{y} = y_v - y. \end{cases} \quad (20)$$

Neste contexto, as ações de controle serão calculadas mediante a Eq. (9), as quais foram propostas para o controlador de posição final.

4.2 Desvio Tangencial Modificado

Em determinadas situações de simulações e experimentos utilizando o algoritmo de desvio tangencial convencional, o robô móvel dotado de um sensor de varredura laser era incapaz de transpor algumas configurações de obstáculos, ou, para contorná-las, teria que realizar manobras que o levavam ou poderiam levá-lo a uma situação de colisão. A Fig. 3 apresenta duas configurações de obstáculos típicas de teste deste algoritmo, as quais serão comentadas a seguir, que são um obstáculo em forma de “V” e um obstáculo em forma de “L”.

Para evitar, ou mesmo minimizar, o risco de colisão nas situações apresentadas, foram propostas duas modificações no algoritmo supracitado, visando, primeiramente, evitar uma aproximação excessiva em relação ao obstáculo, uma vez que o robô já se encontra dentro da região de segurança, e, em seguida, explorar o fato do robô tipo uniciclo poder rotacionar sobre seu próprio eixo.

A Fig. 4 ilustra a situação onde o robô móvel se encontra dentro de região de segurança. Mediante o algoritmo de desvio tangencial convencional, o ângulo de giro é função somente do ângulo do sensor laser que apresenta a menor medida de distância ao obstáculo. No entanto, para o caso apresentado, o robô vai seguir tangencialmente a parede horizontal até o momento em que a distância à parede vertical detectada pelo feixe central seja a mínima. Isto, contudo, pode ser insuficiente



(a)



(b)

Figura 3: Configurações real do ambiente de navegação (a) obstáculo em “V” (b) parede em “L”.

para realizar a manobra com segurança e o robô pode vir a se chocar.

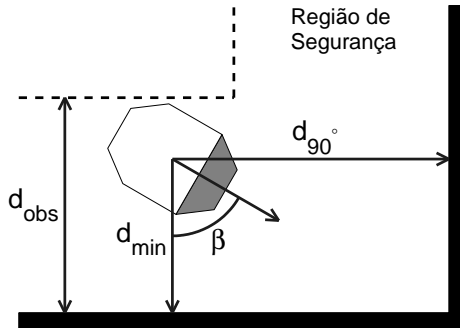


Figura 4: Medições laser frente a um obstáculo.

No desvio tangencial modificado, são levados em consideração os feixes d_{min} e d_{90° , apresentados na Fig. 4, e que representam, respectivamente, a distância mais próxima ao obstáculo e a distância medida a 90° em relação a d_{min} . A distância d_{90° (ilustrada na Fig. 4) é obtida pela medida laser correspondente à posição angular $\beta - 90^\circ$, se $\beta \geq 0$, ou $\beta + 90^\circ$, se $\beta < 0$.

O intuito de utilizar ambas medidas é dar ao robô maior velocidade angular, a fim de contornar com maior segurança e eficiência configurações de obstáculos como aquelas ilustradas na Fig. 3.

Caso d_{min} se encontre na região de segurança, porém d_{90° não, o algoritmo de desvio tangencial convencional é executado, normalmente. No entanto, caso ambas as distâncias apresentem valores inferiores ao limiar de segurança, a Eq. (18), que determina o ângulo de giro, é modificada para

$$\begin{cases} \gamma = \beta - \alpha - 180^\circ, & \text{se } \beta \geq 0 \\ \gamma = \beta - \alpha + 180^\circ, & \text{se } \beta < 0. \end{cases} \quad (21)$$

Em seguida, faz-se a rotação do ponto de destino, que será útil para propiciar uma maior velocidade angular ω ao robô.

Visando reduzir a velocidade linear ν do robô, quando ele já se encontra na região de segurança,

o ponto de destino virtual é calculado em função da distância mínima ao obstáculo, ou seja,

$$X_v = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{min} \cos \theta \\ d_{min} \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (22)$$

onde θ é a orientação do robô em relação ao alvo, conforme a Fig. 1.

Por fim, as ações de controle serão as mesmas que foram propostas para o controlador de posição final citado na Subseção 3.1.

5 Estabilidade de Sistemas Chaveados

Quando o robô atinge o ponto alvo, ele deve comutar do controlador de posição para o de orientação. Ainda assim, a estabilidade é mantida, segundo a extensão direta do teorema de estabilidade de Lyapunov, conforme discutido em (Vidyasagar, 1993). Isto se deve ao fato de que as provas de estabilidade de cada controlador em separado podem ser obtidas usando a mesma função candidata de Lyapunov.

Para isto, obtendo da Fig. 1 que

$$\theta = \varphi + \alpha, \quad (23)$$

e recordando a Eq. (11), tem-se que

$$\alpha = \theta - (\varphi_d - \tilde{\varphi}), \quad (24)$$

e sua derivada temporal é dada por

$$\dot{\alpha} = \dot{\theta} + \dot{\tilde{\varphi}}. \quad (25)$$

Daí, é possível provar a estabilidade do controlador de orientação final, utilizando a mesma função candidata de Lyapunov proposta para a prova de estabilidade do controlador de posição final. Para o controlador de evasão de obstáculos, a estabilidade não é afetada, pois ele simplesmente rotaciona o ponto de destino, temporariamente, até que o obstáculo seja vencido e o caminho para atingir o alvo esteja livre. Por sua vez, o controlador de posição final permanece inerte, durante a rotação do robô, pois a posição final já foi atingida.

6 Simulações

As simulações desta seção foram realizadas utilizando o software ARIA da ActivMedia, que emula a navegação do robô móvel Pioneer 2DX, em conjunto com o sensor de varredura laser.

Os ambientes criados para simulação são aqueles ilustrados na Fig. 3, com o intuito de analisar o comportamento de ambos os controladores de evasão de obstáculos, o desvio tangencial original e o desvio tangencial modificado, quando o robô navega em cada um destes ambientes.

A primeira simulação realizada visa alcançar um ponto destino localizado na posição $(3000mm, 3500mm)$, tendo como empecilho um obstáculo em “L” no caminho a ser traçado até o alvo. A Fig. 5 apresenta a trajetória percorrida pelo robô móvel, usando cada controlador. À esquerda, pode-se visualizar que o caminho seguido usando o controlador convencional se aproxima bastante do obstáculo durante as manobras de desvio, ao contrário do controlador modificado, cujo uso resulta numa trajetória mais suave.

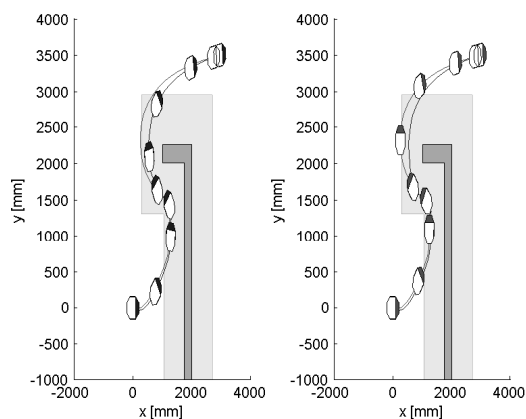


Figura 5: Trajetória percorrida pelo robô móvel para transpor um obstáculo em “L”. À esquerda, desvio tangencial convencional e, à direita, desvio tangencial modificado.

A segunda simulação refere-se ao posicionamento do robô no alvo localizado nas coordenadas $(5000mm, 0mm)$, tendo um obstáculo em “V” entre o ponto de partida e o de destino. A Fig. 6 ilustra a trajetória percorrida usando, novamente, os dois controladores para lograr que o robô móvel atinja o objetivo. É evidente o melhor desempenho do controlador modificado em relação ao convencional, neste tipo de situação, pois este último foi incapaz de transpor o obstáculo existente no espaço de trabalho. Por outro lado, à direita da Fig. 6, está ilustrada a trajetória cautelosa que resultou no cumprimento da tarefa proposta.

Concluindo esta seção, deve ser destacado que nas simulações acima apresentadas, e nos experimentos a seguir, o símbolo que mostra a postura do robô ao longo da trajetória é plotado a cada 5 segundos.

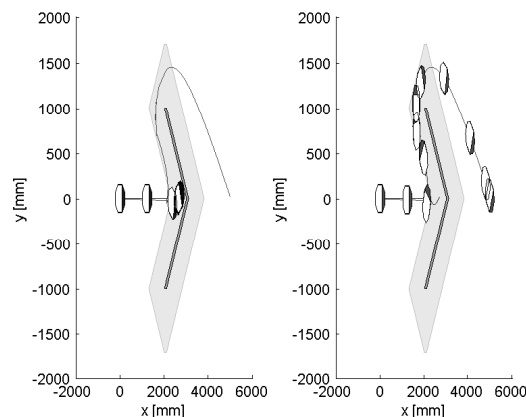


Figura 6: Trajetória percorrida pelo robô móvel para transpor o obstáculo em “V”. À esquerda, método convencional e, à direita, método modificado.

7 Experimentos

A fim de comprovar os resultados das simulações, foram realizados experimentos com o robô Pioneer 2DX, dotado de um sensor SICK de varredura laser. No caso, os experimentos utilizando apenas a versão modificada do controlador de desvio tangencial de obstáculos. Na Fig. 7 é possível verificar as trajetórias percorridas pelo robô móvel até alcançar o ponto desejado em cada uma das configurações de obstáculos. Para o ambiente mostrado na Fig. 7, à esquerda, o ponto desejado se encontra na posição $(3500mm, 0mm)$ e, ao final, o robô deve atingir uma orientação desejada final de 0° . Por sua vez, à direita, o robô móvel deve estar orientado a 0° , quando alcançar a posição desejada $(3000mm, 3500mm)$ de seu espaço de trabalho. Nestes experimentos os seguintes valores das constantes foram adotados: $v_{max} = 0,35m/s$, $k_\omega = 0,40rad/s$ e $\omega_{max} = 0,45rad/s$.

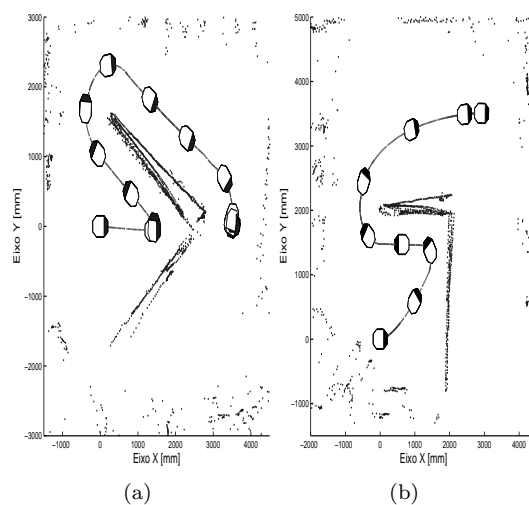


Figura 7: Configurações real do ambiente de navegação (a) obstáculo em “V” (b) parede em “L”.

8 Conclusões

Considerando somente os dados experimentais obtidos no experimento realizado no ambiente de navegação contendo o obstáculo em “V”, a Fig. 8 apresenta as ações de controle enviadas e efetivamente desenvolvidas pelo robô móvel para realizar a tarefa de posicionamento e orientação, utilizando o algoritmo de evasão de obstáculos baseado em desvio tangencial modificado. A evolução das variáveis de estado envolvidas na navegação é apresentada na Fig. 9. Conforme caracterizado na prova de estabilidade do sistema, na Seção 3, $\rho \rightarrow 0$ e $\alpha \rightarrow 0$ para $t \rightarrow \infty$, durante a etapa de posicionamento, e $\theta \rightarrow \theta_d$ para $t \rightarrow \infty$, durante a reorientação.

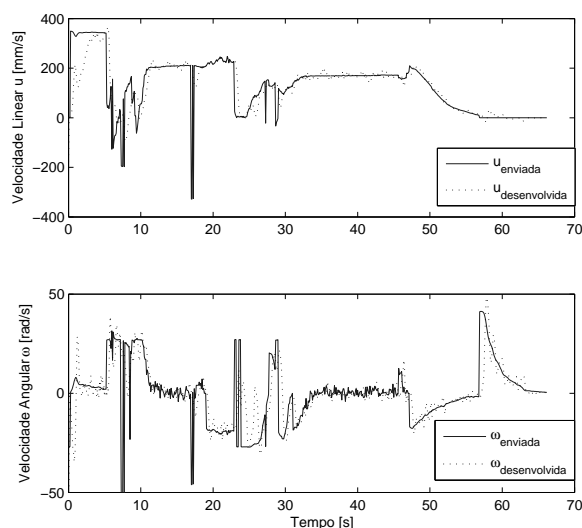


Figura 8: Ações de control enviadas e desenvolvidas pelo robô móvel durante a execução da tarefa.

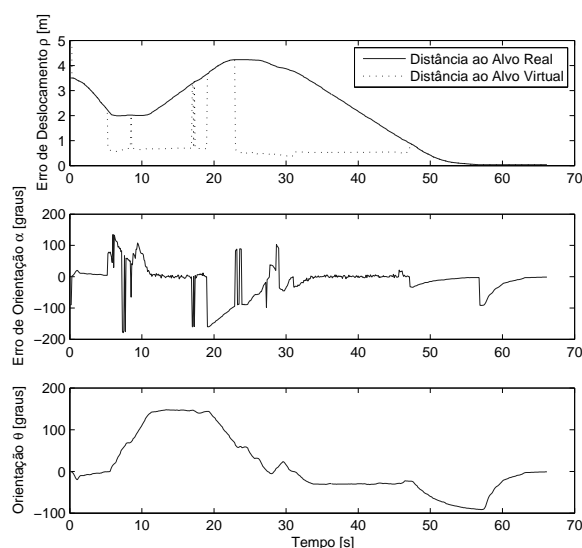


Figura 9: Evolução temporal das variáveis de estado.

Com as modificações inseridas no algoritmo de evasão de obstáculos baseado em desvio tangencial, o robô móvel foi capaz de evitar os mesmos obstáculos antes evitados pelo algoritmo proposto em (Ferreira, 2004) e (Pereira, 2006). Contudo, foi possível obter uma navegação mais segura, em situações onde o robô já se encontrava dentro da região de segurança, bem como vencer obstáculos antes intransponíveis. Desta forma, mostrou-se a viabilidade de se utilizar as modificações propostas para o algoritmo convencional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/MEC e à SPU/Argentina por ter apoiado à parceria entre UFES-UNSJ (projeto 018/04 CAPG-BA) onde este trabalho está inserido. Eles também agradecem ao CNPq pelo financiamento para a compra do robô Pioneer 2DX e do sensor laser.

Referências

- Ferreira, A., *Desvio Tangencial de Obstáculos para um Robô Móvel Navegando em Ambientes Semi-Estruturados*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - Brasil (2004).
- Patiño, H. D. and Carelli, R., “Neural Network-Based Optimal Control for Autonomous Mobile Vehicle Navigation”, *International Symposium on Intelligent Control*, 391-396 (2004).
- Pereira, F. G., *Navegação e Desvio de Obstáculos Usando um Robô Móvel Dotado de Sensor de Varredura Laser*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - Brasil (2006).
- Secchi, H. A., *Control de Vehículos Autoguiados con Realimentación Sensorial*, Tesis de Maestría - Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan, San Juan - Argentina (1998).
- Toibero, J. M., Carelli, R., Kuchen, B. and Canali, L., “Switching Controllers for Navigation with Obstacles in Unknown Environments”, *IV Jornadas Argentinas de Robótica (JAR)*, Córdoba, Argentina (2006).
- Vidyasagar, M., *Nonlinear System Analysis*, 2^o edition, Prentice Hall, New Jersey (1993).