

DISS. ETH NO. 18864

Adaptive Mobile Robot Navigation Based on Online Terrain Learning

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Ambroise KREBS

Ingénieur en Microtechnique

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

Born October 13, 1979

Citizen of Neuchâtel (NE) and Kirchdorf (BE), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Roland Siegwart, Principal Advisor

Prof. Simon Lacroix, Member of the Jury

2010

Abstract

Owing to the fundamental nature of all-terrain exploration, autonomous rovers are confronted with unknown environments. This is especially apparent concerning soil interactions, as the nature of the soil is typically unknown. This work aims at establishing a framework from which the rover can learn from its interaction with the terrain it encounters and shows the importance of such a method. We introduce a set of rover-terrain interaction (RTI) and remote terrain perception (RTP) metrics that are expressed in several subspaces.

Concretely, the information characterizing the terrains, obtained from remote sensors (e.g., a camera) and local sensors (e.g., an inertial measurement unit) is used to characterize the respective RTP and RTI models. In each subspace, which can be described as a feature space encompassing either an RTP or an RTI characteristic, similar features are grouped to form classes, and the probability distribution function over the features is learned for each of those classes. Subsequently, RTI and RTP data acquired on the same terrain is used to associate the corresponding models in each subspace and to build an inference model.

In a second step, based on the remote sensor data measured, the RTI model is predicted using the inference model. This process corresponds to a near-to-far approach and provides the most probable RTI metrics of the terrain lying ahead of the rover. The predicted RTI metrics are then used to plan an optimal path with respect to the RTI model and therefore influence the rover trajectory.

In the context of this research, the CRAB rover mechanics and control were developed and became a reliable autonomous robot. The CRAB rover is used in this work for the implementation and testing of the approach, which we call *Rover Terrain Interactions Learned from Experiments* (RTILE). This thesis presents RTILE, describes its implementation, the CRAB breadboard and concludes with results from field tests that validate the approach.

Key words : Rover, Adaptive Navigation, Rover-Terrain Interaction, Online Learning

Version abrégée

Dû aux caractéristiques inhérentes à l'exploration tout terrain, les véhicules d'explorations autonomes sont confrontés à des environnements inconnus. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne l'interaction de ces véhicules, appelés *rovers*, avec le sol, dont la nature est inconnue. Cette recherche consiste à établir un cadre de travail à partir duquel le *rover* peut apprendre les types d'interactions avec les terrains qu'il rencontre, et montre l'importance d'une telle méthode. Nous introduisons une série de mesures exprimant l'interaction véhicule-terrain (rover-terrain interaction – RTI) ainsi que la perception du terrain à distance (remote terrain perception – RTP) et leurs modèles sont exprimés dans plusieurs sous-espaces.

Plus concrètement, l'information qui caractérise les terrains, obtenue de capteurs *remote* (distant de l'objet mesuré, tel une caméra) et de capteurs *local* (en interaction direct avec l'objet de leur mesure, tel une centrale inertielle ou IMU), est utilisées pour générer les modèles RTI et RTP respectifs. Dans chaque sous-espace, qui peut être décrit comme un espace de *features*, ou particularités, exprimant soit une caractéristique RTI ou RTP, les *features* similaires sont groupés pour former des classes dont la fonction de distribution de probabilités est apprise. Il s'en suit que des données RTI et RTP obtenues sur le même terrain sont utilisées pour associer les modèles correspondants dans chaque sous-espace et construire un modèle d'inférence.

Dans un deuxième temps, sur la base des mesures effectuées par les capteurs *remote*, le modèle d'interaction avec les terrains, ou RTI, est prédit en utilisant le modèle d'inférence. Ce processus correspond à une approche nommée *near-to-far* (proche à éloigné) et fournit les valeurs les plus probables des particularités RTI du terrain qui se situe en avant du *rover*. Ces particularités prédites sont ensuite utilisées pour planifier un chemin optimal en rapport avec le model RTI et donc, influencent la trajectoire du *rover*.

Dans le contexte de cette recherche, la mécanique, de même que le contrôle du rover CRAB ont été développés afin d'obtenir un robot autonome fiable. Le CRAB est utilisé dans ce travail pour l'implémentation et les tests de l'approche que nous appelons RTILE (*Rover Terrain Interactions Learned from Experiments*). Cette thèse présente RTILE, décrit son implémentation, la plateforme robotique CRAB et conclut avec les résultats des tests dans le terrain qui valident cette approche.

Mots clés : Véhicule d'exploration, Navigation adaptative, Interaction véhicule-terrain, Apprentissage en ligne

Kurzfassung

Roboter werden, eingesetzt zur Erkundung unbekannter Gebiete, mit unvertrautem Gelände konfrontiert. Zur Planung der Fortbewegung sind insbesondere Kenntnisse über die Eigenschaften des unbekanntes Untergrundes von grosser Bedeutung. Diese Forschungsarbeit zeigt die Bedeutung dieser Kenntnisse und stellt Methoden vor, die es dem Roboter erlauben aus der Interaktion mit dem Untergrund zu lernen. Dazu werden Metriken zur Bewertung der Roboter-Geländeinteraktion (rover-terrain interaction - RTI) und der entfernten (nicht invasiv messbaren) Geländeeigenschaften (remote-terrain perception - RTP) eingeführt und angewandt.

Konkret formuliert werden Informationen zur Charakterisierung des Untergrundes, z.Bsp. optische Geländeeigenschaften gemessen durch eine Kamera sowie Informationen aus der Interaktion des Roboters mit dem Gelände (z.Bsp. erhalten durch Beschleunigungssensoren), dazu verwendet ein RTI- und ein RTP-Modell zu bilden. Ähnliche Geländeeigenschaften werden darin in Klassen zusammengefasst und für jede Klasse wird die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung gelernt. Anschliessend werden die gemessenen RTI und RTP Eigenschaften desselben Untergrundes zur Erstellung eines Zusammenhanges zwischen den RTI- und den RTP-Modellen verwendet. Dieser Bezug zwischen den RTI- und den RTP-Modellen wird durch ein Inferenzmodell hergestellt.

In einem zweiten Schritt wird das Inferenz-Modell verwendet, um, basierend auf RTP Eigenschaften, ein RTI-Modell vorauszusagen. Dieser Prozess erlaubt es, die wahrscheinlichsten RTI Eigenschaften des unbefahrenen Geländes vor dem Roboter zu berechnen. Diese werden dann zur Planung eines bezüglich des RTI-Modells optimalen Pfades verwendet. Die Abschätzung der Roboter/Geländeinteraktion hat somit einen wesentlichen Einfluss auf die Bewegung des Roboters.

Im Zusammenhang mit dieser Forschungsarbeit wurde die Mechanik sowie das Regelsystem des CRAB Rovers entwickelt und der Rover zu einem zuverlässigen autonomen Roboter erweitert. Der CRAB wurde in dieser Forschungsarbeit zum Testen der erwähnten Methoden (genannt RTILE - *Rover Terrain Interactions Learned from Experiments*) verwendet. Diese These stellt RTILE vor, beschreibt dessen Implementierung sowie die Integrierung in die mobile Plattform CRAB zur Validierung der Methoden durch Feldversuche.

Stichworte : Rover, Adaptive Navigation, Rover-Terrain Interaktion, Online Learning