

DISS. ETH NO. 20594

Interactive Motion Planning among Decision-making Agents

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Martin Markus Rufli

Master of Science ETH in Mechanical Engineering, ETH Zurich

born March 25, 1983

citizen of Seengen AG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Roland Y. Siegwart – Principal Advisor

Prof. Maxim Likhachev – Member of the Jury

Prof. Roland Philippsen – Member of the Jury

2012

Abstract

THIS dissertation is concerned with safe robotic navigation in cluttered, dynamic and (un-)structured environments – amid other decision-making agents. As such, it follows an important trend that aims to bring robots from factory and laboratory settings into our everyday living spaces. From the navigation side this calls for collision-aware systems which respect system and environmental constraints and which are able to plan and perform highly complex maneuvers in constrained areas *online*. In line with these requirements, this dissertation proposes a comprehensive optimization framework that retains its vast scope through a restriction of robot physiologies considered – namely to holonomic robots (i.e. integrators of arbitrary order) and simple, non-holonomic systems (i.e. kino-dynamic unicycles and bicycles). The exposition of this work is structured into three main parts that survey *system-compliance*, *interactive search*, and *safety properties*, respectively.

In the first part, a global graph-based approach to system-compliant planning is developed. The approach is built around traditional graph search principles, which confer some desirable characteristics (such as deterministic (sub-)optimality guarantees and resolution completeness) to the solution and enable *online* operation among hard obstacles at the same time. Located at the heart of this approach is a method suitable for designing system-compliant graph structures. Its output forms a lattice in state-space that satisfies \mathcal{C}^2 -continuity and may be adequately tracked by a large share of practically relevant robot types, including differential-drive robots, cars, simple airplanes, helicopters, and boats. The approach is suitable for global motion planning in static or fully predictable environments, where strict requirements on tracking behavior need to be enforced. Conversely, it faces difficulties among decision-making agents, as interaction effects are not directly modeled and thus need to be compensated for via re-planning.

The second part of this dissertation considers this shortcoming. C^n -CO, a complementary, local method, constructed around a predictive-interactive element, is developed. *Predictive* denotes the method’s foresighted behavior in the presence of environmental dynamicity. *Interactive*, on the other hand, refers to its ability to implicitly negotiate steady-state avoidance strategies among nearby agents. C^n -CO builds on the Reciprocal Velocity Obstacle method for implicit reciprocal collision avoidance and extends it from piecewise linear motion segments to C^n -continuous curves. C^n -CO may thus serve as a *local* system-compliant planning method, rather than as a mere collision avoidance tool. Based on this realization, a new framework for global interactive navigation is proposed, consisting of a partial motion planner, where the local part incorporates C^n -CO and the global heuristic is composed of the lattice structure developed in part one. Yet despite the method’s interactive properties, safety guarantees do not trivially hold.

The third part consequently analyzes safety properties *inherent* to the motion planning algorithms developed in parts one and two. In this regard, C^n -CO-based methods are shown to ensure *passive* safety guarantees while retaining their superior navigation performance – if some mild assumptions regarding other agents’ motives and future behavior are fulfilled.

In each part, the presented approaches are assessed and validated experimentally. Quantitative experiments are predominantly performed in simulation, while qualitative ones are also carried out on physical setups. Exploitation of the developed framework resulted in an implementation of the lattice-based method presented in part one on a differential-drive tour-guide robot that has elapsed more than 20 km of autonomous operation in both campus and inner city environments all over Europe. Furthermore, a precursor of C^n -CO, NH-ORCA, has been implemented on *Pixelbots* – a mobile display composed of 50 robots that has been showcased in various international venues. An implementation of C^2 -CO is under progress.

Finally, parallels between this work and other fields of science are drawn, which suggest that the obtained results may find applications in computer vision (pedestrian tracking), in civil engineering (evacuation dynamics), and in sociology to further explore the motives underlying *human* motion itself.

In summary, this dissertation proposes a novel interactive robotic navigation framework that is particularly suitable for environments characterized by large amounts of clutter and a high dynamicity. Its focus on trajectory continuity, rather than specific agent models, renders it applicable to a large class of practically relevant robot types. Hence, from a robotics perspective this work represents an important step towards an exciting world where robots are no longer a curiosity, but form an integral part of our lives.

Kurzfassung

DIE vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Navigation von Robotern in von hoher Dynamik geprägten Umgebungen – inmitten anderer handelnder Agenten. Damit begünstigt sie eine Entwicklung, welche Robotertechnologie langsam von rein industriellen Anwendungen in unser alltägliches Umfeld führt. Dieser Umstand bedingt vonseiten der Navigation, dass kollisionsresistente Methoden entstehen, die sowohl die dynamischen Eigenschaften der Roboter als auch Umgebungsaufgaben berücksichtigen und des Weiteren in der Lage sind, hochkomplexe Manöver *in Echtzeit* zu tätigen. Basierend auf den beschriebenen Bedingungen, schlägt die vorliegende Arbeit ein umfassendes Optimierungsframework vor, das seine vereinheitlichende Beschreibung durch eine Beschränkung auf die praktisch relevanten Gruppen der holonomen Roboter (d.h. Integratoren), und der einfachen nicht-holonomen Systeme (d.h. Einräder und Fahrräder) erkauft. Die Exposition dieser Arbeit gliedert sich in drei Hauptteile. Der erste beschreibt die Modellierung der *System-Dynamik* während des Planungsvorgangs; der zweite die Entwicklung von Methoden zur *interaktiven Suche*; und der dritte Garantien zur *operativen Sicherheit*.

Im ersten Teil wird ein globaler Ansatz zur graphbasierten Suche entwickelt. Das Herzstück des Ansatzes besteht dabei aus einer Methode zur Konstruktion von Graphenstrukturen, welche die Systemdynamik der behandelten Gruppe von Robotern berücksichtigt. Daraus resultiert ein diskreter Gittergraph im Zustandsraum, dessen Kanten C^2 -stetig sind. Der beschriebene Ansatz eignet sich daher besonders gut zur globalen Trajektorienplanung in stationären, aber auch in deterministisch dynamischen Umgebungen. Andererseits bekundet er Mühe im Umgang mit anderen handelnden Agenten, da Interaktionseffekte nicht Teil der Graphenmodellierung sind, und dadurch nur unzureichend über das Neuplanen berücksichtigt werden können.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit dieser Unzulänglichkeit. Dabei wird C^n -CO, eine komplementäre, lokale Methode, aufbauend auf einem prädiktiven Interaktions-Axiom entwickelt. *Prädiktiv* steht hierbei für das vorausschauende Verhalten der Methode. *Interaktiv* bezieht sich auf deren implizite Fähigkeit, kompatible Gleichgewichtsstrategien zwischen interagierenden Agenten zu erkennen. Aufbauend auf der RVO Methode zur reziproken Kollisionsvermeidung, kann C^n -CO als lokale systemkonforme Planungsmethode betrachtet werden. Mithilfe dieser Erkenntnis wird ein neues Framework zur globalen, interaktiven und systemkonformen Planung vorgeschlagen, in dem die graphenbasierte Methode vom ersten Teil dieser Arbeit als Heuristik dient. Trotz interaktiver Modellierung ergeben sich dabei formelle operative Sicherheitsgarantien allerdings nicht automatisch.

Dies dient als Anlass, um im dritten Teil dieser Arbeit *Sicherheitsmerkmale* der zuvor entwickelten Methoden zu analysieren. Es zeigt sich, dass C^n -CO der *passiven* Sicherheit genügt, falls einige wenige Bedingungen bezüglich dem zukünftigen Verhalten anderer Agenten erfüllt sind.

Schliesslich werden die entwickelten Ansätze einer experimentellen Validierung unterzogen, wobei zur besseren Reproduzierbarkeit quantitativer Experimente zumeist auf Simulationen zurückgegriffen wird. Demgegenüber wird zur qualitativen Betrachtung auf Roboterimplementationen bestanden. Dabei wurde das graphbasierte Framework auf einem Roboter für Stadtführungen implementiert, der damit mehr als 20 km zurückgelegt hat. Ausserdem wurde eine Vorgängermethode von C^n -CO auf einem neuartigen, aus 50 Robotern bestehendem, Roboterdisplay implementiert.

Zusammenfassend schlägt die vorliegende Arbeit ein neuartiges interaktives Navigationsframework vor, das sich besonders gut zur roboterbasierten Trajektorienplanung in dynamischen und interaktiven Umgebungen eignet. Der Fokus auf Pfadkontinuität, anstatt auf spezifische Robotermodelle, verleiht dem Ansatz ausserdem eine gewisse Allgemeingültigkeit. Aus den genannten Gründen stellt diese Arbeit daher einen wichtigen Schritt in Richtung einer neuen Welt dar, in der Roboter einen integralen Bestandteil unserer Gesellschaft bilden.