

FEATURE-BASED SLAM USING RELATIVE QUANTITIES AND STRUCTURAL KNOWLEDGE

THÈSE N° 4049 (2008)

PRÉSENTÉE LE 25 MARS 2008

À LA FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR
INSTITUT D'INGÉNIERIE DES SYSTÈMES
PROGRAMME DOCTORAL EN INFORMATIQUE, COMMUNICATIONS ET INFORMATION

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Viet Tuan NGUYEN

Bachelor of information technology, Australian National University, Australie
et de nationalité vietnamienne

acceptée sur proposition du jury:

Prof. A. Martinoli, président du jury
Prof. R. Siegwart, directeur de thèse
Prof. M. Adams, rapporteur
Prof. W. Burgard, rapporteur
Prof. R. Longchamp, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2008

Contents

Acknowledgements	v
Abstract	vii
Résumé	ix
List of Figures	xi
List of Tables	xiii
1 Introduction	1
1.1 Short History of Robots	1
1.2 Uncertainty in Robotics	2
1.3 Simultaneous Localization and Mapping	2
1.4 Objectives	5
1.5 Contributions	5
1.6 Thesis Structure	6
2 System and Environment Modeling	7
2.1 System Models	7
2.1.1 Vehicle Model	7
2.1.2 Sensor Model	8
2.1.3 Landmark Model	9
2.1.4 Observation Model	10
2.2 Maps	11
2.2.1 Absolute Map	11
2.2.2 Relative Map	11
2.2.3 Map Transformation	13
2.3 Summary	15
3 Extracting Features	17
3.1 Introduction	17
3.2 Feature Models	18
3.2.1 Points	18
3.2.2 2D Lines	19
3.2.3 Orthogonal 2D Lines	20
3.2.4 Orthogonal 3D Planes	21
3.3 2D Line Extraction	21
3.3.1 Problem Statement	21
3.3.2 Line Fitting	22
3.3.3 Merging of Line Segments	22

3.3.4	Preprocessing	22
3.4	Line Extraction Algorithms	23
3.4.1	The Split and Merge Algorithm	23
3.4.2	The Incremental Algorithm	24
3.4.3	The Line Regression Algorithm	24
3.4.4	The Hough Transform Algorithm	25
3.4.5	The RANSAC Algorithm	25
3.4.6	The EM Algorithm	26
3.5	Experimental Comparison	26
3.5.1	The Experiment Setup	26
3.5.2	The Algorithm Implementation	28
3.5.3	The Experimental Results	29
3.5.4	Case Study: SLAM Application	36
3.6	Orthogonal 3D Plane Construction	41
3.7	Summary	42
4	Relative Mapping	45
4.1	Introduction	45
4.2	The Relative Map	46
4.3	The Consistency Problems of a Relative Map	48
4.3.1	Statistical Inconsistency	48
4.3.2	Geometrical Dependence Inconsistency	48
4.3.3	Observation Dependence Inconsistency	49
4.4	The Relative Map Geometric Filter Algorithm	51
4.4.1	The Algorithm	51
4.4.2	Standard Approach - The RMGF-SA	51
4.4.3	Indirect Approach - The RMGF-IA	53
4.4.4	Linearization errors	54
4.4.5	Experimental Results	55
4.5	The Independent Relative Map Algorithm	58
4.5.1	The Algorithm	59
4.5.2	Case study 1: The Independence RMGF	61
4.5.3	Case study 2: The Independence GPF	61
4.5.4	Experimental Results	62
4.6	The Information Relative Map Algorithm	65
4.6.1	The Algorithm	65
4.6.2	Experimental Results	69
4.7	Discussions	73
4.8	Summary	74
5	SLAM Using Structural Knowledge	77
5.1	Introduction	77
5.2	The Orthogonality	79
5.3	The Orthogonal SLAM Algorithm	81
5.3.1	The OrthoSLAM-2D Algorithm	81
5.3.2	The OrthoSLAM-3D Algorithm	85
5.4	The Experiments and Results	91
5.4.1	Case 1: 2D Experiment	91
5.4.2	Case 2: 3D Experiment	93
5.5	Discussions	98

5.6 Summary	99
6 Conclusions	101
6.1 Summary of Contributions	102
6.2 Limitations and Open Problems	103
A Appendix	105
A.1 The Kalman Filter	105
A.2 The Information Filter	107
A.3 The Relative Map Filter	108
Bibliography	111
Index	119
Curriculum Vitae	119

Abstract

This thesis is about feature-based mobile robot navigation in unknown environments. The work is focusing on solving the problem of *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) including feature extraction, estimation and complete map building solution. The robot platforms used in this work have the encoders for odometry and several laser scanners for exteroceptive sensors. Simulations, real experiments and existing well known datasets are used in order to verify the performance of the developed algorithms.

The algorithms developed in this thesis are features based meaning that instead of directly using raw sensory data geometric features are first extracted. This allows the filtering of noise from the sensors and the dynamics of the environment. More importantly, feature based approaches can reduce the amount of data needed to process, enabling the algorithms to scale in large environments. Another advantage of using features is the characteristic of better isolating informative patterns so that by exploiting specific knowledge of the environment, specialized algorithms can be easily adopted with different types of features. Several geometric features (points, lines, planes) are considered in this work.

In this thesis, the relative mapping approach is adopted for solving the SLAM problem. This approach has many advantages. First, the mapping is decoupled from the estimation of robot pose so that the map estimation is independent from odometry errors. In other words, odometry errors do not affect and accumulate to the map estimate as in the absolute mapping approach. Second, the estimation does not involve the dynamics model of the robot which is identity in a relative mapping algorithm, meaning that only the observation model is considered in the estimation. A relative map has extra consistency problem compared to an absolute map. It is subject to the *geometrical consistency* problem which may generate an inconsistent absolute map after a transformation. However, having only observation model in the estimation gives an insight to separating nonlinearities from the iterative part of the estimator and thus minimize the effects of linearization errors. In this work, these subjects are investigated and reported.

For some service robotic applications, especially for indoor office-like environments, we would like to have a fast, robust and lightweight approach which is capable to perform real-time SLAM on minimal hardware platforms. By exploiting some known knowledge about the structure of the environment, we claim to be able to achieve that goal. Particularly, the OrthoSLAM algorithm has been developed for building 2D and 3D maps. The algorithm adopts the Orthogonality assumption (or constraint) on the environment. First, the complexity of the SLAM algorithm is significantly reduced. Second, the linearization error from the robot heading uncertainty is removed and thus the map consistency is greatly improved.

Implementations of the developed algorithms are tested on simulated data, on existing real world datasets and on robot platforms. Existing algorithms used in this work have been also reimplemented. The performance of the algorithms are analysed and compared on well chosen criteria. Particularly, the issues on computational complexity, linearization error, map consistency, map precision, realtime capability are investigated.

Key words: Feature Extraction, Line Extraction, Localization, Mapping, Relative Map, Information Relative Map, SLAM, Map Consistency, Geometric Filter, Mobile Robotics.

Résumé

Cette thèse traite la navigation de robot mobiles basée sur des *amers* dans des environnements inconnus. Le travail se concentre sur la résolution du problème de *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), y compris l'extraction de amers, l'estimation et la construction de cartes complètes. Les robots utilisés dans ce travail ont des encodeurs pour enregistrer l'odométrie et plusieurs scanners à laser comme capteurs extéroperceptives. Des simulations, des expériences réelles et des données existantes bien connues sont utilisées afin de vérifier la performance des algorithmes développés.

Les algorithmes développés dans cette thèse sont basés sur des amers de sens qu'au lieu d'utiliser directement les données brutes, d'extraire d'abord des amers géométriques. Cela permet le filtrage du bruit provenant des capteurs et des dynamiques présent dans l'environnement. Plus important, les approches fondées sur des amers permet de réduire la quantité de données nécessaires au traitement, permettant les algorithmes de s'adapter à des environnements à grande échelle. Un autre avantage d'utiliser des amers est l'exploitation des connaissances spécifiques sur l'environnement, des caractéristiques plus informatives. Des algorithmes spécialisés peuvent être facilement adoptés à des différents amers. Dans ce travail, plusieurs éléments géométriques (points, lignes, plans) sont considérées.

Dans cette thèse, l'approche de la cartographie relative est adoptée pour résoudre le problème SLAM. Cette approche a des nombreux avantages. Tout d'abord, la cartographie est découplée de l'estimation de la pose du robot afin que la carte estimée est indépendante des erreurs de l'odométrie. En d'autres termes, les erreurs de l'odométrie n'influencent et n'accumulent pas à la carte estimée comme c'est le cas pour la cartographie de l'approche absolue. Deuxièmement, l'estimation ne suppose pas le modèle dynamique du robot qui est l'identité dans un algorithme de cartographie relative, ce qui signifie que seul le modèle d'observation est considérée dans l'estimation. Comparé à une carte absolue, une carte relative a de problème de cohérence supplémentaire. Elle est soumise à la problème de *cohérence géométrique* qui peut générer une carte absolue incompatible après une transformation. Cependant, utilisant seule la modèle d'observation dans l'estimation, donne une idée comment séparer des non-linéarités de la partie itérative de l'estimateur et donc de la minimisation des effets des erreurs de linéarisation. Dans ce travail, ces sujets sont étudiés et rapportés.

Pour certaines applications de robotique de service, en particulier dans l'intérieur comme dans les environnements de bureau, nous aimerions avoir une approche rapide, robuste et légère qui est capable d'exécuter du SLAM en temps réel sur des systèmes minimales. En exploitant certaines connaissances sur la structure de l'environnement, nous prétendons d'être capable d'atteindre cet objectif. En particulier, l'algorithme OrthoSLAM a été développé pour la construction des cartes en 2D et 3D. L'algorithme adopte l'hypothèse (ou contrainte) de l'orthogonalité sur l'environnement. Tout d'abord, la complexité de l'algorithme SLAM est considérablement réduit. Deuxièmement, l'erreur de linéarisation de l'incertitude de la direction du robot est enlevé et donc la cohérence de la carte est largement améliorée.

L'implémentations des algorithmes développés sont testés sur des données simulées, des données réelles et des données existantes obtenues avec des robots. Les algorithmes existants, utilisés dans ce travail, ont aussi été réimplémenté. Les performances des algorithmes sont analysés et comparés sur des critères spécifiques, en particulier, sur la question de complexité, d'erreur de linéarisation, de cohérence de la carte, de précision de la carte et de capacité en temps.

Mots-clés: Extraction d'amer, extraction de ligne, localisation, cartographie, carte relative, Information Relative Map, SLAM, cohérence de la carte, filtre géométrique, robotique mobile.