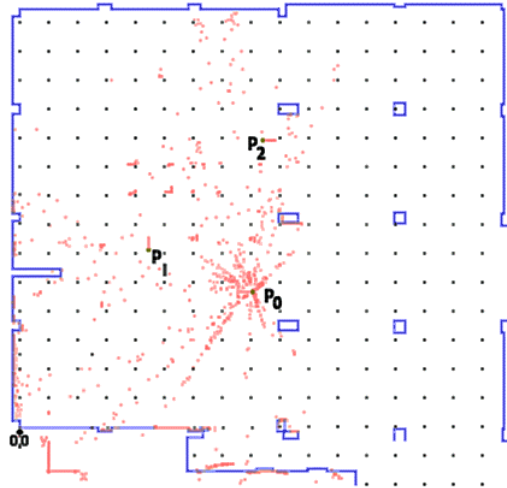




UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



Localisation of a Mobile Robot using Laser Scanner  
and Reconstructed 3D Models

**JOÃO DA SILVA GOMES MOTA**  
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientadora: Doutora Maria Isabel Lobato de Faria Ribeiro

**Júri**

Presidente: Doutora Maria Isabel Lobato de Faria Ribeiro

Vogais: Doutor Jorge Manuel Miranda Dias

Doutor José Alberto Rosado dos Santos Victor

**Novembro de 2001**

*Para a Rita,  
o Francisco, o Tiago e o João Pedro*

# Agradecimentos

Estou profundamente grato à minha orientadora, Professora Maria Isabel Ribeiro, pelo seu apoio constante durante estes anos de trabalho. Proporcionou-me um ambiente de trabalho acolhedor e estimulante, onde os novos problemas são sempre bem acolhidos e encarados como novas oportunidades. Esteve presente sempre que precisei, mas sobretudo insistiu sempre na obtenção de melhores resultados e na exploração de soluções diferentes. Devo também agradecer-lhe a cuidadosa revisão e discussão aturada durante a elaboração deste documento. A competência científica, exigência e rigor da Professora Maria Isabel Ribeiro são uma referência para mim. A sua insatisfação continuada levou-me mais longe enquanto alargava os meus horizontes científicos.

Quero agradecer ao Doutor Eng. Vítor Sequeira a sua insubstituível colaboração. Sem ele, nunca estes resultados teriam sido possíveis. São dele os programas de aquisição de dados e de interface com o meu trabalho. E, acima de tudo, conseguiu responder ao fluxo de e-mails que lhe enviei durante todo este período. Devo também agradecer ao Doutor Kia Chuan Ng pela atenção e apoio que devotou ao meu trabalho.

Quero agradecer à Rita, minha mulher, aos meus Pais e minha irmã Mariana, a sua paciência, encorajamento e adaptabilidade aos horários imprevisíveis a que os submeti.

Quero agradecer ao José Paulo Castro, que trabalhou ao meu lado durante estes anos e foi a vítima constante das minhas divagações. E ao José Gaspar que, com uma perspectiva exterior, me proporcionou críticas e sugestões muito relevantes. Quero também agradecer ao João Pedro Gomes e a todos os colegas e amigos que de várias formas me ajudaram e apoiaram durante este trabalho.

Quero agradecer ao Doutor Eng. Rui Sérgio a sua curiosidade e atenção, que me estimularam a procurar formas mais claras e elegantes de explicar e formalizar as soluções técnicas encontradas.

A todas estas pessoas dedico este trabalho, pois com elas aprendi que ler e escutar os outros é a melhor forma de corrigir os erros e melhorar o nosso caminho, sobrepondo os obstáculos até chegar mais alto, onde a vista é sem dúvida mais límpida e excitante.

Gostaria de agradecer ao Professor João Sentieiro, director do Instituto de Sistemas e Robótica (ISR), que me acolheu durante os meus estudos de Mestrado e ao Instituto Superior Técnico, a faculdade onde estudei e estudo e que apoiou este trabalho.

Quero agradecer ao Programa PRAXIS XXI do Governo Português que patrocinou os primeiros anos do meu Mestrado.

Quero agradecer ao Dr. David Leever, responsável pelo projecto RESOLV, ao qual se aplica este trabalho.



# Acknowledgements

I am deeply grateful to my advisor, Professor Maria Isabel Ribeiro, for her constant support, encouragement and assistance during the last few years. She provided me a friendly and stimulating environment where new issues were always welcome and worth thinking on. She was present whenever I needed, but especially she kept requiring better results and evaluation of different solutions. I must thank her also for the careful revision and thorough discussions during the elaboration of this document. Professor Ribeiro's scientific competence, exigency and accuracy are a landmark to me. Her constant dissatisfaction drove me further ahead while broadening my perspectives.

I would like to thank Doctor Eng. Vítor Sequeira for his co-operation. These results would never be possible without him. He provided the data and the interface to my work. And chiefly, he managed to reply to the persistent flow of e-mails I sent him over the last couple of years. I would like to thank Doctor Kia Chuan Ng, for his attentive support and encouragement.

I would like to thank Rita, my wife, my Parents and Mariana, my sister, for their patience, encouragement and adaptability to the unpredictable schedules I led them into.

I would like to thank José Paulo Castro, who seated at the desk close to me and was a constant victim of my mental wandering. Also José Gaspar, who provided an outside view and thereby provided valuable critics and suggestions. I would like to thank João Pedro Gomes and all my colleagues and friends who, in various ways have helped and supported me throughout these years.

I would like to thank Doctor Eng. Rui Sérgio for his curiosity, which kept me thinking of clearer and more elegant ways to explain and formalise the algorithms.

To all of them I dedicate this work, for I learned that listening to the others is the only way to correct one's way, climb over obstacles and reach higher hills where the view is definitely brighter and more exciting.

I would like to thank Professor João Sentieiro, director of Instituto de Sistemas e Robótica (ISR), who hosted me during the development of my Master studies and the Instituto Superior Técnico, the faculty encompassing the ISR and where I studied the master courses and sponsored this work.

I would like to thank the Programa PRAXIS XXI who sponsored the first years of my master studies.

I would like to thank Dr. David Leever, responsible for the RESOLV project, where this work is to be directly applied.



# Resumo

Esta dissertação apresenta uma nova abordagem ao problema de localização de robots móveis baseada em medidas de distância obtidas por meio de uma câmara laser. O sistema de localização descrito integra o módulo de navegação de um sistema móvel cuja tarefa principal é adquirir e reconstruir o mapa tridimensional de grandes ambientes interiores.

Pretende-se localizar um robot que se desloca em duas dimensões, sobre uma superfície horizontal. A localização deverá ser feita sem estimativas *a priori* de posição nem conhecimento prévio do ambiente. O mapa do ambiente é gerado pelo processo de reconstrução à medida que este vai sendo reconstruído.

A contribuição principal desta dissertação são dois algoritmos de localização e uma estatística dedicada. O primeiro algoritmo, chamado "Frame Localisation" baseia-se na identificação e associação de elementos do ambiente. O segundo algoritmo, chamado "Approximate Localisation", refina os resultados do primeiro comparando os perfis bidimensionais adquiridos com o laser com a representação do mapa e procurando o ponto de ajuste de máxima verosimilhança. A métrica estatística compara exaustivamente os dois perfis, para quantificar a precisão das estimativas obtidas. Esta dissertação apresenta resultados experimentais relevantes, recolhidos durante ensaios reais de reconstrução tridimensional de ambientes.

No Apêndice A apresenta-se um resumo da dissertação em Português.

**Palavras-Chave:** Localização de Robots Móveis, Laser Scanner, Reconstrução 3D de Ambientes, Localização por "Two Line Frames".





# Abstract

This dissertation presents a novel procedure for the localisation of a mobile robot, supported on distance profiles acquired with a laser range scanner. The localisation system is embarked on a mobile robot, whose main task is to acquire and reconstruct a 3D map of large indoor environments.

No prior knowledge or a priori constraints of the environment map are known or assumed for localisation purposes. At each stage of the reconstruction procedure the environment map is known up to the extent it has already been reconstructed.

The main contributions of this dissertation are two algorithms and one dedicated statistics. The first algorithm, named Frame Localisation, is based on natural feature extraction. It uses no a priori estimate of the robot's position and produces a reasonably good position estimate. The second algorithm, named Approximate Localisation, provides a refined position estimate based on an initial estimate or the results of the first algorithm. It compares the scene's range profile with the reconstructed map and computes a maximum likelihood fit. The statistics measures the quality of the computed posture estimates, providing a quantitative performance criterion.

This dissertation presents experimental relevant results, obtained during real 3D acquisition campaigns on different types of indoor environments.

**Keywords:** Mobile Robot Localisation, Laser Scanner, 3D Scene Reconstruction, Frame Localisation.



# Table of Contents

Chapter 1	
INTRODUCTION	1
1.1 PRESENTATION OF THE RESOLV PROJECT	3
1.2 THE RESOLV OUTPUT MODELS	4
1.3 <i>The RESOLV system paradigm</i>	6
1.3.1 <i>Experimental set ups</i>	8
1.3.2 <i>Hardware summary</i>	10
1.3.3 <i>Software architecture</i>	11
1.4 THE LOCALISATION MODULE	15
1.4.1 <i>The state of the art</i>	16
1.4.2 <i>Localisation specifications and constraints</i>	18
1.4.3 <i>Different solutions to different problems</i>	19
1.5 THE LOCALISATION INTERFACE	21
1.5.1 <i>Localisation client module</i>	21
1.5.2 <i>Laser data</i>	23
1.5.3 <i>Odometry data</i>	26
Chapter 2	
FRAME LOCALISATION ALGORITHM	27
2.1 MOTIVATION	28
2.2 FRAME LOCALISATION OUTLINE	31
2.3 FORMAL DEVELOPMENT	35
2.3.1 <i>Frame generation</i>	35
2.3.2 <i>Frame matching</i>	40
2.4 CANDIDATE POSTURE CLUSTERING	42

2.4.1	<i>Selection of the best candidate posture</i>	44
2.5	IMPLEMENTATION ISSUES	44
2.5.1	<i>Line representation and frame building</i>	44
2.5.2	<i>The influence of the Laser errors</i>	46
2.5.3	<i>Representation of sets: line lists and frame lists</i>	50
2.5.4	<i>Frame matching parameters</i>	53
2.5.5	<i>Clustering parameters</i>	53
2.6	EXPERIMENTAL RESULTS	54

### Chapter 3

	LIKELIHOOD TEST	61
3.1	ALGORITHM OUTLINE	62
3.1.1	<i>Foreword</i>	62
3.1.2	<i>Comparing map data to laser data</i>	62
3.1.3	<i>Point-to-point distance distribution</i>	64
3.1.4	<i>Error analysis and validation</i>	67
3.2	THE SIMULATED SCAN	68
3.2.1	<i>Simulated scan based on map data</i>	69
3.2.2	<i>Simulated scan based on previous laser range scans</i>	72
3.2.3	<i>Differences between the laser scan and the simulated scan</i>	74
3.3	FORMAL DEVELOPMENT	75
3.4	EXPERIMENTAL RESULTS	79
3.4.1	<i>The classroom</i>	79
3.4.2	<i>The office</i>	83
3.4.3	<i>The “factory”</i>	93
3.5	CONCLUSIONS AND EXTENSION	107

Chapter 4	
APPROXIMATE LOCALISATION	109
4.1 OUTLINE OF REFERENCE TRANSFORM . . . . .	110
4.1.1 <i>Landmark identification</i> . . . . .	110
4.1.2 <i>Posture update using Reference Transform</i> . . . . .	115
4.1.3 <i>Coping with Reference Transform constraints</i> . . . . .	117
4.2 FORMAL DEVELOPMENT OF REFERENCE TRANSFORM . . . . .	118
4.3 ERROR DESCENT . . . . .	123
4.3.1 <i>Introduction</i> . . . . .	123
4.3.2 <i>Description of Error Descent</i> . . . . .	124
4.4 EXPERIMENTAL RESULTS . . . . .	128
4.3.1 <i>The classroom</i> . . . . .	128
4.3.2 <i>The office</i> . . . . .	134
4.5 COMPARING THE TWO APPROXIMATE LOCALISATION ALGORITHMS . . . . .	144
Chapter 5	
CONCLUSIONS	149
5.1 REQUIREMENTS AND ACHIEVEMENTS . . . . .	151
5.2 OPEN ISSUES . . . . .	152
5.3 DIRECTIONS FOR FUTURE RESEARCH . . . . .	153
5.4 HISTORY OF THE LOCALISATION SOLUTION . . . . .	154
REFERENCES	157

Appendix A

RESUMO DA DISSERTAÇÃO	159
A.1 INTRODUÇÃO . . . . .	159
<i>A.1.1 O projecto RESOLV</i> . . . . .	160
<i>A.1.2 O estado da arte</i> . . . . .	161
<i>A.1.3 O módulo de Localização</i> . . . . .	162
A.2 LOCALIZAÇÃO POR QUADROS . . . . .	163
A.3 TESTE DE VEROSIMILHANÇA . . . . .	169
<i>A.3.1 O scan simulado</i> . . . . .	169
<i>A.3.2 Análise de erro e validação de resultados</i> . . . . .	171
A.4 LOCALIZAÇÃO POR APROXIMAÇÃO . . . . .	173
<i>A.4.1 Transformação de Referenciais</i> . . . . .	174
<i>A.4.2 Descida do Erro</i> . . . . .	178
A.5 CONCLUSÕES . . . . .	181

Appendix B

LINE EXTRACTION FROM MAP DATA	183
B.1 THE LOCALISATION MAP FORMAT . . . . .	183
B.2 EXTRACTION OF MAP LINES FROM 3D RECONSTRUCTION DATA . . . . .	185
B.3 EXTRACTION OF MAP LINES FROM OFFLINE MAPS . . . . .	189

Appendix C

LINE EXTRACTION FROM LASER DATA	191
C.1 LASER SCAN SEGMENTATION . . . . .	191
<i>C.1.1 Range data analysis</i> . . . . .	192
<i>C.1.2 Reflectance data analysis</i> . . . . .	192
<i>C.1.3 Segmentation algorithm</i> . . . . .	194
C.2 ELEMENTARY LINE EXTRACTION . . . . .	197
<i>C.2.1 Deduction of the line extraction formulae</i> . . . . .	197

<i>C.2.2 Line extraction algorithm</i> . . . . .	199
C.3 LINE MERGE . . . . .	202
Appendix D	
OPTIMAL STEP-BY-STEP CLUSTERING	207
Appendix E	
NATURAL LANDMARK SELECTION	211
Appendix F	
COMPANION CD CONTENTS	215
F.1 THE DISSERTATION IN ADOBE PDF FORMAT . . . . .	215
F.2 DYNAMIC TUTORIAL . . . . .	215
F.3 OTHER PUBLICATIONS BY THE AUTHOR IN ADOBE PDF FORMAT . . . . .	215
F.4 SITES ON THE INTERNET . . . . .	216