

**Nilton Cesar Anchayhua Arestegui**

**Localização e mapeamento de robôs móveis  
utilizando inteligência e visão computacional**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Mecânica Aplicada do Departamento de Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marco Antônio Meggiolaro

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009

**Nilton Cesar Anchayhua Arestegui**

**Localização e Mapeamento de Robôs Móveis  
Utilizando Inteligência e Visão Computacional**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.  
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marco Antonio Meggiolaro**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica PUC - Rio

**Prof. Mauro Speranza Neto**

Departamento de Engenharia Mecânica PUC - Rio

**Prof.<sup>a</sup> Karla Tereza Figueiredo Leite**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC - Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 14 de Setembro 2009.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Nilton Cesar Anchayhua Arestegui**

Graduou-se em engenharia na Universidade Nacional de Engenharia (UNI)– (Lima, Peru), cursando Engenharia Mecatrônica. Especializou-se na Universidade Nacional de Engenharia na Área de Eletrônica (Lima, Peru) em Processamento Digital de Sinais (DSP), e participou no centro de desenvolvimento de inteligência computacional.

#### Ficha Catalográfica

Anchayhua Arestegui, Nilton Cesar

Localização e mapeamento de robôs móveis utilizando inteligência e visão computacional / Nilton Cesar Anchayhua Arestegui; orientador: Marco Antônio Meggiolaro. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Mecânica, 2009.

v., 111 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Mecânica – Tese. 2. inteligência computacional. 3. Robô Móvel. 4. Scale Invariant Feature Transform (SIFT). 5. Algoritmos Genéticos. 6. Redes Neurais. 7. Lógica difusa. I. Meggiolaro, Marco Antônio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Mecânica. III. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Marco Antônio Meggiolaro pelo apoio e a quem admiro muito e é exemplo para mim, obrigado pela simpatia de sempre, e incentivo para a realização deste trabalho.

Ao CAPES e PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho no poderia ter sido realizado.

A meus pais Beltran, Lucila, a meus irmãs Tania, Susan que sempre estiveram comigo e meu família.

Aos meus colegas da PUC-Rio, David, Rocem, johana, Gerardo, Cristian, Cesitar, Markini, jorge, juancarlos el loco, quem me fizeram adorar esse lugar.

Aos professores Marco Aurelio, Marley e Omar que me ofereceram a oportunidade desta cooperação.

Ao pessoal do departamento de Mecânica pela ajuda de todos os dias.

## Resumo

Anchayhua Arestegui, Nilton Cesar; Meggiolaro, Marco Antonio. **Localização e Mapeamento de Robôs Móveis Utilizando Inteligência e Visão Computacional**. Rio de Janeiro, 2009. 111p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação introduz um estudo sobre os algoritmos de inteligência computacional para o controle autônomo dos robôs móveis. Nesta pesquisa, são desenvolvidos e implementados sistemas inteligentes de controle de um robô móvel construído no Laboratório de Robótica da PUC-Rio, baseado numa modificação do robô ER1. Os experimentos realizados consistem em duas etapas: a primeira etapa de simulação usando o software *Player-Stage* de simulação do robô em 2-D onde foram desenvolvidos os algoritmos de navegação usando as técnicas de inteligência computacional; e a segunda etapa a implementação dos algoritmos no robô real. As técnicas implementadas para a navegação do robô móvel estão baseadas em algoritmos de inteligência computacional como são redes neurais, lógica difusa e *support vector machine* (SVM) e para dar suporte visual ao robô móvel foi implementado uma técnica de visão computacional chamado *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), estes algoritmos em conjunto fazem um sistema embebido para dotar de controle autônomo ao robô móvel. As simulações destes algoritmos conseguiram o objetivo, mas na implementação surgiram diferenças muito claras respeito à simulação pelo tempo que demora em processar o microprocessador.

## Palavras-chave

Inteligência Computacional; Robô Móvel; Scale Invariant Feature Transform (SIFT); Algoritmos Genéticos; Redes Neurais; Lógica Difusa.

## Abstract

Anchayhua Arestegui, Nilton Cesar; Meggiolaro, Marco Antonio (Advisor). **Computational Intelligence Techniques for Visual Self-Localization and Mapping of Mobile Robots**. Rio de Janeiro, 2009. 111p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This theses introduces a study on the computational intelligence algorithms for autonomous control of mobile robots, In this research, intelligent systems are developed and implemented for a robot in the Robotics Laboratory of PUC-Rio, based on a modification of the robot ER1. The verification consist of two stages: the first stage includes simulation using Player-Stage software for simulation of the robot in 2-D with the developed of artificial intelligence; an the second stage, including the implementation of the algorithms in the real robot. The techniques implemented for the navigation of the mobile robot are based on algorithms of computational intelligence as neural networks, fuzzy logic and support vector machine (SVM); and to give visual support to the mobile robot was implemented the visual algorithm called Scale Invariant Future Transform (SIFT), these algorithms in set makes an absorbed system to endow with independent control the mobile robot. The simulations of these algorithms had obtained the objective but in the implementation clear differences had appeared respect to the simulation, it just for the time that delays in processing the microprocessor.

## Keywords

Computational Intelligence; Mobile Robot; Scale Invariant Feature Transform (SIFT); Genetic Algorithms; Neural Network; Fuzzy Logic.

# Sumário

1	Introdução	14
1.1	Contexto e motivações	14
1.2	Robôs móveis - uma visão geral	15
1.3	Histórico	17
1.4	Objetivo	19
1.5	Escopo	20
1.6	Organização da Dissertação	20
2	Fundamentação Teórica	22
2.1	Modelo cinemático do robô móvel	22
2.2	Percepção Sensorial	29
2.3	Localização-Posicionamento	31
2.4	Navegação de robôs móveis	36
2.5	Planejamento da Trajetória	47
3	O ambiente de desenvolvimento	48
3.1	Introdução	48
3.2	Projeto mecânico do robô	49
3.3	Projeto eletrônico do robô	54
3.4	Projeto do software	59
4	Desenvolvimento de Algoritmos de controle	65
4.1	Introdução	65
4.2	Definição do problema	65
4.3	Percepção Geral	65
4.4	Algoritmo de Exploração	67
4.5	Controlador Fuzzy	77
5	Testes e Resultados	82
5.1	Testes e Resultados no Player-Stage	82
5.2	Experimentos de identificação dos nós	98
5.3	Experimentos de exploração completa	104
6	Conclusão e trabalhos futuros	107
	Referências Bibliográficas	109

## Lista de figuras

1.1	Componentes básicos de um robô: sistema de percepção, de controle, de acionamento e mecanismos de atuação.	15
1.2	Robô Shakey de Stanford	17
1.3	RobartI, RobartII e RobartIII projetados pela marinha norte-americana para patrulhamento em ambientes fechados	18
1.4	Robô Sojourner enviado para uma pesquisa a Marte	19
1.5	a)Omni-França b)Minerva-Carnegie Mello c)Segbot-Stanford d)Familia Pioneer-Espanha e)Tourguide-Alemanha	20
2.1	sistema de Referência global e sistema de referência local do robô	23
2.2	Robô móvel alinhado com os eixos do sistema de referência local	24
2.3	Referência global da unidade do robô	25
2.4	Roda standard fixa e seus parâmetros	28
2.5	Disco do sensor de posição, usado para inferir velocidade	31
2.6	Pulsos de quadratura do encoder	32
2.7	Intensidade típica da distribuição de um sensor ultra-sônico	32
2.8	Conjuntos <i>fuzzy</i> - A variável distância apresenta três conjuntos <i>fuzzy</i> que representam os três conceitos lingüísticos: perto, médio, longe	40
2.9	Idéia básica da Transformada Hough	46
3.1	Semelhança robô e a pessoa humana	48
3.2	Robô ER1 modificado no momento de testes	50
3.3	Motor Brushless DC	51
3.4	Vista transversal do motor brushless	51
3.5	Sensor de Ultra-Som SRF08	52
3.6	Sensor Infravermelho GP2D15 da família Sharp	53
3.7	O Encoder HEDL5540	53
3.8	conexão e pulsos do encoder	53
3.9	Câmera digital USB Clone	54
3.10	Arquitetura do TMS320F2812	55
3.11	Processador de Sinais DSP TMS320F2812	55
3.12	Circuito de potência do motor Brushless	58
3.13	Interface do sensor infravermelho com o DSP	59
3.14	Interface do Sensor Ultra-som com o DSP	60
3.15	Interface do Encoder com o DSP	61
3.16	Ambiente de simulação do player-stage em 2-D	62
3.17	Aspecto da janela do Code Composer Studio	62
3.18	Diagrama de blocos do controle vetorial de velocidade para o robô	64
4.1	Posição dos sensores no robô ER1	66
4.2	Rob móvel com o vetor de percepção	66
4.3	Diagrama de fluxo da etapa de exploração	68
4.4	Diagrama de fluxo do sistema de posição inicial	70
4.5	Diagrama de fluxo do sistema de Percepção	71



4.6	Diagrama de fluxo do sistema de Busca dos nós	72
4.7	Grafo de árvore de nós da exploração	73
4.8	Diagrama de fluxo do sistema de Localização	74
4.9	Diagrama de fluxo do sistema de Navegação ao nó pai	75
4.10	Rede Neuronal proposto	76
4.11	Diagrama de fluxo do sistema de Aprendizagem	77
4.12	Conjuntos fuzzy da variável ângulo de percepção	78
4.13	Conjuntos fuzzy da variável percepção	78
4.14	Conjuntos fuzzy da variável mudança de percepção	79
4.15	Variável de saída fuzzy <i>Direction</i>	79
4.16	Variável de saída fuzzy aceleração	80
4.17	Controle de direção do robô ER1	80
4.18	Controle de velocidade do robô ER1	81
5.1	Exploração WallFollow (etapa 1/10) - robô se move na direção de vetor percepção geral até chegar próximo da parede	82
5.2	Exploração WallFollow (etapa 2/10) - robô se move seguindo a parede	83
5.3	Exploração WallFollow (etapa 3/10) - robô trata de seguir a parede com certa oscilação	83
5.4	Exploração WallFollow (etapa 4/10) - robô se move paralelo à parede e vira à esquerda	84
5.5	Exploração WallFollow (etapa 5/10) - robô se move perto da parede com oscilações devido à parede irregular	84
5.6	Exploração WallFollow (etapa 6/10) - robô se move paralelo à parede	85
5.7	Exploração WallFollow (etapa 7/10) - robô vira à esquerda e segue à parede	85
5.8	Exploração WallFollow (etapa 8/10) - robô vira com aceleração para conseguir virar 180°	86
5.9	Exploração WallFollow (etapa 9/10) - robô se move paralelo à parede	86
5.10	Exploração WallFollow (etapa 10/10) - robô segue paralelo à parede da parte inferior do mapa	87
5.11	Exploração do Espaço Livre (etapa 1/6) - robô procura o espaço aberto	87
5.12	Exploração do Espaço Livre (etapa 2/6) - robô procura achar o caminho livre de obstáculos	88
5.13	Exploração do Espaço Livre (etapa 3/6) - robô segue na direção do menor valor do vetor percepção geral	88
5.14	Exploração do Espaço Livre (etapa 4/6) - robô segue procurando o espaço livre	89
5.15	Exploração do Espaço Livre (etapa 5/6) - robô encontra um obstáculo e procura virar para sair em outra direção	89
5.16	Exploração do Espaço Livre (etapa 6/6) - robô consegue sair do obstáculo e novamente procura o espaço livre	90
5.17	Navegação num ambiente desconhecido(etapa 1/16) - robô na posição inicial procura as possíveis direções de navegação	90
5.18	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 2/16) - robô começa navegar na primeira direção	91

5.19	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 3/16) - robô procura voltar novamente ao nó pai	91
5.20	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 4/16) - robô chega ao nó pai	92
5.21	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 5/16) - robô procura outra direção	92
5.22	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 6/16) - robô chega até estar próximo à parede	93
5.23	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 7/16) - robô procura a direção do nó pai	93
5.24	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 8/16) - robô segue uma trajetória diferente até alcançar o nó pai	94
5.25	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 9/16) - robô procura uma nova direção	94
5.26	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 10/16) - robô faz um wallfollow nesta trajetória	95
5.27	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 11/16) - robô encontra uma possível trajetória	95
5.28	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 12/16) - robô navega para outro nó	96
5.29	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 13/16) - robô tem uma condição de retorno	96
5.30	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 14/16) - robô volta para o nó pai e gira até encontrar a direção do nó inicial	97
5.31	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 15/16) - robô novamente faz um wallfollow para chegar ao nó pai	97
5.32	Navegação num ambiente desconhecido (etapa 16/16) - robô consegue chegar ao nó pai e consegue a condição de parada	98
5.33	Nó pai no início da navegação	99
5.34	Descritores SIFT do nó depois do processamento no matlab num range total de visão	99
5.35	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 15°	100
5.36	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 30°	100
5.37	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 45°	100
5.38	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 60°	101
5.39	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 75°	101
5.40	Descritores SIFT do nó pai num ângulo de 90°	101
5.41	Desempenho da rede neuronal para uma camada escondida de 20 neurônios	102
5.42	Desempenho da rede neuronal para uma camada escondida de 25 neurônios	102
5.43	Desempenho da rede neuronal para uma camada escondida de 26 neurônios	103
5.44	Desempenho da rede neuronal para uma camada escondida de 27 neurônios	103
5.45	Desempenho da rede neuronal para uma camada escondida de 30 neurônios	104
5.46	O robô ER1 evita um obstáculo	105



## Lista de tabelas

2.1	Classificação dos sensores usados nas aplicações de robôs móveis	30
2.2	Comparação entre controladores: FO-Forte, ME-Médio, RA-Razoável e FR-Fraco	43
4.1	Regras do controle de direção do robô ER1	81
4.2	Regras do controle de velocidade do robô ER1	81

*"Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse escrevendo uma dissertação".*

**Albert Einstein., .**