Algorithmen, Modelle und Systeme für die multisensorielle Umgebungserfassung im Automobil

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. Hendrik Weigel
geboren am 8. Juni 1976 in Erlabrunn

eingereicht am 13. Februar 2012

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

Tag der Verleihung: 8. Januar 2013

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

Band 9

Hendrik Weigel

Algorithmen, Modelle und Systeme für die multisensorielle Umgebungserfassung im Automobil

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2013
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1740-3
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

Kurzfassung

Die Verkehrssicherheit wird sich nur mit Systemen weiter verbessern lassen, die aktiv Unfälle verhindern oder zumindest die Unfallfolgen senken können. Die Realisierung solcher Systeme erfordert die ständige zuverlässige Erfassung der Fahrzeugumgebung. Um diese Bedingung zu erfüllen, wird insbesondere der Einsatz von Multisensorsystemen diskutiert. Unter diesem Aspekt untersucht die vorliegende Arbeit, wie man mit einem kostengünstigen Videosensor von diesem Ansatz profitieren kann. Dazu wird untersucht, wie dieser für verschiedene Bereiche der Umfelderfassung einsetzbar ist. Zur videosensorbasierten Objektdetektion müssen Bildverarbeitungsmethoden angewandt werden, die typische und repräsentative Merkmale der gesuchten Objekte liefern können. Um die notwendigen Rechenkapazitäten zu minimieren, wird hierfür ausschließlich die Strukturtensormethode eingesetzt. Neben der Extraktion von Merkmalen zur Detektion von Fahrstreifen und Fahrzeugen bildet sie die Grundlage für die Schätzung des Nickwinkels. Mit dem kontinuierlich geschätzten Nickwinkel wird wiederum die Kompensation der Eigenbewegung weiter verbessert, um die detektierten Objekte zuverlässiger und robuster verfolgen zu können. Abschließend wird eine fahrstreifengenaue Positionierung mit erweitertem Vorausschaubereich vorgestellt. Diese wurde mit einer Sensordatenfusion aus Fahrzeugeigenbewegung, Fahrstreifenerkennung, GPS-Signalen und digitalen Kartendaten für den im Rahmen eines EU-Projektes entwickelten Kurvenassistenten realisiert. Bei den dargestellten Systemen wurde speziell auf die praxisgerechte Umsetzung geachtet, indem alle Algorithmen mit realen Daten getestet wurden und die damit realisierten Systeme echtzeitfähig sind.

Schlagwörter: Digitale Karte, Fahrerassistenzsystem, Fahrzeugerkennung, Fahrstreifenerkennung, GPS, Kalman-Filter, Kurvenassistent, Nickwinkelschätzung, Sensordatenfusion, Umfelderfassung

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **15**

1.1 Motivation 15

1.2 Ziel und Beitrag der Arbeit 16

1.3 Gliederung und Systemüberblick 18

2 Sensormodelle und Methoden der Sensordatenfusion **21**

2.1 Zustandsschätzung 21

2.1.1 Zeitdiskretes, dynamisches System 22

2.1.2 Das Kalman-Filter 23

2.1.3 Das erweiterte Kalman-Filter 29

2.2 Sensorik im Automobilbereich 31

2.2.1 Sensoren zur Umfelderkennung 32

2.2.2 Sensoren zur Positionierung 34

2.2.3 Bewegungssensoren 35

2.3 Modelle 36

2.3.1 Bewegungsmodell 36

2.3.2 Kameramodell 40

2.3.3 Linsenverzerrungen 46

2.4 Kamerakalibrierung 47

2.4.1 Direkte Lineare Transformation (DLT) 48

2.4.2 Zerlegung der Projektionsmatrix 52

2.4.3 Berücksichtigung von Linsenverzerrungen 55

2.4.4 Rückprojektion 57

2.5 Bildverarbeitung 59

2.5.1 Kantendetektion 61

2.5.2 Strukturtensormethode 63
2.6 Sensordatenfusion 66
2.6.1 Verteilte und zentrale Systemkonfiguration 69
2.6.2 Zuordnungsregion 74
2.6.3 Datenzuordnung 74

3 Dynamik der Fahrzeugbewegung 77
3.1 Horizontale Fahrzeugdynamik 79
3.1.1 Prädiktion der Fahrzeugbewegung 80
3.1.2 Kompensation der Eigenbewegung bei der Objektverfolgung 81
3.2 Kompensation des Nickwinkels 82
3.2.1 Bestimmung des Fluchtpunktes im Einzelbild 84
3.2.2 Rekursive Schätzung des Fluchtpunktes 90
3.2.3 Bestimmung des Nickwinkels aus dem Fluchtpunkt 92
3.2.4 Ergebnisse 93

4 Fahrstreifen- und Fahrzeugerkennung 97
4.1 Fahrstreifenerkennung 99
4.1.1 Erfassungsbereich 100
4.1.2 Fahrstreifenbegrenzungsmodell 105
4.1.3 Detektion der Fahrstreifenbegrenzungen 115
4.1.4 Verfolgung des Fahrstreifens 124
4.1.5 Ergebnisse 129
4.2 Fahrzeugerkennung 134
4.2.1 Fahrzeugmodell 135
4.2.2 Detektion von Fahrzeugen 137
4.2.3 Multiobjekt-Verfolgung 150
4.2.4 Ergebnisse 156

5 Globale Fahrzeugpositionierung und Kartenreferenzierung 159
5.1 Fahrzeugpositionierung mit GPS 160
5.1.1 Genauigkeit von GPS-Messungen 161
5.1.2 Verbesserung der Genauigkeit von GPS-Messungen 164

5.1.3 Geodätisches Referenzsystem und konforme Abbildung . . . 165
5.2 Digitale Karte 166
5.2.1 Genauigkeit der digitalen Kartendaten 168
5.2.2 Approximation der Kartendaten 169
5.3 Fahrstreifengenaue Fahrzeugpositionierung mittels Sensordatenfusion 177
5.3.1 Dynamisches Fahrzeugmodell und Zustandsbeschreibung . . 179
5.3.2 Sensoren und Messmodelle 179
5.4 Ergebnisse 184

6 Zusammenfassung und Ausblick 187

A Definition der Koordinatensysteme 191

B Methode der kleinsten Quadrate 195
B.1 Pseudoinverse 195
B.2 Iterative Minimierungsmethode 196
B.2.1 Levenberg-Marquardt Algorithmus 197

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	engl. *Adaptive Cruise Control* (Abstandsregelautomat)
BLIS	engl. *Blind Spot Information System*
CAN	engl. *Controller Area Network*
CEP	engl. *Circular Error Probable*
ctra	engl. *constant turn rate and acceleration*
DLT	Direkte Lineare Transformation
DOP	engl. *Dilution of Precision*
DSC	Dynamische Stabilitätskontrolle, vergleichbares System wie ESP
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
FIR	engl. *Far Infrared*
FP	Fluchtpunkt
GDF	engl. *Geographic Data File*
GNSS	engl. *Global Navigation Satellite System*
GPS	engl. *Global Positioning System*
GRS80	engl. *Geodetic Reference System 1980*
IMU	engl. *Inertial Measurement Unit*
JDL	engl. *Joint Directors of Laboratories*
LEP	engl. *Linear Error Probable*
Lidar	engl. *Light Detection and Ranging*
LKAS	engl. *Lane Keeping Assist System*
LRR	engl. *Long Range Radar*, siehe auch Radar
MLE	engl. *Maximum Likelihood Estimate*

NIR	engl. *Near Infrared*
PDA	engl. *Probabilistic Data Association*
PPS	engl. *Precise Positioning Service*
Radar	engl. *Radio Detection and Ranging*
ROI	engl. *Region of Interest*
SBAS	engl. *Satellite Based Augmentation System*
SEP	engl. *Spherical Error Probable*
SPS	engl. *Standard Positioning Service*
SRR	engl. *Short Range Radar*, siehe auch Radar
SVD	engl. *Singular Value Decomposition* (Singulärwertzerlegung)
UTM	engl. *Universal Transverse Mercator*
WGS84	engl. *World Geodetic System 84*

Symbole

∇	Nabla-Operator

Lateinische Buchstaben

$\mathbf{A}_p$	Pseudoinverse der Matrix $\mathbf{A}$
$A(t_k)$	Systemübergangsmatrix zum Zeitpunkt t_k
a	Achsabstand
B	Größe der von einem realen Objekt erzeugten Abbildung auf einem Videosensor
$\mathcal{B}$	Glättungsmaske
$B(t_k)$	Eingangsmatrix zum Zeitpunkt t_k
b	Fahrzeugbreite
C_c	Kohärenzmaß der lokalen Bildstruktur
C_h	Schwellwert für die Homogenität der lokalen Bildstruktur
C_i	Schwellwert für die Isotropie der lokalen Bildstruktur
$C(t_k)$	Messmatrix zum Zeitpunkt t_k
c	Krümmung
c_0	Krümmung des Fahrstreifens im Detektionsbereich
c_1	Krümmungsänderung des Fahrstreifens im Detektionsbereich
$\mathbf{D}$	Verschiebungsmatrix

$\mathcal{D}$	Ableitungsoperator
d	Distanzmaß (allgemein)
$diag[.]$	Diagonalmatrix
d_1, d_2, d_3, d_4, d_5	Parameter zur Modellierung der radialen und tangentialen Linsenverzerrung
$E\{x\}$	Erwartungswert einer Zufallsvariable x
$\mathbf{e}$	Fehlervektor
FP	Fluchtpunkt
f	Kamerakonstante
$\mathbf{f}(.)$	Funktionenvektor (allgemein)
$\mathbf{f}_a(.)$	Funktionenvektor des nichtlinearen Systemübergangs
$\mathbf{f}_b(.)$	Funktionenvektor des nichtlinearen Einflusses der Stellgrößen
$\mathbf{f}_c(.)$	Funktionenvektor der nichtlinearen Messgleichung
f_u	Kameraskalierungsfaktor in u-Koordinatenrichtung
f_v	Kameraskalierungsfaktor in v-Koordinatenrichtung
G	reale Objektgröße
g	Abstand des Objektes vom Videosensor
$\mathbf{g} = [a, b, c]^T$	allgemeiner Parametervektor einer Geraden
$g(u, v)$	Grauwert an der Bildposition (u, v)
h	Fahrzeughöhe
J_{pq}	Strukturtensor
$\mathbf{J}$	Jacobi-Matrix
$\mathbf{K}$	Matrix zur Transformation von Kamera- in Bildkoordinaten
$K(t_k)$	Kalman-Faktor zum Zeitpunkt t_k
l	Bogenlänge
$\mathbf{N}$	Ähnlichkeitsabbildung
N_S	Anzahl der Sensoren
o_l	Abstand des Fahrzeuges zur linken Fahrstreifenbegrenzung
o_r	Abstand des Fahrzeuges zur rechten Fahrstreifenbegrenzung
$P(t_{k+1\|k})$	Schätzfehlerkovarianz des auf den Zeitpunkt t_{k+1} prädizierten Zustandes
$P(t_{k+1\|k+1})$	Schätzfehlerkovarianz zum Zeitpunkt t_{k+1}
P_d	Detektionsrate

P_f	Falschalarmrate
$\mathbf{p}$	Parametervektor
$p(.)$	Wahrscheinlichkeit
Q_g	Quotient aus Varianz- und Symmetriewert eines Bildbereiches
$Q(t_k)$	Kovarianzmatrix der Systemstörung
R	Radius
$\mathbf{R}$	Rotationsmatrix
$R(t_k)$	Kovarianzmatrix der Messrauschens zum Zeitpunkt t_k
S	Scherung (Kameraparameter)
S_g	Symmetriewert eines Bildbereiches
s	Verdrehung des Fahrzeuges im Fahrstreifen
$\mathbf{T}$	Projektionsmatrix
t_{mn}	Elemente der Projektionsmatrix
t'_{mn}	normierte Elemente der Projektionsmatrix
Δt	Zeitdifferenz zwischen zwei Abtastpunkten t_k und t_{k+1}
$\ddot{\mathrm{U}}_d$	Detektionüberschneidungsfläche
$U(t_k)$	Innovationskovarianzmatrix zum Zeitpunkt t_k
u, v	unverzerrte, kartesische Koordinaten des Bildkoordinatensystems
u_d, v_d	verzerrte Bildkoordinaten
u_0, v_0	Bildhauptpunkt
$\mathbf{u}(t_k)$	Eingangsvektor zum Zeitpunkt t_k
V_g	Varianzwert eines Bildbereiches
v	Geschwindigkeit
$\dot{v}$	Beschleunigung
$\mathbf{v}(t_k)$	Systemstörung zum Zeitpunkt t_k
$w(.)$	Fensterfunktion
$\mathbf{w}(t_k)$	Messstörung zum Zeitpunkt t_k
$\mathbf{x}(t_k)$	wahrer Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k
$\hat{\mathbf{x}}(t_{k+1\|k})$	auf den Zeitpunkt t_{k+1} prädizierter Zustandsvektor
$\hat{\mathbf{x}}(t_{k+1\|k+1})$	Schätzung des Zustandes zum Zeitpunkt t_{k+1}
X_0, Y_0, Z_0	Verschiebungsparameter
${}^c x_d, {}^c y_d$	verzerrte Projektion der Kamerakoordinaten
${}^c x_n, {}^c y_n$	normalisierte Projektion der Kamerakoordinaten

x, y, z	dreidimensionale kartesische Koordinaten
${}^{c}x, {}^{c}y, {}^{c}z$	kartesische Koordinaten des Kamerakoordinatensystems
${}^{v}x, {}^{v}y, {}^{v}z$	kartesische Koordinaten des Fahrzeugkoordinatensystems
${}^{w}x, {}^{w}y, {}^{w}z$	kartesische Koordinaten eines ortsfesten Weltkoordinatensystems
$\mathbf{y}(t_k)$	Messvektor zum Zeitpunkt t_k
$\hat{\mathbf{y}}(t_{k+1\|k})$	auf den Zeitpunkt t_{k+1} prädizierte Messung
$\tilde{\mathbf{y}}(t_{k+1\|k})$	Innovation der Messung zum Zeitpunkt t_{k+1}

Griechische Buchstaben

β_h	horizontaler Öffnungswinkel des Videosensors
β_v	vertikaler Öffnungswinkel des Videosensors
$\Gamma(t_k)$	Rauschverstärkungsmatrix zum Zeitpunkt t_k
δ_A	Ackermannwinkel
ζ	Relevanz eines Filters
θ	Richtung eines Bildsegmentes
σ	Standardabweichung
ϕ	Orientierungswinkel eines Bildsegmentes
φ_x	Drehwinkel um die x-Achse, Wankwinkel
φ_y	Drehwinkel um die y-Achse, Nickwinkel
φ_z	Drehwinkel um die z-Achse, Gierwinkel
$\dot{\varphi}_z$	Giergeschwindigkeit
χ	Bahnazimutwinkel

Vorwort

Die vorliegende Arbeit geht zurück auf meine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität Chemnitz. Wesentliche Teile der wissenschaftlichen Abhandlung entstanden aber auch erst in der nachfolgenden Zeit parallel zu meiner Tätigkeit bei der Bertrandt Ingenieurbüro GmbH.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik, der mir die Möglichkeit der Promotion gab, danke ich sehr für die abwechslungsreiche und interessante Arbeit und die langjährige Geduld mit mir während deren Entstehung. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Madhukar Chandra danke ich sehr für das Interesse an der Thematik und für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens.

Mein Dank gilt auch meinen ehemaligen Kollegen der Professur für Nachrichtentechnik sowie des I-FAS der Technischen Universität Chemnitz (Interdisziplinäres Zentrum für Fahrerassistenzsysteme). Die fachlichen Diskussionen und die kollegiale Zusammenarbeit haben sehr viel zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ingolstadt, im Februar 2012