



CHEMNITZ UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Integrated Bayesian Object and Situation Assessment for Lane Change Assistance

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Robin Schubert

geboren am 31. Dezember 1981 in Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz)

eingereicht am 13. Januar 2011

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik
Prof. Dr.-Ing. Peter Protzel
Dr.-Ing. Christian Zott

Tag der Verleihung: 14. Juli 2011

Forschungsberichte der Professur Nachrichtentechnik
herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik

Band 7

Robin Schubert

**Integrated Bayesian Object
and Situation Assessment
for Lane Change Assistance**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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 978-3-8440-0322-2

ISSN 1610-1251

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

Vorwort

Diese Arbeit ist das Ergebnis meiner mehrjährigen Forschungstätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Mein besonderer Dank gilt daher dem Leiter der Professur Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik für seine Unterstützung. Die durch ihn ermöglichte Arbeit an herausfordernden Forschungsprojekten, die überdurchschnittlichen technischen Rahmenbedingungen an der Professur und nicht zuletzt die Möglichkeit, in hohem Maße eigenständig wissenschaftlich zu arbeiten, haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Protzel und Herrn Dr.-Ing. Christian Zott danke ich für ihr Interesse an der Thematik dieser Arbeit und die Übernahme der Gutachten sowie die darin enthaltenen wertvollen Hinweise.

Viele Aspekte dieser Arbeit sind das Ergebnis verschiedener Forschungsprojekte, an denen ich mitarbeiten durfte. Ich danke daher Herrn Karsten Schulze und der IAV GmbH für die Unterstützung bei der Untersuchung des Fahrstreifenwechselassistenten und die gute langjährige Zusammenarbeit. Auch den Partnern der Europäischen Forschungsprojekte SAFESPOT und COVEL gilt mein Dank für die gemeinsame Arbeit an spannenden und komplexen Themen.

Mein außerordentlicher Dank gilt den Mitarbeitern der Professur für Nachrichtentechnik, die zu der außergewöhnlich vertrauensvollen, freundschaftlichen und weit über fachliche Aspekte hinausgehenden Form der Zusammenarbeit beigetragen haben, an der ich während meiner Promotionszeit teilhaben durfte. Besonders sind hier Norman Mattern und Eric Richter zu nennen, die sowohl während als auch nach der Arbeitszeit dazu beitrugen, die letzten fünf Jahre zu einer erlebnisreichen Zeit zu machen. Ihnen und Marcus Obst danke ich außerdem für ihr Engagement speziell im vergangenen Jahr, das mir die notwendigen Freiräume zum Verfassen dieser Arbeit eröffnete. Dr.-Ing. Ulrich Neubert und Norman Mattern danke ich außerdem für die Durchsicht des Manuskripts und die zahlreichen Verbesserungsvorschläge.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Frau Susann und meiner Tochter Larissa für ihre Geduld, ihr Verständnis für Forscherdrang nach Feierabend und ihre Unterstützung.

Abstract

In-vehicle advanced driver assistance systems are based on the perception and interpretation of the vehicle's environment. These tasks are often based on probabilistic object and situation assessment algorithms such as Bayes filters or Bayesian networks. However, though these techniques are subject to intensive research, the interface between them has not yet been sufficiently addressed.

Thus, the main research objective of this work is to provide a generic, bidirectional, probabilistic interface between object and situation assessment in order to allow a unified view on these tasks. For that purpose, it is firstly shown that by a new technique called adaptive likelihood nodes, uncertainties from the probabilistic perception of the vehicle's surrounding can be directly entered into a Bayesian network in order to influence the situation assessment. In addition, it is investigated how uncertain knowledge about the current situation can be exploited in order to support the tracking performance. For that, an extension of the interacting multiple model filter is proposed which is called the meta model filter. This technique models possible maneuvers of vehicles using a Bayesian network in order to adaptively adjust the transition probabilities of the interacting multiple model filter according to the current situation. With this approach, a situation-dependent multiple model filtering can be achieved.

The benefits of these theoretical contributions are demonstrated on the example of an advanced driver assistance system which supports lane change maneuvers on highways. The aim of this lane change assistant is to sense the surrounding of the host vehicle in order to assess the current traffic situation and automatically determine optimal lane change maneuver decisions. This work describes all data fusion components of this system including probabilistic filtering, situation assessment, and decision taking. It is shown how by using both of the newly proposed concepts – adaptive likelihood nodes and the meta model filter – a unified Bayesian data processing chain from the sensors to the final maneuver decision can be achieved. Finally, the performance of the lane change assistant and the benefits of the proposed techniques are analyzed using both simulated and empirical data.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Objectives	3
1.2	Methodology	5
1.3	Contents and Contributions of the Work	6
1.4	Notational Considerations	9
2	Probabilistic Filtering Techniques	11
2.1	The Bayesian Filtering Problem	12
2.2	The Bayes Filter	14
2.3	Gaussian Filters	19
2.3.1	The Kalman Filter	20
2.3.2	The Extended Kalman Filter	23
2.3.3	The Unscented Kalman Filter	27
2.3.4	Additional Gaussian Filtering Techniques	40
2.3.5	Evaluation of Gaussian Filters	41
2.4	Gaussian Sum Filters	43
2.4.1	Multiple Model Filtering	44
2.4.2	The Interacting Multiple Model Filter	46
2.5	Summary	51
3	Bayesian and Decision Networks	53
3.1	Fundamentals of Bayesian Networks	54
3.2	Inference Algorithms	58
3.2.1	Evidence	58
3.2.2	Inference by Enumeration	59
3.2.3	Overview of Common Inference Techniques	63
3.3	Decision Networks	65
3.4	Dynamic Bayesian Networks	68
3.5	Summary and Evaluation	69
4	State of the Art	71
4.1	Systems for Lane Change Assistance	72
4.2	Situation Assessment under Uncertainty	73

4.3	Situation-dependent Object Assessment	75
4.4	Summary and Motivation of Research Needs	77
5	Integrated Bayesian Object and Situation Assessment	79
5.1	The Adaptive Likelihood Node Approach	80
5.1.1	Proposed Solution	82
5.1.2	Discussion	87
5.2	The Meta Model Filter	87
5.2.1	Bayesian Network Representation of a TPM	88
5.2.2	The Meta Model Filtering Algorithm	91
5.2.3	Discussion	92
6	Implementation of a Lane Change Assistant	95
6.1	System Architecture	97
6.2	Sub-Object Assessment	100
6.2.1	Camera-based Vehicle Detection	100
6.2.2	Detection and Classification of Lane Markings	101
6.3	Object Assessment	101
6.3.1	Filter Architecture	102
6.3.2	Statistical Models	107
6.3.3	Analysis of Algorithmic Interdependencies	119
6.4	Situation and Impact Assessment	123
6.4.1	Definition of Relevant Situation Variables	123
6.4.2	Qualitative and Quantitative Dependencies	126
6.4.3	ALN Interface to Object Assessment	126
6.4.4	DN Representation for Deriving Maneuver Decisions	133
6.4.5	Maximum EU Decision and Ambiguity Measure	136
6.5	Summary & Discussion	137
7	Simulative and Empirical Results	139
7.1	Lane Change Assistant Application Results	140
7.1.1	Simulative Evaluation of the Maneuver Decisions	141
7.1.2	Exemplary Evaluation of the LCA Prototype	146
7.2	Evaluation of Adaptive Likelihood Nodes	155
7.3	Evaluation of the Meta Model Filter	158
7.4	Summary and Critical Discussion	160

8	Conclusions	163
8.1	Achievements of the Work	165
8.2	Open Questions and Subsequent Research Topics	166
A	Model Derivations	171
A.1	Constant Turn Rate and Velocity Motion Model	171
A.2	Constant Turn Rate and Acceleration Motion Model	174
A.3	Radar Range Rate Measurement Model	176
A.4	Circular Lane Model	177
A.5	Deceleration To Safety Time	182
	Bibliography	183
	List of Symbols	201
	List of Acronyms	205
	List of Figures	207
	List of Tables	209
	Curriculum Vitae	211