

DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO EM AMBIENTE VIRTUAL 3D DE UM CONTROLADOR ROBÓTICO PARA GUIAGEM DE ROBÔ MÓVEL EM POMARES

**RAFAEL V. DE SOUSA¹, PAULO H. S. PEREIRA², RUBENS A. TABILE³,
RICARDO Y. INAMASU³**

¹ Doutor em Engenharia Mecânica, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia de Biossistemas, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), USP, Pirassununga - SP, Fone: (0xx19) 3565.6859, rafael.sousa@usp.br

² Engenheiro de Biossistemas, Graduando, Depto. de Engenharia de Biossistemas, FZEA-USP, Pirassununga - SP

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Prof. Doutor, Depto. de Engenharia de Biossistemas, FZEA-USP, Pirassununga - SP

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Prof. Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos - SP

Apresentado no
XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

RESUMO: Arquiteturas de controle robótico baseadas em comportamentos computacionais inteligentes estão sendo pesquisadas para a guiagem de veículos autônomos e robôs móveis para aplicações agrícolas. Neste trabalho é proposto um método baseado na lógica Fuzzy no qual se consideram contextos agrícolas para gerar comportamentos robóticos para executar as ações de guiagem para locomoção segura de um robô móvel entre as linhas de plantio. Um trator robô, controladores Fuzzy e uma ambiente virtual 3D de um pomar são modelados, programados e simulados utilizando software comercial para prototipagem e simulação de robôs móveis. Foram desenvolvidos dois controladores Fuzzy projetados para utilizar um sensor de escaneamento a laser e um receptor do Sistema Global de Navegação por Satélite montados no robô. Os experimentos com base em simulação foram realizados para análise da ativação dos comportamentos de acordo com os contextos apresentados durante a navegação no pomar virtual. Além disso, é avaliada a capacidade operacional da guiagem em relação a um caminho ideal. Os resultados mostram a viabilidade do método proposto para permitir a construção e a combinação de comportamentos robóticos simples para locomoção robô móvel entre as linhas de plantio.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento robótico, lógica Fuzzy, simulação de robôs agrícolas.

DEVELOPMENT AND SIMULATION IN 3D VIRTUAL ENVIRONMENT OF A ROBOTIC CONTROLLER FOR GUIDANCE OF MOBILE ROBOT IN ORCHARDS

ABSTRACT: Robotic control architectures supported by intelligent computational behaviors are being investigated for guidance of autonomous vehicles and mobile robots for agricultural applications. In this work is proposed a method based on Fuzzy logic that applies agricultural contexts to generate robotic behaviors to perform the guidance actions for a safe locomotion of a mobile robot between rows of crop. A robot tractor, two controllers and a 3D virtual orchard are modeled, programmed and simulated using commercial software for prototyping and simulation of mobile robots. It was developed two Fuzzy controllers designed to use a sensor Light Detection and Ranging and a receiver Global Navigation Satellite System equipped on a robot. The experiments based on the simulation are carried out for analysis of the activation of which behavior according the contexts presented during the navigation on the virtual orchard. Also, it is evaluated the operational ability of the navigation comparing

the path performed by the agricultural robot with an ideal path. The results show the viability of the proposed method to allow the design and the combination of simple behaviors for mobile robot locomotion between rows of crops.

KEYWORDS: robotic behavior, Fuzzy logic, agricultural robot simulation

INTRODUÇÃO

Avanços recentes em tecnologias de sensores e de aplicação para agricultura têm demandado máquinas e implementos agrícolas com maior grau de automação para permitir o uso de tais tecnologias através da execução de tarefas mais precisas tanto para navegação assim como para tarefas tais como sementeira, pulverização e colheita (MULLA, 2013).

Nesse cenário, uma das tendências na área é a aplicação de veículos semi-autônomas ou autônomas e de robôs como apontam Pedersen et al. (2006) e reafirmam Blackmore e Apostolidi (2011). Soluções viáveis são propostas para o desenvolvimento de RAM nos últimos anos (BARAWID et al., 2007; CARIU et al., 2009; GRIEPESTRONG et al., 2013), entretanto ainda há diversos desafios de pesquisa em arquiteturas robóticas de controle e automação para viabilizar a navegação autônoma de forma segura e com capacidade de auto-adaptação para atuação em ambientes com características específicas encontradas nas culturas agrícolas (HUANG et al., 2010; MOUSAZADEH, 2013).

Associado à essa tendência de pesquisa, um fator custoso para o desenvolvimento de plataformas robóticas é a execução de experimentos em campo, pois sua condução é normalmente custosa em termos financeiros, logísticos e de tempo principalmente devido à complexidade de tais plataformas que possuem elementos mecatrônicos diversos que incluem sensores, unidades eletrônicas de controle e atuadores. Diante panorama similar, a modelagem e a simulação em ambiente virtual é aplicada com sucesso em outras áreas de pesquisa da robótica e apresenta-se como uma possível atividade complementar às atividades experimentais na medida possibilita acelerar a condução de certos experimentos com custo financeiro muito menor (SOKOLOWSKI e BANKS, 2009; WOLF et al, 2009).

Atualmente, vários trabalhos de pesquisa que incluem modelagem e simulação demonstraram soluções notáveis para o projeto de arquiteturas robóticas para robôs móveis que navegam autonomamente em ambientes não estruturados e dinâmicos (BRUGALI et al., 2014). Entre essas soluções, um número expressivo de grupos de pesquisa tem conseguido resultados positivos com o desenvolvimento de arquiteturas robóticas baseadas em comportamentos que utilizam Lógica Fuzzy (ESKRIDGE e HOUGEN, 2010). A teoria de lógica Fuzzy fornece uma metodologia formal que permite transferir ou implantar conhecimentos em um sistema robótico. Para isso, variáveis linguísticas associadas a leituras de sensores são construídas e utilizadas em conjunto com instruções condicionais simples e intuitiva (regras difusas). Estas regras associam percepções com ações, gerando assim comportamentos que podem compor uma arquitetura robótica para execução de tarefas específicas e de forma autônoma como a guiagem e navegação de robôs (REMONDINI e SAFFIOTTI, 2006; HUQ, MANN e GOSINE, 2008; ESKRIDGE e HOUGEN, 2010).

Embora a aplicação de comportamentos baseados em lógica Fuzzy seja um tema importante de pesquisa atualmente, esse tema ainda é pouco explorado para desenvolvimento de sistemas robóticos agrícolas. Há um número limitado de trabalhos propostos sobre sistemas robustos baseados em arquiteturas robóticas capazes de realizar operações múltiplas e independentes, bem como adaptar-se às mudanças no ambiente. Dessa forma, identifica-se

um potencial significativo de desenvolvimento desse tema na área agrícola (MOUSAZADEH, 2013).

Nesse contexto, o trabalho tem como objetivo principal a implementação e a experimentação em ambiente virtual de uma arquitetura de comportamentos robóticos para navegação entre linhas de plantio em ambiente agrícola com características físicas de pomares. Busca-se também criar bases metodológicas para desenvolvimento e experimentação de arquiteturas robóticas ambiente virtual para viabilizar a pesquisa de RAM para culturas típicas nacionais

MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem do ambiente agrícola virtual e do robô agrícola, bem como a programação das rotinas referentes ao controlador da arquitetura robótica foram realizadas utilizando o software Webots versão 7.4.3 da empresa Cyberbotics (www.cyberbotics.com). Esse software permite que robôs e ambientes sejam modelados em 3D, suportando a simulação física de sistemas complexos que incluem articulações mecânicas, sistemas dinâmicos, atritos e detecção de colisões. Permite a simulação de uma grande variedade de ambientes, assim como a criação de novos ambientes e robôs, ou a utilização de modelos previamente programados. A programação dos controladores do robô pode ser feita utilizando uma ferramenta do software Webots que permite a integração com o software Matlab da empresa MathWorks (www.mathworks.com).

Construiu-se um ambiente agrícola de 5.000 m² terreno composto por grades adjacentes e contínuas com inclinações diferentes que conferiram ao terreno diferentes elevações com a diferença máxima de até 1 metro entre os valores mínimo e máximo. Também foi construída uma plantação de laranjeiras, sendo constituída por quatro tipo árvores com características de laranjeira e com geometrias diferentes (altura e volume de copa). Essas árvores foram replicadas e posicionadas aleatoriamente em linhas com espaçamento de 4 metros entre as árvores e de 6 metros entre linhas formando um pomar como ilustrado na Figura 1.

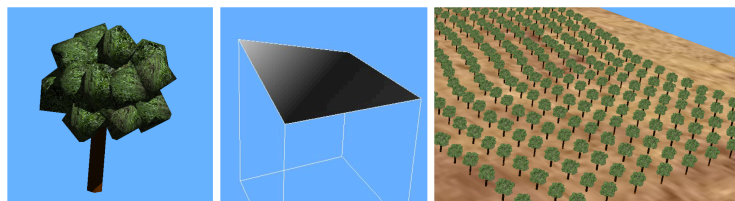


FIGURA 1. Laranjeira, grade de solo e pomar virtual.

Uma pequeno trator virtual foi utilizado como o robô com características estruturais do trator fruteiro comercial TC50 Boomer da empresa CNH. O robô possui um sistema de guiagem com capacidade de esterçamento das rodas dianteiras e capacidade de comando de velocidade em conjunto ou independentemente em cada roda. O robô foi equipados com um sensor laser conhecido com LIDAR (*Light Detection And Ranging*) que permite digitalizar ou escanear o ambiente. O LIDAR foi posicionada na parte frontal do robô, em seu eixo longitudinal e a 1,5 m da posição de contato das rodas com o solo. Esse sensor possui características do sensor comercial LM291 da empresa Sick e foi configurado para varredura de 180° com passo de 1°. O robô também foi equipado com um receptor GNSS (*Global*

Navigation Satellite System - Sistema Global de Navegação por Satélite) com acurácia configurada para 0,02 m.

Desenvolveu-se um comportamento robótico de navegação denominado “*crop feeler*” através da implementação de um controlador Fuzzy em linguagem do Matlab segundo proposto por Sousa (2007). O sistema de controle fundamentado em lógica Fuzzy é composto por quatro módulos ou etapas: a fuzzificação, a base de regra, a máquina de inferência e a defuzzificação. A Figura 2 ilustra os módulos de um sistema de controle baseada em lógica Fuzzy e o robô utilizado (SOUSA, 2007).

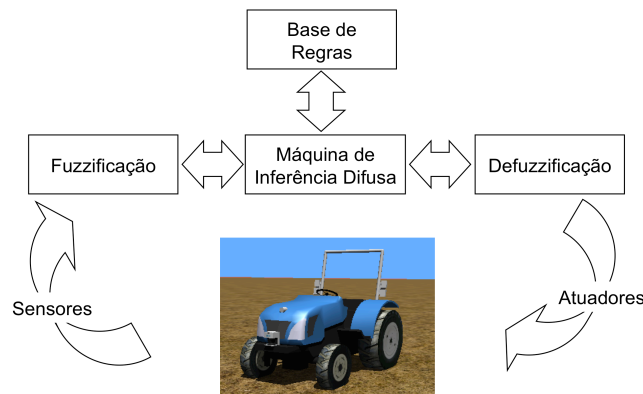


FIGURA 2. Módulos de um sistema de controle baseado em lógica Fuzzy.

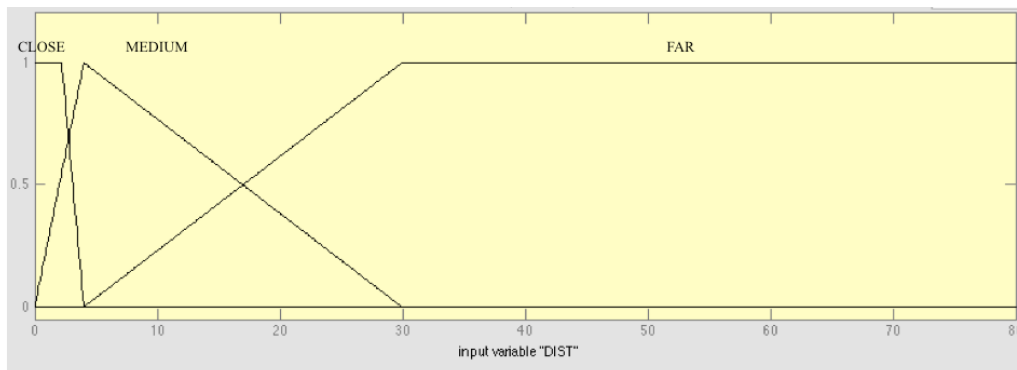
O controlador Fuzzy construído utiliza a distância (DIST) de 0 m a 80 m e o ângulo (ANG) de 0° a 180° (0° a 90° à esquerda e 0° a 90° à direita) formado entre o trator e as árvores fornecidos pelo sensor LIDAR como variáveis linguísticas de entrada do sistema. A saída do controlador Fuzzy é ângulo de esterçamento (STE) para o sistema de direção do trator. A variável linguística DIST utiliza a média dos dez menores valores medidos de distância e foi associada à três intervalos correspondente aos termos FAR, MEDIUM e CLOSE. A variável linguística ANG utiliza o ângulo correspondente ao menor valor medido de distância e foi associada à três intervalos correspondente aos termos SAFE, ALERT e CRITICAL. A variável linguística de saída STE foi associada a três intervalos correspondente aos termos LARGE, REGULAR e SMALL. A base de regras que associa as entradas e a saída do controlador Fuzzy é mostrada na Tabela 1.

TABELA 1. Base de regras do controlador robótico referente ao comportamento *crop feeler*.

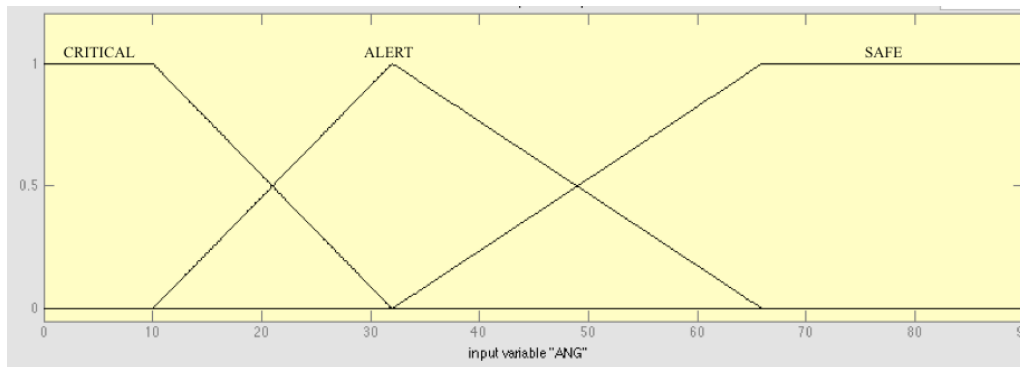
		DIST		
		FAR	MEDIUM	CLOSE
ANG	SAFE	SMALL	SMALL	LARGE
	ALERT	SMALL	SMALL	LARGE
	CRITICAL	SMALL	REGULAR	LARGE

As variáveis linguísticas de entrada e saída associadas a funções de pertinência construídas com formas triangulares e trapezoidais para o processo de fuzzificação. O método Mamdani baseado em composição tipo Max-Min foi utilizado para avaliação da base de regras pela máquina de inferência. O valor de saída é obtido pelo módulo de defuzzificação

através do método do Centróide. A Figura 3 mostra as funções de pertinência construídas para as variáveis linguísticas DIST e ANG.



(a)



(b)

Figura 3. Funções de pertinência para as variáveis linguísticas de entrada DIST e ANG.

Um módulo baseado no receptor GNSS foi programado para georreferenciar a trajetória executada pelo robô no pomar, sendo realizados diversos experimentos para avaliar a capacidade de navegação segura entre linhas de plantio retilíneas e em curva. A velocidade de navegação foi mantida constante em 2 m/s e as manobras de cabeceira foram executadas manualmente, parando a simulação e posicionando o robô.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ambiente foi configurado e programado para atender aos experimentos de navegação de forma que fosse possível acompanhar a variável de controle (esterçamento) e a trajetória do robô segundo os comandos de esterçamento. Além disso, simulações foram executadas incluindo a situação de linhas entre árvores em curva e a situação de falhas de plantio.

A Figura 4 apresenta o resultado da simulação ajustada para simular a navegação de ida e volta em duas trajetórias adjacentes entre 3 linhas de laranjeiras. A posição das laranjeiras no ambiente virtual foram georreferenciadas e foi estabelecida uma trajetória ideal a partir dos pontos que correspondem ao centro da reta formada pela posição geográfica de duas laranjeiras opostas perpendicularmente à trajetória entre as linhas de plantio.

É possível observar na Figura 4 a trajetória do robô mapeada através do receptor GNSS. Tanto no percurso de ida como de volta o robô executou a navegação sem contato com as

laranjeiras, procurando manter-se em uma posição central em relação as linhas de plantio. Mesmo com falhas de plantio, associadas a ausência de duas laranjeiras, verifica-se que mesmo com a atitude repulsiva do robô em relação à presença de objetos, no caso árvores, a intensidade dessa repulsão foi ajustada adequadamente para não afastar o robô à uma posição extrema, superior à trajetória ideal.

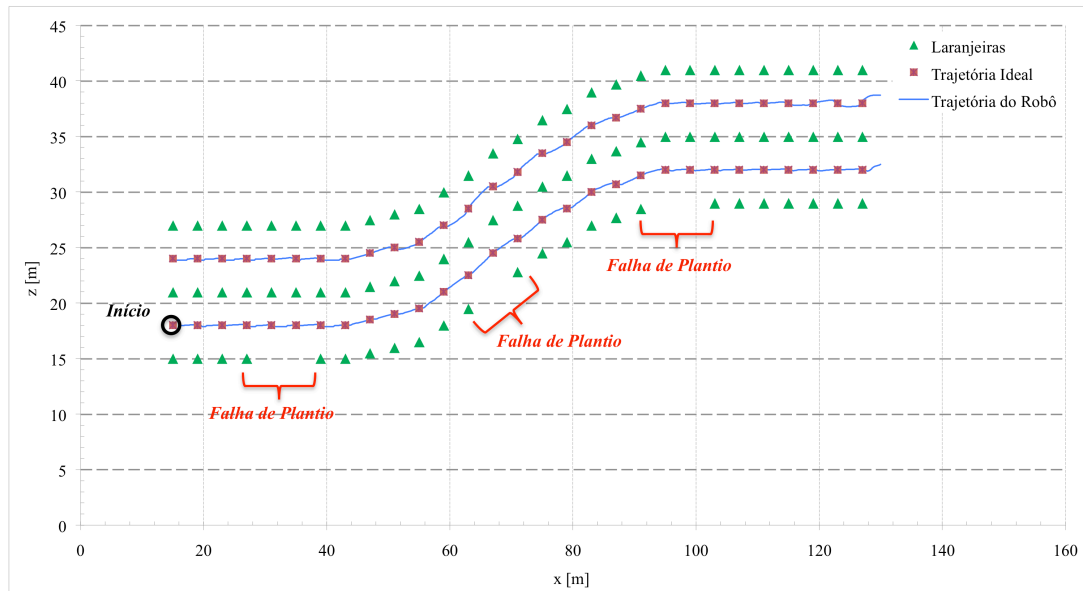


FIGURA 4. Trajetória georreferenciada do robô na execução de percursos entre linhas de plantio do pomar.

A Figura 5 mostra a variação do ângulo de esterçamento segundo determinado pelo comportamento robótico na presença dos contextos que lhe foram apresentados na mesma simulação ilustrada na Figura 4, mas somente para na trajetória de ida. O valor de esterçamento máximo estabelecido pela estrutura do robô é de 45° , porém como pode ser observado esse valor ficou abaixo de 25° .

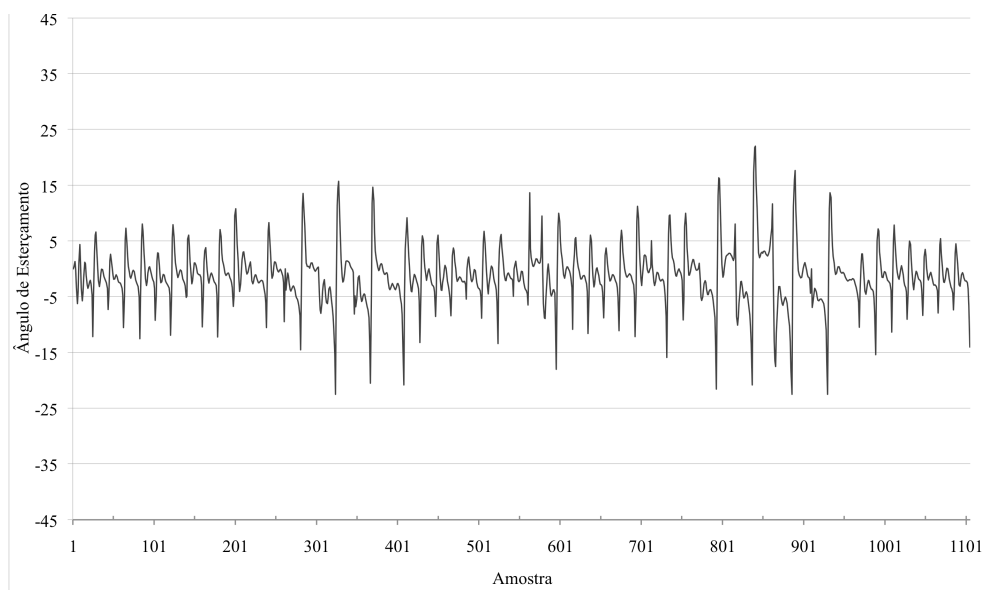


FIGURA 5. Trajetória georreferenciada do robô na execução de percursos entre linhas de plantio do pomar.

O valores maiores que 10° do ângulo de esterçamento corresponde às regiões onde a trajetória curvou-se, primeiramente à esquerda e posteriormente à direita. Além disso, tanto no percurso de ida como de volta, a presença de elevações não comprometeu a atuação comportamento robótico.

CONCLUSÕES

A modelagem e a simulação em ambiente virtual 3D viabilizou o desenvolvimento e a experimentação de comportamento robótico baseado em lógica Fuzzy de navegação para robô agrícola utilizando sensor LIDAR. O controlador Fuzzy proposto permitiu a navegação autônoma utilizando as linhas de plantio como referência. O modelo construído permite a criação e experimentação de novos controladores para aplicação em outras tarefas agrícolas para aprimoramentos de RAM, como, por exemplo, teste de outros tipos de sensores, desenvolvimento de novos comportamentos robóticos e a experimentação em outros tipos de cultura

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido ao projeto (proc. 485033/2013-5).

REFERÊNCIAS

- S. BLACKMORE, K. APOSTOLIDI (2011). "The european farm of tomorrow". ASABE - Resource Magazine, 2011, vol. 8, no. 1, paper numbem 6. 2011
- S. M. PEDERSEN, S. FOUNTAS, H. HAVE, B.S. BLACKMORE. "Agricultural Robots – system analysis and economic feasibility". Precision Agric., vol. 7:pp. 295-308, 2006.
- J. O. C. BARAWID, A. MIZUSHIMA, K. ISHII, N. NOGUCHI. "Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application". Biosystems Engineering, vol. 96, issue 2, pp. 139-149, 2007.
- C. Cariou, R. Lenain, B. Thuilot, M. Berducat, M.. "Automatic Guidance of a Four-Wheel-Steering Mobile Robot for Accurate Field Operations". Journal of Field Robotics, 26 (6-7), 504-518.
- F. A. CHEEIN, G. STEINER, G. PEREZ PAINA, R. CARELLI. "Optimized EIF-SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on systems detection". Computers and Electronics in Agriculture, 78(2), 195-207, 2011.
- MULLA, D. J. (2013). "Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps." Biosystems Engineering 114: 358-371.

- BRUGALI, D. AND BROENINK, J.F. AND KROEGER, T. AND MACDONALD, B.A. (2014) Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots : preface. In: Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, 20-23 Oct 2014, Bergamo, Italy. pp. 5-6. Lecture Notes in Artificial Intelligence 8810.
- D. REMONDINI, A. SAFFIOTTI, “A Modular, Hierarchical, Configurable Controller for Autonomous Robots,” in Proc. 12th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzyzdroje, Poland, 2006.
- R. HUQ, G. K. I. MANN, R. G. GOSINE. “Mobile robot navigation using motor schema and fuzzy context dependent behavior modulation”. Appl. Soft Comput., 8(1), 2008.
- B. E. ESKRIDGE, D. F. HOUGEN. “Extending adaptive fuzzy behavior hierarchies to multiple levels of composite behaviors”. Robotics and Autonomous Systems, vol. 58, no. 6, pp. 1076-1084, 2010.
- ESKRIDGE, B. E.; HOUGEN, D. F. Extending Adaptive Fuzzy Behavior Hierarchies to Multiple Levels of Composite Behaviors, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 58, No. 6, 2010, pp. 1076-1084.
- GRIEPENTROG, H. W.; DÜHRING, J. C. L.; PARAFOROS, D. S. Robots for Field Operations with Comprehensive Multilayer Control, KI - Künstliche Intelligenz, Vol. 27, No. 4, 2013, pp. 325-333.
- HUANG, Y.; LAN, Y.; THOMSON, S. J.; FANG, A.; HOFFMANN, W. C.; LACEY, R. E. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. Computers and Electronics in Agriculture, v. 71, p. 107–127, 2010.
- MOUSAZADEH, H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. Journal of Terramechanics, p. 211-232, 2013.
- SOKOLOWSKI, J. A.; BANKS, C. M.. Principles of modeling and simulation: A multidisciplinary approach. Hoboken, N.J.: John Wiley. 259p, 2009.
- SOUSA, R. V. Robô agrícola móvel (RAM): uma arquitetura baseada em comportamentos hierárquicos e difusos para sistemas autônomos de guiagem e navegação. 2007, 194 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, S.P. – 2007.
- WOLF, D. F.; SIMÕES, E. V.; OSÓRIO, F. S.; TRINDADE JR, O. Robótica inteligente: da simulação às aplicações no mundo real. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Computação - CSBC, Jornadas de Atualização em Informática - JAI (SBC JAI), p.1-51, 2009.