

Path Planning and Collision Avoidance for Safe Autonomous Vessel Navigation in Dynamic Environments

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften,
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation von Herrn

Michael Blaich

geboren am 05. 07. 1978 in Calw

Carl von Ossietzky Universität
Oldenburg, Niedersachsen
Februar 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Weiterer Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Johannes Reuter

Tag der Disputation: 10.06.2016

Berichte aus der Robotik

Michael Blaich

**Path Planning and Collision Avoidance
for Safe Autonomous Vessel Navigation
in Dynamic Environments**

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Oldenburg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5304-3

ISSN 1434-8098

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Acknowledgement

This dissertation was created during my time at the Institute of System Dynamics (ISD) of the University of Applied Sciences (HTWG) Konstanz, Germany and in close collaboration with the University of Oldenburg, Germany. First of all, I would like to thank my supervisor Prof. Dr.-Ing. Johannes Reuter for his unlimited support and the opportunity to realise this work at the Institute of System Dynamics (ISD). His motivation to push things forward as well as the professional discussions inspired me always. I also want to thank my supervisor Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn for the stimulating conversations, his support during the final stage of this dissertation and especially that he made the collaboration with the University of Oldenburg possible. In addition, I would like to thank both for the trust and freedoms they gave me in the content arrangement and in the definition of personal focuses.

A special thanks also goes to Prof. Dr. Oliver Bittel who brought me in touch with mobile robotics and strengthened my interest in this research field. I appreciate the close cooperation over many years and the fruitful discussions.

Moreover I would like to thank my colleagues from the Institute of System Dynamics (ISD), Michael Schuster, Stefan Wirtensohn, Steffen Köhler, Oliver Hamburger and Sebastian Stenzel for their support and the many great hours we spend together at work and also beside. Especially the professional discussions enriched my work and gave me an insight into the areas of control technology and sensor data fusion. Without this excellent team and their tireless support in many test runs on the Lake Constance it would not have been possible to create such a great work.

By the cooperation with the University of Oldenburg, I had the opportunity to spend several weeks there and get to know other Ph.D students and their thoughts. In particular I would like to thank Sascha Hornauer. The close cooperation, and the joint workshops in Oldenburg as well as in Konstanz, helped me a lot in my work.

I would also like to thank the students Michael Rosenfelder, Matthias Greuter, Simon Weber, Christoph Faulhaber, Timo Partl, Benjamin Frank, Dominik Riemelmoser, Melanie Niethammer and Steffen Köhler. They provided with their thesis important findings for this work. Furthermore, they did a lot of implementation work especially for the Boat Operating System (BOS) framework.

Lastly, I would like to thank my family, and especially my wife Claudia, for their patience and unconditional support.

Path Planning and Collision Avoidance for Safe Autonomous Vessel Navigation in Dynamic Environments

Abstract

In the near future autonomous systems such as service robots or autonomous cars will be integrated more and more in our daily lives. There is also a trend in the marine community to use autonomous or semi-autonomous vessels. Nevertheless, due to legal and safety concerns, it is highly improbable to see the use of completely unsupervised, unmanned ships in the near future. The realisation of autonomous Unmanned Surface Vehicles (USVs), however, gains interest all over the world. Many experts see their potential as force multipliers and as alternative ways to meet complex operational requirements in a cost effective manner. One of the most challenging requirement for autonomous USVs is to operate safely – especially in the presence of civil marine traffic. Thus, a collision avoidance system is indispensable. In recent years, collision avoidance methods for close range encounters have become an important subject in marine research and plenty approaches have been carried out. The most promising approaches use path planning algorithms to find collision-free evasive trajectories. However, none of these approaches cover the problem completely because of the huge amount of requirements that have to be considered for fully autonomous vessel navigation.

The idea for this work is to use a grid based path planning algorithm to generate evasive trajectories for situations that potentially lead to a collision. This grid based approach reduces the computational effort and also enables to consider several requirements such as handling of static and dynamic obstacles, consideration of the vessel's kinematic constraints and real-time capability. For an operation in the presence of civil marine traffic, the evasive behaviour has to obey local and international laws.

For the evasive trajectory generation, a specialised A* search algorithm is used to find a sequence of collision-free and reachable waypoints taking into account information from Electronic Nautical Charts (ENCs) and obstacle detection systems. To guarantee the reachability of these estimated waypoints, the kinematic constraints of the own vessel has to be considered by the A* algorithm. Therefore, two new cell neighbourhoods for grid based search algorithms, the so called region of reachability and the T-Neighbourhood, are introduced. Furthermore, a trajectory for an autonomous driving vessel should be smooth with a continuous curvature to improve the motion control performance. Thus, the resulting sequence of waypoints is interpolated using Bézier curves. To define a safety distance to other vessels, the so called ship domains are used. This leads to trajectories which cause a typical nautical behaviour regarding the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREG).

When applying such a collision avoidance system for real ships, it is, however, to note that both the sensors and the models are imperfect. To take this into account, the grid based collision avoidance is extended to consider the measuring and tracking uncertainties of an obstacle detection system. The resulting probabilistic grid based collision avoidance approach uses the corresponding uncertainties of the estimated state of other vessels to predict their future position likelihoods and the related occupancy probability of each grid cell. The A* algorithm is further adopted to take these occupancy probabilities into account.

As the decisions of the other vessels navigators cannot be predicted exactly, it is not sufficient to use collision-free trajectories to guarantee motion safety for a vessel; the vessel also has to maintain a state for which an evasive trajectory is always available. Therefore, the concept of Inevitable Collision States (ICS) is adopted for a vessel travelling along a given trajectory. The proposed ICS method for vessels uses the distances and the progression of the distances to all other vessels to ensure that a circling manoeuvre can be performed at any time for a given trajectory. Thus, motion safety is guaranteed for a specific state if and only if an evasive trajectory exists that leads to constant or increasing distances to all other vessels without violating safety distance limits. These constant or increasing distances ensure that the own vessel will never collide with any other vessel in the future.

Several tests are performed on the Lake Constance with an automated recreational craft to estimate typical navigation parameters such as a proper distances to static obstacles or other vessels. The results of these tests are used to optimise the A* search parameters. Based on the best parameters, three different grid based evasive trajectory planning approaches are implemented and evaluated in simulations for scenarios with two vessel encounters and multi vessel scenarios. The simulations show that evasive trajectories always maintain a proper safety distance and produce evasive manoeuvres that comply with the COLREGs. It is also shown that the probabilistic extension improves the robustness of the solution and therefore enables a smoother trajectory following with a smaller cross track error. The efficiency analysis of the three approaches show that, due to the runtimes, only the most efficient one is suitable for an on-board collision avoidance system of an automated vessel.

Zusammenfassung

Autonome Systeme wie z.B. Serviceroboter oder selbst fahrende Autos werden in naher Zukunft immer mehr in unser tägliches Leben integriert sein. Im maritimen Bereich gibt es ebenfalls diesen Trend zu autonomen bzw. teil-autonomen Schiffen. Auf Grund der rechtlichen Rahmenbedingungen ist es allerdings höchst unwahrscheinlich, dass in naher Zukunft unbemannte oder unüberwachte Schiffe zum Einsatz kommen. Allerdings steigt weltweit das Interesse an kleineren unbemannten Wasserfahrzeugen. Viele Experten sehen dies als eine Möglichkeit, komplexe Aufgaben kostengünstig zu realisieren und dadurch die Forschung im Bereich autonomer Schiffe voran zu bringen. Eine der größten Herausforderungen für diese unbemannten Wasserfahrzeuge ist es, in einer Umgebung mit zivilem Schiffsverkehr sicher zu agieren. Folglich ist ein Kollisionsvermeidungssystem für den Einsatz solcher Fahrzeuge in diesem Umfeld unabdingbar. Die Forschung im Bereich maritimer Kollisionsvermeidung hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Es wurde eine Vielzahl von möglichen Ansätzen zur Lösung dieses Problems veröffentlicht. Die vielversprechendsten Ansätze verwenden Pfadplanungsalgorithmen, um Ausweichtrajektorien zu berechnen. Auf Grund der komplexen Anforderungen einer autonomen Schiffsnavigation löst keiner dieser Ansätze das Problem umfassend.

In dieser Arbeit wird eine gitterbasierte Pfadsuche verwendet, um für Situationen, die möglicherweise zu Kollisionen führen, eine Ausweichtrajektorie zu berechnen. Die Verwendung eines Gitters reduziert zum einen den Rechenaufwand und ermöglicht außerdem verschiedene Anforderungen zu erfüllen. Diese sind zum Beispiel die Berücksichtigung von statischen und dynamischen Hindernissen sowie der kinematischen Beschränkungen. Um diesen Ansatz in Gebieten mit zivilem Schiffsverkehr verwenden zu können, müssen die Ausweichtrajektorien den Schifffahrtsregeln entsprechen.

Zur Berechnung einer Ausweichtrajektorie wird ein speziell angepasster A* Suchalgorithmus verwendet. Dieser liefert unter Berücksichtigung von statischen und dynamischen Hindernissen eine Folge von kollisionsfreien Wegpunkten. Die statischen Hindernisse werden aus elektronischen Seekarten entnommen. Die dynamischen Hindernisse werden mittels eines Radars detektiert. Um sicherzustellen, dass das Schiff die errechneten Wegpunkte erreichen kann, werden dessen kinematischen Beschränkungen während der Pfadsuche berücksichtigt. Hierzu werden zwei neue Zellnachbarschaften für die gitterbasierte Suche eingeführt. Die Segmente zwischen den von der Pfadsuche ermittelten Wegpunkten werden in einem Post-Processing durch Bézierkurven interpoliert, um eine stetige Trajektorie zu erhalten. Dies ist besonders für ein automatisiertes Fahren von Bedeutung, da ein Regler nur bei Vorgabe einer entsprechenden Trajektorie das Schiff mit geringer Abweichung zu dieser Trajektorie führen kann. Hierfür ist besonders wichtig, dass die Krümmung der Trajektorie begrenzt ist. Um typische nautische Abstände, speziell zu anderen Schiffen, einzuhalten werden sogenannte Schiffs-Domains verwendet. Dies sorgt außerdem dafür, dass die Aus-

weichtrajektorien ein typisch nautisches Verhalten produzieren, welches den Schiffsregeln entspricht.

Da sowohl die verwendeten Sensoren wie auch die mathematischen Modelle nicht perfekt sind, muss dies bei der Integration eines Kollisionsvermeidungssystems in ein reales Schiff berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die gitterbasierte Pfadplanung dahingehend erweitert, dass die Messungenauigkeiten sowie die Trackinggüte des Hinderniserkennungssystems berücksichtigt werden. Es werden zusätzlich zu den Zuständen der anderen Schiffe die dazugehörigen Unsicherheiten verwendet, um deren Aufenthaltswahrscheinlichkeiten zu berechnen. Basierend auf diesen berechnet die probabilistische gitterbasierte Pfadplanung die Belegheitswahrscheinlichkeit der Gitterzellen. Der zur Pfadsuche verwendete A* Algorithmus muss dahingehend angepasst werden, dass er diese Belegheitswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Da das Verhalten der anderen Schiffsführer nicht exakt vorhergesagt werden kann, reicht eine kollisionsfreie Trajektorie nicht aus, um eine Bewegungssicherheit für ein Schiff zu garantieren. Ein Schiff muss außerdem zu jedem Zeitpunkt in der Lage sein ein Ausweichmanöver durchführen zu können. Um dies zu erreichen, wird das Konzept der Inevitable Collision States (ICS) für Schiffe, die sich auf Trajektorien bewegen, übertragen. Die neu vorgeschlagene Inevitable Collision States (ICS) für Schiffe verwenden die Abstände und den Verlauf der Abstandsfunktion zu allen anderen Schiffen, um sicherzustellen, dass das eigene Schiff zu jeder Zeit ein Wendemanöver ausführen kann. Eine Bewegungssicherheit für ein Schiff kann genau dann garantiert werden, wenn eine Trajektorie existiert, welche die Abstände zu allen anderen Schiffen konstant hält oder vergrößert ohne dabei einen Sicherheitsabstand zu unterschreiten. Die konstanten beziehungsweise anwachsenden Abstände zu allen anderen Schiffen stellen sicher, dass auch in Zukunft mit keinem dieser Schiffe eine Kollision stattfindet.

Um typische Parameter wie z. B. den Abstand zu statischen Hindernissen oder den Abstand zu anderen Schiffen zu bestimmen, wurden auf dem Bodensee verschieden Testfahrten mit einem automatisiert fahrbaren Sportboot durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Testfahrten wurden dazu verwendet, um die Parameter des A* Algorithmus zu optimieren. Unter Verwendung des besten Parametersatzes wurden drei verschiedene Ansätze zur gitterbasierten Ausweichtrajektorienplanung implementiert und evaluiert. Für die Evaluation wurden sowohl Szenarien mit zwei als auch mit mehreren Schiffen simuliert. Diese Simulationen haben gezeigt, dass mit allen drei Ansätzen die Sicherheitsabstände eingehalten werden und die Ausweichtrajektorien den Schiffsregeln entsprechen. Es wurde weiterhin gezeigt, dass der probabilistische Ansatz die Robustheit des Verfahrens deutlich verbessert und die Ausweichtrajektorien dadurch seltener neu berechnet werden müssen. Dies ermöglicht eine bessere Regelperformance und einen kleineren Regelfehler. Die Effizienzanalyse der Algorithmen zeigte, dass der effizienteste der drei Ansätze eine Ausweichtrajektorie in weniger als einer Sekunde berechnet. Daher eignet sich dieser im Besonderen für eine Onboard-Kollisionsvermeidung.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Problem Statement	4
1.2	Methodology	6
1.3	Structure of the Work	7
2	Requirements and State of the Art Review	9
2.1	Requirements Definition	10
2.2	Collision Avoidance for Maritime Traffic Safety	16
2.3	Collision Avoidance for Autonomous Vessels	28
2.4	State of the Art Summary	29
3	Path Planning Basics	33
3.1	Representations	33
3.2	Search Algorithms	42
3.3	Specialised Grid Based Path Planning Approaches	45
4	Grid Based Trajectory Planning	49
4.1	Grid Representation of Maritime Environments	49
4.2	Grid Cell Connectivity and Reachability	51
4.3	Specialised A* Algorithm	62
4.4	Trajectory Generation	65
4.5	Trajectory Example	69
5	Grid Based Collision Avoidance	71
5.1	Motion Prediction	71
5.2	Maritime Obstacle Handling	75
5.3	Evasive Trajectory Planning	78
5.4	Collision Detection	80
5.5	Collision Avoidance Example	80
6	Probabilistic Collision Avoidance	83
6.1	Probabilistic Motion Prediction	84
6.2	Probabilistic Obstacle Handling	86
6.3	A* Adaptation for Probabilistic Obstacles	91
6.4	Simulation Example	93

7 Evasive Trajectory Verification	97
7.1 Review of Inevitable Collision States	98
7.2 Motion Safety for Vessels	99
7.3 Distance Based Inevitable Collision States	102
8 Implementation	105
8.1 Boat Operating System (BOS)	106
8.2 Unified Navigation Environment (DUNE)	108
8.3 Inter-Module Communication Protocol (IMC)	108
9 Test and Evaluation	109
9.1 Parametrisation of the Evasive Trajectory Planning	109
9.2 Evaluation of Typical Traffic Scenarios	116
9.3 Evaluation with Respect to the Requirements	129
9.4 Discussion	144
10 Summary and Concluding Remarks	151
Acronyms	155
Bibliography	157
A CPA for the CV Model	167
B Transition from CTRV to CV	169
Ehrenwörtliche Erklärung	171