

DISS. ETH NO. 21009

Multi-Robot Coverage and Path Planning for the Inspection of Curved Surfaces

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Andreas Breitenmoser

Master of Science in
Electrical Engineering and Information Technology
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zurich, Switzerland

born on May 12, 1983
citizen of Mosnang SG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Roland Siegwart, ETH Zurich
Prof. Dr. Alcherio Martinoli, EPF Lausanne
Dr. Roland Moser, ALSTOM
Prof. Dr. Daniela Rus, Massachusetts Institute of Technology

2013

Abstract

This dissertation proposes different algorithms for multi-robot coverage and path planning in 3D environments of challenging geometry. The problem of deploying a group of mobile robots is studied for covering environments which present obstacles, nonconvexities and curved surfaces.

The general motivation of this work is drawn from *robotic inspection*. The periodic inspection of industrial structures and infrastructure is crucial for their safe and efficient future operation. The *inspection task* can be understood as the *complete coverage* of a structure in order to detect developing defects and prevent more severe damages, destruction or supply shortfalls. In seeking to develop *assistive inspection tools* of increased autonomy, autonomous inspection robots, equipped with appropriate coverage and path planning algorithms, could lead to desired improvements in reliability, efficiency, accessibility and flexibility of today's inspection and maintenance.

This dissertation is structured in three parts, of which the first part embeds the latter two parts, which present the thesis's main contributions of multi-robot coverage and path planning.

The first part describes the motivating inspection scenario and derives the underlying problem formulation for our work. The *hybrid coverage concept* is introduced, which provides a basic formulation for multi-robot coverage: hybrid coverage combines deployment and sweeping motion by performing one after the other. *Hybrid Voronoi coverage* offers particularly interesting properties in the context of the inspection scenario. The hybrid Voronoi coverage solution deploys the robots by constructing a Voronoi tessellation of the environment, assigning each robot to a Voronoi region and steering the robots to the regions' centroids in a first stage. In a second stage, each robot covers its assigned Voronoi region by moving along a sweeping pattern.

The second part then develops the methods that allow for deploying a group of robots in *nonconvex environments* and on *curved surfaces* within the first stage of hybrid Voronoi coverage. To cope with nonconvex environments, a coverage solution is designed in continuous space, which combines

Voronoi coverage with *path planning*. The robots explore obstacle boundaries and plan paths to circumnavigate obstacles on the way to their goal positions. If a goal position is not reachable, a robot moves to the closest accessible position in free space, which realizes a *gradient projection method* in distributed fashion. In addition, two coverage solutions for curved surfaces, using a discrete environment representation, are presented. Each robot models the environment as triangle mesh, which provides a *graph embedded in 3D space*. The first coverage algorithm computes shortest path distances and propagates a discrete wavefront on the robot’s graph representation to obtain a centroidal graph Voronoi tessellation. The second coverage algorithm approximates distances on the surface through the Euclidean distance in the ambient space and locally exchanges vertices between adjacent Voronoi regions of robot neighbors to create a final centroidal Voronoi configuration. By additionally computing a metric tensor field locally on the surface, the shape of the Voronoi regions can be made *adaptive* in position, size, orientation and aspect ratio according to the present anisotropy.

The third part addresses the underlying problem of moving individual robots through uneven terrain and over curved surfaces of the 3D environments. *Mesh-based* and *point-based* path planning are proposed. The presented navigation solution for mesh-based path planning generates a *triangle mesh* from 3D point clouds and plans a *triangle strip path* on the mesh. A vector field is created along the extracted strip, which guides a robot over the approximated surface. Point clouds, unlike triangle meshes, intrinsically do not provide connectivity information. Point-based path planning saves the mesh generation step but needs ways to *establish connectivity* throughout the point cloud. Two navigation solutions for point-based path planning are suggested. The first navigation solution for *dense point cloud planning* generates a dense point cloud in a preprocessing step, using *tensor voting* for augmenting the point cloud. Connectivity is established by subdividing the augmented point cloud into a regular grid structure and constructing a graph *incrementally*. A specialized graph-based planner connects the successive discretized robot poses along the surface into a *6-DoF path*, considering kinematic as well as structural constraints. The 6-DoF path is then transformed from 3D space into 2D space by projecting movements into local tangent planes of the surface, which makes 2D trajectory tracking for robot control possible. The second navigation solution for *sparse point cloud planning* fits *quadric surface patches* locally to the augmented 3D point cloud to establish connectivity. By developing and expanding *motion primitives* on the surface patches, the robot is finally controlled on the surface.

The coverage and navigation solutions have been evaluated in simulations, and in experiments with the *e-puck robot* and *MagneBike robot* platforms. MagneBikes are compact inspection robots, which can climb ferromagnetic structures due to their magnetic wheels. With respect to the multi-robot inspection task, a vision-based relative localization system, consisting of a *camera* and a *target module* with four active or passive visual markers has been developed and evaluated. It provides a lightweight solution for localizing a robot's full *6D pose*, which is especially beneficial for the relative localization of inspection robots that climb curved surfaces in 3D space.

In summary, the *coverage* and *navigation solutions* developed within this thesis investigate and contribute concepts that are of general relevance for environment modeling, path planning and coordination of robots operating in real world scenarios.

Keywords: Multi-robot systems, Robot deployment, Distributed algorithms, Voronoi coverage, Coverage path planning, Path planning in 3D environments, Environment modeling, LIDAR point clouds, Mesh generation, Curved surfaces, Wheeled and climbing robots, Relative robot localization, Robotic inspection

Kurzfassung

Diese Dissertation behandelt verschiedene Algorithmen für die Flächenabdeckung durch Mehr-Roboter-Systeme und deren Pfadplanung in geometrisch anspruchsvollen 3D-Umgebungen. Es wird die Problemstellung untersucht, wie mehrere Roboter zu verteilen sind, um Umgebungen abzudecken, die Hindernisse, nichtkonvexe und gekrümmte Oberflächen aufweisen.

Der Beweggrund für diese Arbeit ist in der *Inspektion mit Robotern* begründet. Periodische Inspektionen von Infrastrukturbauten und industriellen Anlagen sind entscheidend für deren sicheren und effizienten Betrieb. Die *Inspektionsaufgabe* kann durch die *vollständige Oberflächenabdeckung* einer Struktur gelöst werden, wobei entstehende Defekte entdeckt und somit ernste Schäden, Zerstörung oder Versorgungsengpässe vermieden werden können. Wird die Selbständigkeit der *unterstützenden Inspektionswerkzeuge* erhöht und weiterentwickelt, könnten autonome Inspektionsroboter, die mit geeigneten Algorithmen für die Flächenabdeckung und Pfadplanung ausgerüstet sind, zu wünschenswerten Verbesserungen bezüglich Zuverlässigkeit, Effizienz, Zugänglichkeit und Flexibilität bei Inspektion und Unterhalt beitragen.

Die Dissertation ist in drei Teile gegliedert. Der erste Teil führt auf die beiden folgenden Teile hin, in denen die Hauptbeiträge der Flächenabdeckung durch Mehr-Roboter-Systeme und deren Pfadplanung behandelt werden.

Der erste Teil beschreibt das herausfordernde Inspektionsumfeld und leitet die zugrunde liegenden Fragestellungen für unsere Arbeit ab. Das *hybride Flächenabdeckungskonzept* wird eingeführt, das eine grundlegende Formulierung für die Flächenabdeckung durch Mehr-Roboter-Systeme bereitstellt: Die hybride Flächenabdeckung kombiniert die Formierung und die Flächen überstreifende Bewegung durch Ausführen eines Schrittes nach dem andern. Die *hybride Voronoi-Flächenabdeckung* weist besonders interessante Eigenschaften im Zusammenhang mit dem Inspektionsumfeld auf. Die Lösung mit der hybriden Voronoi-Flächenabdeckung formiert die Roboter durch eine Voronoi-Flächeneinteilung der Umgebung, indem jeder Roboter einem Voro-

noi-Bereich zugeordnet wird. Jeder Roboter wird zu Beginn in den gewichteten Flächenschwerpunkt eines Bereiches gesteuert. Anschliessend deckt jeder Roboter seinen zugeordneten Voronoi-Bereich ab, indem er sich entlang eines Flächen überstreifenden Musters bewegt.

Der zweite Teil entwickelt die Methoden, die es erlauben, eine Gruppe von Robotern in *nichtkonvexen Umgebungen* und auf *gekrümmten Oberflächen* im ersten Schritt der hybriden Voronoi-Flächenabdeckung zu positionieren. Um nichtkonvexe Umgebungen zu meistern, wird für die Flächenabdeckung im kontinuierlichen Raum eine Lösung entworfen, die die Voronoi-Flächenabdeckung mit der *Pfadplanung* kombiniert. Die Roboter erkunden die Grenzen von Hindernissen und planen Wege, um Hindernisse auf dem Weg zu ihren Zielpositionen zu umgehen. Wenn eine Zielposition nicht erreichbar ist, bewegt sich der Roboter zum nächstgelegenen erreichbaren Punkt im Raum. Dies verwirklicht ein *Gradienten-Projektionsverfahren* auf verteilte Art und Weise. Zudem werden zwei Lösungen für die Flächenabdeckung von gekrümmten Oberflächen mit unterschiedlichen Umgebungsdarstellungen vorgestellt. Jeder Roboter modelliert die Umgebung als Dreiecksgitternetz, welches einen *im 3D-Raum eingebetteten Graphen* bereitstellt. Der erste Flächenabdeckungsalgorithmus berechnet die kürzesten Wegstrecken und breitet eine diskrete Wellenfront auf der Graph-Darstellung des Roboters aus, um eine Flächenschwerpunkt basierte Graphen-Voronoi-Flächeneinteilung zu erzielen. Der zweite Flächenabdeckungsalgorithmus nähert Distanzen auf der Oberfläche durch die Euklidische Distanz im umgebenden Raum an und tauscht angrenzende Knoten zwischen Voronoi-Bereichen benachbarter Roboter lokal aus, um schliesslich eine Flächenschwerpunkt basierte Voronoi-Anordnung zu erstellen. Indem lokal auf der Oberfläche ergänzend ein metrisches Tensorfeld berechnet wird, kann die Form der Voronoi-Bereiche entsprechend der gegenwärtigen Anisotropie in der Position, der Grösse, der Orientierung und dem Abbildungsverhältnis *angepasst* werden.

Der dritte Teil befasst sich mit der zugrunde liegenden Fragestellung, wie einzelne Roboter durch unebenes Gelände und über gekrümmte Oberflächen von 3D-Umgebungen zu bewegen sind. Eine *Gitternetz* und *Punkt basierte* Pfadplanung werden vorgeschlagen. Die vorgestellte Navigationslösung für die Gitternetz basierte Pfadplanung erstellt ein *Dreiecksgitternetz* aus 3D-Punktwolken und plant einen *aus Dreiecken bestehenden Streifenpfad* auf dem Gitternetz. Entlang des resultierenden Streifens wird ein Vektorfeld erstellt, das den Roboter über die angenäherte Oberfläche führt. Im Gegensatz zu Dreiecksgitternetzen enthalten Punktwolken keine Information über die Verbindungen von Punkten. Die Punkt basierte Pfadplanung spart den Gitternetz-Erstellungsschritt ein, muss aber *Verbindungen* durch die Punkt-

wolke aufbauen. Zwei Navigationslösungen für die Punkt basierte Pfadplanung werden angeregt. Die erste Lösung für die *Planung mit dichten Punktwolken* generiert eine dichte Punktwolke in einem Vorverarbeitungsschritt, indem zusätzliche Information zur Punktwolke durch *Tensor Voting* dazugefügt wird. Verbindungen werden aufgebaut, indem die mit zusätzlicher Information versehene Punktwolke in eine regelmässige Gitterstruktur unterteilt und *schrittweise* ein Graph konstruiert wird. Ein spezialisierter, Graph basierter Planer verbindet laufend die diskretisierten Roboterpositionen entlang der Oberfläche zu einem *6-DoF Pfad*, während er kinematische und strukturelle Randbedingungen beachtet. Der 6-DoF Pfad wird anschliessend vom 3D-Raum in den 2D-Raum transformiert, indem Bewegungen in lokalen Tangentialebenen der Oberfläche abgebildet werden. Dies ermöglicht den Robotern das Verfolgen von Trajektorien im 2D-Raum. Die zweite Navigationslösung für die *Planung mit spärlichen Punktwolken* passt *Quadriken* lokal an die 3D-Punktwolke an, um Verbindungen zwischen den Punkten herzustellen. Durch die Entwicklung von *Bewegungsprimitiven* auf den Quadriken wird der Roboter schliesslich auf der Oberfläche gesteuert.

Die Flächenabdeckungs- und Navigationslösungen wurden in Simulationen und Experimenten mit *e-puck* Robotern und *MagneBike* Robotern evaluiert. *MagneBike* Roboter sind kompakte Inspektionsroboter, die dank ihren magnetischen Rädern auf ferromagnetischen Strukturen klettern können. Im Hinblick auf die Mehr-Roboter-Inspektionsaufgabe wurde ein Bild basiertes Lokalisierungssystem bestehend aus einer *Kamera* und einem *Zielmodul* mit vier aktiven oder passiven visuellen Marken entwickelt und evaluiert. Es ist eine leichtgewichtige Lösung, um die vollständige *6D Position und Orientierung* eines Roboters zu lokalisieren. Sie ist besonders geeignet für die relative Lokalisierung von Inspektionsrobotern, die auf gekrümmten Oberflächen im 3D-Raum klettern können.

Die *Flächenabdeckungs- und Navigationslösungen*, die in dieser Dissertation entwickelt wurden, untersuchen Konzepte und bringen Konzepte ein, die von allgemeiner Bedeutung sind für die Umgebungsmodellierung, die Pfadplanung und die Koordination von Robotern in realen Umgebungen.

Stichworte: Mehr-Roboter-Systeme, Robotervertelung, Verteilte Algorithmen, Voronoi-Flächenabdeckung, Abdeckungspfadplanung, Pfadplanung in 3D-Umgebungen, Umgebungsmodellierung, LIDAR Punktwolken, Gitternetz-Erstellung, Gekrümmte Oberflächen, Fahrende und kletternde Roboter, Relative Roboterlokalisierung, Inspektion mit Robotern