

DISS. ETH NO. 18888

Robot Locomotion and Localization on 3D Complex-Shaped Structures

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Fabien TÂCHE

Ingénieur en Microtechnique
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

born August 23, 1979
citizen of Remaufens, Switzerland

Reviewers:

Prof. Roland Siegwart, Principal Advisor
Prof. Paolo Fiorini, Member of the Jury
Dr. Francesco Mondada, Member of the Jury
Dr. Roland Moser, Member of the Jury

ETH Zürich
March 2010

Abstract

Mobile inspection and maintenance robotics is a fast growing industrial market. The type of applications covered by these mobile robots is very broad. Robots are developed to inspect all kinds of pipes or pipelines infrastructures. They are also designed to inspect gas, petroleum or chemical storage tanks, bridges, subterranean mines or air ducts. Such robots also find their applications in power plants, for the inspection of the steam boilers to the power lines including steam turbines or generators.

One of the main advantages of mobile robots is that they can reach locations inaccessible by humans because of size constraints, temperature, immersion in liquids or safety reasons. Robots also allow to decrease the inspection time and costs if operations like building scaffoldings, excavating, disassembling or moving cumbersome parts into workshops, can be avoided. Furthermore, storing the measurements of systematic inspection procedures improves the traceability of defects, the prediction of the constructions lifetime and allow to optimally plan their repairing. Repairing can even be done *in situ* if the robot is equipped with the appropriate tools.

The variety of applications and their specificities have fostered the development of innovative locomotion concepts. The mobility of inspection robots has to be adapted to their environment, which may require to overcome obstacles or to climb on 3D structures built of different materials. In this framework, miniaturization and integration is often an issue because the robot may have to maneuver about in narrow spaces or to enter a structure through narrow openings. Because the robots have to operate in confined environments, localization is another key issue. The robot localization is a necessary feedback for the user remote controlling the robot or for autonomous control purposes. Therefore, inspection robots do not only have to carry inspection sensors, but also perception sensors for localization.

This thesis addresses the following challenges, *i.e.* 3D locomotion, 3D localization and system integration, by presenting the design of a robot that is intended for inspecting power plants, especially the inner surface of steam

chests in steam turbines as a case study. The steel environment mainly consists of complex-shaped structures comprised of hollow cylinders and spheres that can have any inclination regarding gravity and various diameters.

The innovative locomotion concept presented in this thesis is based on an adapted magnetic wheel unit integrating two lateral lever arms. These arms allow to slightly lift off the wheel in order to locally decrease the magnetic attraction force when passing concave edge obstacles, as well as laterally stabilizing the wheel unit. The concept, called MagneBike, consists of two adapted magnetic wheels in a motorbike arrangement. Field experiments show the high mobility of the robot. The robot cannot only climb vertical walls and follow circumferential paths inside pipe-type structures, but it is also able to pass complex combinations of 90° convex and concave ferromagnetic obstacles. This high mobility and the robot payload enable the robot to bring inspection sensors or repairing tools to any location in the specified environment by accessing it through a single opening.

This thesis also describes a full 3D localization concept to track the robot in the 3D environment. The localization strategy consists of combining 3D odometry - used to track the robot position on the steam chest surface - with 3D laser scanning. Scan matching allows to build 3D maps of the environment in which the robot is moving. The 3D odometry model assumes slow motion and only requires wheel encoders and a three-axis accelerometer. To compensate for the lack of angular velocity inputs, we propose a model including a filter that estimates the local surface curvature. 3D odometry is reliable to track the robot between 3D scans and can be used as an initial guess for the 3D scan registration. The localization procedure has also been characterized in detail through field experiments. It results that the localization concept allows to reliably track the robot moving in the complex 3D environment.

System integration is another important result of this work. The MagneBike is actually a compact system ($185 \times 143 \times 236 \text{ mm}^3$) integrating five actuators for locomotion, embedding sensors to control the active locomotion concept as well as localization and mapping sensors. The robot also embeds a single board computer and electronic to control low-level tasks. The conceptual prototype has been successfully implemented and evaluated. Given its good performance, the industrial partner decided to invest in the industrialization of the robot. This thesis also presents the contribution to this further step.

Key words: Inspection robot, Field robot, Locomotion, Magnetic wheels, Localization, 3D odometry, Design and integration

Résumé

L'intérêt de l'industrie pour les robots mobiles dans le domaine de l'inspection et de la maintenance croît rapidement. Le champ d'application des robots mobiles est très large. Ils sont notamment développés pour l'inspection de pipelines, de citernes (stockage de gaz, de pétrole ou de produits chimiques), de ponts, de mines souterraines ou de canaux de ventilation. Des robots sont également utilisés dans les centrales électriques pour l'inspection de boilers, turbines vapeurs, générateurs ou de lignes à haute tension.

L'un des principaux avantages des robots mobiles est leur aptitude à atteindre des endroits inaccessibles aux humains à cause de contraintes dimensionnelles, de température, en cas d'immersion (liquides) ou pour des raisons de sécurité. Les robots permettent également de drastiquement diminuer le temps et les coûts d'inspection en évitant le montage d'échafaudages, l'excavation, le démontage ou le déplacement de pièces encombrantes. De plus, la prise systématique de données issues des procédures d'inspection améliore le suivi des potentiels dégâts et permet la prédiction du temps de vie des constructions, cela afin d'optimiser la planification des réparations. De plus, les réparations peuvent alors souvent être effectuées *in situ* lorsque le robot est équipé avec les outils appropriés.

La variété des applications et leurs spécificités ont encouragé le développement de concepts de locomotion innovants. La mobilité des robots d'inspection doit être adaptée à leur environnement, qui peut nécessiter le passage d'obstacles ou l'escalade de structures 3D constituées de matériaux variables. Dans ce contexte, la miniaturisation et l'intégration jouent un rôle important, puisque le robot peut avoir besoin de manoeuvrer dans des espaces restreints ou d'entrer dans une structure par une ouverture étroite. Comme les robots doivent pouvoir intervenir dans des endroits confinés, la localisation est également un problème clé. La localisation du robot est nécessaire lorsqu'une personne le pilote, mais aussi lorsque le robot est contrôlé de façon autonome. Par conséquent, les robots d'inspection ne doivent pas seulement être pourvus de capteurs d'inspection, mais également de perception afin de

pouvoir les localiser.

En présentant le design d'un robot prévu pour l'inspection de centrales de production d'énergie, cette thèse aborde les problèmes de locomotion et localisation 3D, ainsi que l'intégration du système. Plus spécifiquement, le robot présenté a été développé pour l'inspection de la surface intérieure des organes d'admission vapeur des turbines, dont l'environnement métallique est principalement formé de structures complexes composées de cylindres ou sphères creuses de diamètre et orientation variables.

Le concept de locomotion novateur présenté dans cette thèse est basé sur une roue magnétique intégrant deux bras de leviers latéraux. Ces bras permettent de légèrement soulever la roue, afin de diminuer la force d'attraction magnétique localement, lorsque le robot doit passer sur des obstacles concaves, mais également de stabiliser l'ensemble de la roue. Le concept, appelé MagneBike, est composé de deux roues alignées l'une derrière l'autre, à la façon d'une moto. Des expériences de terrain ont montré la grande mobilité du robot: le robot ne peut pas seulement monter des murs verticaux et suivre des trajectoires circonférentielles à l'intérieur de la structure, mais il est également capable de passer sur des combinaisons complexes d'obstacles ferromagnétiques convexes et concaves. Cette grande mobilité ainsi que la charge utile du robot permettent le transport de capteurs d'inspection ou d'outils de réparation à n'importe quel endroit dans un environnement spécifié et en y accédant par une seule entrée.

Cette thèse décrit également un concept de localisation 3D pour suivre le robot dans un environnement 3D. La stratégie de localisation consiste à combiner l'odométrie 3D - utilisée pour suivre le robot sur la surface de l'organe d'admission - avec la détection par capteur laser 3D. L'assemblage des données 3D ainsi obtenues, permet de construire des cartes 3D de l'environnement dans lequel le robot se déplace. Le modèle d'odométrie 3D est prévu pour des mouvements lents et ne requiert que des capteurs sur les roues et un accéléromètre à trois axes. Pour compenser l'absence de données sur la vitesse angulaire, nous proposons un modèle incluant un filtre estimant la courbure locale de la surface. L'odométrie 3D est suffisamment fiable pour suivre le robot entre les prises de données et peut par conséquent être utilisée comme estimation initiale pour l'assemblage des mesures 3D. Le système de localisation a été caractérisé en détail lors d'expériences de terrain. Le concept de localisation permet un suivi fiable du robot en déplacement dans l'environnement 3D complexe.

L'intégration du système est également un résultat important de ce travail. MagneBike est un système compact ($185 \times 143 \times 236 \text{ mm}^3$) qui intègre cinq moteurs de locomotion et transporte des capteurs pour contrôler son

système de locomotion actif, sa localisation et cartographier l'espace environnant. Le robot porte également un ordinateur miniature et l'électronique permettant le contrôle des tâches de bas niveau. Le prototype présenté a été réalisé et testé avec le succès escompté. Etant donné les bonnes performances de MagneBike, notre partenaire industriel a décidé de soutenir et financer son industrialisation. Cette thèse présente également notre contribution apportée à cette prochaine étape.

Mots clés : Robot d'inspection, Robot de terrain, Locomotion, Roues magnétiques, Localisation, Odométrie 3D, Conception et intégration

Zusammenfassung

Die Nachfrage der Industrie für Mobilrobotik in den Bereichen Inspektion, Wartung und Instandsetzung wächst stark. Mobilroboter aus diesen Bereichen übernehmen vielseitige Aufgaben. Roboter werden entwickelt, um Infrastrukturbauteile wie Rohrleitungen und Leitungssysteme zu untersuchen. Ausserdem werden mobile Roboter zur Inspektion von Gas- und Erdölspeichertanks sowie Lagertanks für Chemikalien, von Brücken und Untertageanlagen oder Lüftungskanälen entworfen. Die Roboter werden auch bei der Inspektion von Dampfkesseln, Hochspannungsleitungen, Dampfturbinen oder Generatoren in Kraftwerken eingesetzt.

Einer der Hauptvorteile von mobilen Robotern liegt darin, dass sie an Stellen herankommen können, die für den Menschen - sei es bedingt durch die Platzverhältnisse, die Temperatur, das Eintauchen in Flüssigkeiten oder aus Sicherheitsgründen - unzugänglich sind. Zudem vermögen Roboter die Dauer und Kosten einer Inspektion entscheidend zu verringern. Der Einsatz von Hilfsgeräten wie Baugerüste wird überflüssig und der Aufwand durch Freilegung, Demontage oder Verlegung von unhandlichen Bauteilen in eine Werkhalle kann vermieden werden. Das Abspeichern der Ergebnisse von systematischen Inspektionsverfahren verbessert die Nachvollziehbarkeit von Defekten sowie die Vorhersage der Lebensdauer einer Anlage und ermöglicht die optimale Planung der Reparaturarbeiten. Die Reparatur kann ebenfalls *in situ* erfolgen, falls der Roboter mit den passenden Werkzeugen ausgestattet ist.

Die Vielfalt von Anwendungen und deren Ausprägungen haben zur Entwicklung von innovativen Fortbewegungskonzepten beigetragen. Die Mobilität von Inspektionsrobotern muss jeweils auf deren Umgebung abgestimmt werden. Dies kann das Überwinden von Hindernissen oder das Erklettern von 3D-Konstruktionen, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen, erfordern. In diesem Zusammenhang spielen Miniaturisierung und Integration eine wichtige Rolle, da der Roboter sich oft in engen Räumen bewegen oder durch eine schmale Öffnung in eine Konstruktion gelangen muss. Weil

die Roboter gewöhnlich in geschlossener Umgebung agieren, ist zudem der Lokalisierung des Roboters grosse Bedeutung beizumessen. Die Lokalisierung dient als wichtiges Feedback für den Benutzer, der den Roboter fernsteuert, sowie als notwendige Eingangsinformation für die autonome Regelung des Roboters. Deshalb sollten Inspektionsroboter nicht nur mit Inspektionssensoren ausgerüstet sein, sondern auch mit Wahrnehmungssensoren für die Lokalisierung.

Diese Doktorarbeit befasst sich schwerpunktmässig mit folgenden Themengebieten: Fortbewegung in 3D, Lokalisierung in 3D und Systemintegration. Die Entwicklung eines Roboters wird vorgestellt, anhand derer die einzelnen Themengebiete behandelt werden. Der Roboter ist gezielt für die Inspektion von Kraftwerken entwickelt worden, wobei die Inspektion der Innenfläche von Dampfzuleitung, wie sie in Dampfturbinen Verwendung finden, als Fallbeispiel dient. Die Umgebung besteht hauptsächlich aus verzweigten und komplex geformten Strukturen aus Stahl, die sich aus Hohlzylindern und Hohlkugeln mit beliebigen Neigungswinkeln bezüglich der Schwerkraft und verschiedensten Durchmessern zusammensetzen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte innovative Fortbewegungskonzept basiert auf einer adaptierten magnetischen Radeinheit, in die zwei seitliche Hebelarme integriert wurden. Diese Hebelarme erlauben, das Rad leicht anzuheben, um lokal die magnetische Anziehungskraft beim Passieren von Hindernissen mit konkaven Kanten zu verringern sowie seitlich die Radeinheit zu stabilisieren. Das MagneBike genannte Konzept besteht aus zwei adaptierten magnetischen Rädern in einer Motorrad-Anordnung. Feldversuche zeigen die hohe Mobilität des Roboters auf. Der Roboter kann nicht nur vertikale Wände hochklettern und periphere Pfade innerhalb röhrenähnlicher Bauelemente abfahren, sondern auch komplexe Kombinationen von 90° konvexen und konkaven ferromagnetischen Hindernissen passieren. Die hohe Mobilität und die Nutzlast ermöglichen dem Roboter, Inspektionssensoren oder Reparaturwerkzeuge zu jeder beliebigen Stelle in der spezifizierten Umgebung zu bringen und dabei durch eine einzelne Öffnung in die Umgebung zu gelangen.

Diese Arbeit beschreibt auch ein vollständiges Lokalisierungskonzept für 3D, das ermöglicht, den Roboter in der 3D-Umgebung ausfindig zu machen. Die Lokalisierungsstrategie kombiniert 3D-Odometrie, um die Roboterposition auf der Oberfläche der Dampfzuleitung zu verfolgen, mit dem Scannen mittels 3D-Laser. Die Anpassung sowie das Aneinanderfügen der Scans (Matching) erlaubt 3D-Karten der Umgebung zu erstellen. Das Modell der 3D-Odometrie geht von der Annahme einer langsamen Bewegung aus und benötigt ausschliesslich Rad-Encoder und einen Drei-Achsen-Beschleunigungs-

sensor. Um die fehlenden Messungen von Winkelgeschwindigkeiten zu kompensieren, schlagen wir ein Modell vor, das einen Filter zur Schätzung der lokalen Oberflächenkrümmung verwendet. 3D-Odometrie ist ein zuverlässiges Mittel, um die Roboterposition zwischen 3D-Scans zu ermitteln und kann als anfängliche Abschätzung für die 3D-Scan-Registrierung benutzt werden. Der Lokalisierungsablauf wird im Weiteren detailliert durch Feldversuche charakterisiert. Daraus ergibt sich als Resultat, dass das Lokalisierungs-konzept die zuverlässige Positionsbestimmung eines Roboters, der sich in komplexer 3D-Umgebung bewegt, gewährleistet.

Die Systemintegration ist ein weiteres wichtiges Ergebnis dieser Arbeit. MagneBike ist ein kompaktes System ($185 \times 143 \times 236 \text{ mm}^3$) mit fünf integrierten Aktuatoren für die Fortbewegung, eingebauten Sensoren für die Regelung des aktiven Fortbewegungskonzepts sowie Lokalisierungs- und Map-pingsensoren. Der Roboter enthält auch einen Einplatinen-Computer und die notwendige Elektronik, um Aufgaben der unteren Abstraktionsschichten zu kontrollieren. Der konzeptionelle Prototyp wurde erfolgreich implementiert und evaluiert. Angesichts der vielversprechenden Resultate, hat sich der Industriepartner dazu entschlossen, die Industrialisierung des Roboters zu unterstützen und finanziell zu tragen. Diese Arbeit beschreibt abschliessend den Beitrag zu diesem weiterführenden Schritt.

Schlüsselwörter : Inspektionsroboter, Feldroboter, Fortbewegung, Magnetische Räder, Lokalisierung, 3D-Odometrie, Entwicklung und Integration