

# CONCEPÇÃO DE UM ROBÔ MÓVEL USANDO KIT LEGO E SISTEMAS NEBULOSOS

RODOLFO L. PEREIRA, ALISSON F. FONDAZZI, INGRID Y. YOSHIKAWA, LEANDRO DOS SANTOS COELHO

*Laboratório de Automação e Sistemas, Grupo Produtônica  
Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR / PPGEPS  
Imaculada Conceição, 1155, CEP 80215-901 Curitiba, PR  
E-mails: leandro.coelho@pucpr.br*

**Abstract** This paper presents a mobile robot design build with a LEGO DACTA kit. The deal of mobile robot design is the navigation in a test environment, obstacles avoidance and the search by a light source. In this context, the computational algorithm uses fuzzy systems concepts and Braitenberg vehicles. The control system based on fuzzy systems is implemented in a control chip (Handy Board). The mobile robot has also two photosensible sensors that identify the position of light source and two ultra-sound sensors that measure the distance for the obstacles.

**Keywords** Mobile robotics, fuzzy systems, Braitenberg vehicles, LEGO kit.

**Resumo** Este artigo apresenta o projeto de um robô móvel, construído com um kit LEGO DACTA, cujo objetivo é navegar em um ambiente de teste, desviar de obstáculos e ir ao encontro de uma fonte luminosa. Para isso o sistema utiliza um algoritmo com conceitos de sistemas nebulosos e dos veículos de Braitenberg. O sistema de controle baseado em sistemas nebulosos é implementado em uma placa de controle (*Handy Board*). O robô móvel possui também um par de sensores foto-sensível, responsável pela identificação da posição da fonte luminosa e um par de sensores ultra-som, responsável pela medição da distância dos obstáculos.

**Palavras-chave** Robótica móvel, sistemas nebulosos, veículos de Braitenberg, *kit* LEGO.

## 1 Introdução

A robótica móvel é uma área de pesquisa relativamente recente, que lida com o controle de veículos autônomos ou semi-autônomos. Os robôs móveis apresentam pelo menos duas características importantes, que os diferenciam da robótica de manipuladores, por exemplo (Johansson, 2000): (i) *alcance*: robôs móveis (e portanto mobilidade) são necessários se a área de atuação (envelope) do robô não está restrita a uma área suficientemente pequena; e (ii) *flexibilidade*: se a posição de atuação do robô não é estática, o robô pode ter a característica de perseguir seu objetivo.

Uma das tarefas que caracteriza um robô móvel é a navegação, sua capacidade de se locomover da maneira mais inteligente possível em seu ambiente de trabalho (Alsina *et al.*, 2002). A navegação está situada entre o controle dos atuadores (motores) e a execução da tarefa (Marchi, 2000).

Para que um robô móvel apresente estas características, é comum definir o seguinte algoritmo para o robô (Alsina *et al.*, 2002): (i) percepção do ambiente ao seu redor, geralmente com auxílio de sensores; (ii) mapeamento do ambiente de trabalho, a partir das informações coletadas pelos sensores; (iii) com base no mapa recém elaborado, e de posse de sua posição inicial e da posição final desejada, o robô calcula uma trajetória tendo como ponto inicial a posição atual, e como objetivo final uma posição desejada, buscando sempre desviar de obstáculos que se oponham à sua locomoção; (iv) a trajetória planejada é corrigida para se adaptar às limitações do robô móvel, como raio de curvatura, velocidade e

dimensões físicas do robô; (v) uma vez calculada a trajetória, esta deve ser executada o mais fielmente possível ao planejado. Faz uso dos atuadores do robô (como motores elétricos) submetidos a um mecanismo ou algoritmo de controle, que ajusta os parâmetros do robô em tempo real, para evitar qualquer desvio da trajetória.

A contribuição deste artigo é apresentar o projeto de um robô móvel usando *kit* LEGO DACTA® (Ferrari *et al.*, 2002), aliado aos conceitos de sistemas nebulosos (*fuzzy systems*) (Passino e Yurkovich, 1998) e veículos de Braitenberg (Braitenberg, 1984). O objetivo estipulado para o robô móvel apresentado neste trabalho é desviar de obstáculos e ir ao encontro de uma fonte luminosa, ou até mesmo ambos os casos simultaneamente, sem conhecimento prévio de suas posições. Para isso o sistema utiliza um algoritmo com conceitos de sistemas nebulosos e dos veículos de Braitenberg. O sistema de controle baseado em lógica nebulosa utilizado foi implementado em uma placa de controle (*Handy Board*) habilitando o robô a desempenhar seus objetivos de desviar obstáculos. O robô possui um par de sensores foto-sensível, responsável pela identificação da posição da fonte luminosa e um par de sensores ultra-som, responsável pela medição da distância aos obstáculos.

O restante deste artigo é organizado da seguinte maneira. Na seção 2 são apresentados os fundamentos de sistemas nebulosos. Na seção 3 são descritos os conceitos básicos dos veículos de Braitenberg. Nas seções 4 e 5, os detalhes de *hardware* e *software* do projeto do robô móvel são mencionados. Os resultados e a conclusão do projeto são apresentados nas seções 6 e 7, respectivamente.

## 2 Fundamentos dos Sistemas Nebulosos

Os conceitos da lógica nebulosa e conjuntos nebulosos foram apresentados em trabalhos pioneiros nas décadas de 1960 e 1970 (Zadeh, 1965, Zadeh, 1973). A lógica nebulosa torna-se importante na medida em que o mundo em que vivemos não é constituído por fatos absolutamente verdadeiros ou falsos. É uma lógica que permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre os valores de verdadeiro e falso da lógica clássica (bivalente).

A teoria de controle clássica permite projetar controladores usando informação imprecisa sobre o processo a ser tratado. Esta teoria, no entanto, apresenta limitações no tratamento de processos complexos, devido as não-linearidades e comportamentos variantes no tempo (Passino e Yurkovich, 1998). Contudo, os operadores humanos controlam, freqüentemente, com sucesso, diversos processos complexos. Os operadores humanos são capazes de controlar baseados em informações imprecisas e/ou incertas a respeito do funcionamento de processos. A estratégia de controle adotada pelos operadores humanos é de natureza imprecisa e, geralmente, pode de ser expressa em termos lingüísticos.

Conforme Jang e Sun (1995), a essência dos modelos nebulosos é similar ao princípio de “dividir e conquistar”. Os antecedentes das regras (*se <condição> então <ação>*) dividem o espaço de entrada em um número de regiões nebulosas locais, enquanto os consequentes descrevem o comportamento dentro de uma região através dos seus constituintes. Os componentes dos consequentes resultam em tipos diferentes de modelos matemáticos nebulosos, mas seus antecedentes são essencialmente os mesmos. Apesar das várias formas de classificar os controladores nebulosos, neste artigo adota-se uma classificação de controladores nebulosos baseados em modelos nebulosos. Neste contexto, os componentes dos modelos nebulosos são classificados em modelos interpolativos, modelos relacionais e modelos lingüísticos.

### 2.1 Etapas do projeto do controlador nebuloso

A abordagem de controle nebuloso foi, e ainda é, amplamente explorada na literatura de controle de processos e está presente em diversos trabalhos científicos, tais como Kodagoda *et al.* (2002), Abdessemed *et al.* (2004), Sierakowski (2005) e Angelov e Zhou (2007).

O esquema geral apresentando os módulos que compõem o controlador nebuloso lingüístico, validado neste trabalho, é mostrado na Fig. 1. As principais etapas presentes no controlador são as seguintes (Araujo Filho, 2004): (i) formação da base de regras (base de dados e conhecimento), (ii) codificação das variáveis de projeto (etapa de nebulização ou *fuzzification*), (iii) determinação dos

graus de pertinência, (iv) aplicação do mecanismo de inferência, (v) agregação das regras, e (vi) etapa de decodificação (*defuzzification*).

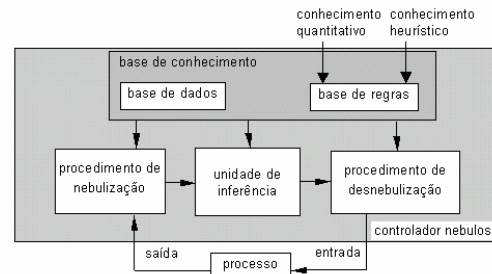


Fig. 1. Configuração básica de um controlador nebuloso lingüístico do tipo Mamdani.

Os modelos lingüísticos são baseados em regras *se-então*, apresentando predicados vagos e utilizando raciocínio nebuloso. Nestes modelos, as quantidades nebulosas são associadas aos termos lingüísticos, e o modelo nebuloso é essencialmente uma expressão qualitativa do sistema. Os modelos lingüísticos formam a base de modelagem qualitativa, que descreve o comportamento do sistema (neste trabalho, o robô móvel) através da utilização da linguagem natural. O representante mais significativo desta classe é o modelo do tipo Mamdani (Mamdani e Assilian, 1975).

O modelo de Mamdani caracteriza-se por utilizar os conjuntos nebulosos como consequentes das regras de produção, ou seja,

$$R_i: \text{ se } x_1 \text{ é } A_{i,1} \text{ e } \dots \text{ e } x_m \text{ é } A_{i,m} \text{ então } y \text{ é } C_i \quad (1)$$

onde  $x_i$  são as variáveis de entrada,  $y$  é a variável de saída,  $A_i$  e  $C_i$  são conjuntos nebulosos.

O procedimento de projeto adotado para o controlador nebuloso é sintetizado pelas seguintes etapas: (i) definir as funções de pertinência das entradas e das saídas; (ii) selecionar a(s) entrada(s) de controle; (iii) especificar as regras associadas às funções de pertinência; (iv) selecionar o método de inferência associado as regras de produção; (v) selecionar o método de nebulização (adotado o método do centróide neste trabalho) e decodificação; e (vi) avaliação do controlador na navegação do robô móvel.

## 3 Veículos de Braitenberg

Na década de 1950, Grey W. Walter propôs a construção de modelos eletrônicos para analisar comportamentos complexos. Grey W. Walter desenvolveu uma pesquisa pioneira relativa a robôs móveis autônomos, pois concebeu um robô móvel (com uma forma que lembrava uma tartaruga ou “tortoise”) em plástico que possuía três rodas, sensores de toque e luminosidade, motor de propulsão, tubos a vácuo e era controlado por dois “neurônios” (amplificadores interconectados).

A abordagem de Grey Walter (Walter, 1950, 1951, 1963; Freeman, 2003) foi precursora dos conceitos propostos por Braitenberg (Braitenberg, 1984) e denominados veículos de Braitenberg. Os veículos de Braitenberg são abordagens especiais de robôs móveis que podem exibir comportamentos de medo, atração, repulsão, persistência, exploração, amistoso, entre outros (Coelho e Vallim, 2001). Nos veículos de Braitenberg também é assumido que o sensor gera um sinal que é proporcional ao estímulo.

Neste trabalho é assumido que o robô móvel deve exibir um comportamento de atração a uma fonte luminosa. Neste contexto, o robô móvel também deve ser capaz, de forma autônoma, explorar o ambiente, desviando-se dos obstáculos, no final, indo de encontro à fonte luminosa.

#### 4 Hardware do projeto do robô móvel

O objetivo principal deste trabalho foi a implementação de um sistema *fuzzy* para ser avaliado em um robô construído usando *kit* LEGO DACTA®. O mesmo deve ser capaz de percorrer um ambiente e ir ao encontro de uma fonte luminosa fixa, desviando-se de obstáculos fixos que estejam presentes no caminho. Neste contexto, o projeto de robô móvel concebido usando *kit* LEGO utiliza as seguintes tecnologias (Fondazzi e Yoshikawa, 2005; Pereira, 2006):

##### Sensor foto-sensível

Os sensores serão responsáveis pela aquisição dos sinais do mundo externo para sinais elétricos. O sensor foto-sensível utilizado neste projeto é um diodo semiconductor em que a junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa (Fig. 2).

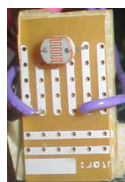


Fig. 2. Sensor foto-sensível.

##### Sensor de ultra-som

O funcionamento do sonar baseia-se no princípio do eco. Um sinal ultra-sônico de curta duração é enviado e o tempo até o eco ser recebido é medido, sabendo-se a velocidade do som no ar, calcula-se a distância, conforme ilustração da Fig. 3. O sonar utilizado neste projeto é da marca “TATO Equipamentos Eletrônicos” (Tato, 2007), com alcance mínimo de 20 mm e máximo de 1500 mm (Fig. 4).

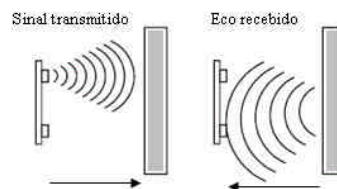


Fig. 3. Ilustração referente ao funcionamento do sonar.

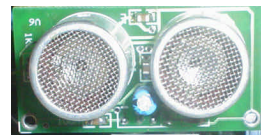


Fig. 4. Sensor de ultra-som TATO.

##### Kit LEGO DACTA e Handy Board

O kit LEGO DACTA®, é um conjunto de peças permite a criação de robôs móveis usando blocos de montar, engrenagens, motores, sensores, polias e a interface RCX™. O RCX é um microprocessador que atua como “cérebro” do robô. Apesar de ser versátil, o RCX possui algumas falhas quando é necessário trabalhar com diferentes tipos de sensor e sua linguagem de programação acaba sendo insuficiente caso se deseje fazer algo mais profundo, por esses motivos, neste projeto, é utilizada a *Handy Board* (Martin, 2002).

Desenvolvida pelo MIT, a *Handy Board* é baseada no microcontrolador da Motorola MC68HC11 e inclui 32K de memória RAM, 4 saídas para motores DC, e um conector que permite que sensores ativos sejam conectados individualmente na placa. Contém um visor LCD integrado e baterias recarregáveis. O *Handy Board* é promissora para o desenvolvimento de projetos em robótica móvel (Fig. 5).

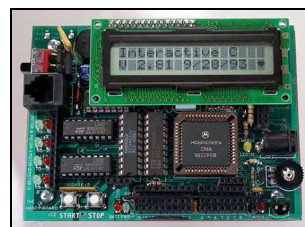


Fig. 5. Handy Board.

Além destas características citadas, a *Handy Board* possui um compilador C, o Interactive C desenvolvido por Fred G. Martin (Martin, 2002). Este compilador permite o desenvolvimento de programas em linguagem C com o compilador Interactive C, que podem ser descarregados para a placa facilmente via uma interface serial que acompanha a *Handy Board*.

O Interactive C (ou IC) é uma linguagem que utiliza código C e é constituída em um compilador com Debug interativo de comando por linha e

modulo de linguagem de máquina com execução em tempo Real. O IC compila o código em C em linguagem de máquina no computador, e depois compilando em código nativo de máquina diretamente no processador da *Handy Board*.

#### Sistema integrado do robô móvel e os sensores

Como a *Handy Board* possui dois temporizadores (*timers*) disponíveis para utilização do usuário, adotou-se estes dois temporizadores para implementar os sensores de ultra-som, ficando o robô dotado de um sensor frontal e outro traseiro.

As ligações do sensor foto-resistor e também do sensor de ultra-som são ilustradas nas Figs. 6 e 7.

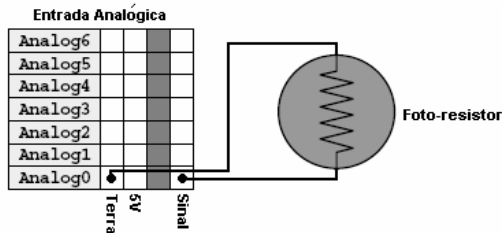


Fig. 6. Ligação do sensor foto-resistor com a *Handy Board*.

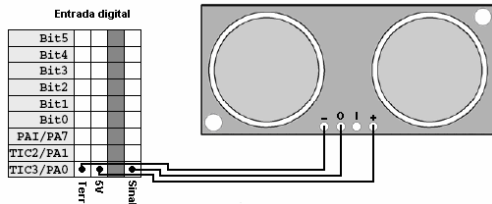


Fig. 7. Ligação do sensor de ultra-som com a *Handy Board*.

Na Fig. 8 é mostrada a versão do robô móvel construída e testada.

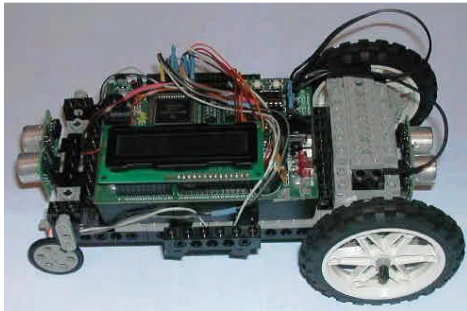


Fig. 8. Robô móvel usando kit LEGO, *Handy Board* e sensores.

### 5 Software do projeto do robô móvel

O compilador utilizado para a programação da *Handy Board* é o Interactive C para Windows®. A transferência de dados entre o computador e a *Handy Board* é realizada através da saída serial RS-232.

O *software* implementado usa conceitos de sistemas nebulosos, veículos de Braitenberg e sistemas autônomos para realizar o controle da movimentação do robô móvel. Foi escolhido um

sistema nebuloso por ser capaz de determinar uma solução (saída do sistema) através da fusão de várias entradas de sensores.

Com um diagrama de transição de estados, tem-se uma representação dos estados do sistema, conforme apresentado na Fig. 9. Através desta representação, é possível fazer uma rápida análise do *software* que foi implementado. Inicialmente o robô entra em modo *pathfinder*, que consiste em iniciar a busca pela fonte luminosa. Enquanto ele realiza esta busca, aguarda dados dos sensores de luz e de distância. Os dados capturados pelos sensores passam por um processo de codificação, que consiste em passar os valores do domínio real para o domínio dos conjuntos nebulosos. Desta forma é possível utilizar a inferência nebulosa para a tomada de decisão. Uma vez tendo a resposta da inferência, é necessário fazer o processo inverso (decodificação) para se obter um valor *crisp* que seja enviado aos motores.

Para as tomadas de decisões do robô, o controlador utiliza dados das tabelas de valores de entrada dos sensores. No total são três tabelas do sistema nebuloso (Tabelas 1 a 3), das quais duas são relacionadas às entradas dos sensores. A outra tabela é relacionada às decisões de saída (conseqüente das regras), na qual uma associação diferenciada é utilizada para maior compreensão.

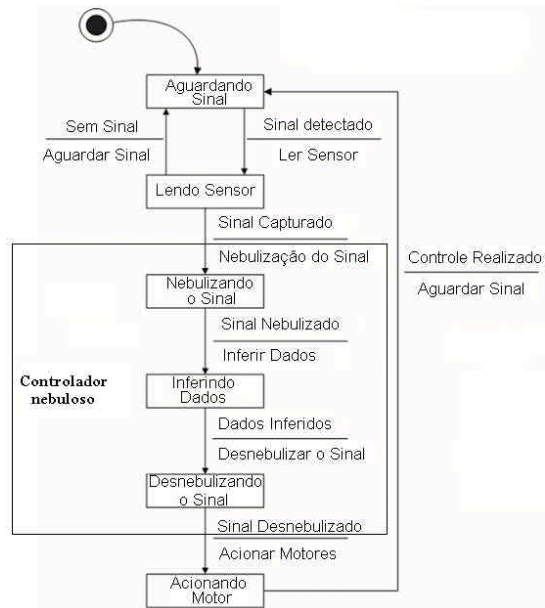


Fig. 9. Diagrama de transição de estados do *software*.

Tabela 1. Relação de intensidade de luz.

		Luz Esquerda		
		Baixa	Média	Alta
Luz Direita	Baixa	Indiferente	Esquerda	Esquerda
	Média	Direita	Indiferente	Esquerda
	Alta	Direita	Direita	Indiferente



Tabela 2. Relação de distância.

		Direção Frente		
		Perto	Média	Longe
Direção Atrás	Perto	Indiferente	Frente	Frente
	Média	Atrás	Indiferente	Frente
	Longe	Atrás	Atrás	Indiferente

Tabela 3. Relação de saída das direções.

		Direção (Direita / Esquerda)			
		Não	Direita (D)	Esquerda (E)	Indiferente
Direção (Frente / Atrás)	Não	Não	D	E	D ou E
	Frente (F)	F	F ou D	F ou E	F ou D ou E
	Atrás (A)	A	A ou D	A ou E	A ou D ou E
	Indiferente	F ou A	F ou A ou D	F ou A ou E	F ou A ou D ou E

Para determinar os valores das funções de pertinência de intensidade de luz (alta, média e fraca) e de distância (perto, médio e longe), utiliza-se o método de tentativa e erro, até o comportamento do robô esteja satisfatório. Os valores encontrados estão apresentados na Fig. 10. Estes valores são os resultados das leituras diretas dos sensores, antes de passar pela codificação.

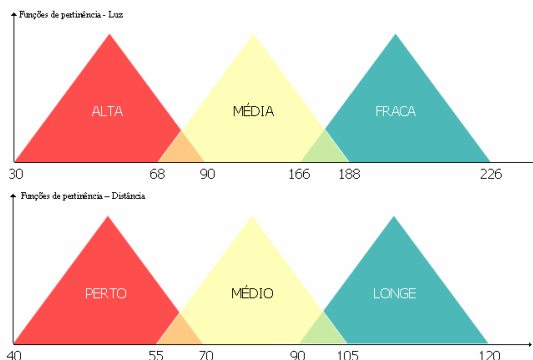


Fig. 10. Funções de pertinência para os experimentos com o sistema de controle nebuloso do robô móvel.

Na etapa de inferência ocorrem as operações de combinação dos antecedentes (intensidade da luz e distância) das regras apresentadas nas Tabelas 1 a 3, após é realizada a implicação e *modus ponens generalizado*.

Neste contexto, a tomada de decisão é definida de forma hierárquica (Raju *et al.*, 1991; Raju e Zhou, 1993; Wang, 1999) constituída de três sistemas nebulosos, conforme apresentado na Fig. 11.

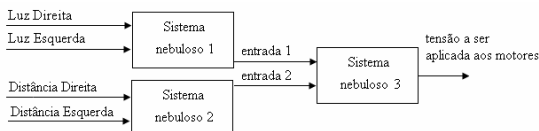


Fig. 11. Sequência hierárquica para a tomada de decisão no sistema nebuloso.

## 6 Resultados

Os testes realizados neste sistema foram realizados após a finalização de cada um dos módulos, isso por que o objetivo do projeto é a simulação em ambientes específicos.

A validação do sistema será aceito caso o robô percorra todo o ambiente sem colidir com obstáculos ou com a parede. O robô deverá também ser capaz de achar o foco luminoso caso este exista e, caso não exista, deverá ficar percorrendo o ambiente até a intervenção humana.

Nas Fig. 11 e Tabela 4 são apresentadas as etapas na movimentação do robô para um determinado cenário. Neste caso, o robô móvel obteve êxito na tarefa de validação obtendo desvio de obstáculos e se direcionando para a fonte luminosa.

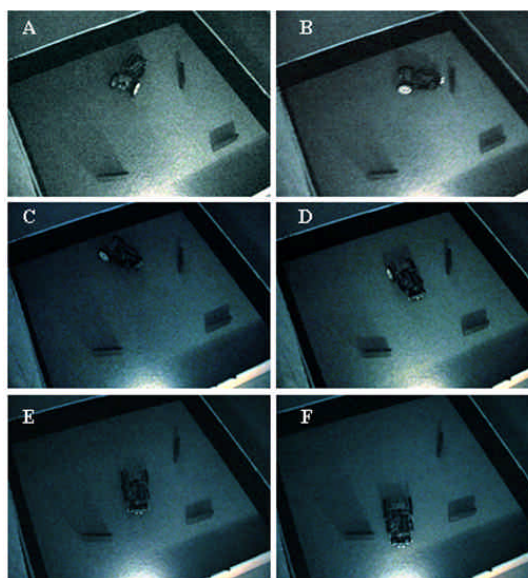


Fig. 11. Sequência de etapas na movimentação do robô móvel.

Tabela 4. Descrição das etapas em termos de medição pelos sensores de ultra-som.

Etapa	Sensores			
	Luz Esquerda	Luz Direita	Distância Frente	Distância Traseira
A	Baixa	Baixa	Longe	Longe
B	Baixa	Média	Perto	Longe
C	Média	Média	Média	Longe
D	Média	Alta	Longe	Longe
E	Alta	Alta	Longe	Longe
F	Alta	Alta	Média	Longe
G	Alta	Alta	Perto	Longe

## 7 Conclusão

Este artigo apresenta a descrição e validação do sistema nebuloso para o controle da movimentação

um robô móvel concebido com a utilização de peças LEGO e uma *Handy Board*.

O robô obteve sucesso em cumprir os objetivos propostos, percorrendo com sucesso um cenário com obstáculos e uma fonte luminosa.

Em trabalhos futuros, deseja-se incorporar ao robô móvel de sensores laterais e um sistema de visão computacional baseado na câmera CMUcam.

### Referências Bibliográficas

- Abdessemed, F., Benmahammed, K. e Monacelli, E. (2004). A fuzzy-based reactive controller for a non-holonomic mobile robot, *Robotics and Autonomous Systems*, **47**: 31-46.
- Alsina, P. J., Gonçalves, L. M. G., Vieira, F. C., Pedrosa, D. P. F. e Medeiros, A. A. D. (2002). Navegação e controle de robôs móveis, *Minicurso*, XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal, RN.
- Angelov, P. e Zhou, X. (2007). Evolving fuzzy classifier for novelty detection and landmark recognition by mobile robots, *Mobile robots: the evolutionary approach*, Studies in Computational Intelligence, vol. 50, Nedjah, N., Coelho, L. S. e Mourelle, L. M. (eds.), Springer-Verlag, Berlin, Germany, chapter 5, pp. 89-118.
- Araujo Filho, J. E. (2004). Entendendo a lógica fuzzy aplicada a controle de processos e a sistemas de decisão, *Minicurso*, 4º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, ISA Show, São Paulo, SP.
- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles: experiments in synthetic psychology*, The Cambridge, MIT Press.
- Coelho, L. S. e Vallim, M. (2001). Uma abordagem multidisciplinar de robótica móvel em cursos de tecnologia e de engenharia, *Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, XXIX COBENGE*, Porto Alegre, RS.
- Ferrari, M., Ferrari, G. e Hempel, R. (2002). Building robots with LEGO Mindstorms: the ultimate tool for Mindstorms manics!, Syngress Publishing, USA.
- Fondazzi, A. F. e Yoshikawa, I. Y. (2005). Abordagem de sistema fuzzy aplicada à movimentação de um robô móvel, *Projeto de conclusão de graduação*, Engenharia de Computação, PUCPR, Curitiba, PR.
- Freeman, W. J. (2003). W. G. Walter: biographical essay, *Encyclopedia of Cognitive Science*, **4**: 537-539.
- Jang, J. -S. R. e C. -T. Sun (1995). Neuro-fuzzy modeling and control, *Proceedings of the IEEE*, **83**(3): 378-406.
- Johansson, R. (2000). Intelligent motion planning for a multi-robot system, *Master dissertation*, School of Computer Science and Engineering, Royal Institute of Technology. Stockhol, Sweden.
- Kodagoda, K. R. S., Wijesoma, W. S. e Teoh, E. K. (2002). Fuzzy speed and steering control of an AGV, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **10**(1): 112-120.
- Mamdani, E. e S. Assilian (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, **7**(1): 1-13.
- Marchi, J. (2001). Navegação de robôs móveis autônomos: estudo e implementação de abordagens, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, SC.
- Martin, F. G. (2000). *The Handy board technical reference*, University of Massachusetts Lowell, Computer Science Department, MA, USA.
- Passino, K. M. e Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*, Addison Wesley Longman, CA, USA.
- Pereira, R. L. (2006). Concepção de robô móvel usando kit LEGO e sistema fuzzy, *Projeto de conclusão de curso de graduação*, Engenharia Mecatrônica, PUCPR, Curitiba, PR.
- Raju, G. V. S., Zhou, J. e Kisner, R.A. (1991). Hierarchical fuzzy control, *International Journal of Control*, **54**(5): 1201-1216.
- Raju, G. V. S. e Zhou, J. (1993). Adaptive hierarchical fuzzy controller, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **23**(4): 973-980.
- Sierakowski, C. A. (2005). *Inteligência coletiva aplicada a problemas de robótica móvel*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PUCPR, Curitiba, PR.
- Tato (2007). [http://www.tato.ind.br/prod\\_sensor.htm](http://www.tato.ind.br/prod_sensor.htm)
- Walter, W. G. (1950). An imitation of life, *Scientific American*, May, pp. 42-45.
- Walter, W. G. (1951). A machine that learns, *Scientific American*, August, pp. 60-63.
- Walter, W. G. (1963). *The living brain*, W. W. Norton, New York, NY, USA.
- Wang, L. X. (1999). Analysis and design of hierarchical fuzzy systems, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **7**(5): 617-624.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets, *Information and Control*, **8**: 338-353.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **3**(1): 28-44.