

CAPÍTULO 6

PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA COM OBSTÁCULOS PARA MANIPULADORES ROBÓTICOS COLABORATIVOS, INSTANCIADO EM EDUCAÇÃO UNIVERSITÁRIA

Data de aceite: 26/08/2024

Márcio Mendonça

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná ; PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica PP/
CP, Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

Fabio Rodrigo Milanez

UniSENAI PR Campus Londrina
Londrina-PR
<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Francisco de Assis Scannavino Junior

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná Departamento Acadêmico de
Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio - Pr
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

Henrique Cavalieri Agonilha

Graduando na Universidade Filadélfia
(Unifil), Londrina - PR
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

Angelo Feracin Neto

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Departamento Acadêmico de
Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/0580089660443472>

Marcio Jacometti

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná , Departamento acadêmico das
ciências humanas e sociais aplicadas
(DACHS), Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/8509336134084374>

Vicente de Lima Gongora

UniSENAI PR Campus Londrina
Londrina – PR
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

Bruno Oliveira Rosa

Acadêmico - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná Departamento
Acadêmico de Engenharia Elétrica
(DAELE)
<http://lattes.cnpq.br/5010826876808074>

Marcos Antônio de Matos Laia

Universidade Federal de São Joao Del Rei
Departamento De Ciência Da Computação
– UFSJ
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

Claudiane Olímpio da Silva

Escola Municipal Alvorada- Cambé - Pr
<http://lattes.cnpq.br/1224239123093049>

Roseli Lopes Fernandes de Almeida

Escola Municipal Alvorada- Cambé - Pr
<http://lattes.cnpq.br/8184743559589424>

José Augusto Fabri

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Computação (DACOM)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/1834856723867705>

Emerson Ravazzi Pires da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento de Engenharia Elétrica Daele
Cornelio Procopio
<http://lattes.cnpq.br/0797649979829091>

Marcos Banheti Rabello Vallim

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/2326190172340055>

Rodrigo Rodrigues Sumar

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/1461760661483683>

Mateus Henrique De Oliveira Louro

Acadêmico - Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de
Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/8431748067658674>

Roberto Bondarik

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento de Ciências Humanas e
Sociais (DACHS)– Cornélio Procópio - Pr
<http://lattes.cnpq.br/6263028023417758>

RESUMO: Neste trabalho, o objetivo é apresentar redes neurais artificiais (RNAs) para resolver a cinemática inversa de um manipulador robótico de 2 graus de liberdade (DOF). Além disso, foi incluída uma árvore de decisão para aumentar a segurança do braço robótico em movimento quando um objeto aparece em sua trajetória. A árvore de decisão oferece duas alternativas: desviar do obstáculo acrescentando um ponto ou, caso não seja possível, parar e esperar a desobstrução, similar ao comportamento de robôs colaborativos que trabalham ao lado de seres humanos. O planejamento de trajetórias utilizou um polinômio de quinto grau, que se mostrou uma solução plausível. Os resultados obtidos foram promissores, indicando que a combinação de RNA com uma estratégia de segurança foi mais robusta. O trabalho se encerra com uma conclusão e sugestões para futuros estudos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Computacionais Inteligentes, Robótica Cognitiva, Robótica, Educação Universitária.

TRAJECTORY PLANNING WITH OBSTACLES FOR COLLABORATIVE ROBOTIC MANIPULATORS, INSTANCED IN UNIVERSITY EDUCATION

ABSTRACT: This work aims to present artificial neural networks (ANNs) to solve the inverse kinematics of a 2 degrees of freedom (DOF) robotic manipulator. Furthermore, a decision tree included to increase the safety of the moving robotic arm when an object appears in its trajectory. The decision tree offers two alternatives: avoid the obstacle by adding a point or, if this is not possible, stop and wait for cleared, like the behaviour of collaborative robots that work alongside humans. Trajectory planning used a fifth-degree polynomial, which proved to be a plausible solution. The results were promising, indicating that combining RNA with a security strategy was more robust. The work ends with a conclusion and suggestions for future studies.

KEYWORDS: Intelligent Computational Systems, Cognitive Robotics, Robotics. University Education.

INTRODUÇÃO

A robótica, um campo profundamente fascinante, tem se tornado uma força transformadora em diversos setores, incluindo a produção industrial, exploração espacial e medicina entre outras áreas de pesquisa. Dentro deste domínio expansivo, a pesquisa sobre manipuladores robóticos destaca tópicos cruciais, notadamente o planejamento de trajetória — um processo meticuloso que define o caminho ideal para um robô se mover de um ponto inicial até seu destino, conforme detalhado por SOU et al. (2006).

Verdadeiras mudanças no comportamento global têm ocorrido com o surgimento dos *chatbots*, como por exemplo, o *ChatGpt* que surgiu a pouco mais de 2 anos e tem dividido a comunidade científica em Inteligência Artificial Fraca e Forte, ao menos um consenso de que estamos nos aproximando da I.A. Forte já existe com as versões cada vez mais poderosas dessas ferramentas. Maiores detalhes podem ser conferidos no artigo/capítulo de livro na Editora Atena, *Evolução da Inteligência Artificial: da IA Fraca à IA Forte Na era dos Chatbots*, com instanciações na Educação (Mendonça, et al, 2024)

Já a área de planejamento de trajetória e a robótica colaborativa são conceitos fundamentais no estudo de manipuladores robóticos, conforme enfatizado por UNHELKAR e SHAH (2015). Recentemente, os avanços na robótica têm ampliado as aplicações dos robôs na manufatura, estendendo-se para os processos de montagem final. O trabalho de KRÜGER, LIEN e VERL (2009), que inspirou esta investigação, oferece um estudo abrangente sobre o uso de robôs em linhas de montagem.

A robótica colaborativa, também conhecida como robótica assistida ou robótica de segurança, foca no desenvolvimento de robôs que podem trabalhar de forma segura e eficiente ao lado de humanos (CORDEIRO, 2022). A Organização Internacional para Padronização (ISO) define a robótica colaborativa como “a aplicação de robótica onde um robô e um operador humano trabalham juntos em um espaço compartilhado para realizar uma tarefa” (ISO 10218-3:2016). As principais características de segurança dos robôs colaborativos incluem:

- Velocidade e força reduzidas para evitar colisões; sensores para detectar a presença de humanos; modos de operação que permitem ao operador assumir o controle em emergências (OLIVEIRA, 2022).

Aplicações dos robôs colaborativos: montagem e manufatura, logística e transporte, saúde, agricultura e horticultura, pesquisa e desenvolvimento.

Benefícios para as empresas: aumento da produtividade, melhoria da segurança, redução de custos, flexibilidade de produção.

De modo resumido: Robôs colaborativos operam com segurança, podendo ser controlados por humanos em emergências. Suas aplicações abrangem diversos campos como manufatura, logística, saúde, agricultura e pesquisa. Os benefícios incluem maior produtividade, segurança, redução de custos e flexibilidade.

No entanto, problemas clássicos da robótica, como a cinemática, permanecem significativos. A cinemática é um método comum para analisar o movimento dos manipuladores robóticos e inclui dois tipos: cinemática direta, que determina a posição do efector final a partir das posições das juntas, e cinemática inversa, que determina as posições das juntas a partir da posição do efector final. A cinemática inversa, conforme descrito por Mendonça et al. (2020), é desafiadora devido ao seu potencial para múltiplas soluções e equações não lineares. Métodos comuns para resolver esse problema incluem abordagens algébricas, geométricas e iterativas, embora possam ser inadequados para manipuladores com muitos graus de liberdade.

Uma alternativa para resolver a cinemática inversa é o uso de redes neurais artificiais (RNA). As RNA são capazes de aprender a partir de dados e podem ser adaptadas a diferentes sistemas.

Em algumas aplicações, é necessário que o manipulador robótico tenha precisão superior à permitida por um manipulador com o número mínimo de graus de liberdade. Nesses casos, são utilizados manipuladores redundantes, que têm mais graus de liberdade do que o necessário para realizar a tarefa.

Um exemplo de robô denominado colaborador, denominados de *CoBot*, uma notável inovação oriunda da renomada *Carnegie Mellon University*, representa um avanço significativo no campo da robótica autônoma, como mostra a figura 1.



Figura 1– Exemplo de Robô Colaborativo (COBOT)

Além disso, figura 1 descreve uma mulher usando óculos de proteção e roupas de trabalho, manipulando um robô colaborativo em um ambiente industrial. O robô possui um braço articulado com várias juntas e está equipado com diversos cabos e componentes eletrônicos. No fundo, há várias peças metálicas organizadas em uma linha de produção automatizada. O cenário indica um ambiente de fabricação ou montagem, onde a robótica colaborativa está sendo utilizada para melhorar a eficiência e precisão das operações.

DESENVOLVIMENTO MUNDIAL: DA ROBÓTICA COLABORATIVA

A robótica colaborativa, frequentemente referida por “cobots”, refere-se a robôs projetados para trabalhar em conjunto com seres humanos em um ambiente compartilhado. Ao contrário dos robôs industriais tradicionais, que muitas vezes são isolados dos trabalhadores humanos por razões de segurança, os cobots são projetados para serem seguros e flexíveis, permitindo a colaboração direta entre máquinas e humanos. Desde o início da sua concepção, a área da robótica colaborativa tem presenciado avanços significativos, e aqui estão alguns pontos-chave sobre o seu desenvolvimento mundial:

Origens: Os primeiros cobots foram introduzidos na década de 1990 como uma forma de ajudar os humanos em tarefas de manufatura. Eles foram projetados para serem intrinsecamente seguros, usando sensores para detectar e responder à presença humana.

Tecnologia e Segurança: Com o avanço dos sensores e da inteligência artificial, os cobots tornaram-se mais sensíveis ao ambiente ao seu redor. Eles são equipados com características como limitação de força e parada de emergência para evitar ferimentos em humanos.

Aplicações Expandidas: Enquanto os cobots inicialmente encontraram aplicações na manufatura, eles agora são usados em uma variedade de indústrias, incluindo saúde, logística, agricultura e serviços.

Aceitação e Crescimento: Nos anos 2010, a adoção de cobots começou a crescer rapidamente à medida que as empresas reconheceram o valor de ter robôs trabalhando ao lado de humanos. O mercado global de cobots tem testemunhado um crescimento robusto, com previsões otimistas para o futuro.

Normas e Regulamentações: A segurança é uma grande preocupação na robótica colaborativa. Organizações internacionais, como a ISO, estabeleceram normas específicas (por exemplo, a ISO/TS 15066) para garantir a segurança dos cobots.

Avanços em Interfaces Humano-Robô: Para que os cobots sejam verdadeiramente colaborativos, as interfaces de usuário devem ser intuitivas. Há um foco contínuo no desenvolvimento de interfaces que facilitam a programação, treinamento e interação dos cobots.

Desafios Futuros: Ainda existem desafios para os cobots, incluindo melhorar a sua capacidade de aprender com os humanos, aprimorar a sua percepção do ambiente, e garantir que eles sejam economicamente viáveis para pequenas e médias empresas.

Impacto Socioeconômico: Como toda tecnologia disruptiva, os cobots têm o potencial de redefinir empregos e funções no ambiente de trabalho. Há discussões contínuas sobre como garantir que a introdução de cobots beneficie a sociedade como um todo.

Em suma, a robótica colaborativa representa uma interseção fascinante da tecnologia com a sociologia e a economia. À medida que os cobots continuam a evoluir e a se tornar mais integrados em diversos setores.

FUNDAMENTAÇÃO

Nesta seção são apresentados os conceitos de Educação na Robótica (em especial, universitária) de manipuladores robóticos, planejamento de trajetória e robótica colaborativa. Além disso, discutimos brevemente as técnicas de RNA usadas para a calibração do manipulador.

A robótica na educação universitária utiliza a construção e programação de robôs para promover o aprendizado em disciplinas como matemática, ciências, engenharia e tecnologia. **Benefícios:** Desenvolvimento de habilidades técnicas (programação e engenharia), estímulo ao pensamento crítico e resolução de problemas, engajamento e motivação, desenvolvimento de habilidades sociais e de trabalho em equipe, e preparação para o futuro. **Programas de robótica:** LEGO Mindstorms, VEX Robotics, FIRST Robotics. **Desafios:** Custo, formação de professores, acesso e inclusão. **Implementação:** Incorporar no currículo, criar clubes e atividades extracurriculares, parcerias com organizações e treinamento para professores.

A robótica na educação universitária transforma o aprendizado, tornando-o mais dinâmico, envolvente e relevante como por exemplo, várias universidades nos EUA oferecem graduações em robótica, mas muitos programas não ensinam práticas essenciais de engenharia de software de forma explícita. Alguns conteúdos são abordados apenas em projetos de longo prazo, o que pode deixar os alunos despreparados para o mercado de trabalho (ZIZYTE, M.; TABOR, T, 2022).

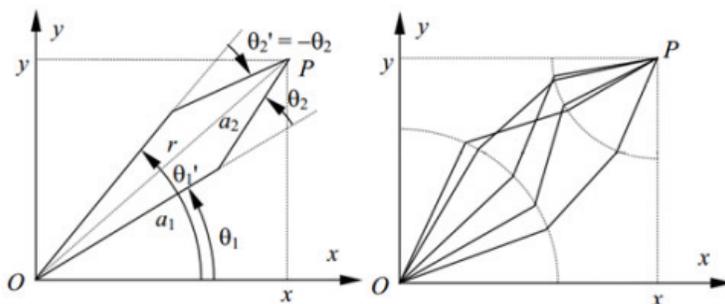


Figura 2. Ilustração do problema das múltiplas soluções.

Robôs precisam ter emergências previstas e programadas para responder adequadamente. A robótica é categorizada em robôs programados e autônomos. Exemplos de robôs complexos como PUMA e Stanford apresentam sistemas avançados que complicam a interação e controle com o ambiente (HU, 2018). Com o uso crescente de manipuladores em diversos setores, a adaptabilidade tornou-se crucial.

A trajetória de um robô não deve ser apenas uma soma de ângulos; a interação com ambientes variáveis requer controladores adaptáveis (ZHANG, WEI, 2017). Sistemas como ANFIS e Redes Neurais Artificiais (RNAs) são usados devido à dificuldade em projetar robôs para ambientes flexíveis e desconhecidos (SICILIANO, KHATIB, 2016). A cinemática inversa apresenta o desafio das múltiplas soluções, especialmente à medida que o número de Graus de Liberdade (GDL) aumenta.

A calibração adequada é vital, como indicado por Kuo et al. (2016). Múltiplas soluções podem surgir na definição da posição de um manipulador, levando a redundâncias. A Figura 2 ilustra isso para manipuladores com 2 e 3 GDL (DALMEDICO, et al, 2018).

Na Figura 2, θ_1 e θ_2 representam os ângulos da primeira e segunda articulações, a_1 e a_2 são os comprimentos das juntas, e P é a posição desejada para a extremidade livre.

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

As Redes Neurais Artificiais (RNAs), inspiradas em células biológicas, são reconhecidas como aproximadores universais de funções e possuem ampla aplicação em diversas áreas, como previsões de consumo de água e análise econômica, entre outras (DA SILVA et al., 2017). Na engenharia, as RNAs são ferramentas fundamentais para a resolução de problemas complexos, especialmente quando a solução analítica direta não é viável (HAYKIN, 2009).

A capacidade computacional das RNAs decorre de sua estrutura massivamente distribuída e de sua habilidade de aprendizado, o que permite a solução de problemas complexos (HAYKIN, 2009). Entre as características destacadas das RNAs estão a não linearidade, o mapeamento de entrada e saída, a adaptabilidade, a resposta evidencial, as informações contextuais, a tolerância a falhas, a implementação VLSI (Very-Large-Scale-Integration) e a uniformidade na análise e no design (DA SILVA et al., 2017). Esses aspectos serão detalhados nos parágrafos seguintes.

A não linearidade das RNAs é explicada pela presença de estruturas não lineares de neurônios artificiais distribuídos pela rede, essencial para lidar com a não linearidade dos sinais de entrada (HAYKIN, 2009). O mapeamento de entrada e saída é outra característica crucial, onde os pesos sinápticos são ajustados para treinar a rede em tarefas específicas, utilizando amostras aleatórias para minimizar a diferença entre a saída obtida e a resposta desejada (DA SILVA et al., 2017).

A figura 3 mostra uma rede neural artificial canônica com 5 camadas intermediárias, entrada e saída e seus respectivos neurônios conexões.

As RNAs são adaptáveis, capazes de responder a mudanças sutis no ambiente de estudo, o que altera os pesos sinápticos e pode garantir um desempenho robusto em ambientes dinâmicos. Contudo, a adaptabilidade nem sempre garante robustez proporcional. As RNAs também oferecem uma resposta evidencial, proporcionando informações sobre a seleção de padrões e sua confiabilidade, visando aprimorar a classificação e o reconhecimento de padrões (HAYKIN, 2009).

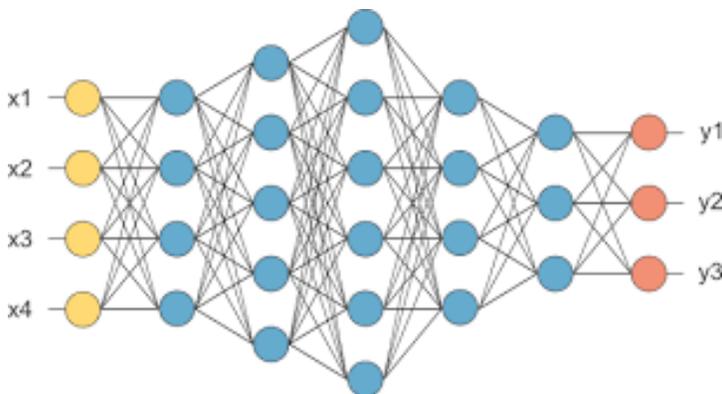


Figura 2. Redes Neurais Artificiais Perceptron.

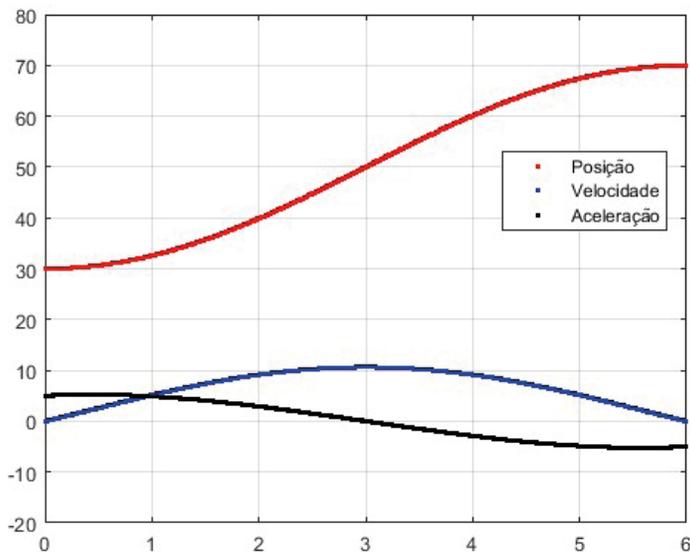


Figura 4. Variáveis no espaço angular de um planejamento sem obstáculo.

O recurso da tecnologia *VLSI* (*Very-Large-Scale-Integration*) permite que as Redes Neurais Artificiais (RNAs) realizem cálculos em paralelo, facilitando a solução de tarefas comportamentais complexas. Já o conceito de uniformidade de análise e *design* envolve a aplicação de uma notação consistente em todos os domínios de uma rede. Isso se manifesta através da integração de neurônios, compartilhamento de teorias e algoritmos entre várias aplicações, e na perfeita integração dos módulos que compõem redes modulares (HAYKIN, 2009).

Os resultados da solução da cinemática inversa podem ser encontrados no trabalho de Mendonça e colaboradores (MENDONÇA et al., 2022). Uma possível solução clássica para o planejamento de trajetória é o polinômio de quinta ordem (NIKU, 2011).

No estudo de Mendonça e colaboradores (2019), são identificados dois tipos distintos de obstáculos: dinâmicos e estáticos. Ao empregar RNAs e o polinômio de quinta ordem mencionado, a solução para um obstáculo dinâmico envolve uma estratégia de parada seguida pela retomada do movimento.

A Figura 4 apresenta o planejamento de uma junta rotacional robótica, que move de 30 para 70 graus, utilizando um polinômio de quinta ordem. Além disso, conceitos relevantes para o planejamento, como aceleração e desaceleração simétricas e uma velocidade de cruzeiro suavemente crescente, são observados.

Já a Figura 5 ilustra um obstáculo estático na posição de 60 graus. A estratégia adotada, segundo Holland (1975), foi recalculada para desviar para 63 graus, utilizando um *algoritmo genético clássico*, com cromossomos numéricos, em vez dos binários tradicionais, dentro do raio de alcance do braço robótico.

De forma resumida, o Algoritmo Genético Canônico (AGC), proposto por John Holland em 1975, marcou o início de uma nova era na otimização heurística. Inspirado nos mecanismos da evolução natural, o AGC se consolidou como uma ferramenta poderosa para resolver problemas complexos em diversos domínios.

A aceleração teve uma descontinuidade no replanejamento da trajetória, entretanto um cuidado de não ser maior do o dobro da situação sem obstáculo para preservar a vida útil do atuador (SICILIANO, KHATIB, 2016).

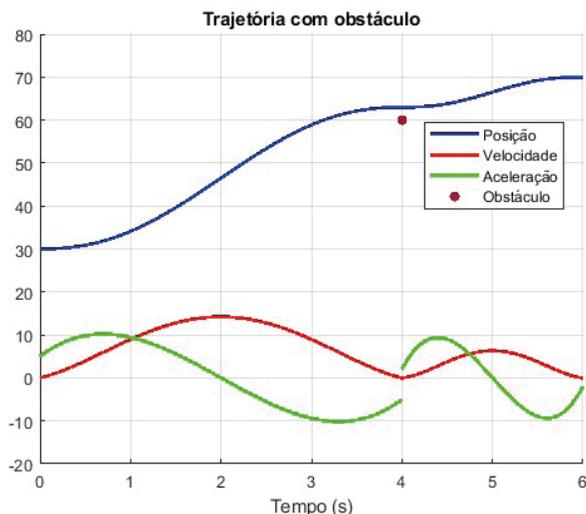


Figura 5. Variáveis no espaço angular de um planejamento com obstáculo Estático ou Dinâmico.

CONCLUSÃO

Os resultados para o desvio de obstáculos estáticos foram promissores. De forma geral, a robótica colaborativa destaca-se como uma revolução na automação industrial, permitindo que robôs trabalhem de maneira segura e integrada com humanos. Esses robôs não apenas otimizam a eficiência, mas também oferecem flexibilidade na produção, atendendo à demanda por customização em massa. Além disso, tornam a automação mais acessível para pequenas e médias empresas, sendo mais econômicos e fáceis de programar em comparação com robôs industriais tradicionais. Outro ponto crucial é a capacidade de adaptação e aprendizado desses robôs. Com o uso de algoritmos avançados e inteligência artificial, eles melhoram continuamente suas funções, tornando-se ferramentas essenciais para a manufatura do futuro. Trabalhos Futuros: Interface Humano-Robô: Investigar como robôs colaborativos podem interagir melhor com humanos, considerando ergonomia, psicologia e segurança. Integração com IoT: Avaliar como a robótica colaborativa pode aproveitar a rede de dispositivos conectados para coletar dados em tempo real e otimizar a produção. Técnicas Avançadas de Aprendizado: Explorar como avanços em aprendizado profundo e aprendizado por reforço podem aprimorar a adaptabilidade e eficiência dos robôs colaborativos.

REFERÊNCIAS

CORDEIRO, J. S. (2022). **Robôs colaborativos podem até ser utilizados no âmbito do metaverso**. *Jornal da USP*.

DA SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A.; LIBONI, L. H. B.; ALVEZ, S. F. R. **Redes neurais artificiais: um curso prático**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

DALMEDICO, J. F.; MENDONÇA, M.; DE SOUZA, L. B.; DE BARROS, R. V. P.; CHRUN, I. R. **Redes neurais artificiais aplicadas na solução do problema de cinemática inversa de um braço manipulador 3D**. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 2018. p. 1-6. DOI: 0.1109/IJCNN.2018.8489532.

HAYKIN, S. S. **Redes neurais e máquinas de aprendizagem**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2009.

HOLLAND, John H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. 1. ed. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

HU, J.; XIONG, R. Estimation of contact force for robot manipulator using semiparametric model and disturbance Kalman filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 4, p. 3365-3375, 2018. DOI: 10.1109/TIE.2017.2748056.

ISO 10218-3:2016 - Segurança de robôs - Parte 3: Robôs colaborativos. International Organization for Standardization, Genebra, Suíça, 2016.

KRÜGER, J.; LIEN, T. K.; VERL, A. **Cooperation of human and machines in assembly lines**. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, v. 58, n. 2, p. 628-646, 2009. doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.009.

KUO, P. H.; LIU, G. H.; HO, Y. F.; LI, T. H. S. **PSO and neural network based intelligent posture calibration method for robot arm**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, SMC, 2016, Anais IEEE, 2017. p. 3095-3100. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844711.

MENDONÇA, M.; KONDO, H. S.; DE SOUZA, L. BOTONI; PALÁCIOS, R. H. C.; DE ALMEIDA, J. Paulo Lima Silva. **Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS (FUZZ-IEEE), 2019, New Orleans, LA, USA. Anais [...]. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2019. p. 1-8. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858847.

MENDONÇA, M.; PALÁCIOS, R. H. C.; BREGANON, R.; BOTONI DE SOUZA, L.; RODRIGUES CINTRA MOURA, L. **Analysis of the Inverse Kinematics and Trajectory Planning Applied in a Classic Collaborative Industrial Robotic Manipulator**. *IEEE Latin America Transactions*, v. 20, n. 3, p. 363-371, mar. 2022. DOI: 10.1109/TLA.2022.9667133.

MENDONÇA, M. et al. **Evolução da Inteligência Artificial: da IA Fraca à IA Forte Na era dos Chatbots, com instanciações na Educação**. 2024, Artigo/Capítulo de livro ainda não publicado.

NIKU, S. B. **Introdução à robótica: análise, controle, aplicações**. 2. ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011. v. 53, n. 9.

OLIVEIRA, D. M., & Santos, S. A. (2022). **Robótica colaborativa: Uma revisão bibliográfica**. *Revista Eletrônica de Engenharia e Tecnologia (REET)*, 10(1), 1-13.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Eds.). **Springer Handbook of Robotics**. 2. ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.

SOU, A., HOU, Z., FU, S., & TAN, M. **Neural networks for mobile robot navigation**: A survey. In *Advances in Neural Networks - ISNN 2006*, vol. II, pp. 1218-1226. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. doi: 10.1007/11760023_177.

SOUZA, F. B., & Giardini, G. J. (2018). **Um estudo sobre o impacto da robótica colaborativa na produtividade em tarefas manuais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Paulo.

UNHELKAR, V. V.; SHAH, J. A. **Challenges in developing a collaborative robotic assistant for automotive assembly lines**. In: *ACM/IEEE Int. Conf. Human-Robot Interact.* vol. 02-05-Marc, pp. 239-240. 2015. doi: 10.1145/2701973.2702705.

ZHANG, D.; WEI, B. (Eds.). **Controle adaptativo para manipuladores robóticos**. 1. ed. Oshawa, ON: CRC Press, 2017.

ZIZYTE, M.; TABOR, T. **Should Robotics Engineering Education Include Software Engineering Education?** In: *IEEE/ACM 4th INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROBOTICS SOFTWARE ENGINEERING (ROSE)*, 2022, Pittsburgh, PA, USA. New York: ACM, 2022. p. 39-42. DOI: 10.1145/3526071.3527514.