



Smith Washington Arauco Canchumuni

**Localização e Mapeamento Probabilístico
Simultâneos de Robôs Móveis em
Ambientes Internos com um Sensor de
Varredura a Laser**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Smith Washington Arauco Canchumuni

**Localização e Mapeamento Probabilístico
Simultâneos de Robôs Móveis em
Ambientes Internos com um Sensor de
Varredura a Laser**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico 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. Karla Tereza Figueiredo Leite

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-RIO

Prof. Max Suell Dutra

Departamento de Engenharia Mecânica – Coppe

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC–Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2013

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

Smith Washington Arauco Canchumuni

Formado em Engenharia Mecatrônica pela Universidad Nacional de Ingeniería – UNI, Lima, Peru (2005-2009).

Ficha Catalográfica

Arauco Canchumuni, Smith Washington

Localização e Mapeamento Probabilístico Simultâneos de Robôs Móveis em Ambientes Internos com um Sensor de Varredura a Laser / Smith Washington Arauco Canchumuni; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. — Rio de Janeiro PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

v., 99 f: il. (color) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. SLAM. 3. Sobreposição de Varreduras do Laser. 4. Evolução Diferencial. 5. Medidor de Varredura a Laser. 6. Robô Móvel. 7. Robótica Probabilística.

I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

Dedicado aos meus pais, Atilio e Juana, a meus tios, Joseph e Maria pelo apoio
todo este tempo.

Agradecimentos

A meu orientador Prof. Marco Antonio Meggiolaro, que sob sua orientação, confiança e suporte acadêmico foi possível a realização deste trabalho.

Aos Profs. Ricardo Rodríguez Bustinza e Nilton Cesar Anchayhua Arestegui, da Universidad Nacional de Ingeniería, pelo apoio para começar meus estudos de pós-graduação.

À PUC-Rio, através dos professores e da equipe técnica e administrativa do Departamento de Engenharia Mecânica.

Finalmente à CAPES, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Arauco Canchumuni, Smith Washington; Meggiolaro, Marco Antonio. **Localização e Mapeamento Probabilístico Simultâneos de Robôs Móveis em Ambientes Internos com um Sensor de Varredura a Laser**. Rio de Janeiro, 2013. 99p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os Robôs Móveis são cada vez mais inteligentes, para que eles tenham a capacidade de se mover livremente no interior de um ambiente, evitando obstáculos e sem assistência de um ser humano, precisam possuir um conhecimento prévio do ambiente e de sua localização. Nessa situação, o robô precisa construir um mapa local de seu ambiente durante a execução de sua missão e, simultaneamente, determinar sua localização. Este problema é conhecido como Mapeamento e Localização Simultâneas (SLAM). As soluções típicas para o problema de SLAM utilizam principalmente dois tipos de sensores: (i) odômetros, que fornecem informações de movimento do robô móvel e (ii) sensores de distância, que proporcionam informação da percepção do ambiente. Neste trabalho, apresenta-se uma solução probabilística para o problema SLAM usando o algoritmo DP-SLAM puramente baseado em medidas de um LRF (Laser Range Finder), com foco em ambientes internos estruturados. Considera-se que o robô móvel está equipado com um único sensor 2D-LRF, sem nenhuma informação de odometria, a qual é substituída pela informação obtida da máxima sobreposição de duas leituras consecutivas do sensor LRF, mediante algoritmos de Correspondência de Varreduras (Scan Matching). O algoritmo de Correspondência de Varreduras usado realiza uma Transformada de Distribuições Normais (NDT) para aproximar uma função de sobreposição. Para melhorar o desempenho deste algoritmo e lidar com o LRF de baixo custo, uma reamostragem dos pontos das leituras fornecidas pelo LRF é utilizada, a qual preserva uma maior densidade de pontos da varredura nos locais onde haja características importantes do ambiente. A sobreposição entre duas leituras é otimizada fazendo o uso do algoritmo de Evolução Diferencial (ED). Durante o desenvolvimento deste trabalho, o robô móvel "iRobot Create", equipado com o sensor LRF "Hokuyo URG-04lx", foi utilizado para coletar dados reais de ambientes internos, e diversos mapas 2D gerados são apresentados como resultados.

Palavras-chave

SLAM; Sobreposição de Varreduras do Laser; Evolução Diferencial; Medidor de Varredura a Laser; Robô Móvel; Robótica Probabilística.

Abstract

Arauco Canchumuni, Smith Washington; Meggiolaro, Marco Antonio (Advisor). **Probabilistic Simultaneous Localization and Mapping of Mobile Robots in Indoor Environments with a Laser Range Finder**. Rio de Janeiro, 2013. 99p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The robot to have the ability to move within an environment without the assistance of a human being, it is required to have a knowledge of the environment and its location within it at the same time. In many robotic applications, it is not possible to have an a priori map of the environment. In that situation, the robot needs to build a local map of its environment while executing its mission and, simultaneously, determine its location. A typical solution for the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) problem primarily uses two types of sensors: i) an odometer that provides information of the robot's movement and ii) a range measurement that provides perception of the environment. In this work, a solution for the SLAM problem is presented using a DP-SLAM algorithm purely based on laser readings, focused on structured indoor environments. It considers that the mobile robot only uses a single 2D Laser Range Finder (LRF), and the odometry sensor is replaced by the information obtained from the overlapping of two consecutive laser scans. The Normal Distributions Transform (NDT) algorithm of the scan matching is used to approximate a function of the map overlapping. To improve the performance of this algorithm and deal with low-quality range data from a compact LRF, a scan point resampling is used to preserve a higher point density of high information features from the scan. An evolution differential algorithm is presented to optimize the overlapping process of two scans. During the development of this work, the mobile robot "iRobot Create", assembled with one LRF "Hokuyo URG-04LX", is used to collect real data in several indoor environments, generating 2D maps presented as results.

Keywords

SLAM; Scan Matching; Evolution Differential; Laser Range Finder; Robot Mobile; Probabilistic Robotics.

Sumário

Sumário das notações	15
1 Introdução	18
1.1 Motivação	20
1.2 Objetivos do Trabalho	21
1.3 Revisão Bibliográfica	21
1.3.1 SLAM	21
1.4 Roteiro da Dissertação	25
2 Fundamentação Teórica	26
2.1 Conceitos Básicos em Probabilidade	26
2.1.1 Regra de Bayes	27
2.1.2 Filtro de Bayes para SLAM	28
2.1.3 Laser Range Finder	31
2.2 Mapa	32
2.2.1 Representação de mapas por Grade de Ocupação	32
2.2.2 Representação de mapas baseado nas Características	34
2.3 Interação do Robô com o Ambiente	34
2.4 Correspondência de Varreduras (Scan Matching)	34
2.4.1 Algoritmo de Correspondência de Varreduras por NDT	35
2.5 Inteligência Computacional	41
2.6 Evolução Diferencial	41
2.6.1 Estrutura da População	42
2.6.2 Etapas do Algoritmo de ED	42
2.7 DP-SLAM	44
2.7.1 Filtro de Partículas	45
2.7.2 Representação do Mapa	46
2.7.3 Atualização do Mapa	48
2.7.4 PD-Mapping	49
2.7.5 SLAM usando PD-Map	50
3 Implementação dos Algoritmos no Sistema Experimental	51
3.1 SLAM	51
3.1.1 Filtragem das Varreduras	51
3.2 Algoritmo de Correspondência de Varreduras	55
3.3 Parâmetros e Considerações	56
3.3.1 O Sensor	56
3.3.2 O Ambiente	57
3.3.3 Robô Móvel	58
4 Resultados da Simulação	60
4.1 Correspondência de Varreduras	60
4.2 SLAM mediante Correspondência de Varreduras	66
4.3 DP-SLAM	67

4.3.1	Modelo de Movimento	68
4.4	Mapeamento e Localização usando DP-SLAM	70
5	Resultados Experimentais	72
5.1	Correspondência de Varreduras	72
5.2	SLAM mediante Correspondência de Varreduras	83
5.3	Mapeamento e Localização usando DP-SLAM	85
5.4	Comparação com Plantas Baixas	91
6	Comentários finais e sugestões	94
	Referências Bibliográficas	96

Lista de figuras

Figura 55 -	Interação do robô Móvel com o ambiente.	19
Figura 57 -	Posição e Orientação do Robô	30
Figura 58 -	Robô móvel em um mapa obtendo as medições a partir do seu LRF.	31
Figura 60 -	Laser Range Finder (LRF), Hokuyo URG 04LX-UG01.	32
Figura 61 -	Representação de um ambiente mediante Grade de Ocupação	33
Figura 64 -	Posição Inicial e Final do robô móvel.	35
Figura 65 -	Varreduras geradas pelo sensor.	35
Figura 67 -	Processo de Evolução Diferencial	44
Figura 69 -	Representação da Gaussiana por um conjunto de partículas	46
Figura 72 -	Regiões de alta densidade, produzida por um robô móvel situado perto da parede	52
Figura 74 -	Erro na sobreposição das Varreduras (círculos pretos), a primeira Varredura (pontos vermelhos) e a segunda Varredura (pontos azuis) apresentam regiões de alta densidade (círculo verde) de pontos	52
Figura 78 -	Reamostragem Uniforme da Varredura. (a) Varredura original com 594 pontos (b) Varredura depois da reamostragem com 85 pontos.	53
Figura 81 -	Representação da <i>Saliência</i>	54
Figura 83 -	Reamostragem baseada em saliências. (a) Varredura original com 594 pontos (b) Varredura depois do reamostragem com 134 pontos.	55
Figura 87 -	Exemplos de degeneração.	57
Figura 89 -	O Robô <i>iRobot Create</i> acoplado a um LRF (<i>URG-04LX-UG01</i>)	58
Figura 91 -	Controle Mediante Microsoft Robotics Developer Studio	59
Figura 94 -	Esquema do Controle em Microsoft Robotics Developer Studio	59
Figura 95 -	Ambiente Simulado	60
Figura 101 -	Erro da Correspondência de Varreduras para duas tamanhos de grade ($0,5m; 1,0m$)	61
Figura 106 -	Algoritmo NDT para duas resoluções de Grade	62
Figura 118 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Pequenas Populações.	64
Figura 122 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Populações Médias.	64
Figura 126 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Grandes populações.	64
Figura 133 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Iterações 20 e 30.	65
Figura 137 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Iterações 25 e 40.	65
Figura 141 -	Erro do deslocamento, $(\Delta x, \Delta y, \Delta \theta)$. Iterações 50 e 75.	65
Figura 145 -	Mapeamento do Ambiente Simulado mediante Correspondência de Varreduras	66

Figura 151 - Trajetória do Ambiente Simulado. Trajetória real(vermelho) e Trajetória Estimada (verde)	67
Figura 153 - Distribuição Normal através do histograma do erro ($\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$)	68
Figura 156 - Mapa 2D do ambiente simulado obtido usando o algoritmo DP-SLAM	70
Figura 164 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	73
Figura 166 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	74
Figura 168 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	75
Figura 170 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	76
Figura 172 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	77
Figura 174 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	78
Figura 176 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para Diferentes Situações	79
Figura 179 - Valor numérico da Função Objetivo do Primeiro Experimento	80
Figura 184 - Correspondência de Varreduras com dados Reais para as Experiências 3,4 e 5	82
Figura 186 - Valor numérico da Função Objetivo do Segundo Experimento	83
Figura 187 - Correspondência de Varreduras com dados Reais (Experiência 7)	83
Figura 189 - SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Cardeal Leme 4º Andar PUC-Rio	84
Figura 193 - SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Cardeal Leme 1º Andar PUC-Rio	84
Figura 196 - SLAM para dados reais usando Correspondência de Varreduras: Edifício Kennedy 1º Andar PUC-Rio	85
Figura 198 - Mapa 2D do ambiente da primeira experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM	85
Figura 203 - Mapa 2D do ambiente da segunda experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM	86
Figura 205 - Mapa 2D do ambiente da quinta experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM	86
Figura 207 - Mapa 2D do 1º andar do Prédio Kennedy usando o algoritmo DP-SLAM	87
Figura 209 - Detalhes do Mapa 2D do ambiente da segunda experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM	88
Figura 213 - Detalhes do Mapa 2D do ambiente da quarta Experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM:	89
Figura 219 - Detalhes do Mapa 2D do ambiente da sétima experiência obtido usando o algoritmo DP-SLAM	90
Figura 225 - Sobreposição de mapas do Prédio Cardeal Leme 4º andar (Experimento 1)	91

Figura 229 - Sobreposição de mapas do Prédio Cardeal Leme 1º andar	92
Figura 235 - Sobreposição de mapas do Prédio Kennedy 1º andar	93

Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Visão geral da dimensionalidade de abordagens SLAM-mapas 2D.	24
Tabela 1.2 - Visão geral da dimensionalidade de abordagens SLAM-mapas 3D.	25
Tabela 2.1 - Algoritmo de Filtro de Partículas [1]	47
Tabela 3.1 - Características do sensor LRF modelo <i>URG – 04LX – UG01</i> .	56
Tabela 4.1 - Parâmetros a serem utilizados nos experimentos.	63
Tabela 4.2 - Modelo do Movimento de Correspondência de Varreduras [2].	69
Tabela 4.3 - Algoritmo Aproximado de uma Distribuição Normal	70
Tabela 4.4 - Parâmetros DP-SLAM dos experimentos.	71
Tabela 5.1 - Tabela das Experiências Realizadas.	81
Tabela 5.2 - Percentual de leituras com função Objetivo maior que 20.	81

*O sábio não é o que sabe, o sábio é o que faz
aquilo que sabe.*

Nuno Cobra

Sumário das notações

Símbolos romanos

C_r	A Probabilidade de crossover	$[-]$
F	Fator de Escala de Evolução Diferencial	$[-]$
f_s	Frequência do Scan	$[Hz]$
g	Número de Geração em Evolução Diferencial	$[-]$
L_i	Saliência de um ponto dirigido	$[-]$
M	Tamanho do mapa	$[-]$
N_p	Número de População	$[-]$
$P_{x,g}$	Número de População na geração g	$[-]$
P_r	Posição de Referência do Robô móvel	$[(m, m, rad)]$
P_n	Posição nova do Robô móvel	$[(m, m, rad)]$
P	Número de Partículas	$[-]$
P_i	Ponto Dirigido	$[-]$
R_θ	Orientação do Robô móvel	$[rad]$
R	Localização do Robô móvel	$[(m, m, rad)]$
R_x	Localização no eixo x do Robô móvel	$[m]$
R_y	Localização no eixo y do Robô móvel	$[m]$
S_{ref}	Varredura de Referência	$[-]$
S_{atu}	Varredura Atual	$[-]$
t	Tempo	$[seg]$
u_t	Controle do Movimento do robô móvel no tempo t	$[m]$
v_{max}	Velocidade Translacional Máxima do Robô Móvel	$[\frac{m}{seg}]$
w_{max}	Velocidade Rotacional do Robô Móvel	$[\frac{m}{seg}]$

x_B^A	Rotação e Traslação no Plano entre A e B	[-]
z_t	Medição do sensor no tempo t	[m]

Símbolos gregos

Δx	Câmbio do deslocamento no eixo x do robô móvel	[-]
Δy	Câmbio do deslocamento no eixo y do robô móvel	[-]
$\Delta \theta$	Câmbio da orientação do robô móvel	[-]
\oplus	Composição de Transformações	[-]

Subscritos

$2D$	Bidimensional
$3D$	Tridimensional
DP	Distribuição de Partículas
$DP - SLAM$	Distribuição de partículas-Mapeamento e Localização Simultânea
ED	Evolução Diferencial
EKF	Filtro de Kalman Estendido
EIF	Filtro Estendido de Informação
$FastSLAM$	Fatorada Solução de Mapeamento e Localização Simultânea
FP	Filtro de Partículas
FDP	Função Densidade de Probabilidade
GPS	Global Positioning System
ICP	Iterative Closest Point
IDC	Iterative Dual Correspondence
ICL	Iterative Closest Line
LRF	Laser Ranger Finder

<i>MS Robotics</i>	Microsoft Robotics Developer Studio
<i>NDT</i>	Transformada de Distribuições Normais
<i>SLAM</i>	Mapeamento e Localização Simultânea
<i>VPL</i>	Linguagem de Programação Visual