

Modelle zur multisensoriellen Erfassung des Fahrzeugumfeldes mit Hilfe von Schätzverfahren

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Heiko Cramer

geboren am 8. November 1973 in Stuttgart

eingereicht am 4. Oktober 2004

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Wanielik

Prof. Dr.-Ing. P. Protzel

Dr.-Ing. A. Kirchner

Tag der Verleihung: 8. Juli 2005

Forschungsberichte der Professur Nachrichtentechnik

Band 2

Heiko Cramer

**Modelle zur multisensoriellen Erfassung des
Fahrzeugumfeldes mit Hilfe von Schätzverfahren**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5165-0

ISBN-13: 978-3-8322-5165-9

ISSN 1610-1251

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik, der mir die Promotion ermöglicht und sich in verschiedenen Situationen sehr für mich eingesetzt hat. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen haben zur Erstellung der vorliegenden Arbeit entscheidend beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Protzel und Herrn Dr.-Ing. Alexander Kirchner danke ich für ihr Interesse an der Thematik und für die Übernahme eines Gutachtens. Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Diplom-Betreuer Dr. rer. nat. Jens Bohlmann, ohne dessen ansteckende Begeisterung für wissenschaftliches Arbeiten ich wohl nicht auf die Idee gekommen wäre, mich um eine Promotion zu bemühen.

Zu Dank bin ich auch allen jetzigen und ehemaligen Mitarbeitern der Professur für Nachrichtentechnik verpflichtet. Ich wurde in vielerlei Hinsicht unterstützt und habe Dinge, die weit über das Thema dieser Arbeit hinausgehen, kennengelernt. Diesbezüglich gilt mein besonderer Dank Dr.-Ing. Ullrich Scheunert, der durch seine theoretische und wissenschaftliche Herangehensweise an neue Aufgaben sehr viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinem langjährigen Freund und Arbeitskollegen Dipl.-Ing. (FH) Basel Fardi.

Viele Studenten haben während meiner Tätigkeit an der Professur als Studienarbeiter, Diplomanten oder Hilfswissenschaftler gearbeitet. Stellvertretend für alle möchte ich mich bei den von mir betreuten Studenten Benjamin Berger, Matthias Domes, André Froß, Dirk Martin, Hendrik Neuber, Daniel Seyffert, Anne Sternberger, Andreas Westhues und Thomas Wüstner bedanken. Ihr Engagement hat mich sehr beeindruckt und die fachlichen Diskussionen waren auch für mich bereichernd. Dipl.-Math. Markus Wappler und Prof. Dr. Helmberg von der Fakultät für Mathematik danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Betreuung der Diplomarbeit von Jens Ulbrich.

Während meiner Zeit an der Technischen Universität Chemnitz habe ich thematisch dem Europäischen Forschungsprojekt EUCLIDE zugearbeitet. Die gesammelten Erfahrungen in der gemeinsamen Arbeit mit Kollegen aus anderen europäischen Ländern sind mir wichtig. Deswegen möchte ich mich stellvertretend für alle bei der Projektleiterin Dr. Luisa Andreone bedanken, die durch ihre professionelle Art viel zum freundschaftlichen Klima zwischen den Projektpartnern beigetragen hat.

Mein Dank gilt auch Miriam Bahr für die Durchsicht des Manuskripts und die sprachlichen Verbesserungsvorschläge.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Catherine und meinen beiden Töchtern Jessica und Sophia für ihre Unterstützung und ihr Verständnis bedanken. Vor allem aber gebührt Gott im Himmel die Ehre für seine vollkommene Schöpfung, die wir auch mit noch so guten, von Menschen erdachten Modellen nie ganz erfassen können.

Amtsberg, im September 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Zielstellung der Arbeit	10
1.3	Gliederung der Arbeit	11
2	Kalman-Filter-basierte Zustandsschätzung	13
2.1	Rekursive Zustandsschätzung	13
2.1.1	Statische Schätzsysteme	14
2.1.2	Dynamische Systeme	16
2.1.3	Das Kalman-Filter	19
2.1.4	Das erweiterte Kalman-Filter	22
2.1.5	Parallele Kalman-Filter zur Schätzung eines einzelnen Systemzustands . .	24
2.2	Datenzuordnungsmethoden	24
2.3	Messprinzipien in der Fahrzeugumfeldsensorik	28
2.3.1	Aktive vorausschauende Sensoren	29
2.3.2	Passive vorausschauende Sensoren	30
2.3.3	Bewegungssensoren	31
2.3.4	Positionssensoren und virtuelle Sensoren	31
3	Multisensor- und Multiobjekt-Funktionalität	33
3.1	Datenfusion auf verschiedenen Abstraktionsebenen	34
3.2	Multisensor-Datenfusion	37
3.2.1	Dezentrale und zentrale Fusion	37
3.2.2	Zeitliche Abfolge von Datenfusions-Schritten	42
3.3	Gating und Multiobjekt-Datenzuordnung	45
3.3.1	Gating-Methoden	45
3.3.2	Globale Datenzuordnungsmethoden	50
3.4	Verwaltung von Filtern in Multiobjekt-Systemen	55
3.4.1	Anlegen und Löschen von Filtern	55
3.4.2	Zusammenfassen von Filtern mit ähnlichen Schätzparametern	58

4 Zustandsraummodelle für die multisensorielle Datenfusion	59
4.1 Modelle zur Multiobjekt-Verfolgung	59
4.1.1 Bewegungsmodelle	60
4.1.2 Vergleich und Bewertung der Bewegungsmodelle	72
4.1.3 Kompensation der Bewegung des eigenen Fahrzeugs	77
4.1.4 Messmodelle und Messgleichungen	79
4.1.5 Das Merkmalmodell als allgemeines 3D-Formmodell	84
4.1.6 Initialisierung von Objekten unter Beachtung der Ausgedehntheit	95
4.2 Straßenrand- bzw. Spurbegrenzungsmodelle	96
4.2.1 Allgemeine Definitionen zur Schätzung des Straßenrandes bzw. der Spurbegrenzung	96
4.2.2 Funktionale Modelle zur Schätzung einer Straßenverlaufslinie	99
4.2.3 Dynamische Krümmungsmodelle	111
4.2.4 Ortsfeste Segmentmodellierung	115
4.2.5 Messmodelle und Messgleichungen	116
4.2.6 Nutzung eines virtuellen Sensors in einem Multisensor-System	117
5 Ergebnisse der Multisensor-Datenfusion	123
5.1 Ergebnisse der Multiobjekt-Verfolgung	123
5.1.1 Simulationsergebnisse bei der Verwendung des allgemeinen Merkmalmodells	123
5.1.2 Ergebnisse des Merkmalmodells auf der Basis realer Daten	129
5.2 Ergebnisse der Straßenrand- bzw. der Spurbegrenzungsschätzung	132
5.2.1 Simulation der Multisensor-Straßenrand- bzw. Spurbegrenzungsschätzung .	133
5.2.2 Ergebnisse auf der Basis realer Daten	140
6 Zusammenfassung und Ausblick	143
A Übergang von zeitkontinuierlichen zu diskreten Systemen	145
B Definition von Koordinatensystemen	147
C IR-Kamera-Merkmale für Fahrzeuge und Personen	151
D Segmentapproximation auf der Basis digitaler Karten	155