

COORDINATION SCHEMES FOR DISTRIBUTED BOUNDARY COVERAGE WITH A SWARM OF MINIATURE ROBOTS: SYNTHESIS, ANALYSIS AND EXPERIMENTAL VALIDATION

THÈSE N° 3919 (2007)

PRÉSENTÉE LE 12 OCTOBRE 2007

À LA FACULTÉ INFORMATIQUE ET COMMUNICATIONS

GROUPE MARTINOLI

PROGRAMME DOCTORAL EN INFORMATIQUE, COMMUNICATIONS ET INFORMATION

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Nicolaus CORRELL

Dipl. Elektroingenieur ETH
et de nationalité allemande

acceptée sur proposition du jury:

Prof. E. Telatar, président du jury
Prof. A. Martinoli, directeur de thèse
Prof. G. Kaminka, rapporteur
Prof. V. Kumar, rapporteur
Prof. J.-Y. Le Boudec, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse
2007

We provide a comparison of a series of original coordination mechanisms for the distributed boundary coverage problem with a swarm of miniature robots. Our analysis is based on real robot experimentation and models at different levels of abstraction. Distributed boundary coverage is an instance of the distributed coverage problem and has applications such as inspection of structures, de-mining, cleaning, and painting. Coverage is a particularly good example for the benefits of a multi-robot approach due to the potential for parallel task execution and additional robustness out of redundancy. The constraints imposed by a potential application, the autonomous inspection of a jet turbine engine, were our motivation for the algorithms considered in this thesis. Thus, there is particular emphasis on how algorithms perform under the influence of sensor and actuator noise, limited computational and communication capabilities, as well as on the policies about how to cope with such problems.

The algorithms developed in this dissertation can be classified into reactive and deliberative algorithms, as well as non-collaborative and collaborative algorithms. The performance of these algorithms ranges from very low to very high, corresponding to highly redundant coverage to near-optimal partitioning of the environments, respectively. At the same time, requirements and assumptions on the robotic platform and the environment (from no communication to global communication, and from no localization to global localization) are incrementally raised. All the algorithms are robust to sensor and actuator noise and gracefully decay to the performance of a randomized algorithm as a function of an increased noise level and/or additional hardware constraints.

Although the deliberative algorithms are fully deterministic, the actual performance is probabilistic due to inevitable sensor and actuator noise. For this reason, probabilistic models are used for predicting time to complete coverage and take into account sensor and actuator noise calibrated by using real hardware. For reactive systems with limited memory, the performance is captured using a compact representation based on rate equations that track the expected number of robots in a certain state. As the number of states explode for the deliberative algorithms that require a substantial use of memory,

this approach becomes less tractable with the amount of deliberation performed, and we use Discrete Event System (DES) simulation in these cases.

Our contribution to the domain of multi-robot systems is three-fold. First, we provide a methodology for system identification and optimal control of a robot swarm using probabilistic models. Second, we develop a series of algorithms for distributed coverage by a team of miniature robots that gracefully decay from a near-optimal performance to the performance of a randomized approach under the influence of sensor and actuator noise. Third, we design and implement a miniature inspection platform based on the miniature robot Alice with ZigBee ready communication capabilities and color vision on a foot-print smaller than $2 \times 2 \times 3 \text{ cm}^3$.

Keywords: Swarm Robotics, Distributed Coverage, Multi-Robot Systems

Cette dissertation étudie et compare des mécanismes de coordination pour le problème de couverture distribuée de contours (distributed boundary coverage problem) avec un essaim de robots miniatures. La comparaison se fonde sur l'expérimentation et la modélisation de robots à différents niveaux d'abstraction. La couverture distribuée de contours est un exemple du problème de couverture distribuée et elle trouve des applications dans l'inspection de structures, la détection de mines, le nettoyage ou encore la peinture. Les problèmes de couverture tirent un grand bénéfice des systèmes multi-robots grâce à leur parallélisme et leur redondance qui leur donne une robustesse additionnelle. Les contraintes imposées par une application potentielle, l'inspection autonome d'une turbine de jet, servent de motivation pour les algorithmes présentés dans cette thèse. Ainsi, un accent tout particulier a été mis sur la performance des algorithmes sous l'influence du bruit des capteurs et des actionneurs, et de ressources de calcul et de mémoire limitées, mais également sur les diverses solutions permettant d'améliorer les performances dans de telles conditions.

La description formelle de la dynamique d'un système multi-robots est nécessaire pour la prévision et l'optimisation de l'exécution. Les algorithmes sont classifiés en diverses catégories: réactifs et délibératifs, ainsi que collaboratifs et non-collaboratifs. La performance de ces algorithmes va d'une couverture fortement redondante à une division proche de l'optimum du domaine, avec une croissance incrémentale des hypothèses et des exigences sur la plateforme robotique et l'environnement (d'aucune communication à une communication globale, et d'aucune localisation à une localisation globale). Tous les algorithmes sont robustes au bruit des senseurs et des actionneurs et se réduisent élégamment à l'exécution d'un algorithme randomisé lorsque le niveau de bruit et le nombre de contraintes matérielles augmente.

Bien que les algorithmes délibératifs soient entièrement déterministes, leur exécution réelle devient probabiliste en raison du bruit inévitable des senseurs et des actionneurs. Pour cette raison, des modèles probabilistes sont employés pour prévoir le temps de couverture tout en tenant compte du bruit des senseurs et des actionneurs calibré à l'aide

de vrais robots. Pour les systèmes réactifs dont la mémoire est limitée, la performance est évaluée en utilisant une représentation compacte basée sur des équations différentielles qui modélise le nombre moyen de robots dans un certain état. Cette approche devient moins appropriée lorsque la quantité de mémoire utilisée pour une délibération devient substantielle. Dans de tels cas, on doit recourir à la simulation de systèmes d'événements discrets (DES).

La contribution de cette dissertation au domaine des systèmes multi-robots porte ainsi sur trois plans. Premièrement, elle fournit une méthodologie pour l'identification de systèmes et le contrôle optimal d'un essaim de robots en utilisant des modèles probabilistes. Deuxièmement, elle développe une série d'algorithmes pour la couverture distribuée par une équipe de robots miniatures qui se réduisent avec élégance d'une performance proche de l'optimum à celle d'une approche randomisée sous l'influence du bruit des senseurs et des actionneurs ainsi que des contraintes matérielles. Troisièmement, une plateforme miniature d'inspection basée sur le robot miniature Alice avec des possibilités de communication via ZigBee et de vision couleur, le tout intégré dans un volume de moins de 2cm x 2cm x 3cm est conçue et mise en application.

Mot clés: essaim de robots, couverture distribuée, systèmes multi-robots

Abstract	iii
Résumé	v
Foreword	xi
1 Introduction	1
1.1 Design Challenges for Miniature Inspection Systems	3
1.2 Experimental Setup	5
1.3 Modeling Multi-Robot Systems	6
1.4 Distributed Coordination Schemes for Multi-Robot Inspection	6
1.5 Objectives of this Dissertation	7
1.6 Contribution of this Dissertation	7
2 Background	9
2.1 Distributed Dispersion, Exploration and Coverage	9
2.1.1 Dispersion	10
2.1.2 Exploration	11
2.1.3 Coverage	11
2.1.4 Multi-Robot Boundary Coverage	13
2.2 Models for Swarm-Robotic Systems	14
2.2.1 Deterministic Models	14
2.2.2 Probabilistic Models	15
2.2.3 Hybrid Models	16
2.2.4 Multi-Level Modeling and Simulation Techniques	17
2.3 Robotic Inspection Systems	19

2.3.1	Turbine Inspection	19
2.3.2	Nondestructive Evaluation	20
3	Case Study and Experimental Setup	23
3.1	A Miniature Robotic Platform for Autonomous Inspection	24
3.1.1	Basic Platform	24
3.1.2	Communication Module	25
3.1.3	Camera Module	26
3.2	Turbine Mock-Up Environment	27
3.3	Realistic Simulation	28
3.4	Performance Evaluation	28
3.5	Discussion	30
4	Probabilistic Modeling and Identification of Multi-Robot Systems	33
4.1	Preliminaries	35
4.1.1	State-space Granularity	35
4.1.2	Master Equations, Rate Equations, and Markov chains	36
4.1.3	Continuous Time vs. Discrete Time Models	37
4.1.4	Modeling Assumptions	37
4.1.5	Model Parameters	37
4.1.6	Transient, Recurrent, Periodic and Absorbing States	39
4.1.7	Steady-State Analysis	39
4.2	Probabilistic Models for Reactive Systems with Limited Memory	40
4.2.1	Example 1: Collision Avoidance	40
4.2.2	Example 2: A Basic Environmental Model	45
4.2.3	Example 3: Collaboration	45
4.3	Probabilistic Modeling of Deliberative Systems	48
4.3.1	Example 4: A Basic Task Allocation Problem	48
4.3.2	Example 5: A Basic Coverage Problem	51
4.4	Calibration of Model Parameters	54
4.4.1	Parametric Calibration	54
4.4.2	Optimization of Model Parameters	55
4.5	Discussion	57
4.6	Conclusion	58
5	Reactive Algorithms for Distributed Boundary Coverage	61
5.1	Reactive Coverage without Collaboration	62
5.1.1	Individual Robot Behavior	62

5.1.2	Microscopic Models	63
5.1.3	Macroscopic Model	66
5.2	Reactive Coverage with Stationary Marker-Based Collaboration	69
5.2.1	Individual Robot Behavior	69
5.2.2	Microscopic Model	70
5.2.3	Macroscopic Model	71
5.2.4	Dynamic Optimization	73
5.3	Reactive Coverage with Mobile Marker-based Collaboration	73
5.3.1	Individual Robot behavior	74
5.3.2	Microscopic Model	75
5.3.3	Macroscopic Model	75
5.4	Results	76
5.4.1	Validation of Modeling Assumptions	77
5.4.2	Parameter Calibration	77
5.4.3	Optimal Control of a Stationary Marker-Based Collaboration policy	79
5.4.4	Mobile Marker-Based Inspection	80
5.5	Discussion	82
5.5.1	Modeling Assumptions	82
5.5.2	Parameter Calibration	84
5.5.3	Reactive Algorithms for Robotic Boundary Coverage	85
5.5.4	Multi-Level Modeling	85
5.5.5	Model Complexity	86
5.6	Conclusion	86
6	Deliberative Algorithms for Distributed Boundary Coverage	89
6.1	Preliminaries	90
6.1.1	Environment Model	90
6.1.2	Cost Functions and Team Objective	91
6.1.3	Reactive Robot Behavior	92
6.1.4	Microscopic Simulation	94
6.2	Non-Collaborative Deliberative Coverage without Localization	96
6.2.1	Individual Robot Behavior	98
6.2.2	Microscopic Model	98
6.2.3	Macroscopic Model	99
6.2.4	Completeness	100
6.3	Collaborative Deliberative Coverage with Localization	100
6.3.1	Individual Robot Behavior	100
6.3.2	Microscopic Model	101

6.3.3	Macroscopic Model	102
6.3.4	Completeness	102
6.4	Market-Based Distributed Coverage	103
6.4.1	Individual Robot Behavior	103
6.4.2	Microscopic Model	105
6.4.3	Completeness	106
6.5	Results	106
6.5.1	Non-Collaborative Deliberate Coverage without Localization	106
6.5.2	Collaborative Deliberative Coverage with Localization	109
6.5.3	Market-Based Distributed Coverage	113
6.6	Discussion	113
6.6.1	Sensor and Actuator Noise	113
6.6.2	Communication	115
6.7	Conclusion	115
7	Comparing Coordination Schemes for Distributed Boundary Coverage	119
7.1	Quantitative Performance Comparison	120
7.1.1	Scalability	120
7.1.2	Robustness	122
7.2	Comparing Performance as a Function of Requirements and Benefits	124
7.3	Modeling Robotic Swarms	127
7.4	Conclusion	129
8	Conclusion	131
	Bibliography	133
	Curriculum Vitae	143