

DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ MÓVEL NÃO-HOLONÔMICO PARA NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA EM AMBIENTES FECHADOS POR WALL-FOLLOWING

OTAVIO A. CHASE¹, JORGE R. BRITO-DE-SOUZA²

^{1,2}*Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará – ITEC/UFPA
Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá. CEP: 66075-110. Caixa Postal 479*

E-mails: ¹chase@sbajovem.org, ²jrgbrito@ufpa.br

Abstract — This paper presents the development of a wheeled mobile robot called LOGBOT, with ability for autonomous navigation in indoor environments with the Wall-Following. The tuning of the controller proportional trajectories of the robot is made by the Kuipers experimental method. The robot navigates indoor corridor using the wall as a reference trajectory to be followed. The acquisition of information is obtained by running an ultrasound array, is managed by an embedded device on the robot. The navigation tasks in follow-up wall are presented through experimental results in a corridor with stalls and obstacles.

Keywords — Mobile Robots, Autonomous Navigation, Control of Non-Holonomic Mobile Robots.

Resumo — Este artigo apresenta o desenvolvimento de um robô móvel terrestre denominado LOGBOT, com habilidade para navegação autônoma em ambientes fechados do tipo corredor com uso da técnica *Wall-Following*. A sintonia do controlador proporcional de trajetórias do robô é feita pelo método experimental de *Kuipers*. O robô navega em ambientes fechados do tipo corredor com uso da parede como referência de trajetória a ser seguida. A aquisição de informações do corredor é obtida por um vetor de sensores de ultra-som que é gerenciado por um dispositivo embarcado no robô. As tarefas de navegação em seguimento de parede são apresentadas, através de resultados experimentais em um corredor com baias e obstáculos.

Palavras-chave — Robótica Móvel, Navegação Autônoma, Controle de Robôs Móveis Não-Holonômicos.

1 Introdução

A indústria da computação alcançou estabilidade e padrões técnicos que são rigidamente usados nas áreas de pesquisa, comércio e entretenimento. O desempenho dos sistemas de computação e suas aplicações tornaram o computador uma ferramenta popular e obrigatória na sociedade da informação. Isto formou a base para a emergência da indústria robótica, que está se desenvolvendo de modo muito parecido com o que ocorreu no início da indústria da computação na década de 1970 (Gates, 2008).

A robótica móvel é uma das principais linhas de pesquisa no campo da robótica, cuja ênfase é direcionada para o desenvolvimento de robôs de serviço (Pieri, 2002), que podem ser usados em diferentes setores da sociedade, tais como, na fabricação de produtos industriais, transporte de documentos em escritórios, limpeza e vigilância de residências, guias de museus, transporte de mercadorias em lojas, transporte de equipamentos médicos e monitoramento de pacientes em hospitais, e etc.

No ambiente atuação, os robôs móveis executam suas tarefas de maneira autônoma ou semi-autônoma, ou seja, são autômatos com capacidade para tomada de decisões do tipo como chegar a um ponto objetivo, desviar de obstáculos e explorar o ambiente de atuação (Russel e Norvig, 2003).

As funções relacionadas à mobilidade de um robô móvel em seu ambiente são a navegação e a localização, que têm grande importância no desenvolvimento de sistemas autônomos inteligentes. Essas duas capacidades são essenciais para que o robô possa executar tarefas mais complexas no ambiente em que atua.

O ambiente onde o robô navega pode possuir, obstáculos fixos e móveis. O que requer sempre a realimentação de sinais do sistema de sensoramento para a tomada de decisão da próxima configuração (x, y, θ) do robô móvel em sua tarefa de navegação à medida que evolui no ambiente que o circunda.

A contribuição deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um robô móvel não-holonômico, denominado de LOGBOT, com uso de poucos recursos sensoriais, e cuja principal tarefa é navegar de maneira autônoma em ambientes fechados do tipo corredor, com uso da parede como referência de trajetória a ser percorrida, com base na técnica de navegação *Wall-Following*.

O robô conta com um vetor de sensores de ultra-som para perceber o ambiente e se manter a uma distância específica da parede esquerda de um corredor. Um controlador proporcional de trajetórias é sintonizado por métodos experimentais (Kuipers, 1999) para controle de velocidade de translação em malha aberta de dois motores de corrente contínua, que são usados como atuadores para a locomoção do robô móvel LOGBOT.

O programa do controlador é executado e embarcado no microcontrolador do robô, que ao perceber as informações de sua distância com a parede, através do vetor de sonares, o algoritmo de controle os processa e gera os sinais proporcionais que são enviados a cada motor, através de modulação por largura de pulso. Tudo isto com objetivo de que o robô siga e se mantenha a uma distância definida com a parede.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 descreve-se o algoritmo de navegação *Wall-Following*. Na Seção 3 descreve-se o *hardware* do robô móvel. Nas Seções 4 e 5 apresentam-se os resultados experimentais e a conclusão do projeto, respectivamente.

2 Navegação e Controle Wall-Following

O *Wall-Following* é uma técnica comumente usada para navegação de robôs móveis em ambientes fechados e/ou conhecidos. No planejamento de caminhos ou em navegação é freqüente que o robô móvel tenha habilidade de usar a parede, ou o contorno de um obstáculo de um ambiente como referência de trajetória a ser seguida. Através do uso de sensores de distância do tipo sonar, infravermelhos, ou lasers para manter o robô a uma distância de referência da parede. A informação obtida destes sensores não tem ligação direta com a geração de trajetórias, e sim com a geometria do robô com o seguimento de paredes.

O algoritmo *Wall-Following* usado quando o robô está próximo a parede ou do contorno de obstáculos consiste basicamente em:

- Seguir em frente enquanto tiver uma parede à esquerda (direita);
- Manter-se a uma distância de referência da parede à esquerda (direita);
- Quando houver uma aproximação frontal com a parede virar à direita (esquerda);
- Se não houver mais parede perto do lado esquerdo, virar à esquerda (direita).

O robô pode tanto seguir a parede a sua esquerda quanto à parede a sua direita, por isso as informações entre parênteses. A figura 1 mostra o robô móvel LOGBOT em seu corredor de testes.



Figura 1. Robô Móvel LOGBOT

2.1 Geometria do Robô Móvel LOGBOT

A figura 2 mostra o modelo e a disposição do robô móvel que se move ao longo do seu espaço de configurações (corredor) com velocidade linear v e orientação θ atual com relação ao eixo de x .

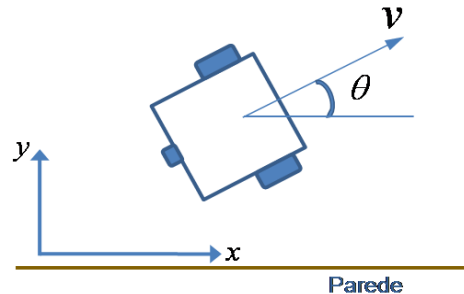


Figura 2. Disposição do robô no corredor.

Ao decompor a velocidade linear do robô em suas componentes x , y , θ , chega-se ao conjunto de equações (Pereira, 2008):

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y} = v \sin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

O modelo simplificado de um robô móvel não-holonômico é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

A velocidade de translação v , e a velocidade angular ω são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D}{2} & \frac{D}{2} \\ \frac{D}{T} & -\frac{D}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_D \\ \omega_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

Em (3), D é o diâmetro das rodas (14,8cm), T a distância entre as rodas (32,0cm), e ω_D e ω_E são a velocidade angular da roda direita e esquerda respectivamente. As velocidades resultantes do robô como um todo são dadas por:

$$\omega = \frac{\omega_{RPM}}{60_{SEG}} = \frac{78}{60} = 1,3Hz \quad (4)$$

$$v = \omega \times \pi \times D = 0,60 m/s \quad (5)$$

Em (4) ω_{RPM} é a velocidade angular de saída do motor em rotações por minuto, e com eficiência máxima (carga). Em (5) v é a velocidade linear máxima que o corpo rígido do robô como um todo pode alcançar. As configurações do motor de corrente contínua, como velocidade e torque de saída são fornecidos pelo fabricante.

2.2 Geometria Wall-Following

Na figura 3 considera-se o caso onde o robô LOGBOT navega no corredor e segue a parede esquerda.

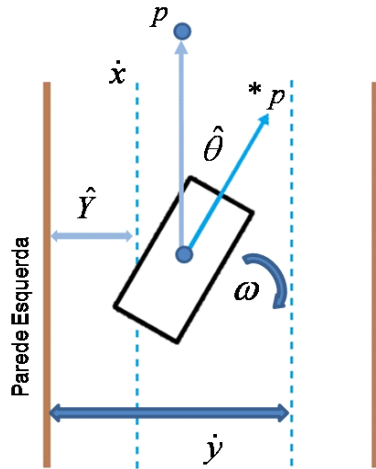


Figura 3. Robô Móvel LOGBOT

As variáveis de controle são definidas em relação ao corredor como \hat{Y} e $\hat{\theta}$, onde \hat{Y} representa a distância atual do robô com a parede, e $\hat{\theta}$ o desvio angular atual com relação ao eixo do corredor (coordenada x); p é a trajetória desejada e $*p$ a trajetória real do robô no ambiente; e \dot{x} , \dot{y} , ω representa a configuração do robô em movimento.

A aquisição das informações de distância com a parede e desvio angular é feito por um vetor de sensores de ultra-som, cuja disposição no robô LOGBOT é vista na figura 4. O robô tem que se manter a uma distância de 40cm com a parede (referência). Os sensores de ultra-som usados no projeto medem com precisão distâncias relativamente pequenas, comumente no intervalo de 15 a 300 centímetros, e estas leituras são medidas perpendiculares a parede.

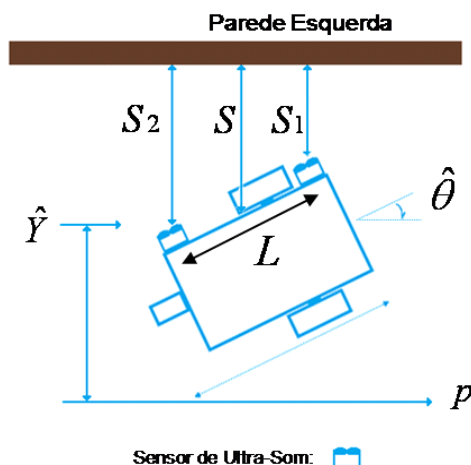


Figura 4. Aquisição de dados do Vetor de Ultra-Som.

Onde $S1$ e $S2$ são a disposição e leituras atuais dos dois sonares na estrutura do robô, e L a distância entre o sonar $S1$ e o sonar $S2$. A grande desvantagem do sensor de ultra-som é a fraca resolução lateral de sua leitura, que tem um largo feixe de leitura e ocasiona um espalhamento que gera inconsistências na leitura. S é a distância do centro de massa do robô com a parede.

A figura 5 mostra o tratamento do erro de posição – que é a distância definida com a parede, e do erro de orientação – que é a diferença angular entre o eixo do robô e a distância da parede. A posição do robô quando está a uma distância abaixo da referência o erro de posição é negativo, e quando uma distância acima da referência, o erro de posição é positivo. O erro de orientação do robô é negativo quando a parte dianteira estiver mais próxima a parede que a parte traseira, e positiva quando a parte traseira estiver mais próxima que a parte dianteira.

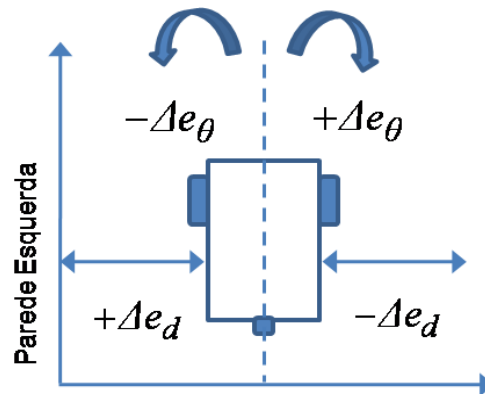


Figura 5. Erro das referências de distância e orientação.

2.3 Controlador Proporcional de Trajetórias com Base em Wall-Following

O objetivo do controlador proporcional de trajetórias é desenvolver as ações de controle ω e v tais que os erros de controle para posição e orientação do robô sejam reduzidos assintoticamente a zero, enquanto mantém as ações de controle dentro de seus limites específicos. No robô móvel LOGBOT é usado um controlador proporcional segundo a seguinte lei de controle:

$$U = K_D \times E_D + K_\theta \times \hat{\theta} \quad (6)$$

onde U é o sinal de controle, K_D e K_θ são os ganhos proporcionais de distância e orientação respectivamente, E_D é o erro calculado pela diferença das distâncias da posição de referência com a parede Y_{ref} com a leitura da posição atual \hat{Y}_D , e $\hat{\theta}$ é o estado atual da orientação do robô com relação ao eixo de x . O sinal de controle é usado nas equações que regem o controle do robô:

$$\begin{cases} v_E = \omega \times r - U \\ v_D = \omega \times r + U \end{cases}, \quad (7)$$

onde v_E e v_D são as velocidades lineares, das rodas esquerda e direita respectivamente enviadas na forma de sinais modulados por largura de pulso – PWM (*Pulse Width Modulation*) para cada motor acoplado as rodas, v a velocidade linear do robô com um todo, U o sinal de controle obtido pela equação, ω é a velocidades angular do robô como um todo, e r o raio da roda acoplada ao eixo de cada motor.

2.4 Algoritmo de Controle

O algoritmo de controle é implementado no microcontrolador do robô móvel LOGBOT, e as tarefas de todo o procedimento são vistos a seguir:

1. Medir a distância entre o robô e a parede:

$$Y_D = 0.5 \times (S1 + S2)$$

2. Medir o Erro (Referência em: 40 cm):

$$E_D = Y_{Dref} - \hat{Y}_D$$

3. Zona Morta (38 cm e 42 cm):

$$Se |E_D| = 2, \text{ Então } E_D = 0$$

4. Mede a orientação em graus radianos:

$$\theta_{rad} = \arcsen\left(\frac{(S1 - S2)}{L}\right), \text{ se } S1 \geq S2 \text{ ou}$$

$$\theta_{rad} = \arcsen\left(\frac{(S2 - S1)}{L}\right), \text{ se } S2 \geq S1$$

5. Converte para graus:

$$\hat{\theta} = \frac{\theta_{rad} \times 180}{\pi}$$

6. Lei de Controle:

$$U = K_D \times E_D + K_\theta \times \hat{\theta}$$

7. Velocidade da Roda Esquerda:

$$VE = \omega \times r - U$$

8. Velocidade da Roda Direita:

$$VD = \omega \times r + U$$

Na primeira tarefa a leitura dos sensores de ultra-som mede a distância entre o centro de massa do robô com a parede (coordenada x), onde $S1$ e $S2$ são as variáveis correspondentes as leituras dos sonares, e L a distância entre $S1$ e $S2$ como mostrado na figura 4; \hat{Y}_D é a distancia atual do centro de massa do robô com a parede. Na segunda tarefa é feito a medição do erro de distância com a parede. Na terceira tarefa é configurada uma zona morta para diminuir a margem oscilatória da ação de controle. Na quarta tarefa o ângulo de orientação do robô com relação ao eixo de x é extraído em graus radianos e

tratado conforme visto na figura 5, assim é possível medir a distância do robô com a parede e sua orientação, através somente do uso de sonares. Na quinta tarefa a orientação em graus radianos é convertida para graus. Na sexta tarefa é processada a lei de controle Wall-Following para gerar a ação de controle U . Nas tarefas sete e oito, a ação de controle é usada nas equações que calculam os respectivos sinais PWM para cada motor.

O algoritmo de controle é processado por finitas iterações enquanto o robô estiver no modo autônomo.

2.5 Sintonia do Controlador Proporcional de Trajetórias Baseado em Wall-Following

Os ganhos K_D e K_θ podem ser sintonizados de maneira experimental, através do método de Kuipers para obtenção de parâmetros em controladores Wall-Following para robótica móvel (Kuipers, 1998). Primeiro deve ser encontrado o K_D , através de um ensaio experimental com o robô móvel a uma distância pré-definida da parede e seguir os passos:

- O robô deve ser programado para se manter a uma distância pré-definida da parede.
- O ganho K_D deve ser testado entre 0.1 e 0.6.
- A sintonia do ganho só deve ser validada quando a reação do robô manter-se em ganho critico, sem que colida com a parede, conforme mostra a figura 6.
- Quando K_D estiver sintonizado, então o ganho K_θ deve ser extraído na forma:

$$K_\theta = 2 \times \sqrt{K_D} \quad (8)$$

No ensaio realizado com o robô móvel LOGBOT, os ganhos obtiveram os seguintes valores – $K_D = 0.4$ e $K_\theta = 1.26$. De acordo com o método de Kuipers, o K_θ deve ser maior que K_D . Isto faz com que este controlador tenha o comportamento proporcional derivativo. Com os ganhos obtidos pelo método de sintonia de Kuipers o robô móvel LOGBOT tem a seguinte lei de controle:

$$U = 0.4 \times E_D + 1.26 \times \hat{\theta} \quad (9)$$



Figura 6. Ensaio da sintonia experimental.

3 Robô Móvel LOGBOT

O robô móvel LOGBOT mostrado na figura 1 tem sua estrutura mecânica constituída de alumínio naval e acrílico, tem dimensões de 30cm x 40cm x 40cm, e conta com duas rodas independentes, à esquerda e direita de sua parte dianteira, e uma terceira roda de sustentação na parte central traseira. Como atuadores tem dois motores DC de 115RPM (sem carga), com tensão nominal de 12V, e torque de saída 44Kgf.cm, que são fixados em sua estrutura sendo seus eixos alinhados com os eixos das rodas.

Os motores são alimentados por uma bateria de chumbo-ácido DC de 12V/7A.h. Uma segunda bateria de Níquel-Metal-Hidreto (NiMH) DC de 12V/2,3A.h é usada para alimentar exclusivamente a eletrônica do microcontrolador, que assim fica protegida da interferência de eventuais ruídos gerados pelos motores que movimentam o robô.

O acionamento tem a função de controlar a velocidade e tração diferencial dos motores. O seu núcleo de processamento é um microcontrolador PIC18F458, que emite, para cada motor, sinais de acionamento (parar ou girar em certo sentido) e outro sinal do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) que define a sua velocidade de translação. Para realizar o chaveamento destes sinais utiliza-se uma ponte-H modelo LMD18200T em cada motor. O sinal PWM aplicado em cada motor é o que diferencia a velocidade de cada roda, como também os movimentos do robô. A frequência de comutação PWM deve ser muito mais elevada que a inversa da constante de tempo elétrica do motor T_a , que é dada pela divisão da resistência interna do motor R pela sua indutância L em ohms:

$$\frac{1}{T_a} = \frac{R}{L} = \frac{0,5}{0,052} = 9,61\text{Hz} \quad (10)$$

A frequência PWM para controlar a potencia dos motores obedece à relação (Sunada, 2007) em (11), e a frequência identificada é mostrada em (12):

$$f_{PWM} \geq 5 \times f_{MOTOR} \quad (11)$$

$$f_{PWM} = 12\text{kHz} \quad (12)$$

O vetor de sensores de ultra-som é composto por cinco sonares modelo EZ1-Maxsonar®, cuja saída analógica fornece uma tensão de 10 mV por unidade de polegada, com faixa de medição entre 6 e 255 polegadas (15,24cm a 647,7cm). Para diminuir a interferência entre os sonares é necessário aplicar um sinal *STROBE* no pino RX de cada sonar, que é um pulso com duração de 200µs aplicado a cada 50ms.

A comunicação entre o robô e o computador é feita através de dois transceptores do tipo Zigbee-Maxstream®, que operam na radiofrequência de 2.4 GHz em modo bidirecional, usando modo do tipo *half-duplex*, com taxa de transmissão a 250kbps. Os dados de processamento do controlador do robô são emitidos para o computador, por esta comunicação.

O período do controlador proporcional de trajetórias Wall-Following é de 200ms por cada iteração. O processamento é em tempo real, com uso do conjunto de bibliotecas *FreeRTOS*.

4 Resultados Experimentais

Os ensaios são realizados em corredores de um prédio com salas de professores e laboratórios de pesquisa. Os resultados para navegação autônoma Wall-Following são obtidos pela lei de controle em (9). A referência de distância a qual o LOGBOT deve manter-se da parede esquerda é de 40 cm.

Ao evoluir no ambiente o robô envia uma matriz de aquisição de dados do controlador com as informações de – distância atual com a parede, erro de referência, orientação atual, ação de controle, velocidade PWM da roda esquerda, e velocidade PWM da roda direita. A análise é off-line, ou seja, após o robô ter realizado todos os procedimentos. Três testes ensaios são realizados da seguinte forma:

4.1 Teste I – 10 cm Acima da Referência de Distância com a Parede (Erro Negativo)

O robô inicia a sua navegação no ambiente de atuação posicionado 10 centímetros acima da referência de distância com a parede conforme mostra a figura 8.1. Ao passo que o robô navega e evolui no corredor, o controlador deve agir de forma que a velocidade de tração diferencial nas rodas direita e esquerda faça com que o robô se aproxime da parede.

O controlador reduz o erro à zero, entrando em regime permanente mantendo o robô na distância de referência com a parede no seguimento de sua trajetória conforme mostra a figura 7.

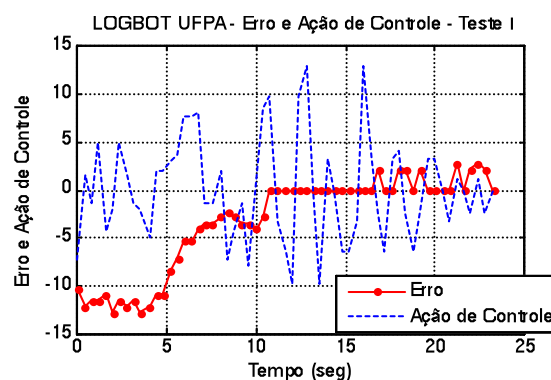


Figura 7. Teste I – 10 cm Acima da Referência.

A redução do erro a partir da distância atual do robô com a parede começa a partir de 4 segundos, e alcança o regime permanente a partir de 12 segundos, onde é notável a ação da zona morta até 17 segundos. Os impulsos que aparecem no comportamento do erro são justificáveis pela ocorrência de inconsistências de leitura do vetor de sonares.

4.2 *Teste II – Mudança Brusca de Posição e Orientação: O vão de uma porta*

O robô inicia a navegação no ambiente de atuação posicionado dentro da margem de referência de distância com a parede. Ao passo que o robô navega e evolui no corredor, obstáculos do tipo baia como o vão de uma porta fechada ocasionam em uma mudança brusca de posição e orientação do robô, o que requer maior ação de controle.

O controlador reduziu o erro à zero, entrando em regime permanente mantendo o robô na distância de referência com a parede no seguimento de sua trajetória conforme mostra a figura 8.

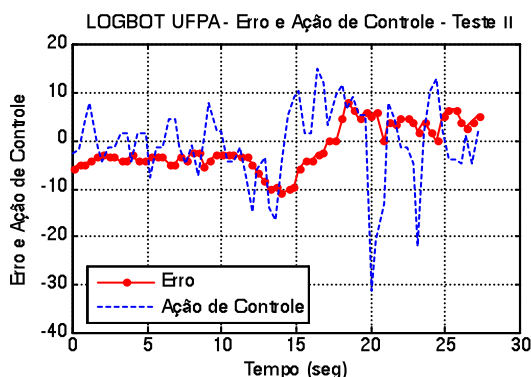


Figura 8. Teste II – Mudança Brusca de Posição e Orientação.

A redução do erro a partir da distância atual do robô com a parede ocorre entre 13 e 20 segundos, onde há a brusca variação de distância da parede devido ao vão da porta.

4.3 *Teste III – Mudança Brusca de Posição e Orientação: Mudança de Parede no Corredor*

O robô deve contornar a curva de fim do corredor, para mudar de parede. O robô iniciou sua navegação no ambiente de atuação 10cm abaixo da referência de distância com a parede. O controlador reduziu o erro à zero, e entra em regime permanente mantendo o robô na distância de referência com a nova parede e no seguimento de sua trajetória conforme mostra a figura 9.

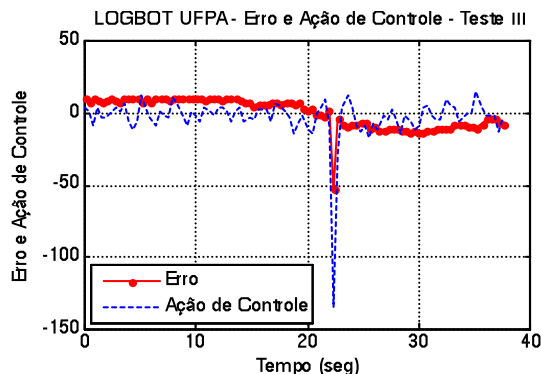


Figura 9. Teste III – Mudança Brusca de Posição e Orientação.

Entre 22 e 24 segundos há a brusca variação causada pela mudança de parede que gera uma “distância infinita”. Após superar a mudança de parede o erro passa a ser corrigido a partir de 24 segundos e oscila próximo à distância de referência.

5 Conclusão

Em todos os testes – corrigir os erros de distância da parede, detectar a problemática da porta, e contornar o final corredor, o robô apresentou resultados satisfatórios com o uso do controlador proporcional de trajetórias para posição e orientação de robôs móveis em ambientes fechados.

Em *Wall-Following* comportamentos como – obstáculos encostados a parede, vãos de portas e mudanças de corredor devem ser superados mesmo com brusca variação das medidas de configuração do robô, de forma que a ação de controle não seja alta o suficiente de forma que o robô não se perca da referência e fique girando a procura de uma parede, e que a ação de controle não seja baixa o suficiente para que o robô colida com a parede. Caso a porta esteja aberta, o robô tratará este comportamento como uma mudança de parede.

No estágio atual, o projeto encontra-se na fase de um protótipo e constitui um projeto de baixo custo, cuja ênfase didática é o estudo e aplicação da robótica móvel autônoma. Mesmo o robô tendo o vetor de sonares como seu único recurso sensorial, obteve resultados satisfatórios em sua navegação autônoma no corredor de testes.

Em um futuro breve pretende-se incorporar ao robô outros sensores do tipo proprioceptivos e exteroceptivos, com objetivo de aumentar a gama de aplicações do projeto LOGBOT.

Referências Bibliográficas

- Gates, B. (2008). Um robô em cada casa, *Scientific American Brasil Edição Especial*, N°. 25, Brasil, pp. 006–013.
- Pieri, E. (2002). Curso de Robótica Móvel, *PGEAS-UFSC*, Vol. I, 141 pp.
- Russel, S. e Norvig, P. (2003). Inteligência Artificial, Ed. 2, Editora: Campus.
- Kuipers, B. (1999). Tuning the Wall-Following Controller. Notes in Mobile Robotics, Texas University, USA.
- Pereira, G. A. S. e Chaimowicz, L. (2008). Enciclopédia de Automática – Controle & Automação. Vol. 3. Editora: Blucher, Brasil.
- Sunada, M. M. (2007). Acionamento de um Posicionador Linear de Ultraprecisão Empregando uma redução Harmonic Drive com Controle de Velocidade. Dissertação de mestrado, UFSC, Brasil, 2007.