

# Merkmalsbasierte Fusion einer NIR-Kamera und eines bildgebenden Radarsensors zur Fußgängerwarnung bei Nacht

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

## DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Matthias Serfling**  
geboren am 05. März 1981 in Gera

eingereicht am 8. Juli 2010

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik  
Prof. Dr. rer. nat. Madhukar Chandra  
Dr.-Ing. Otto Löhlein

Tag der Verleihung: 31. Mai 2011



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

Band 6

**Matthias Serfling**

**Merkmalsbasierte Fusion einer NIR-Kamera  
und eines bildgebenden Radarsensors  
zur Fußgängerwarnung bei Nacht**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**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.

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

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0237-9

ISSN 1610-1251

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Die aktuelle zweite Generation von Nachtsichtassistenzsystemen nutzt nahinfrarot oder ferninfrarot Kamerasysteme mit integrierten Systemen zur Erkennung von Fußgängern, die dem Fahrer auf einem Display im Cockpit angezeigt werden. Dem Fahrer wird dadurch eine frühere Erkennung von Fußgängern ermöglicht, er muss jedoch selbst entscheiden, ob diese eine Gefahrensituation für ihn darstellen. Um dem Fahrer in künftigen Systemgenerationen diese Entscheidung abzunehmen und ihn damit maßgebend zu entlasten, steht die Integration einer zuverlässigen Warnfunktion im Fokus der Weiterentwicklung von Nachtsichtassistenzsystemen.

In dieser Arbeit wird ein prototypisches Fußgängerwarnsystem vorgestellt, welches die Erkennungsleistung bisheriger Systeme für den außerstädtischen Einsatz mit Reichweiten bis 120 m deutlich steigert und zusätzlich erkannte Fußgänger nach ihrer Gefährdung für den Fahrer differenziert. Das System nutzt hierfür die Informationen einer Nahinfrarotkamera, eines neuartigen bildgebenden Radarsensors und einer digitalen Karte.

Die Steigerung der Erkennungsleistung gegenüber rein bildbasierten Systemen und Ansätzen mit Detektorfusion wird durch die in dieser Arbeit vorgestellte Merkmalsfusion von Kamera und Radar auf Rohdatenebene erzielt, welche Merkmale beider Sensoren simultan in einem Klassifikator fusioniert. Basistechnologie dieser Arbeit bildet das AdaBoost Klassifikationsverfahren, welches für die Verarbeitung von Sensoren mit physikalisch unterschiedlichen Messprinzipien und mit unterschiedlichen Abbildungseigenschaften angepasst wurde. Der in Fachkreisen bekannte Fakt des erheblich höheren Verarbeitungsaufwands einer Rohdatenfusion lässt sich durch die in dieser Arbeit angewandten Verfahren stark reduzieren, so dass die entwickelte merkmalsbasierte Fusion auf Rohdatenebene damit eine echte Alternative zu bisherigen Systemen darstellt.

Die dargestellte Fusionsmethode der Bilddaten einer monokularen Kamera mit den Messdaten des Radarsensors zeichnet sich v.a. durch die inhärente Bestimmung der Objektposition aus, die sich als besonders zuverlässig erweist. In Kombination mit einem System zur Straßenverlaufsvorhersage lässt sich damit die angestrebte Gefährdungsanalyse

der erkannten Fußgänger realisieren. Das entwickelte System zur Straßenverlaufsvorhersage basiert auf der Verwendung einer digitalen Karte der Straßentopologie. Es unterscheidet sich wesentlich zu bekannten Verfahren, indem es weder die Bildinformationen einer Kamera nutzt noch eine Koppelnavigation mit fehlerbehafteten GPS Messungen durchführt. Stattdessen zeigt diese Arbeit, wie sich eine hinreichend genaue Fahrzeugpositionierung auf einer digitalen Karte durch die Messungen des eingesetzten Radarsensors und einer initialen GPS Position umsetzen lässt. Der vorausliegende Straßenverlauf der digitalen Karte wird schließlich verwendet, um die Fußgänger nach ihrem Abstand zum Fahrbahnrand in verschiedene Gefährdungsstufen einzuordnen.

**Stichwörter:** Fußgängerwarnung, Nachtsichtsystem, Sensordatenfusion, Rohdatenfusion, Merkmalsfusion, AdaBoost, Radar, Straßenverlaufsvorhersage, digitale Karte, globale Positionierung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
1.1	Motivation . . . . .	13
1.2	Zielsetzung und Beitrag der Arbeit . . . . .	17
1.3	Systemüberblick . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>21</b>
2.1	Radarsysteme . . . . .	21
2.2	Kamerasysteme . . . . .	23
2.2.1	Kameramodell . . . . .	24
2.2.2	Stereoskopisches Sehen . . . . .	25
2.3	Klassifikationsparadigma nach Viola/Jones . . . . .	28
2.3.1	Funktionsprinzip des Kaskadenklassifikator . . . . .	28
2.3.2	Struktur und Training des Kaskadenklassifikators . . . . .	29
2.4	Zustandsschätzung nichtlinearer dynamischer System . . . . .	34
2.4.1	Zustandsbeschreibung nach Bayes . . . . .	34
2.4.2	Extended-Kalman-Filter . . . . .	36
2.4.3	Partikelfilter . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Messaufbau und Festlegung der Koordinatensysteme</b>	<b>41</b>
3.1	Globale Positionierung . . . . .	42
3.1.1	GPS . . . . .	42
3.1.2	Digitale Karten . . . . .	46
3.1.3	UTM Koordinaten . . . . .	47
3.2	Lokale Positionierung . . . . .	50
3.3	Sensorik zur lokalen Erfassung der Umgebung . . . . .	51
3.3.1	Kamerasystem . . . . .	51
3.3.2	Radarsystem . . . . .	53
3.3.3	Kalibration der Systeme zum Fahrzeug . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Sensordatenfusion auf Merkmalsebene zur Fußgängererkennung</b>	<b>61</b>
4.1	Bereitstellung einer GroundTruth . . . . .	64
4.2	Erweiterung von AdaBoost auf mehrere Sensorströme . . . . .	75
4.2.1	Merkmale auf Basis des Kamerabilds . . . . .	76
4.2.2	Merkmale auf Basis von Radardaten . . . . .	78
4.3	Generierung von Hypothesen im Online-Betrieb . . . . .	82
4.3.1	Hypothesengenerator . . . . .	86
4.3.2	Aufwandsreduktion durch Baumstrukturen . . . . .	91

4.4	Systemevaluation . . . . .	94
4.4.1	Zusammenstellung der GroundTruth . . . . .	94
4.4.2	Kriterium zur Systembewertung . . . . .	96
4.4.3	Analyse des sequentiellen Paradigmas . . . . .	96
4.4.4	Analyse des Fusionssystems und des bildbasierten monokularen Systems . . . . .	100
4.4.5	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	103
<b>5</b>	<b>Abschätzung des Gefährdungspotentials von Fußgängern</b>	<b>107</b>
5.1	Fahrzeugeigenbewegung . . . . .	112
5.1.1	Modellierung der Messungen . . . . .	113
5.1.2	Prozessmodellierung . . . . .	115
5.1.3	Realisierung des Zustandsbeobachters zur Schätzung der Fahrzeug- bewegung . . . . .	118
5.2	Extraktion von Straßenverlaufsdaten . . . . .	122
5.2.1	Grundidee der Rekonstruktionsverfahren . . . . .	125
5.2.2	Beispiele zur Rekonstruktion des Straßenverlaufs . . . . .	126
5.2.3	Fazit . . . . .	128
5.3	Filterung bewegter Objekte . . . . .	129
5.4	Positionsbestimmung durch Erfassung und Auswertung der lokalen Umgebung . . . . .	129
5.4.1	Systemansatz . . . . .	130
5.4.2	Bewertung der Positionshypothesen . . . . .	133
5.5	Warnung von Fußgängern . . . . .	138
5.6	Evaluation . . . . .	140
5.6.1	Analyse der globalen Positionsschätzung . . . . .	140
5.6.2	Bewertung der Warnfunktionalität . . . . .	143
5.6.3	Untersuchung der Aufwandseinsparung in der Objekterkennung durch Nutzung der Straßenverlaufsvorhersage . . . . .	146
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>157</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>169</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Thesen</b>	<b>173</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>175</b>
	<b>Veröffentlichungen, Patente und andere wissenschaftliche Leistungen</b>	<b>177</b>