

Seguidor de trajetória usando Lógica Fuzzy

Bruna L D da Cunha^{*}
IFCE - Campus Cedro
Al Dom Quintino S/N - Prado
Cedro - Ceará

Francisco V de Andrade[†]
Dep Eng Elétrica - UFC
Campus do Pici
Av. Mister Hull S/N

ABSTRACT

This work presents trajectory control via computer simulation using Fuzzy Logic. The controller was developed to be applied to a mobile robot with differential action for line following purposes. A kinematic model of the robot was used, where the control inputs are linear and angular speed. In the design of this control system, the linear velocity was kept fixed, so the controller is of the Single Input-Single Output type, taking the orientation error as input and angular velocity as output. As it is an orientation controller, a Proportional control strategy was used, as it ensures zero steady-state error for step-type reference tracking, due to the inherent integration of the system. The trajectories to be followed in the tests were composed of step-type changes of direction. The computer simulation results were satisfactory using the IAE (Integral Absolute Error) criterion. The simulink tool and the matlab fuzzy toolbox were used to carry out the project.

RESUMO

Este trabalho apresenta o controle de trajetória via simulação computacional usando Lógica Fuzzy. O controlador foi desenvolvido para ser aplicado em um robô móvel com ação diferencial com objetivo de seguimento de linha. Foi utilizado um modelo cinemático do robô, onde as entradas de controle são a velocidade linear e angular. No projeto deste sistema de controle, a velocidade linear foi mantida fixa, de modo que o controlador é do tipo Single Input-Single Output, tendo como entrada o erro de orientação e como saída a velocidade angular. Por se tratar de um controlador de orientação, foi utilizada uma estratégia de controle Proporcional, já que esta assegura erro de regime permanente nulo para seguimento de referência tipo degrau, devido à integração inerente ao sistema. As trajetórias a serem seguidas nos testes foram compostas por mudanças

*lorranydeassis1999@gmail.com

†vanierandrade@ifce.edu.br

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

de direção do tipo degrau. Os resultados de simulação computacional mostraram-se satisfatórios utilizando-se o critério IAE(Integral Absoluta do Erro). Foram utilizadas na realização do projeto a ferramenta simulink e a toolbox fuzzy do matlab.

Keywords

Seguidor de Linha; Diferencial; Lógica Fuzzy

1. INTRODUÇÃO

Robôs móveis estão sendo cada vez mais utilizados em todos os ambientes da vida cotidiana. O ambiente industrial deixou de ser exclusivo em aplicações executadas por robôs. Atualmente é cada vez mais comum se encontrar no ambiente residencial robôs utilizados em limpeza, auxílio a pessoas idosas, crianças e portadores de necessidades especiais. Armazéns de distribuição de grandes empresas também estão fazendo uso de robôs móveis para o transporte de material.

A elevada concorrência para se manter nos mercados exige mudanças na forma de produção empresarial, necessitando de automatizar os processos produtivos. O Brasil se enquadra como um país com potencial de crescimento na área de automação, devido à demanda reprimida. A expansão da automação robótica prevista para os próximos anos deve incluir desde a manufatura até a logística, tornando a realização de tarefas complexas mais eficiente.

Outra área com tendência de crescimento é a robótica colaborativa, que deve ser empregada tanto no meio industrial, como em assistência médica. Esta área deve ser impulsionada pelo crescimento da Inteligência Artificial, permitindo sistemas capacitados a tomar decisões.

Questões sociais têm sido levantadas, tentando prever os impactos socioeconômicos causados pela robótica, o que vai exigir profissionais qualificados para atuar no mercado de trabalho.

A indústria 4.0 representa um avanço tecnológico da automação visando o aumento de produtividade e eficácia a nível operacional. De acordo com a Consultoria McKinsey & Company, essa quarta revolução industrial vai depender, além de tecnologia, da capacitação de pessoas para atuarem com essa tecnologia.

Entre as tecnologias importantes nesse processo industrial, a robótica vem a desempenhar um papel fundamental, realizando trabalho cooperativo com os humanos.

A pandemia de COVID ocorrida nos anos anteriores, acelerou

diversos processos, como: teletrabalho, utilização de robôs móveis em diversas tarefas, além de outros processos de produção automatizada.

Dentro da área de robótica, a robótica móvel deve desempenhar papel de destaque nesse processo automatizado, resultado dos avanços significativos experimentados nos anos anteriores. O uso de robôs do tipo VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), assim como robôs móveis com rodas, já são realidade em tarefas de entrega de compras, ainda que estejam em fase de implantação nos dias atuais.

Pode-se diferenciar robôs móveis com rodas em dois tipos: AGV (Auto Guided Vehicle) e AMR (Autonomous Mobile Robot) [10]. No primeiro tipo, o controle atua através de um sistema de rota predefinido, como pistas. Este tipo de móvel possui limitações de percurso devido aos caminhos fixos, enquanto que os últimos têm controle através de um sistema de navegação autônoma, portanto estes têm mais flexibilidade de movimentação no ambiente. Este trabalho aborda robôs móveis com rodas do tipo AGV, cuja controle foi desenvolvido baseado na modelagem cinemática e o mesmo está dividido da seguinte forma: A seção Robô Móvel com Ação Diferencial apresenta de forma resumida algumas características do robô utilizado neste trabalho. A seção Modelagem Matemática apresenta a modelagem cinemática de um robô com uma estrutura semelhante à do robô utilizado. Em Metodologia são apresentados a estratégia de controle implementada. A seção Resultados mostra através de uma descrição quantitativa os resultados obtidos utilizando-se o controle de trajetórias.

2. TRABALHOS CORRELATOS

O uso de robôs seguidores de linha tem sido abordado por diversos autores principalmente no meio acadêmico e de modo especial porque este tipo de robô é bastante utilizado em competições de robótica. Além disso, estes também são utilizados em aplicações de transporte de material no meio industrial. Robôs com ação diferencial geralmente são preferidos para utilização como seguidores de linha, pelo fato de poderem realizar manobras com mais facilidade do que outras configurações, como os robôs com geometria de Ackerman. Um outro fator determinante para o sucesso na tarefa de seguimento de linha está relacionado à quantidade, disposição e tipo dos sensores utilizados.

Em [11] é apresentado o projeto e implementação de robôs seguidores de linha, realizados com materiais de baixo custo. O desenvolvimento de um robô móvel com sensores reflexivos e Arduino pode ser encontrado em [4]. O estudo comparativo e formas de disposição dos sensores do tipo reflexivo em robôs seguidores de linha através de simulação computacional é realizado em [8]. Estratégias de controle diferentes para robôs seguidores de linha podem ser encontradas na literatura. O uso de controlador PID para robôs seguidores de linha pode ser encontrado em [1] e [2]. Um PID ajustado através de algoritmos genéticos é apresentado em [5]. Em [3] é apresentado o controle de trajetória para seguimento de linha usando dois controladores proporcionais para reduzir a distância do móvel à linha e outro para manter a orientação para um robô com geometria de Ackerman.

3. ROBÔ MÓVEL COM AÇÃO DIFERENCIAL

O robô móvel com ação diferencial caracteriza-se por possuir 2 motores de tração acionados de forma independente. Estes motores estão afixados diretamente ou através de um conjunto de engrenagens a rodas fixas. Geralmente, existe uma terceira ou quarta rodas para manter a estabilidade estática do robô. Estas rodas são do tipo castor ou rodas esféricas, uma vez que não devem ter influência na mobilidade do robô.

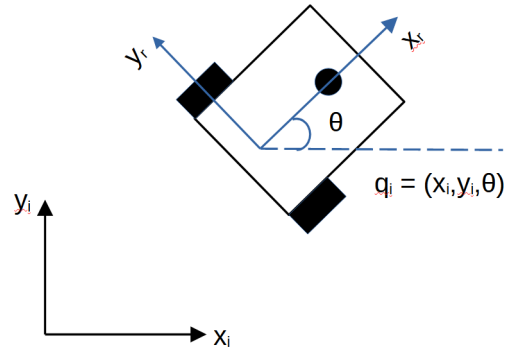


Figure 1: Robô com ação diferencial

A Figura 1 mostra a representação de um robô com ação diferencial. O eixo (x_i, y_i) é um sistema de coordenadas de referência global, enquanto o eixo (x_r, y_r) representa o frame de referência local ao robô. Este eixo foi posicionado no ponto médio entre as rodas de tração traseira. A origem deste eixo mede a posição em relação ao frame global e também é possível determinar a orientação do robô. O vetor postura é dado por: $q_i = (x_i, y_i, \theta)$.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a obtenção do modelo cinemático do robô será utilizada a mesma representação utilizada em [9]. Será considerada que a parte frontal do robô coincide com a direção e sentido do eixo x_r . A velocidade linear do robô aponta na direção e sentido desse eixo x_r . Na modelagem cinemática serão consideradas como entradas de controle a velocidade linear (v) e a velocidade angular (ω).

Os detalhes da modelagem cinemática do robô é apresentado em [6], sendo a postura do robô dada pela Eq. 1.

$$q = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

Onde: x e y são respectivamente a abscissa e ordenada do ponto médio entre as rodas traseiras do robô, θ é ângulo de orientação do robô.

As entradas de controle são a velocidade linear do ponto médio entre as rodas traseiras (velocidade linear do robô) e a velocidade de orientação das rodas dianteiras (Velocidade angular do robô).

Para a obtenção do modelo cinemático, projeta-se a velocidade linear sobre os eixos x_i e y_i . Este modelo cinemático resultante é apresentado na Eq.3.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2)$$

Sendo o vetor $\mathbf{u} = [v \ \omega]^T$.

Deve-se ressaltar que as velocidades linear e angular do robô podem ser obtidas através de cinemática direta, conforme as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$v = \frac{v_d + v_e}{2} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_e}{L} \quad (4)$$

Onde: v_d e v_e são a velocidade linear da roda direita e da roda esquerda, respectivamente, L é a distância entre o ponto médio das rodas direita e esquerda.

5. METODOLOGIA

Foi desenvolvido um controlador proporcional usando lógica fuzzy. Esta seção apresenta as funções de pertinência utilizadas no controlador fuzzy implementado e o gerador de trajetórias para se testar o sistema de controle. A Figura 2 representa o diagrama de blocos do sistema de controle. Como o robô deve seguir uma linha, o ângulo de referência deve ser nulo para que ele esteja sobre a linha de referência. A variável e representa o erro de orientação, que é a entrada do controlador fuzzy. Este controlador gera como saída a velocidade angular necessária para manter o erro de regime nulo.

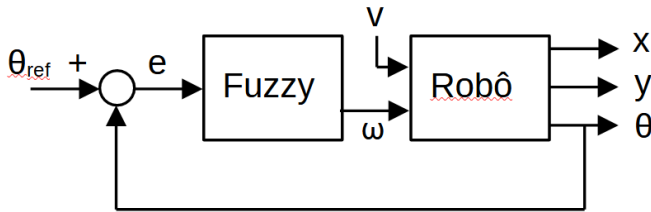


Figure 2: Diagrama de Blocos do Sistema

5.1 Estratégia de Controle

O controle de orientação não pode ser realizado de forma independente do controle de movimento forward [7], pois a composição das velocidades das rodas direita e esquerda resultam em velocidade linear e angular.

Para facilitar o desenvolvimento do controlador fuzzy, a velocidade linear foi mantida constante e a velocidade angular é obtida através do conjunto de regras fuzzy definidas. Desse modo, tem-se um controlador SISO (*Single Input - Single Output*).

A Figura 3 mostra as funções de pertinência para a entrada de erros do sistema (diferença entre θ_r e θ). Essa entrada corresponde ao erro de orientação, cujo valor está normalizado correspondente ao intervalo $[-1,1]$.

A Figura 4 apresenta as funções de pertinência de saída do controlador fuzzy. Foi utilizado como método de defuzzificação o centróide da área das funções de pertinência.

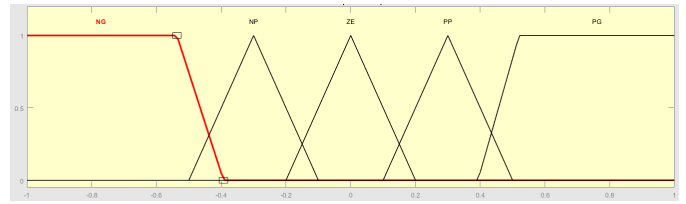


Figure 3: Funções de Pertinência de Entrada

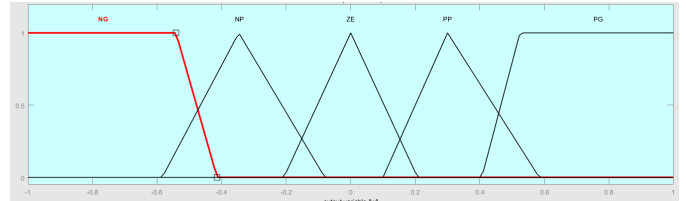


Figure 4: Funções de Pertinência de Saída

A Figura 5 apresenta a superfície de decisão do sistema fuzzy. Para valores no intervalo $[-0.5 \ 0.5]$, a saída vai apresentar um comportamento quase linear. Fora deste intervalo o controlador fornece valores máximo e mínimo de velocidade angular. Estes valores serão escalonados para velocidades angulares a serem aplicados ao robô móvel.

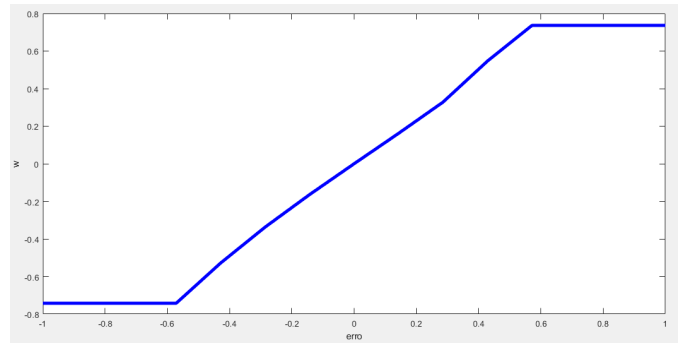


Figure 5: Superfície de decisão fuzzy

A geração de trajetórias usadas para testar o desempenho do controlador é realizada através de uma sequência de degraus unitários em instantes de tempo diferentes.

A Figura 6 mostra a geração de uma trajetória retangular usando mudanças de direção do tipo degrau.

6. RESULTADOS

Para testar o desempenho do sistema de controle fuzzy, foi utilizado a integral do erro absoluto (IAE) como índice de desempenho, conforme a Equação 5.

$$IAE = \int |e(\tau)| d\tau \quad (5)$$

A Figura 7 mostra a saída obtida para uma trajetória poligonal de 16 lados (16-látero). A mudança de direção corresponde a um ângulo de 22.5° .

Para uma trajetória em forma de 'S', a saída é mostrada na Figura 8.

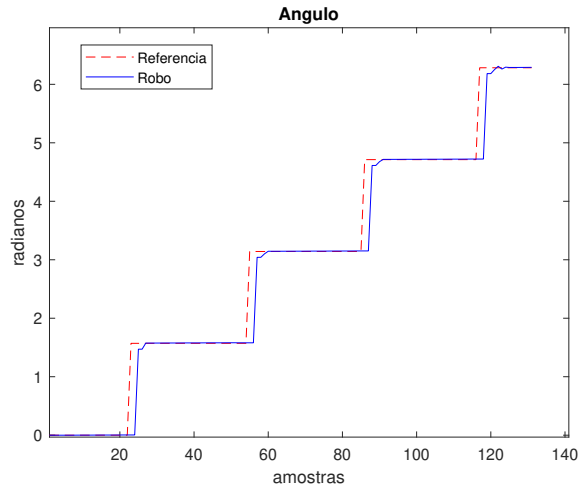


Figure 6: Trajetória gerada em degraus

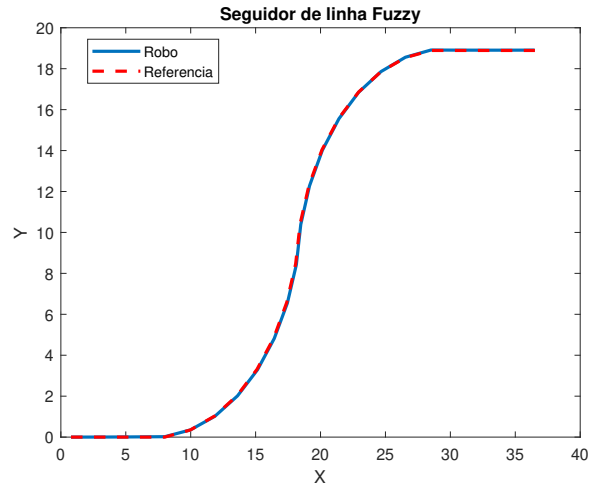


Figure 8: Trajeto em S

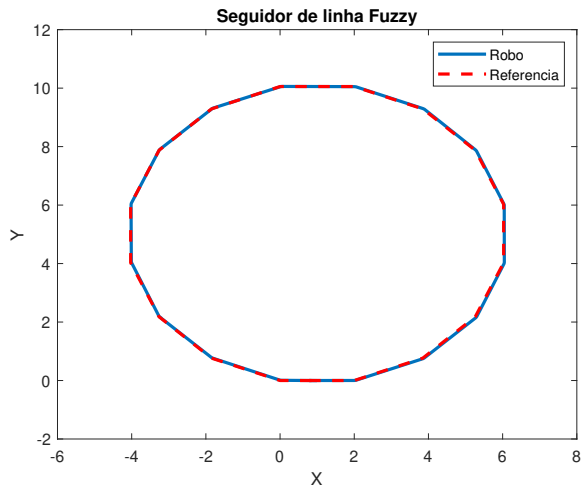


Figure 7: Trajeto circular

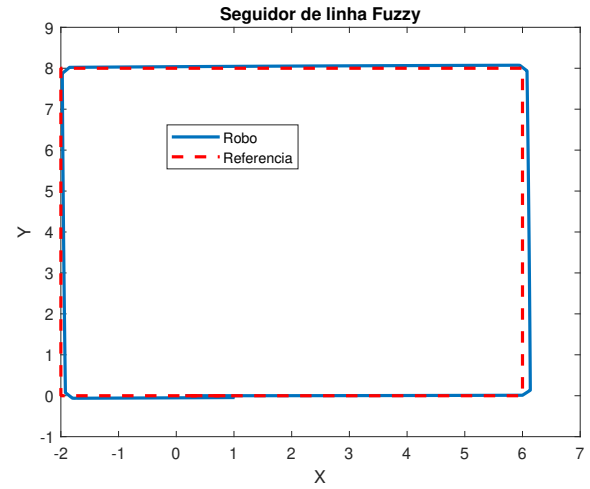


Figure 9: Trajeto retangular

A Figura 9 mostra o resultado para uma trajetória em forma retangular. Neste tipo de trajetória, a mudança de degrau de 90° exige velocidades angulares muito elevadas, o que corresponde ao IAE mais alto. Como pode ser observado, a trajetória em forma de 'S' é a que possui menor IAE, devido às menores variações de direção.

A Tabela 1 apresenta resumidamente os resultados obtidos de IAE para cada uma das trajetórias usadas nos testes. O cálculo das velocidades angulares das rodas direita e esquerda pode ser obtido através da cinemática inversa. Estes valores devem ser usados no caso de implementação prática num robô real, onde o controlador fuzzy será usado para o controle de seguimento de trajetória e devem ser implementados controladores embarcados para as velocidades das rodas esquerda e direita de forma independente.

$$v_d = v + \frac{\omega L}{2} \quad (6)$$

$$v_d = v - \frac{\omega L}{2} \quad (7)$$

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o controle de trajetória de robôs móveis para seguimento de linha, implementado através de lógica nebulosa. Para a simplificação do projeto de controle, foi mantida a velocidade linear fixa e utilizada como entrada de controle a velocidade angular.

O projeto trata portanto de um controlador de orientação. Este trabalho tem objetivo de ser utilizado como ferramenta didática em aulas de robótica móvel e inteligência computacional, para mostrar o desenvolvimento de controladores nebulosos de trajetória de robôs móveis.

Os resultados de simulação computacional mostraram um índice IAE aceitável, como por ser visto de forma gráfica. O sistema foi desenvolvido usando a ferramenta simulink, de modo a torná-lo mais intuitivo, facilitando o entendimento

Table 1: Resultados do Seguimento de Trajetórias

Trajetória	IAE	Erro máximo
Circular	3,5486	0.4013
Retangular	3,5487	1.5778
Em S	1,9358	0.1829

por parte dos alunos.

Como uma segunda fase, a implementação prática será sendo desenvolvida e será aplicada a um robô móvel real para seguir linha. Nesta fase, o controlador fuzzy ficará embarcado e será implementado usando a biblioteca *effl* para arduino. Serão também implementados dois controladores de velocidade para os motores de tração usando a estratégia PI. Espera-se melhorar o seguimento de trajetórias que possam ser usadas em futuras competições de robótica.

8 REFERENCES

- [1] F. G. Alves, G. F. Paim, L. A. Leston, and M. Esposito. Robô seguidor de linha com controlador pid. In *XXII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas*, 2013.
- [2] V. G. R. Caitité, D. M. G. dos Santos, I. C. Gregorio, W. B. da Silva, and V. F. Mendes. Robô seguidor de linha empregando controle pid. In *Mostra Nacional de Robótica*, 2018.
- [3] P. Corke. *Robotics, Vision and Control*. Springer, Brisbane, 2017.
- [4] R. G. da Rocha, E. F. de Moraes, and J. A. Bento. Robô móvel autônomo segue faixa. In *3o Congresso Internacional de Pesquisa, Ensino e Extensão*, 2013.
- [5] T. da Silva Oliveira and V. L. da Silva. Controlador pid ajustado por meio de algoritmo genético aplicado a um robô móvel seguidor de linha. In *8o Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP*, 2017.
- [6] F. Fahimi. *Autonomous Robots Modeling, Path Planning, and Control*. Springer, Edmonton, 2009.
- [7] G. Klancar, A. Zdesar, S. Blazic, and I. Skrjanc. *Wheeled Mobile Robotics*. Springer, Ljubljana, 2017.
- [8] C. M. Santos, G. C. Julião, L. M. de Jesus, S. G. C. Oliveira, V. G. S. F. dos Santos, and A. I. A. Cunha. Estudo comparativo das disposições de sensores em robôs seguidores de linha realizado em ambiente de simulação. In *Anais Mostra Nacional de Robótica*, pages 01–06. MNR, Outubro 2020.
- [9] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, Cambridge, 2004.
- [10] S. G. Tzafestas. *Introduction to Mobile Robot Control*. Elsevier, Athens, 2014.
- [11] N. A. Virmond, H. B. Fragoso, J. C. B. Dalcin, R. P. M. Marin, and V. C. de Carlos. Projeto de robô seguidor de linha. *Revista Foco Interdisciplinary Studies*, 16(1):01–13, Janeiro 2023.