

# TOPOLOGICAL SLAM - SIMULTANEOUS LOCALIZATION AND MAPPING WITH FINGERPRINTS OF PLACES

THÈSE N° 3357 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Institut d'ingénierie des systèmes

SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Adriana TAPUS**

Master en Informatique: Systèmes et Communications de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France  
Ingénieur Diplômé en Informatique, Université Polytechnique de Bucarest, Roumanie  
et nationalité roumaine

acceptée sur proposition du jury:

Prof. Roland Siegwart, directeur de thèse  
Prof. Pierre Bessière, rapporteur  
Prof. Raja Chatila, rapporteur  
Prof. Dario Floreano, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2005

# Table of Contents

<i>List of Tables</i> .....	5
<i>List of Figures</i> .....	7
<i>Acknowledgments</i> .....	11
<i>Abstract</i> .....	13
<i>Résumé</i> .....	15
<b>1 Introduction</b> .....	<b>19</b>
<b>1.1 Space Representation</b> .....	<b>20</b>
<b>1.2 Problem Statement and Contributions</b> .....	<b>22</b>
<b>1.3 The Platforms</b> .....	<b>23</b>
<b>1.4 Thesis Outline</b> .....	<b>25</b>
<b>2 Multi-Modal Perception</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 Odometry</b> .....	<b>27</b>
<b>2.3 Laser Range Finder</b> .....	<b>30</b>
<b>2.4 Omnidirectional Camera</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5 Summary</b> .....	<b>35</b>
<b>3 Feature Extraction and Environment Modeling</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1 Introduction</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2 Laser Scanner Features</b> .....	<b>38</b>
3.2.1 Horizontal Lines .....	38
3.2.1.1 Line Model .....	39
3.2.1.2 Segmentation with Douglas-Peucker Algorithm.....	39
<b>3.3 Omnidirectional Camera Features</b> .....	<b>41</b>
3.3.1 Vertical Edges.....	42
3.3.1.1 Edge Enhancement .....	42
3.3.1.2 Image Histogram and Thresholding.....	45

3.3.1.3 Non-Maxima Suppression and Regrouping Filtering.....	45
3.3.2 Color Patches.....	46
3.3.2.1 Color Spaces.....	47
3.3.2.2 Saturation Thresholding.....	47
3.3.2.3 Hue Histogram.....	48
3.3.2.4 Color Fusion.....	49
<b>3.4 Environment Modeling with Fingerprint of Places.....</b>	<b>50</b>
3.4.1 Fingerprint of Place Definition.....	50
3.4.2 Fingerprint Encoding.....	51
3.4.3 Fingerprint Generation.....	51
3.4.4 Uncertainty Modeling in the Fingerprint.....	51
<b>3.5 Summary.....</b>	<b>54</b>
<b>4 Topological Localization with Fingerprints of Places.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Related Work.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Environment Model.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Localization with Fingerprints of Places.....</b>	<b>57</b>
4.3.1 Fingerprint Matching using Bayesian Programming.....	58
4.3.1.1 Bayesian Programming (BP) Formalism.....	58
4.3.1.2 Bayesian Program for Localization.....	60
4.3.1.3 Mixture of Gaussians.....	62
4.3.1.4 Expectation Maximization.....	63
4.3.1.5 Example.....	64
4.3.1.6 Experimental Results.....	65
4.3.1.6.1 Simulation Experiments.....	65
4.3.1.6.2 Experiments with the robots.....	68
4.3.2 Fingerprint Matching with Global Alignment Algorithm.....	69
4.3.2.1 Localization with Global Alignment (GA).....	70
4.3.2.2 Localization with Global Alignment with Uncertainty.....	72
4.3.2.3 Indoor Experimental Results.....	73
4.3.2.3.1 Results with Global Alignment.....	73
4.3.2.3.2 Results with Global Alignment with Uncertainty.....	73
4.3.2.4 Outdoor Experimental Results.....	74
4.3.3 Fusion of Bayesian Programming and Global Alignment.....	76
4.3.3.1 Bayesian Program.....	76
4.3.3.2 Experimental Results.....	78
<b>4.4 Discussion and Comparison of the Place Recognition Experiments.....</b>	<b>78</b>
<b>4.5 Summary.....</b>	<b>79</b>
<b>5 Indoor Exploration Tools.....</b>	<b>81</b>
<b>5.1 Introduction.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2 Wall Following.....</b>	<b>81</b>
5.2.1 Wall Detection.....	82
5.2.2 Control Law.....	83
5.2.3 Kalman Filter (KF).....	84
<b>5.3 Mid-line Following.....</b>	<b>87</b>

<b>5.4</b>	<b>Center of Free Space</b> .....	<b>87</b>
5.4.1	Method Description .....	88
5.4.2	Experimental Results .....	88
<b>5.5</b>	<b>Indoor Structures and Door Detection using Bayesian Programming</b> .....	<b>89</b>
5.5.1	Implementation Related Assumptions .....	90
5.5.2	Indoor Structures and Doors Corpus .....	90
5.5.3	Bayesian Program for Indoor Structures and Doors Detection .....	90
5.5.3.1	Bayesian Program .....	92
5.5.3.2	Discussions .....	94
5.5.4	Experimental Results .....	95
<b>5.6</b>	<b>Summary</b> .....	<b>98</b>
<b>6</b>	<b><i>Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) with Fingerprints of Places</i></b> .....	<b>99</b>
<b>6.1</b>	<b>Related Work</b> .....	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Environment Representation with Fingerprints of Places</b> .....	<b>102</b>
<b>6.3</b>	<b>Topological Localization and Map Building</b> .....	<b>102</b>
6.3.1	Topological Mapping Technique .....	102
6.3.1.1	Exploration Strategy .....	102
6.3.1.2	Automatic Map Building .....	103
6.3.2	Mean Fingerprint .....	104
6.3.2.1	Clustering of Fingerprints .....	105
6.3.3	Indoor Topological Localization with POMDP .....	106
6.3.4	Control Strategy .....	108
6.3.5	Map Update .....	109
6.3.6	Closing the Loop.....	109
<b>6.4</b>	<b>Experimental Results</b> .....	<b>110</b>
6.4.1	Mapping Indoor Environments .....	111
6.4.1.1	Results .....	111
6.4.2	Mapping Outdoor Environments .....	114
6.4.2.1	Results .....	114
6.4.3	Indoor Topological Localization with POMDP .....	115
6.4.4	Closing the Loop.....	116
<b>6.5</b>	<b>Discussion and Limitations</b> .....	<b>117</b>
<b>6.6</b>	<b>Summary</b> .....	<b>118</b>
<b>7</b>	<b><i>Conclusions</i></b> .....	<b>119</b>
<b>7.1</b>	<b>Review and Contributions</b> .....	<b>119</b>
<b>7.2</b>	<b>The Hippocampal Place Cells and the Fingerprints of Places: Spatial Representation Animals, Animats and Robots</b> .....	<b>121</b>
<b>7.3</b>	<b>Open Issues</b> .....	<b>122</b>
<b>Appendix A</b>	<b><i>Bayesian Programming – Basic Concepts</i></b> .....	<b>125</b>
<b>A.1</b>	<b>Fundamental Definitions</b> .....	<b>125</b>
A.1.1	Proposition .....	125
A.1.2	Variable .....	126
A.1.3	The probability of a proposition.....	126

<b>A.2 Inference rules and postulates .....</b>	<b>127</b>
A.2.1 The conjunction postulate (Bayes theorem) .....	127
A.2.2 The normalization postulate .....	127
A.2.3 The disjunction rule .....	127
A.2.4 The marginalization rule .....	127
<b>A.3 Bayesian Programming Formalism .....</b>	<b>128</b>
A.3.1 Structure of a Bayesian Program .....	128
A.3.2 Description .....	129
A.3.3 Specification .....	129
A.3.4 Identification .....	130
A.3.5 Utilization .....	130
<b>A.4 Simple Example: Sensor Fusion .....</b>	<b>131</b>
A.4.1 Bayesian Program Description .....	132
A.4.2 Results and Discussion .....	136
<b>A.5 Summary .....</b>	<b>137</b>
<b><i>Appendix B Glossary .....</i></b>	<b><i>139</i></b>
<b><i>Bibliography .....</i></b>	<b><i>143</i></b>
<b><i>Personal Publications .....</i></b>	<b><i>157</i></b>
<b><i>Curriculum Vitae .....</i></b>	<b><i>157</i></b>

# Abstract

This thesis is about topological navigation, more precisely about space representation, perception, localization and mapping. All these elements are needed in order to obtain a robust and reliable framework for navigation. This is essential in order to move in an environment, manipulate objects in it and avoid collisions. The method proposed in this dissertation is suitable for fully autonomous mobile robots, operating in structured indoor and outdoor environments.

High robustness is necessary to obtain a distinctive and reliable representation of the environment. This can be obtained by combining the information acquired by several sensors with complementary characteristics. A multimodal perception system that includes the wheel encoders for odometry and two exteroceptive sensors composed of a laser range finder that gives a 360° view of the environment and an omnidirectional camera are used in this work. Significant, robust and stable features are extracted from sensory data. The different features extracted from the exteroceptive sensors (i.e. corners, vertical edges, color patches, etc.) are fused and combined into a single, circular, and distinctive space representation named the *fingerprint of a place*. This representation is adapted for topological navigation and is the foundation for the whole dissertation.

One of the major tasks of a mobile robot is localization. Different topological localization approaches based on the *fingerprint* concept are presented in this dissertation. Localization on a fingerprint-based representation is reduced to a problem of *fingerprint* matching. Two of these methods make use of the Bayesian Programming (BP) formalism and two others are based on dynamic programming. They also show how multimodal perception increases the reliability of topological localization for mobile robots.

In order to autonomously acquire and create maps, robots have to explore their environment. Several exploration tools for indoor environments are presented: wall following, mid-line following, center of free space of a room, door detection, and environment structure identification.

An automatic and incremental topological mapping system based on *fingerprints of places* and a global localizer using *Partially Observable Markov Decision Processes* (POMDP) are proposed. The construction of a topological mapping system is combined with localization, both relying on *fingerprints of places*, in order to perform *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM). This enables navigation of an autonomous mobile robot in a structured environment without relying on maps given a

priori, without using artificial landmarks and by employing a semantic spatial representation that allows a more natural interface between humans and robots. The fingerprint approach, combining the information from all sensors available to the robot, reduces perceptual aliasing and improves the distinctiveness of places. This fingerprint-based approach yields a consistent and distinctive representation of the environment and is extensible in that it permits spatial cognition beyond just pure navigation.

All these methodologies have been validated through experiments. Indoor and outdoor experiments have been conducted over a distance exceeding 2 km. The *fingerprints of places* proved to provide a compact and distinctive methodology for space representation and place recognition – they permit encoding of a huge amount of place-related information in a single circular sequence of features. The experiments have verified the efficacy and reliability of this approach.

# Résumé

Cette thèse porte sur la navigation topologique, et plus précisément sur la représentation spatiale, la localisation et la construction de cartes. Tous ces éléments sont nécessaires afin d'obtenir un cadre de travail robuste et fiable pour la navigation. Ceci est essentiel pour se déplacer dans un environnement, manipuler des objets dans celui-ci et éviter des collisions. La méthode proposée dans cette dissertation convient aux robots mobiles autonomes, opérants dans des environnements intérieurs et extérieurs structurés.

Afin d'obtenir une représentation distincte et fidèle de l'environnement, une robustesse importante est nécessaire. Il est possible de l'obtenir en combinant les informations acquises par des différents capteurs avec des caractéristiques complémentaires. Un système de perception multimodale a été utilisé dans ce travail. Il inclut des encodeurs de roues pour l'odométrie et deux capteurs extéroceptifs composés d'un laser scanner capable de donner une vue à 360 degrés de l'environnement, et une caméra omnidirectionnelle. Des *features* robustes, précises et significatives sont extraites des données sensorielles. Les différentes *features* extraites des capteurs extéroceptifs (par exemple : les coins, les lignes verticales, les couleurs, etc.) sont fusionnées et combinées dans une représentation spatiale circulaire, unique et distincte appelée « signature d'un lieu » (*fingerprint of a place*). Cette représentation est adaptée pour la navigation topologique et il s'agit du fondement même de cette entière dissertation.

Une des tâches principales pour un robot mobile est la localisation. Différentes approches de localisation topologique basées sur le concept des *fingerprints* sont présentées tout au long de ce travail. La localisation basée sur la représentation à l'aide de *fingerprints* se réduit à un problème de correspondances entre *fingerprints*. Deux de ces méthodes utilisent un formalisme de Programmation Bayésienne (BP) et les deux autres sont basées sur la programmation dynamique. Elles décrivent également comment la perception multimodale augmente la fidélité de la localisation topologique pour des robots mobiles.

Afin d'obtenir et de créer de façon autonome des cartes, les robots doivent explorer leur environnement. Plusieurs outils d'exploration pour les environnements intérieurs sont présentés : le suivi de mur (wall following), le suivi de ligne du milieu (mid-line following), le centre d'une espace libre d'une pièce (center of free space), la détection de portes, et l'identification de structure de l'environnement.

Un système de construction de cartes topologiques automatique et incrémental basé sur les *fingerprints of places*, ainsi qu'une localisation globale utilisant les Processus

Décisionnels Partiellement Observables de Markov (POMDP) sont proposés. Le développement d'un système de construction de cartes topologiques est combiné avec la technique de localisation globale, toutes deux s'appuyant sur les *fingerprints of places*, afin de donner une solution au problème nommé Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Ce qui permet la navigation d'un robot mobile autonome dans un environnement structuré sans s'appuyer sur les cartes apprises auparavant et sans utiliser des points de repère artificiels. L'approche à base du concept de fingerprints, en combinant les informations provenant de tous les capteurs disponibles du robot, réduit le perceptual aliasing et améliore la distinction des lieux. Elle donne également une représentation consistante et distincte de l'environnement, et est extensible dans la mesure qu'elle permet la cognition spatiale au delà de la pure navigation.

Toutes ces méthodologies ont été validées à travers des expérimentations. Des expériences ont été conduites à l'intérieur et à l'extérieur sur une distance supérieure à 2 km. Les *fingerprints of places* permettent de produire une méthode compacte et de distinction pour la représentation spatiale et la reconnaissance de lieux – ils permettent l'encodage d'une énorme quantité d'informations propres aux lieux dans une simple et unique séquence circulaire de caractéristiques. Les expériences ont permis de vérifier l'efficacité et la validité de cette approche.