Systematik zur Evaluierung einer Fahrerbeobachtung und Bewertung des Einflusses auf die Fahrmanöverprädiktion

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Daniel Harm Slieter

aus Emden

Hauptberichter: *Prof. Dr. rer. nat. habil. P. Levi*

Mitberichter: *Univ-Prof. Hon-Prof. Dr. D. Roller*

2. Mitberichter: *Prof. Dr.-Ing. J. M. Zöllner*

Tag der mündlichen Prüfung: *04.02.2016*

Institut für Parallele und Verteilte Systeme der Universität Stuttgart

2016

BV-Forschungsberichte

herausgegeben von
Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi
Universität Stuttgart, IPVS
Lehrstuhl Praktische Informatik - Bildverstehen (BV)

Band 1/2016

Daniel Harm Slieter

Systematik zur Evaluierung einer Fahrerbeobachtung und Bewertung des Einflusses auf die Fahrmanöverprädiktion

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4308-2

ISSN 1868-3886

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

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als Doktorand bei der Porsche AG in Weissach in Zusammenarbeit mit dem Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS) der Universität Stuttgart.

Auf Seiten der Universität Stuttgart möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Paul Levi für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie für seine fachlichen Anregungen und lehrreichen Diskussionen bedanken. Herrn Prof. Dieter Roller und Herrn Prof. Johann Zöllner möchte ich für wertvolle Anregungen und die Übernahme der Gutachten danken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer bei der Porsche AG, Herrn Dr. Matthias Gebhard. Er stand mir während dieser Arbeit stets mit guten Ratschlägen zur Seite, half mir mit seiner ruhigen und strukturierten Arbeitsweise und nahm sich stets Zeit für fachliche Diskussionen. Weiterhin möchte ich mich bei meinen Abteilungsleitern Herrn Siegfried Steckdaub und Herrn Waldemar Nowak für ihre Unterstützung bedanken, die eine Ausrüstung der vorgestellten Versuchsträger erst ermöglichten.

Bei Frau Bianca Lehmann möchte ich mich für die freundliche Unterstützung bei allen organisatorischen Fragen bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Paul Behrendt und Herrn Stefan Jacobi für ihre interessanten Fragestellungen und Diskussionen bedanken. Durch ihre Unterstützung konnte ich diese Arbeit fachbereichsübergreifend bei der Porsche AG durchführen und vorstellen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Abschlussarbeitern /-innen, Praktikanten und Studenten bedanken, die an dieser Arbeit mitgewirkt und engagiert mitgearbeitet haben.

Zu guter Letzt danke ich meiner Freundin Kathrin und meinen Eltern, die stets an mich geglaubt haben und mich durch alle Höhen und Tiefen während der Entstehung dieser Arbeit begleitet haben.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	IX
Summary	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik - Fahrerassistenz	9
2.1 Fahrerassistenzsysteme	10
2.1.1 Begriffsdefinitionen	10
2.1.2 Der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt	12
2.1.3 Automatisierungsgrade von Fahrerassistenzsystemen	13
2.2 Übersicht der Prädiktionsverfahren	15
2.2.1 Kernelmaschinen	15
2.2.2 Fuzzy-Inferenz	16
2.2.3 Dynamische Bayessche Netze	18
2.2.4 Hidden Markov Modelle	21
2.2.5 Dynamic Time Warping	22
2.2.6 Bag-of-Features	24
2.2.7 Künstliche Neuronale Netze	26
2.3 Prädiktionsansätze in Fahrerassistenzsystemen	26
2.4 Diskussion der Fahrmanöverprädiktionsansätze	27

3	Prädiktionsrelevante Innenraumsensorik	31
3.1	Verfahren zur Kopfposeschätzung	32
3.1.1	Merkmalsbasierte Kopfposeschätzung	33
3.1.2	Modellbasierte Kopfposeschätzung	35
3.1.3	Iterative Closest Points zur Kopfposeschätzung	39
3.1.4	Vergleich und Bewertung der Algorithmen	42
3.1.5	Evaluierung am Fahrsimulator	46
3.1.6	Referenzsystematik für Einsatz im Fahrzeug	60
3.2	Verfahren zur Insassenidentifikation	62
3.2.1	Eigenfaces	63
3.2.2	Fisherfaces	66
3.2.3	Sparse Representation	67
3.2.4	ICP-basierte Fahreridentifikation	69
3.2.5	Merkmalsbasierte Verfahren	70
3.2.6	Erstellung einer Fahrerdatenbank	71
3.2.7	Evaluierung der Verfahren	73
3.3	Simulationsumgebung für Innenraumsensorik	79
3.3.1	Motivation einer überlagerten Simulationsumgebung	79
3.3.2	Überblick über die Simulationsumgebung	81
3.3.3	Anwendung zur Evaluierung von Poseschätzungssystemen	88
3.3.4	Anwendung zur Evaluierung von Verbaupositionen	90
3.3.5	Anwendung zur Zuliefererevaluierung	93
3.4	Diskussion	94
4	Systematik zur Prädiktion eines Spurwechsels	95
4.1	Probandenstudie zur Analyse von Spurwechseln	96
4.2	Auswahl der relevanten Signale für einen Spurwechsel	98
4.2.1	Indikatorselektion mit psychologischem Modell	99
4.2.2	Automatische Indikatorselektion mit der Bag-of-Features	100
4.3	Auswertung der relevanten Signale	104
4.3.1	Zeitliche Variation des Signalverlaufs beim Spurwechsel	104
4.3.2	Räumliche Variation des Signalverlaufs beim Spurwechsel	110
4.4	Erstellung des Prädiktionsmodells	111
4.4.1	Hidden Markov Modell	112
4.4.2	Dynamic Time Warping	116
4.4.3	Bag-of-Features	122

5	Evaluierung der Prädiktionsmodelle	127
5.1	Strategie zur Evaluierung von Prädiktionsmodellen	128
5.2	Korrelation der Rohsignale mit dem Spurwechsel	131
5.3	Evaluierungsergebnisse	132
5.4	Detaillierte Evaluierung des BoF-Ansatzes	136
5.5	Diskussion	138
6	Realfahrversuche zur Spurwechselprädiktion	139
6.1	Versuchsträger	140
6.2	Versuchsablauf	141
6.3	Signalverlauf vor einem Spurwechsel	142
6.4	Ergebnisse der realen Spurwechselprädiktion	146
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
7.1	Zusammenfassung	147
7.2	Ausblick	151
	Abbildungsverzeichnis	155
	Tabellenverzeichnis	159
	Literaturverzeichnis	161
	Veröffentlichungen und Patente	169
	Studentische Arbeiten	169

KURZFASSUNG

Die in dieser Arbeit vorgestellte Spurwechselprädiktion ermöglicht durch ihre Prognosen eine fahrer- und situationsadaptive Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Die Prädiktion baut dabei nicht nur auf der vorhandenen Umfeldsensorik des Fahrzeugs auf, sondern berücksichtigt ebenfalls neuartige Funktionen einer Fahrerbeobachtungssensorik. Zu diesen Funktionen zählt die Fahreridentifikation und die Kopfposeschätzung im Fahrzeug. Da diese Funktionen im aktuellen Stand noch keine Serienreife erlangt haben, sind zwei weitere Ziele dieser Arbeit die Entwicklung einer Referenzmethode zur Kopfposeschätzung und der Entwurf einer Evaluierungsstrategie für beide Funktionen.

Für die Fahreridentifikation wird dabei ein neues Schema zum Aufbau einer Fahrerdatenbank aufgezeigt. Diese Datenbank enthält zeitsynchron aufgezeichnete Informationen über die Kopfpose, das zweidimensionale Farbbild sowie die Position des Kopfes in diesem, die kalibrierte Tiefenkarte und eine Punktwolke. Mit dieser Datenbank können alle verfügbaren zwei- und dreidimensionalen Identifikationsalgorithmen unter genauer Vorgabe der Parameter evaluiert werden. Die kopfposeschätzenden Systeme werden mithilfe von Probandenversuchen und einem markerbasierten System im Fahrsimulator evaluiert. Um einige Nachteile dieser markerbasierten Systeme zu umgehen, wird weiterhin eine Simulationsumgebung entwickelt und vorgestellt. In dieser Simulationsumgebung werden virtuelle Fahrer- und Fahrzeugmodelle mit realen Fahrer- und Fahrzeugbewegungen überlagert. Dies ermöglicht eine realistische Nachbildung des Fahrzeuginnenraums und stellt damit ein wichtiges Instrument zur Evaluierung der Fahrerbeobachtungskamera dar. Für die Spurwechselprädiktion wird eine Evaluierungsstrategie entwickelt. Das vorgestellte Verfahren zur Spurwechselprädiktion wird im Rahmen einer Probandenstudie erprobt sowie im realen Fahrversuch getestet.

Die Anwendung der Fahrerdatenbank für die Evaluierung von verschiedenen Identifikationsalgorithmen hat gezeigt, dass das in dieser Arbeit vorgestellte dreidimensionale Verfahren Vorteile gegenüber den vorgestellten zweidimensionalen Verfahren aufweist. In Probandenversuchen konnte nachgewiesen werden, dass das dreidimensionale Kopfposeschätzungsverfahren eine sehr hohe Genauigkeit aufweist und daher als Referenzsensorik im Fahrsimulator und im Realfahrzeug mit seinen speziellen Eigenschaften einsetzbar ist. Die Anwendung dieses Verfahrens im Fahrzeug unter realen Lichtbedingungen wurde im Rahmen dieser Arbeit in Fahrversuchen erfolgreich nachgewiesen.

Die von der überlagerten Simulationsumgebung erzeugten Daten eignen sich zur Evaluierung der vorgestellten Kopfposeschätzungsverfahren und zweier Zulieferersysteme (zweidimensionale und kombinierte zwei- und dreidimensionale Bildausgabe). Außerdem konnte mit der entwickelten Simulationsumgebung in dieser Arbeit die Evaluierung verschiedener Verbaupositionen der Fahrerbeobachtungskamera aufgezeigt werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Systematik zur Spurwechselprädiktion wurde erfolgreich im Fahrsimulator eingesetzt. Die Vorteile dieser Systematik im Vergleich zu bekannten Verfahren wurden in dieser Arbeit hervorgehoben. Des Weiteren konnte das Fahrverhalten vor einem Spurwechsel näher analysiert und wiederkehrende, fahrerabhängige Muster mit statistischen Methoden extrahiert werden.

Darüber hinaus wurde das Fahrverhalten in Realfahrversuchen untersucht. Es konnte eine hohe Übereinstimmung mit den Daten des Fahrsimulators festgestellt werden, womit die Realitätsnähe des Fahrsimulators bestätigt wurde. Zudem wurde dadurch gezeigt, dass der Einsatz der vorgestellten Referenzsystematik zur Kopfposeschätzung im Fahrzeug angewendet werden kann. Die Funktion des Prädiktionsverfahrens wurde ebenfalls im Realversuch nachgewiesen.

SUMMARY

The lane change prediction, which is developed and presented in this thesis, enables with its forecasts a driver and situation specific design of advanced driver assistance systems. The prediction is based not only on existing signals from environment and automotive sensor systems, but also takes into account innovative functions of a driver monitoring sensor. These functions include head pose estimation and identification of the driver. Since these innovative functions are not available in mass production yet, two further purposes of this thesis are the development of a reference tool for head pose estimation in automotive environments and also the development of an evaluation strategy for both functions.

In order to evaluate driver identification algorithms and systems, a methodology for a driver face database will be developed. This database contains synchronous information about the head's pose, the two-dimensional frame and the head's position, a calibrated depthmap as well as the scene's point cloud. This database can be used to evaluate two and three dimensional face identification algorithms from literature and allows the user to restrict influential parameters. Head pose estimation systems will be evaluated within driving simulator studies by comparing the system's results with a marker-based head pose measurement. In order to circumvent some of the disadvantages of such marker-based measurements, a simulation environment will be developed. This environment augments virtual driver and automobile models with real driver and car signals recorded during test drives. This permits realistic modeling of the automobile's interior and thus the evaluation of driver monitoring functions. A system in the area of driving maneuver prediction will be developed as well as an evaluation strategy. The developed and proposed lane-change prediction will be evaluated in driving simulator studies and real test drives.

The use of the proposed database for the evaluation of driver identification algorithms has shown that the consideration of spatial depth is able to improve the algorithms' recognition rates. Moreover, the driving simulator study has shown the advantages of a three-dimensional head pose estimation compared to a two-dimensional. It has been proven that the three-dimensional head pose estimation has a very high accuracy and a high availability. Real test drives have shown the function to work under real automotive conditions.

The rendered output of the augmented simulation environment was successfully used to evaluate two and three dimensional supplier systems. With this environment different camera mounting positions could be compared and evaluated.

The proposed prediction algorithm for lane-changes has been evaluated with simulator studies and compared with well-known prediction approaches from literature. The advantages of the proposed prediction algorithm have been highlighted by using these studies. In addition, the driving behavior of each driver could be analyzed in order to extract driver-dependent, recurring patterns by statistical methods.

Furthermore, the driver's behavior has been analyzed in real test drives and compared to the behavior in the simulator studies. This experiment successfully demonstrates a high conformity with the simulator results and shows a high level of realism in the simulator studies. This experiment also indicates that the proposed head pose estimation could be successfully used in automotive environments during test drives. Finally, the functionality of the proposed prediction approach was applied and proven under real conditions.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

2D,3D,6D	zwei-, drei-, sechsdimensional
ACC	Adaptive Cruise Control, Abstandsregeltempomat
BoF	Bag of Features
BoW	Bag of Words
CAN	Controller Area Network
CLM	Constrained Local Model
CLM-3	auf drei Kameras erweitertes CLM-Verfahren
DBA	DTW Barycenter Average
DBN	Dynamisches Bayessches Netz
DLC	Distance to Line Crossing
DTW	Dynamic Time Warping
FPR	False-Positive-Rate
FRA	Fahrrichtungsanzeiger
HMM	Hidden Markov Model
HW	Hardware
ICP	Iterative Closest Points
KNN	Künstliche Neuronale Netze

LCE	Lane Change Emergency, Status im HMM für Spurwechsel
LCN	Lane Change Normal, Status im HMM für Spurwechsel
LCS	Longest Common Substring
LDA	Linear Discriminant Analysis
LDW	Lane Departure Warning
LIDAR	Light Detection and Ranging
LKN	Frames per Second, Videobilder pro Sekunde
LKN	Lane Keeping Normal, Status im HMM für Spurwechsel
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
PCA	Principal Component Analysis
PCM	Porsche Communication Management
POSIT	Pose from Orthography and Scaling with Iterations
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropologisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation
ROC	Receiver Operating Characteristic
ROI	Region of Interest
RVM	Relevance Vector Machine
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SURF	Speeded Up Robust Features
SVM	Support Vector Machine
SW	Software
SWA	Spurwechselsassistent
TLC	Time to Line Crossing
TPR	True-Positiv-Rate
VM	Vektormaschine