

Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung

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. Michael Skutek
geboren am 16. Mai 1976 in Karl-Marx-Stadt

eingereicht am 24. Januar 2006

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Wanielik
Prof. Dr.-Ing. M. Chandra
Dr.-Ing. J. Dickmann

Tag der Verleihung: 20. September 2006

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

Band 3

Michael Skutek

**Ein PreCrash-System auf Basis
multisensorieller Umgebungserfassung**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2006

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2006

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: 3-8322-5620-2

ISBN-13: 978-3-8322-5620-3

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

Das in dieser Dissertation beschriebene PreCrash-System wie auch die Dissertation selbst entstanden im Rahmen von Arbeiten innerhalb des EU-Projekts APALACI, einem Unterprojekt des EU-Vorhabens PReVENT. Ziel dieser europäischen Förderinitiative ist die erhebliche Verbesserung der Sicherheit und damit eine deutliche Reduktion von Opfern im Straßenverkehr. Innerhalb des APALACI-Projektes stehen die Entwicklung, Realisierung und die Demonstration eines Systems zur Verbesserung der Unfall-Prävention bzw. Unfallschwere-Reduktion im Vordergrund. Die erfolgten Arbeiten leisten hierfür einen Beitrag durch die Entwicklung eines Systems, welches Unfälle schon vor dem eigentlichen Unfallbeginn erkennen soll.

Konzeption, Implementation und ausführliche Tests fanden innerhalb des DaimlerChrysler-Forschungszentrums in Ulm statt. Alle zur Arbeit benötigten Mittel inklusive der Versuchsfahrzeuge stellte die Abteilung REI/AU zur Verfügung. Hierfür und für die über etwas mehr als vier Jahre dauernde, sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung möchte ich den Kollegen dort danken; insbesondere unserem Teamleiter Dr.-Ing. Jürgen Dickmann, der die Durch- und Weiterführung der Arbeiten am Forschungszentrum überhaupt erst ermöglichte, dem Kollegen Dr.-Ing. Moheb Mekhaïel, der mir mit fachlichem Rat und aktiver Unterstützung zur Seite stand, dem Kollegen Nils Appenrodt für viele Fragen, Anregungen und vor allem für die Erledigung der Organisation des EU-Projekts und den Kollegen Wolff Luik und Michael Hieber, die in der Werkstatt viele notwendige Auf- und Umbauten an den Versuchsträgern durchführten.

Zwei weitere Kollegen trugen durch unzählige fachliche Diskussionen und ihre aktive Unterstützung zum Gelingen des Projekts bei: Prasanna und mein „Gegenüber“ Dirk Linzmeier.

Ein wichtiger Teil der Unterstützung für diese Arbeiten kam von meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. Wanielik, der mir die Möglichkeit der Promotion verschaffte, mit fachlichem Rat zur Seite stand und mir große Freiheiten bei den Arbeiten innerhalb des Forschungszentrums ließ.

Dank geht auch an alle Studenten, die mich durch ihre Mitarbeit unterstützten und ohne die Implementation und die vielen Tests des Systems nicht in dem Umfang innerhalb des kurzen Zeitrahmens möglich gewesen wären: Jochen (Jürgen) Mühlhäusser, Min Wu, Thomas Rolfes, Benjamin Müller, Christoph Moll, Peter Doliwa, Martin Prokop, Mustafa Uzunali und Matthias Keller.

Bad Westernkotten, Januar 2006

Inhaltsverzeichnis

Glossar	7
Formelzeichen	9
1 Einleitung	15
1.1 Umfeldererkennung im Automobilbereich	15
1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit	19
1.3 PreCrash - Funktionsbeschreibung	19
1.4 PreCrash - Anforderungen an das System und die Sensorik	23
1.5 PreCrash - Logischer Systemaufbau	25
2 Beschreibung der Sensorik	27
2.1 Mechanischer Aufbau des Systems	27
2.2 Radar	28
2.2.1 Funktionsweise	28
2.2.2 Randbedingungen	28
2.2.3 Spezifikation der verwendeten Sensoren	33
2.3 Laserscanner	33
2.3.1 Aufbau und Funktionsweise	33
2.3.2 Randbedingungen	34
2.3.3 Spezifikation des verwendeten Sensors	39
2.4 Gegenüberstellung der beiden Sensoren	40
3 Grundlegende Betrachtungen zur Fusion	43
3.1 Sensordatenfusion	43
3.1.1 Begriffsdefinitionen	43
3.1.2 Ziele und Potential von Sensordatenfusionsansätzen	44
3.1.3 Nachteile der Sensordatenfusion	44
3.1.4 Unterscheidungskriterien	45
3.1.5 Werkzeuge zur Sensordatenfusion	48
3.2 Sensordatenfusion von Nahbereichsradaren und Laserscanner	49
3.2.1 Nutzen der Sensordatenfusion	49
3.2.2 Nachteile und Probleme der Fusion von Laserscanner und Radar	51
3.2.3 Weitere Anwendungen	52
4 Einzelsignalverarbeitung der für die Fusion genutzten Sensortypen	53
4.1 Signalverarbeitung für die Radarsensoren	54
4.1.1 Fusion der Radare mittels Triangulation	54
4.1.2 Fusion der Radare mittels Grid of Evidence	57

4.1.3	Fusion der Radare mittels Klassifikator	59
4.2	Signalverarbeitung für den Laserscanner	63
4.2.1	Segmentierung, Filterung und Fusion der Rohdaten	63
4.2.2	Merkmalsextraktion	70
4.3	Tracking	75
4.3.1	Alpha-Beta-Tracker	76
4.3.2	Kalman-Filter	76
4.3.3	Assoziation	82
4.3.4	Erweiterungen	84
4.4	Sensorausfall-Erkennung	87
4.4.1	Fehlerarten	87
4.4.2	Bekannte Ansätze zur Fehlererkennung	88
4.4.3	Stochastisches Verfahren zur Fehlererkennung	91
5	Fusionsansätze	97
5.1	Zeitliche Aspekte der Signalverarbeitung	97
5.2	Bekannte Verfahren zur Fusion der Sensordaten	101
5.2.1	Messwerte-Fusion	101
5.2.2	Track-to-Track-Fusion	102
5.3	Implementierte Verfahren	104
5.3.1	Messvektor-Fusion	104
5.3.2	Fusion mittels Segmentierungsgitter	107
6	Umfeldbeschreibung und Entscheidungsalgorithmen	111
6.1	Umfeldbeschreibung und Vorhersage	112
6.2	Entscheidungsverfahren in Einzelsensorsystemen	115
6.2.1	Entscheidung mittels Limit	115
6.2.2	Entscheidung mittels Klassifikation	116
6.3	Entscheidungsverfahren bei mehreren Sensoren	117
6.3.1	Klassifikation und logische Verknüpfung	117
6.3.2	Klassifikation und Dempster-Shafer-Kombination	118
7	Ergebnisse	125
7.1	Randbedingungen	125
7.1.1	Datensätze	125
7.1.2	Systemstruktur und Algorithmen	127
7.2	Ergebnisse und Vergleich	128
7.2.1	Tracking-Algorithmus	128
7.2.2	Sensorausfallerkennung	131
7.2.3	Gewinn an Robustheit durch Fusion	134
7.2.4	Entscheidungsstufe und Gesamtfunktionalität	135
8	Zusammenfassung	141

Glossar

ABS

Antiblockiersystem

ACC

Adaptive Cruise Control

ARCNet

Attached Resources Computer Network

BmBF

Bundesministerium für Bildung und Forschung

CAN

Controller Area Network

DARPA

Defense Advanced Research Projects Agency

ESP

Elektronisches Stabilitätsprogramm

JPDA

Joint Probabilistic Data Association

Laser

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

PDA

Probabilistic Data Association

Radar

RAdio Detection And Ranging

TDC

Time-to-Digital-Converter

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen

α	Kontextabhängig Absorptionskoeffizient, Wichtungsfaktor oder Winkel
$\bar{\nu}$	Mittelwert der Innovation
β	Kontextabhängig Absorptionskoeffizient, Wichtungsfaktor oder Winkel
ν	Innovation
ϵ_{s_k}	Fehler
η	Schwellwert für Entscheidung der Sensorausfallerkennung
γ	Winkelauflösung
$\hat{\mathbf{s}}$	Zustandsschätzung (mehrdimensional)
$\hat{\mathbf{s}}^-$	Prädiktion eines Zustandes (mehrdimensional)
\hat{s}	Zustandsschätzung (eindimensional)
\hat{s}^-	Prädiktion eines Zustandes (eindimensional)
λ	Wellenlänge
μ	Mittelwert
ω	Kreisfrequenz
ϕ_0	Phasenwinkel
ρ	Koordinate im (ρ, θ) -Raum
σ	Varianz
σ_R	Radarrückstreuquerschnitt
τ_P	Pulsdauer
A	Zustandsübergangsmatrix
B	Rückführungsmatrix
C	Messmatrix
D	Systemparametermatrix

Abkürzungen und Formelzeichen

\mathbf{d}_m	Abstand (mehrdimensional)
\mathbf{G}	Polinommatrix für Beschreibung eines Systems in Eingang-Ausgangsform
\mathbf{H}	Polinommatrix für Beschreibung eines Systems in Eingang-Ausgangsform
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
\mathbf{K}	Kalman Gain (mehrdimensional)
\mathbf{P}	Schätzung des Schätzfehlers
\mathbf{P}^-	Prädiktion des Schätzfehlers
\mathbf{P}_C	Kreuzkovarianzmatrix
$\mathbf{q}(k)$	Vektoren, die Sensorfehler enthalten
\mathbf{Q}^-	Modellfehler
\mathbf{R}	Messfehlerkovarianzmatrix
\mathbf{S}	Innovationskovarianzmatrix
\mathbf{u}	Regeleingriff
\mathbf{v}	Messfehler
\mathbf{W}	Gewichtungsmatrix
$\mathbf{w}(k)$	Vektoren, die unbekannte Einflüsse enthalten
\mathbf{z}	Messung (mehrdimensional)
Θ	Menge
θ	Koordinate im (ρ, θ) -Raum
Θ_B	Beobachtungswinkel
Θ_E	Einfallswinkel
Θ_G	Grenzwinkel der Totalreflexion
$\tilde{\mathbf{s}}$	Abweichung zwischen Prädiktion und wahren Zustand (mehrdimensional)
\tilde{s}	Abweichung zwischen Prädiktion und wahren Zustand (eindimensional)
\vec{E}	Elektrische Feldstärke
\vec{E}_0	Amplitude der elektrischen Feldstärke
\vec{H}	Magnetische Feldstärke
\vec{H}_0	Amplitude der magnetischen Feldstärke

ξ	Überlappungsfaktor
A	Elektrisch wirksame Fläche
a	Kontextabhängig Ausbreitungsdämpfung oder Beschleunigung
A_n	Anzahl der Fehlalarme
A_p	Anzahl der Falschalarme
A_Z, A_E	Elektrisch wirksame Fläche (Ziel, Empfänger)
b_i	Verschiebung eines Ziels in y -Richtung (Merkmal)
B_S	Signalbandbreite
$Bel(\dots)$	Grad des Glaubens an eine Annahme
C	Kollisionswahrscheinlichkeit bzw. Aussage zur möglichen Kollision mit einem Objekt
c	Kern einer Massefunktion
c_0	Phasengeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle in einem homogenen, verlustfreien Medium
c_c	Konstante für Dekrementierung des Ausfallzählers
c_l	Laufzeit eines Laserimpulses in Luft
c_p	Konstante für Inkrementierung des Ausfallzählers
c_r	Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen
$c_{i,j}$	Grenzwerte für Attribute
D	Statistische Distanz
d	Strecke, Distanz
d_k	Ausfallzähler
D_p	Detektionsrate
F	Fensterbreite
f	Frequenz
F_a	Fehlalarmrate
f_A	Abtastfrequenz
F_p	Falschalarmrate
f_P	Pulsfolgefrequenz

Abkürzungen und Formelzeichen

f_S	Sendefrequenz
G	Antennengewinn
h	Plancksches Wirkungsquantum
I	Intensität
i	Laufindex
I_0	Lichtintensitätswert an der Lichtquelle
I_S	Die für den Absorber typische Sättigungsintensität
j	Laufindex
K	Kontextabhängig für Kalman Gain (eindimensional) oder Maß für Widerspruch
k	Kontextabhängig Wellenzahl oder Laufindex
k_k	Minimal benötigte Anzahl von Zyklen für die Erkennung eines Sensorausfalls
L	Limit
l	Laufindex
M	Gitterindex
$m(\dots)$	Masse
$m_{x,y}$	Zellenindex
N	Anzahl
n	Anzahl
n_S	Brechungsindex
P	Wahrscheinlichkeit
p	Kontextabhängig Impuls eines Photons oder Wahrscheinlichkeit
P_S	Sendeleistung
p_s	Schwerpunkt
$PL(\dots)$	Plausibility
R, R_p, R_s	Reflexionsgrad (parallel bzw. senkrecht zur Einfallsebene)
r_{ein}	Eindeutigkeitsbereich bei der Entfernungsmessung
r_{max}	Größte Entfernung, in der typische Objekte noch detektiert werden müssen
r_{min}	Kleinste Entfernung, in der typische Objekte noch detektiert werden müssen

s	Zustand
$S(X)$	Leistungsdichte im Fall von $X = r$, sonst Grad des Glaubens an eine Annahme
S_K	Skalierungsfaktor
s_M	Zustandsänderung
S_{μ_j}	Schwellwert für Fehlererkennungsverfahren
S_{μ_m}	Schwellwert für Fehlererkennungsverfahren
s_{AB}	Abstand zwischen zwei Punkten A und B
T	Periodendauer
t	Zeit
t_a	Zeit, die die Aktuatorik zur Auslösung benötigt
t_c	Zeit bis zum Aufprall
t_l	Laufzeit
t_o	Zeit, die zusätzlich zur Auslösezeit der Aktuatorik hinzukommt (Offset)
T_S	Periodendauer des gesendeten Signals
t_s	Zeit, um die ein Empfangssignal verschoben wird
T_T	Transmissionsgrad
t_z	Messzykluszeit
t_{IV}	Laufzeit durch ein einzelnes Verzögerungsglied
t_{sc}	Zeitschwellwert; bezeichnet die Auslöseschwelle des PreCrash-Systems und ist von Relativgeschwindigkeit und benötigter Vorwarnzeit abhängig
T_{T0}	Transmissionsgrad bei niedrigen Intensitäten im Bereich der linearen Absorption
T_{Tot}	Totzeit (Verarbeitungszeit)
v	Geschwindigkeit
$v_{i,j}$	Attribute
$v_{rel,max}$	Größte Relativgeschwindigkeit zwischen Objekt und eigenem Fahrzeug, bei dem das System noch funktionieren muss
$v_{rel,min}$	Kleinste Relativgeschwindigkeit zwischen Objekt und eigenem Fahrzeug, bei dem das System noch funktionieren muss
W	Einem Photon zugeordnete Energie

Abkürzungen und Formelzeichen

$w_{...}$	Wichtungsfaktor
x	Positionsangabe in kartesischen Koordinaten (x -Komponente)
y	Positionsangabe in kartesischen Koordinaten (y -Komponente)
z	Positionswert in z -Richtung