

Two-step Trajectory Planning for Automatic Parking

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Bernhard Robert Müller

Erlangen 2009

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	25. März 2009
Tag der Promotion:	24. Juli 2009
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. J. Huber
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. G. Roppenecker Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski Dr.-Ing. J. Deutscher

Zweistufige Trajektorienplanung für das automatische Einparken

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Bernhard Robert Müller

Erlangen 2009

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Bernhard Müller

Two-step Trajectory Planning for Automatic Parking

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

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 978-3-8322-8570-8

ISSN 0945-1005

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Regelungstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Roppenecker, danke ich für seine Unterstützung und sein Interesse sowie für die Gewährung des nötigen Freiraums zur Erstellung der Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski und Herrn Dr.-Ing. Joachim Deutscher bedanke ich mich für die freundliche Übernahme der Korreferate. Dabei gilt Herrn Dr.-Ing. Joachim Deutscher mein besonderer Dank, da er als Leiter der Forschungsgruppe Nichtlineare Systeme die Arbeit mit großem Engagement betreut und mit vielen wertvollen Anregungen sehr zu ihrem Gelingen beigetragen hat. Für Ihre Mitwirkung im Prüfungskollegium möchte ich mich außerdem bei Herrn Prof. Dr. Johannes Jahn und Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Moor bedanken.

Allen Kollegen am Lehrstuhl für Regelungstechnik danke ich für das sehr angenehme Arbeitsklima, die vielen anregenden (und nicht immer nur fachlichen) Gespräche sowie für die beständige Bereitschaft zur gegenseitigen Unterstützung. Besonders erwähnen möchte ich die Hilfe von Herrn Dipl.-Ing. Markus Bäuml, der das Manuskript der Arbeit kritisch durchgesehen und hilfreiche Anregungen zur Verbesserung der Verständlichkeit und Lesbarkeit gegeben hat. Ein Dankeschön gebührt zudem allen Studenten, die als studentische Mitarbeiter oder im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten den Fortgang der Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Stefanie, die stets Geduld und Verständnis gezeigt und mich vor allem während der Phase des Zusammenschreibens immer wieder neu motiviert hat. Darüber hinaus gilt mein Dank unseren Familien, auf deren Unterstützung wir immer uneingeschränkt zählen können.

Kurzzusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Bahnplanung für das automatische Einparken, d.h. die Berechnung einer kollisionsfreien Bahn, welche ein Fahrzeug unter Einhaltung aller kinematischen Beschränkungen zur gewünschten Zielposition innerhalb einer Parklücke überführt. Dabei werden insbesondere sogenannte semi-autonome Parkassistenzsysteme betrachtet. Letztere sind dadurch charakterisiert, dass während des Einparkvorgangs zwar die Lenkung automatisiert erfolgt, aber der Fahrer in gewohnter Weise über Gas, Bremse und Gangwahl die Längsführung des Fahrzeuges übernehmen muss.

Die Anforderungen an die Bahnplanung, welche sich aus dieser speziellen Funktionsweise ergeben, werden analysiert und zu einer konkreten mathematisch fassbaren Problemstellung zusammengefasst. Dies ermöglicht es zunächst, die Lösbarkeit der Planungsaufgabe mit Hilfe von Werkzeugen der nichtlinearen Regelungstheorie zu untersuchen. Anschließend wird gezeigt, wie eine aus der Robotik entlehnte allgemeine zweistufige Bahnplanungsstrategie auf die speziellen Erfordernisse angepasst und erweitert werden kann.

So erlaubt es eine konsequente bogenlängenbezogene Betrachtungsweise, die Planung weitgehend geschwindigkeitsunabhängig durchzuführen und somit der späteren Einbindung des Fahrers in den Einparkprozess Rechnung zu tragen. Desweiteren werden einige wesentliche Konzepte in der Arbeit weiterentwickelt, welche die Komplexität des resultierenden Manövers reduzieren, d.h. ein unnötiges Anhalten oder überflüssige Fahrtrichtungswechsel während des Einparkvorgangs vermeiden. Alle Maßnahmen werden sorgfältig in das zugrunde liegende Zwei-Stufen-Verfahren integriert, so dass einerseits wichtige theoretische Aussagen ihre Gültigkeit bewahren und andererseits eine moderate Rechenzeit des Algorithmus gewährleistet werden kann. Auf diese Weise ist es möglich zu garantieren, dass eine existierende Lösung auch tatsächlich gefunden wird, sofern die für numerische Berechnungen verwendete Auflösung fein genug gewählt ist.

Die Funktionstüchtigkeit des vorgestellten Verfahrens wird für serienfahrzeugähnliche Parameter in Rechnersimulationen nachgewiesen. Zusätzlich wird die praktische Umsetzbarkeit der entwickelten Algorithmen über die erfolgreiche Integration in ein komplettes experimentelles Parkassistenzsystem belegt, dessen Erprobung mit Hilfe eines Laborfahrzeugs erfolgt.

Abstract

In this dissertation, the central motion planning problem occurring during the design of automatic parking systems is considered, i.e. the task of planning a suitable collision-free path which observes all kinematic constraints of the car while guiding it to the desired position inside of the parking space. More precisely, the so-called semi-autonomous system setup is examined, where the steering angle is provided automatically during the actual realization of the parking process, but the driver still controls the longitudinal motion of the vehicle.

This functionality implies that some specific conditions must be respected during path planning, which are summarized in form of a mathematically precise problem statement first. Then, tools from nonlinear control theory are applied to study the solvability of the described planning task, before a suitable solution algorithm is developed. The latter is based on a general two-step motion planning strategy for mobile robots which is adapted and extended such that the particular requirements of semi-autonomous automatic parking can be satisfied.

The fact that the driver controls the velocity during the parking process is accounted for by introducing an arc-length based modeling framework which allows to describe vehicle movements independently from the longitudinal motion. Moreover, a series of unique measures are proposed to reduce the complexity of the resulting parking maneuver, i.e. to avoid unnecessary stops as well as too many changes in the direction of motion. All concepts are carefully integrated into the underlying two-step approach such that moderate computation times are achieved without compromising fundamental theoretical properties which ensure the reliability of the method. In particular, it can be guaranteed that an existing solution will always be found if the resolution of discretization-based computation steps is chosen appropriately.

The performance of the approach is demonstrated in simulation studies assuming parameters of a typical series production car. Furthermore, the developed algorithms are also tested in practice by means of experiments with a laboratory vehicle, where it is shown that the suggested motion planning strategies can be smoothly integrated into a complete parking assistant system.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation and Problem Formulation	1
1.2	Contribution of This Dissertation	3
1.3	Dissertation Overview	6
2	Semi-autonomous Collision-free Motion Planning Problem	9
2.1	Kinematic Modeling	10
2.1.1	Fundamental Vehicle Model	10
2.1.2	Velocity-independent Description of Vehicle Kinematics	14
2.1.3	Admissible Arc-length Based Trajectories	17
2.2	Geometric Modeling	20
2.3	Problem Statement	26
2.4	Solvability of the Semi-autonomous Motion Planning Problem	28
2.5	Available Solution Approaches	37
2.5.1	Application-oriented Approaches for Automatic Parking	38
2.5.2	General Non-holonomic Motion Planning Approaches	39
2.5.3	Algorithms Based on the Two-step Principle	41
3	Two-step Collision-free Trajectory Planning	45
3.1	Overview of the Two-step Solution Approach	46
3.1.1	Motivation and Principle	46
3.1.2	Incorporation of Qualitative Requirements	51

3.2	Step 1: Distance Optimized Vehicle Path Planner	54
3.2.1	Distance Measure: SFP-Metric	55
3.2.2	Shortest Admissible Trajectory Sequences according to Reeds and Shepp	60
3.2.3	Approximation of the Obstacle Distribution	69
3.2.4	Symmetry Properties of Basic Obstacle Elements	74
3.2.5	Calculation of Obstacle Distance Look-up Tables	82
3.2.6	Collision Detection and Safety Distance	88
3.2.7	Algorithm for Distance Optimized Path Planning	99
3.3	Step 2: One-sided Continuous Curvature Local Trajectory Planner	110
3.3.1	Overview and Working Principle	113
3.3.2	Elementary Arc-length Based Vehicle Trajectory Segments	119
3.3.3	Composite Base Element: OSCC Turn	134
3.3.4	Trajectory Families and their Construction	143
3.3.5	Trajectory and Velocity Selection	162
3.3.6	Concatenating OSCC Trajectories	174
3.4	Overall Trajectory Planning Algorithm	176
3.5	Simulation Results	186
4	Experimental Verification	209
4.1	Experimental Setup and Functionality Overview	210
4.2	Realization of the Automatic Vehicle Guidance	214
4.2.1	Lateral Vehicle Guidance	214
4.2.2	Longitudinal Vehicle Guidance	217
4.3	Experimental Results	220
5	Summary and Conclusions	243

Appendix	245
A Proofs	245
A.1 Proof to Lemma 1	245
A.2 Proof to Lemma 6	247
A.3 Proof to Lemma 7	248
A.4 Proof to Lemma 8	249
A.5 Proof to Lemma 10	250
A.6 Proof to Lemma 11	250
A.7 Proof to Lemma 12	253
A.8 Proof to Lemma 13	254
A.9 Proof to Theorem 2	255
A.10 Proof to Theorem 4	257
A.11 Proof to Lemma 15	261
A.12 Proof to Theorem 5	262
A.13 Proof to Lemma 16	265
A.14 Proof to Theorem 7	270
A.15 Proof to Theorem 8	275
A.16 Proof to Lemma 17	276
A.17 Proof to Theorem 11	277
B The Euclidean Modulo Operator	281
C Basic Trigonometric Identities	285
D The Fresnel Integral Functions	287
E Feasibility Conditions of OSCC Trajectory Families	289
F Technical Data of a VW Golf VI	291
G List of Relevant Publications and Technical Reports	295
References	297