

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE BORTOLON

**Controle Lateral de um Veículo Guiado
Automaticamente**

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE BORTOLON

Controle Lateral de um Veículo Guiado Automaticamente

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Bortolon, Henrique
Controle Lateral de um Veículo Guiado
Automaticamente / Henrique Bortolon. -- 2018.
80 f.
Orientador: Jeferson Vieira Flores.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2018.

1. Veículo Guiado Automaticamente. 2. Controlador
Fuzzy. 3. Controlador PID. 4. Controle Lateral. I.
Vieira Flores, Jeferson, orient. II. Título.

HENRIQUE BORTOLON

Controle Lateral de um Veículo Guiado Automaticamente

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores
Orientador - UFRGS

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho
Chefe do Departamento de Engenharia
Elétrica (DELET) - UFRGS

Aprovado em 04 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores
UFRGS

Prof^a. Dr^a. Lucíola Campestrini
UFRGS

Prof. Dr. Ivan Müller
UFRGS

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha família, em especial aos meus pais, que me apoiaram em todas as minhas escolhas, fornecendo suporte financeiro e emocional. Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores, que me auxiliou com muita dedicação na construção deste trabalho, bem como, foi responsável por despertar meu interesse na área de controle ao longo do curso. Por fim, agradeço a empresa Spark pela disponibilização do AGV para os testes e também aos funcionários, que auxiliaram na realização dos ensaios experimentais.

Resumo

Os veículos guiados automaticamente (AGVs) são utilizados na automação de processos em intralogística, onde podem ser empregados em linhas de produção e centros de distribuição. O controle lateral em tais sistemas é indispensável, pois permite que o veículo navegue automaticamente em relação a um dado referencial, que no caso em questão é realizado por uma fita colorida alocada no chão. Os AGVs são caracterizados pelas não linearidades e complexidade de sua dinâmica, tornando a modelagem matemática desafiadora, visto a ocorrência de variações de carga e velocidade em uma operação usual do veículo. Tendo em vista estes aspectos, o objetivo deste trabalho é implementar controladores laterais através das metodologias *Fuzzy* e PID, com base em dados experimentais e no conhecimento heurístico do processo. Desta forma foi implementada a topologia *Fuzzy PD*, a qual se utiliza de regras e funções de pertinência, resultando em um mapeamento estático não linear entre as entradas e a saída. Diferentemente, para o controlador PD, foi realizada a identificação experimental da planta com o auxílio do software MATLAB®, possibilitando o projeto via Lugar Geométrico das Raízes (LGR). Os controladores foram implementados em ambiente digital embarcados no AGV, permitindo a aquisição de dados via comunicação serial. Portanto, foram realizados ensaios sob a variação de carga e velocidade, e também ensaios ao degrau e à perturbação oscilante. De modo geral, através da comparação dos resultados pôde-se concluir que o controlador *Fuzzy PD* se mostrou mais adequado em relação ao controlador PD, principalmente em termos de amplitude do sinal de controle e robustez às perturbações relacionadas com a fita de referência.

Palavras-chave: Veículo Guiado Automaticamente , Controle Lateral, Controlador *Fuzzy*, Controlador PID.

Abstract

Automatically guided vehicles (AGVs) are used in the automation of processes in intralogistics, where they can be used in production lines and distribution centers. The lateral control in such systems is indispensable since it allows the vehicle to automatically navigate in relation to a given reference, which in the case in question is carried out by a colored tape allocated to the ground. The AGVs are characterized by nonlinearity and complexity of their dynamics, making mathematical modeling challenging, given the occurrence of load and speed variations in a typical vehicle operation. In view of these aspects, the objective of this work is to implement lateral controllers through the *Fuzzy* and PID methodologies, based on experimental data and the heuristic knowledge of the process. In this way, the topology *Fuzzy PD* was implemented, which uses rules and membership functions that result in a non-linear static mapping between inputs and output. Differently, for the PD controller, the experimental identification of the plant was carried out with the aid of the software MATLAB[®], enabling the design by Root Locus. The controllers were implemented in a digital environment embedded in the AGV, allowing the acquisition of data through serial communication. Therefore, tests were carried out under load and speed variation, as well as step and oscillating disturbance tests. In general, through the comparison of the results it was possible to conclude that the *Fuzzy PD* controller was more suitable in relation to the PD controller, mainly in terms of control signal amplitude and robustness to disturbances related to a reference tape.

Keywords: Automated Guided Vehicle, Lateral Control, *Fuzzy* controller, PID controller.

Lista de Figuras

Figura 1 – Veículo de movimentação diferencial.	16
Figura 2 – Estrutura do AGV e referenciais para a modelagem.	17
Figura 3 – Configuração do controlador PID no domínio s	20
Figura 4 – Comparação entre funções de pertinência clássica e <i>Fuzzy</i>	23
Figura 5 – Operações de União e Interseção entre os conjuntos <i>Fuzzy</i>	24
Figura 6 – Diagrama de blocos de um controlador <i>Fuzzy</i>	25
Figura 7 – Exemplo de fuzzificação das entradas.	25
Figura 8 – Diagrama de blocos do sistema de inferência <i>Fuzzy</i>	27
Figura 9 – Sistema de inferência Mamdani utilizando MIN e MAX.	28
Figura 10 – Exemplo de uma defuzzificação GOG e MOM.	29
Figura 11 – Diagrama de bloco de um sistema de controle <i>Fuzzy</i>	30
Figura 12 – Diagrama de bloco de um sistema de controle <i>Fuzzy</i> PD.	30
Figura 13 – Diagrama de bloco de um sistema de controle <i>Fuzzy</i> PI.	30
Figura 14 – Visão inferior frontal do AGV, componentes constituintes.	32
Figura 15 – Imagem do AGV utilizado.	33
Figura 16 – Dimensões do AGV.	33
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema de controle do AGV.	34
Figura 18 – Diagrama de blocos para o ensaio.	36
Figura 19 – Dados adquiridos para a identificação da planta.	37
Figura 20 – Aproximação de dados utilizando a função t_{fest}	38
Figura 21 – LGR de $1 + \bar{K} G(s) = 0$	39
Figura 22 – LGR de $1 + \bar{K} L(s) = 0$, (LGR completo e com zoom , respectivamente).	39
Figura 23 – Posição dos polos no LGR em função do ganho escolhido.	40
Figura 24 – Resposta ao degrau unitário do sistema controlado.	41
Figura 25 – Diagrama de blocos do controlador <i>Fuzzy</i>	42
Figura 26 – Funções de pertinência, modelo para os cinco casos de equacionamento.	43
Figura 27 – Funções de pertinência para a entrada "Erro".	45
Figura 28 – Funções de pertinência para a entrada "D-erro".	46
Figura 29 – Funções de pertinência para a saída.	47
Figura 30 – Dimensões para o cálculo da área.	48
Figura 31 – Exemplo de saída para a <i>defuzzificação</i> do tipo centroide.	48
Figura 32 – Quadro de regras <i>Fuzzy</i>	49
Figura 33 – Fluxograma do programa implementado.	50
Figura 34 – Superfície que representa o mapeamento estático do sistema <i>Fuzzy</i>	53
Figura 35 – Configuração do circuito para os ensaios.	55
Figura 36 – Distância em relação à fita para diferentes valores de $gd(y(t))$	57

Figura 37 – Derivada do erro para diferentes valores de gd ($D - erro(t)$)	58
Figura 38 – Distância em relação a fita ($y(t)$) para $gd = 50 @ 160Hz$ e $gd = 30 @ 250Hz$	58
Figura 39 – Derivada do erro ($D - erro(t)$) para $gd = 50 @ 160Hz$ e $gd = 30 @ 250Hz$	59
Figura 40 – Resposta ao degrau para o controlador <i>Fuzzy</i>	60
Figura 41 – Sinal de controle para a resposta ao degrau, controlador <i>Fuzzy</i>	60
Figura 42 – Comparação de desempenho em função da velocidade, sinal $y(t)$	61
Figura 43 – Comparação de desempenho em função da velocidade, sinal de controle $u_c(t)$	62
Figura 44 – Comparação de desempenho em função da carga, sinal $y(t)$	63
Figura 45 – Comparação de desempenho em função da carga, sinal de controle $u_c(t)$	63
Figura 46 – Funções de pertinência modificadas para a entrada "erro" e inalteradas para "D-erro".	64
Figura 47 – Sinais $y(t)$ e $u_c(t)$ para entrada "erro" modificada.	65
Figura 48 – Funções de pertinência modificadas para as entradas "erro" e "D-erro".	65
Figura 49 – Sinais $y(t)$ e $u_c(t)$ para as entradas modificadas "erro" e "D-erro".	66
Figura 50 – Resposta ao degrau para o controlador PID.	67
Figura 51 – Sinal de controle para a resposta ao degrau.	67
Figura 52 – Comparação de desempenho em função da velocidade, sinal $y(t)$	68
Figura 53 – Comparação de desempenho em função da velocidade, sinal de controle $u_c(t)$	68
Figura 54 – Comparação de desempenho em função da carga, sinal $y(t)$	69
Figura 55 – Comparação de desempenho em função da carga, sinal de controle $u_c(t)$	69
Figura 56 – Comparação das respostas ao degrau, controladores <i>Fuzzy</i> e PD.	70
Figura 57 – Comparação dos sinais de controle para as respostas ao degrau.	70
Figura 58 – Comparação de desempenho dos controladores em função da velocidade, sinal $y(t)$	71
Figura 59 – Comparação de desempenho dos controladores em função da velocidade, sinal de controle $u_c(t)$	72
Figura 60 – Comparação de desempenho dos controladores em função da carga, sinal $y(t)$	73
Figura 61 – Comparação de desempenho dos controladores em função da carga, sinal de controle $u_c(t)$	73
Figura 62 – Comparação de desempenho para a perturbação oscilante, sinal $y(t)$	74
Figura 63 – Comparação de desempenho para a perturbação oscilante, sinal de controle $u_c(t)$	75

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACI	<i>Alternating Current Induction motor.</i>
AGV	<i>Automated Guided Vehicle.</i>
BLDC	<i>Brushless Direct Current motor.</i>
GLONASS	<i>Global Navigation Satellite System.</i>
CM	Comando de Motor.
CTT	<i>Computed Torque Technique, (Técnica de Computação de Torque).</i>
GPS	<i>Global Positioning System.</i>
ICC	<i>Instantaneous Center of Curvature, (Centro Instantâneo de Curvatura).</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.</i>
LGR	Lugar Geométrico das Raízes.
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo.
PMAC	<i>Permanent Magnet Alternating Current motor.</i>
PMDC	<i>Permanent Magnet brushed Direct Current motor.</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification.</i>
SLAM	<i>Simultaneous Localization And Mapping.</i>
SMC	<i>Sliding Mode Controller, (Controlador de modos deslizantes).</i>
TISO	<i>Two-Input Single-Output.</i>
TITO	<i>Two-Input Two-Output.</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	A Cinemática do AGV	15
2.1.1	Veículos de movimentação diferencial	15
2.1.2	Modelo cinemático	17
2.2	Controle Proporcional Integral Derivativo	19
2.2.1	Controlador PID no domínio contínuo	20
2.2.2	Controlador PID no domínio discreto	21
2.3	Sistema Fuzzy	22
2.3.1	Conjuntos <i>Fuzzy</i> e Lógica <i>Fuzzy</i>	22
2.3.2	Controlador <i>Fuzzy</i>	24
2.3.2.1	Fuzzificação	25
2.3.2.2	Regras <i>Fuzzy</i>	26
2.3.2.3	Inferência	26
2.3.2.4	Modelo de inferência <i>Fuzzy</i> Mamdani	27
2.3.2.5	Defuzzificação	28
2.3.3	Sistemas de controle com controladores Fuzzy	29
2.4	Resumo do capítulo	31
3	METODOLOGIA	32
3.1	Descrição das características mecânicas do veículo	32
3.2	Funcionamento do sistema automático	34
3.3	Projeto do controlador PID	36
3.3.1	Implementação e ajuste de parâmetros	41
3.4	Projeto do Controlador Fuzzy	42
3.4.1	Fuzzyficação	42
3.4.1.1	Funções de pertinência para a <i>fuzzyficação</i>	43
3.4.1.2	Projeto do bloco de <i>fuzzyficação</i>	44
3.4.2	<i>Defuzzyficação</i>	46
3.4.3	Regras e Inferência	49
3.4.4	Implementação	50
3.4.5	Validação do controlador implementado	52
3.4.6	Ajuste dos parâmetros de ganho	53
3.5	Resumo do Capítulo	54

4	RESULTADOS	55
4.1	Metodologia experimental	55
4.1.1	Ambiente de testes	55
4.1.2	Ensaio ao degrau	56
4.1.3	Ensaio com variações de carga e velocidade	56
4.1.4	Ensaio à perturbação oscilante	56
4.2	Resultados para o controlador <i>Fuzzy</i>	57
4.2.1	Ensaio para o ajuste do ganho <i>gd</i>	57
4.2.2	Ensaio ao degrau	60
4.2.3	Ensaio com variação de velocidade	61
4.2.4	Ensaio com variação de carga	62
4.2.5	Ensaio com diferentes configurações de funções de pertinência	64
4.3	Resultados para o controlador PD	66
4.3.1	Ensaio ao degrau	66
4.3.2	Ensaio com variação de velocidade	67
4.3.3	Ensaio com variação de carga	69
4.4	Comparação entre os controladores PD e <i>Fuzzy</i>	70
4.4.1	Comparação para o ensaio ao degrau	70
4.4.2	Comparação para a variação de velocidade	71
4.4.3	Comparação para a variação de carga	72
4.4.4	Ensaio com perturbação	74
4.5	Resumo do capítulo	75
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 Introdução

Com o avanço da computação, microeletrônica, controle e automação, os veículos guiados automaticamente (AGVs) vem ganhando espaço no cenário tecnológico mundial. Atualmente, os AGVs são componentes chave no ramo da intralogística. Tais sistemas são aplicados na automação de processos, onde há a necessidade de movimentação de materiais dentro de indústrias, centros de distribuição e estabelecimentos comerciais. Estes veículos foram introduzidos inicialmente nos EUA e posteriormente na Europa, onde ganharam grande relevância e tornaram-se referência no mercado mundial (ULLRICH, 2015) .

Com a evolução dos AGVs ao longo das décadas houve o desenvolvimento de várias topologias para determinadas aplicações, como por exemplo: tipo garfo, que realiza a elevação e movimentação de cargas em prateleiras, assim como uma empilhadeira; tipo trator, os quais realizam o deslocamento de carga através de reboques; tipo carregador, que realiza o deslocamento horizontal e vertical com a carga carregada na parte superior do AGV (ULLRICH, 2015).

Os AGVs também podem possuir diversos tipos de sistemas de navegação, os principais são listados na sequência. Método por seguimento de fita: uma fita colorida ou magnética é fixada no chão; pode delimitar caminhos com vários laços e bifurcações; o AGV deve estar provido de sensores magnéticos ou câmeras. Navegação por marcadores reflexivos: este método consiste em utilizar marcadores fixados nas paredes e prateleiras do ambiente, onde o AGV deve estar provido de um sistema emissor e receptor LASER que realiza a medição de distância dos marcadores, possibilitando a localização do mesmo no ambiente, muito utilizado em AGVs do tipo garfo. Navegação matricial: códigos equidistantes são fixados no chão na forma de uma matriz, com um leitor (câmera, RFID) o AGV realiza a leitura dos códigos; geralmente há grandes quantidades de AGVs comandados por um mestre. Navegação por SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*): este método realiza a varredura do ambiente, medindo as distâncias por feixes de LASER (qualquer superfície, não há refletores), desta forma, um mapa é gerado e o caminho pode ser delimitado virtualmente no AGV. Navegação via rádio: este método consistem em utilizar ondas eletromagnéticas para localizar o AGV, possibilitando o posicionamento no ambiente, exemplos são os sistemas GPS e GLONASS. Todos os exemplos citados anteriormente podem ser encontrados em (ULLRICH, 2015).

Devido a necessidade de elevados níveis de eficiência e potência, conciliados em pequenos volumes, o sistema de tração em veículos de pequeno e médio porte, geralmente consiste em motores elétricos com ímãs permanentes, com preferência para motores de corrente contínua sem escovas (BLDC) e motores de corrente contínua com escovas (PMDC).

Para veículos de grande porte, geralmente são utilizados motores de corrente alternada com ímãs permanentes (PMAC) e motores de indução (ACI). A faixa de tensão pode variar dos 24 até 96 Volts (ULLRICH, 2015). Sendo assim, o fornecimento de energia dos AGVs pode ser realizado por: baterias, supercapacitores, transferência indutiva (realizado por bobinas) e sistemas híbridos constituídos da combinação das três metodologias mencionadas anteriormente.

Há várias complexidades envolvidas no projeto de sistemas de controle para AGVs, com destaque para as não linearidades e incertezas inerentes ao sistema, tornando assim o seu controle um problema desafiador (WIJESOMA; KODAGODA, 2000). As não linearidades, geralmente estão associadas com as características mecânicas do AGV, tais como folgas em engrenagens e variações da superfície de locomoção (ondulações, atrito) (WIJESOMA; KODAGODA, 2000). Vale salientar que a carga pode variar de forma significativa em um AGV, bem como o atrito mecânico, desta forma dificultado a modelagem matemática do sistema.

A implementação de controladores com lógica *Fuzzy* é largamente empregada em trabalhos visando o controle de AVGs, com destaque para topologias *Fuzzy PD* e *Fuzzy PI* (Proporcional, Integral), assim como pode ser visto em: (KODAGODA; WIJESOMA; TEOH, 2002), (HUANG; HUANG, 2010), (OLIVARES-MENDEZ *et al.*, 2011), (DIANYONG; HUI, 2003), (LI *et al.*, 2016) e (ZHANG; YUAN; MEI, 2006). A grande motivação para a utilização de controladores *Fuzzy* reside na facilidade de projeto aliado a bons resultados obtidos, mostrando boa robustez aos parâmetros incertos da planta. Esta conclusão é obtida quando o mesmo é comparado com outras metodologias de controle, assim como pode ser visto em: (KODAGODA; WIJESOMA; TEOH, 2000) e (WIJESOMA; KODAGODA, 2000). Outros trabalhos fazem o uso de métodos não lineares clássicos como o SMC (*Sliding Mode Control*), porém, requerem uma modelagem dinâmica confiável do sistema (SOYSAL, 2014). A lógica *Fuzzy* também é aplicada em conjunto com técnica SMC, como pode ser visto em (KEIGHOBADI; MOHAMADI, 2011), (CHEN; LI; YEH, 2009) e (HWANG; YANG; HUNG, 2017). Na área de controle inteligente, técnicas com sistemas *Neuro-Fuzzy* são abordadas, as quais reúnem características de redes neurais com a lógica *Fuzzy*, onde dados experimentais são utilizados para realizar a aprendizagem do controlador, (SU; CHEN; SU, 2010), (KEIGHOBADI; FAZELI; SHAHIDI, 2013) , (RUSU *et al.*, 2003).

A planta que será abordada neste trabalho consiste em um AGV de quatro rodas, com eixo dianteiro móvel e traseiro fixo. A rotação da parte frontal é realizada através da diferença de velocidade entre as rodas dianteiras, onde dois motores elétricos estão acoplados. O AGV é do tipo carregador, e se utiliza de fitas magnéticas ou coloridas para a navegação. Tem aplicação em ambientes fechados, em linhas de produção ou em centros de distribuição. O principal objetivo deste trabalho é realizar o projeto de um

controlador estável, que garanta o seguimento de referência para o deslocamento lateral (seguimento da fita), apresentando relativa robustez a variações de carga e velocidade ocorridas em uma situação real de operação. Além disso, o controlador desenvolvido deverá ser implementado digitalmente em microprocessador embarcado no AGV. Ensaios experimentais serão realizados a fim de validar o sistema projetado. Como consequência, o AGV agregará eficiência e confiabilidade nas longas jornadas de serviço, realizando o transporte de cargas em linhas de produção ou distribuição.

Perante ao que foi proposto nesta introdução, são listados os objetivos:

Objetivo geral: Realizar o projeto de controladores laterais utilizando as metodologias *Fuzzy* e PID.

Objetivos específicos:

- Modelar o sistema mecânico do AGV em questão, considerando o modelo cinemático e identificar um modelo matemático para fins de controle.
- Implementar o controlador em sistema digital embarcado no AGV.
- Realizar testes em um AGV de escala industrial, com o objetivo de avaliar o controlador projetado em situações reais de operação.
- Realizar comparações entre as metodologias empregadas, elencando vantagens e desvantagens.

Referências Bibliográficas

- BAZANELLA, A. S.; GOMES DA SILVA JR., J. M. *Sistemas de controle: Princípios e métodos de projeto*. [S.l.]: UFRGS, 2005. Citado na página 20.
- CHEN, C.-Y.; LI, T.-H. S.; YEH, Y.-C. Ep-based kinematic control and adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control for wheeled mobile robots. *Information Sciences*, Elsevier, v. 179, n. 1, p. 180–195, 2009. Citado na página 13.
- CORKE, P. I.; RIDLEY, P. Steering kinematics for a center-articulated mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 215–218, 2001. Citado na página 19.
- DHAOUADI, R.; HATAB, A. A. Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using lagrange and newton-euler methodologies: A unified framework. *Advances in robotics and automation*, v. 2, n. 2, 2013. Citado na página 16.
- DIANYONG, Y.; HUI, X. Application of fuzzy control method to agv. In: IEEE. *Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, 2003. Proceedings. 2003 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 768–772. Citado nas páginas 13 e 49.
- HUANG, M.; HUANG, D. Embedded fuzzy logic control of agv in path tracking. In: IEEE. *Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 682–686. Citado nas páginas 13, 21 e 27.
- HWANG, C.-L.; YANG, C.-C.; HUNG, J. Y. Path tracking of an automatic ground vehicle with different payloads by hierarchical improved fuzzy dynamic sliding-mode control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, IEEE, 2017. Citado na página 13.
- JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E. *Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence*. prentice hall, 1997. Citado nas páginas 23, 26, 27 e 28.
- KEIGHOBADI, J.; FAZELI, K. A.; SHAHIDI, M. S. Self-constructing neural network modeling and control of an agv. *Positioning*, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 2, p. 160, 2013. Citado na página 13.
- KEIGHOBADI, J.; MOHAMADI, Y. Fuzzy sliding mode control of non-holonomic wheeled mobile robot. In: IEEE. *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2011 IEEE 9th International Symposium on*. [S.l.], 2011. p. 273–278. Citado na página 13.
- KING, P. J.; MAMDANI, E. H. The application of fuzzy control systems to industrial processes. *Automatica*, Elsevier, v. 13, n. 3, p. 235–242, 1977. Citado na página 22.
- KODAGODA, K.; WIJESOMA, W.; TEOH, E. Stable fuzzy state space controllers for an agv. In: IEEE. *Neural Networks for Signal Processing X, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE Signal Processing Society Workshop*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 672–681. Citado nas páginas 13 e 22.

- KODAGODA, K.; WIJESOMA, W. S.; TEOH, E. K. Fuzzy speed and steering control of an agv. *IEEE Transactions on control systems technology*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 112–120, 2002. Citado nas páginas 13, 21, 22, 27, 30, 44 e 49.
- LI, X. *et al.* A fuzzy pid controller applied in agv control system. In: IEEE. *Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 555–560. Citado na página 13.
- MAMDANI, E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. In: IEEE COMPUTER SOCIETY PRESS. *Proceedings of the sixth international symposium on Multiple-valued logic*. [S.l.], 1976. p. 196–202. Citado na página 22.
- MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, Elsevier, v. 7, n. 1, p. 1–13, 1975. Citado nas páginas 24 e 28.
- MOZELLI, L. Controle fuzzy para sistemas takagi-sugeno: Condições aprimoradas e aplicações. *Diss. de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais*, 2008. Citado nas páginas 22, 26 e 27.
- OGATA, K.; SEVERO, B. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Prentice Hall do Brasil, 1998. Citado na página 21.
- OLIVARES-MENDEZ, M. A. *et al.* A visual agv-urban car using fuzzy control. In: IEEE. *Automation, Robotics and Applications (ICARA), 2011 5th International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 145–150. Citado na página 13.
- PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S.; REINFRANK, M. *Fuzzy control*. [S.l.]: Addison-wesley Reading, MA, 1998. v. 20. Citado nas páginas 24, 25, 29 e 30.
- RIBEIRO, M. I.; LIMA, P. Kinematics models of mobile robots. *Instituto de Sistemas e Robotica*, p. 1000–1049, 2002. Citado na página 17.
- RUSU, P. *et al.* Behavior-based neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 52, n. 4, p. 1335–1340, 2003. Citado na página 13.
- SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. *Introduction to autonomous mobile robots*. [S.l.]: MIT press, 2011. Citado na página 15.
- SOYSAL, B. Real-time control of an automated guided vehicle using a continuous mode of sliding mode control. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, The Scientific and Technological Research Council of Turkey, v. 22, n. 5, p. 1298–1306, 2014. Citado na página 13.
- SU, K.-H.; CHEN, Y.-Y.; SU, S.-F. Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 73, n. 13, p. 2478–2488, 2010. Citado na página 13.
- TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, IEEE, n. 1, p. 116–132, 1985. Citado na página 24.

TZAFESTAS, S. G. *Introduction to mobile robot control*. [S.l.]: Elsevier, 2013. Citado nas páginas 15 e 17.

ULLRICH. Automated guided vehicle systems. *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg*, Springer, 2015. Citado nas páginas 12 e 13.

WIJESOMA, W.; KODAGODA, K.; TEOH, E. Uncoupled fuzzy controller for longitudinal and lateral control of a golf car-like agv. In: IEEE. *Intelligent Transportation Systems, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/IEEEJ/JSAI International Conference on*. [S.l.], 1999. p. 142–147. Citado na página 22.

WIJESOMA, W. S.; KODAGODA, K. Design of stable fuzzy controllers for an agv. In: IEEE. *Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 1044–1049. Citado nas páginas 13 e 22.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, p. 338–353, 1965. Citado nas páginas 22 e 23.

ZHANG, H.; YUAN, K.; MEI, S. Fuzzy logic cross-coupling control of wheeled mobile robots. In: IEEE. *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. p. 740–744. Citado na página 13.