

Multisensorgestützte Bildverarbeitung zur Erkennung und Lokalisierung von Fußgängern im Fahrzeugumfeld

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Basel Fardi
geboren am 30. Mai 1975 in Damaskus

eingereicht am 29. Juni 2007

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

Tag der Verleihung: 19. Dezember 2007

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

Band 5

Basel Fardi

**Multisensorgestützte Bildverarbeitung
zur Erkennung und Lokalisierung
von Fußgängern im Fahrzeugumfeld**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2008

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., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7031-5

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

*Für Dima, Elia, Daniel
und Benjamin*

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Professur für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität Chemnitz.

Für die Möglichkeit der Promotion und die fachlich hervorragende Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Wanielik bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Madhukar Chandra und Herrn Dr.-Ing. Jens Gayko danke ich sehr für ihr Interesse an der Thematik und für die freundliche Übernahme eines Gutachtens.

Mein Dank gilt auch allen jetzigen und ehemaligen Mitarbeitern der Professur für Nachrichtentechnik. Durch ihre uneigennützig Unterstützung in vielerlei Hinsicht haben sie zum Gelingen dieser Arbeit sehr viel beigetragen. Besonders bedanke ich mich an dieser Stelle bei Dr.-Ing Heiko Cramer und Dr.-Ing. Ullrich Scheunert.

Bei Cornelia Neubert und Dr.-Ing. Ulrich Neubert bedanke ich mich für die Durchsicht des Manuskripts und die daraus resultierenden Verbesserungsvorschläge. Dank geht auch an alle Studenten, die mich durch ihre Mitarbeit als Studienarbeiter, Diplomanten oder Hilfwissenschaftler unterstützt haben.

Chemnitz, Juni 2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Zielsetzung und Beitrag der Arbeit	10
1.3	Systemüberblick	12
2	Multisensorbasierte Szenenerfassung	15
2.1	Auswahl der Messsensoren	16
2.2	Datenfusion der Messsensoren	18
2.2.1	Festlegung der Koordinatensysteme	19
2.2.2	Kalman-Filter basierte Zustandsschätzung	24
2.3	Sensorspezifische Vorverarbeitung	33
2.3.1	Detektionen aus dem IR-Bild	33
2.3.2	Detektionen aus dem Laserscannersignal	45
2.4	Das Systemkonzept	46
3	Formbasierte Analyse	51
3.1	Ansätze zur Objekterkennung in Einzelbildern	51
3.2	Konturdetektion des im Vorhersagebereich befindlichen Objektes	59
3.2.1	Aktive Konturmodelle	71
3.2.2	Das Isotropiemaß als externe Energie	84
3.2.3	Korrektur des Untersuchungsgebietes mittels Kopfposition	87
3.2.4	Ein Algorithmus zur Konturdetektion von Fußgängern	88
3.2.5	Modellbasierte Initialisierung der Kontur	89
3.3	Objektklassifikation	92
3.3.1	Merkmalstransformation	92
3.3.2	Entscheidungsstrategien	99

4	Bewegungsanalyse	111
4.1	Erkennung des Menschen anhand seiner Bewegung	111
4.2	Berechnung des optischen Flusses	114
4.2.1	Das Verschiebungsvektorfeld	115
4.2.2	Kompensation der Eigenbewegung	124
4.3	Analyse der Objektbewegung	132
4.3.1	Repräsentation des optischen Flusses durch Merkmale	133
4.3.2	Auswertung der zeitlichen Änderung der Merkmale	134
4.4	Resultate	135
4.5	Auswertung der Bewegungsstartheit	140
5	Straßenranderkennung zur Performanzsteigerung der Fußgängererken-	143
	nung	
5.1	Ein Verfahren zur Erkennung der Straßenränder in der Bildebene	144
5.1.1	Geradliniger Verlauf des Straßenrandes als vereinfachte Modellann-	
	ahme	145
5.1.2	Fluchtpunktbasierte Erweiterung	146
5.2	Schätzung des Straßenrandverlaufes unter Verwendung des Kalman-Filters	148
5.2.1	Kreisförmiger Verlauf als Modellannahme	149
5.2.2	Schätzung mit Hilfe von Bildmessungen	151
5.2.3	Gewinnung von Detektionen aus den Reflektionswerten des La-	
	serscannersignals	154
6	Zusammenfassung und Ausblick	157
A	Spezifikationen der verwendeten Sensoren	161
B	Transferfunktionen symmetrischer Operatoren	163
C	Bestimmung der Eigenwerte und Eigenvektoren	165

Verwendete Notation

Kapitel 2, 4 und 5:

Lateinische Buchstaben

A	allgemeine Transformationsmatrix für den Übergang zwischen Koordinatensystemen
$A(t_k)$	Zustandsübergangsmatrix zum Zeitpunkt t_k
$\tilde{A}(t_k)$	linearisierte Zustandsübergangsmatrix zum Zeitpunkt t_k
a_{mn}	Einträge der Transformationsmatrix
$B(t_k)$	Stellmatrix zum Zeitpunkt t_k
$b(t_k)$	Bogenlänge zum Zeitpunkt t_k
C	Kameralagematrix
$C(t_k)$	Messmatrix zum Zeitpunkt t_k
$\tilde{C}(t_k)$	linearisierte Messmatrix zum Zeitpunkt t_k
c	Krümmung
D_x, D_y, D_z	Rotationsmatrizen für den Übergang zwischen Koordinatensystemen
\mathbf{d}	Tangentialvektor
ddx, ddy	Abmessungen des bildgebenden Sensors
$E\{..\}$	Erwartungswert einer Zufallsvariable
\mathbf{e}	Fehlervektor
FP	Fluchtpunkt
f	bildseitige Brennweite der Kamera
f_s	Schrittfrequenz
$\mathbf{f}\{..\}$	Funktionsvektor (allgemein)
$g(x, y)$	Grauwert an der Bildposition (x, y)
g_x, g_y, g_t	partiellen Ableitungen der Grauwertfunktion nach x , y und t
$G(x, y)$	Bild oder Bildausschnitt
H	Bildentropie
$K(t_k)$	Kalman-Verstärkungsmatrix zum Zeitpunkt t_k
$KK(\Delta x, \Delta y)$	Kreuzkorrelationskoeffizient

$M_c(t_k)$	Kamerabewegungsmatrix zum Zeitpunkt t_k
$M_v(t_k)$	Fahrzeugbewegungsmatrix zum Zeitpunkt t_k
m_{pq}	Flächen- und Konturmomente der Ordnung $p + q$
N_x, N_y	Pixelanzahl des bildgebenden Sensors
$P(t_k)$	Kovarianzmatrix der Schätzfehler zum Zeitpunkt t_k
$P^*(t_k)$	prädizierte Kovarianzmatrix der Schätzfehler zum Zeitpunkt t_k
$Q(T_k)$	Kovarianzmatrix des Prozessrauschens
$Q_d(T_k)$	Kovarianzmatrix des Prozessrauschens für eine konstante Störung zwischen zwei Abtastpunkten t_{k-1} und t_k
\mathbf{q}_e	Einheitsvektor der Drehachse
$r(t_k)$	Radius der Kreisbahn zum Zeitpunkt t_k
${}^l r$	Koordinate des polaren Laserscannerkoordinatensystems
$R(t_k)$	Kovarianzmatrix der Messstörung zum Zeitpunkt t_k
S	Matrix zur Transformation von Kamerakoordinaten in Bildkoordinaten
S_1, S_2	Schwellwerte
$\text{sp}(\dots)$	Spur einer Matrix
$SSD(\Delta x, \Delta y)$	Summe der quadrierten Differenzen
T	Translationsmatrix für den Übergang zwischen Koordinatensystemen
\mathbf{T}	Translationsgeschwindigkeitsvektor
T_k	Zeitdifferenz zwischen zwei Abtastpunkten t_{k-1} und t_k
$\mathbf{u}(t_k)$	Eingangsvektor zum Zeitpunkt t_k
\mathbf{u}	Verschiebungsvektor
$\mathbf{v}(t_k)$	Eingangsstörung zum Zeitpunkt t_k
$\mathbf{v}_d(t_k)$	stückweise konstante Eingangsstörung zum Zeitpunkt t_k
$w(k, l)$	Fensterfunktion
$\mathbf{w}(t_k)$	Messrauschen zum Zeitpunkt t_k
\mathbf{W}	Wichtungsmatrix
$\mathbf{x}(t)$	wahrer Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k
$\hat{\mathbf{x}}(t_k)$	geschätzter Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k
$\mathbf{x}^*(t_k)$	prädizierter Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k
${}^c \mathbf{x}$	kartesische Koordinaten des Kamerakoordinatensystems
${}^i \mathbf{x}$	kartesische Koordinaten des Bildkoordinatensystems
${}^l \mathbf{x}$	kartesische Koordinaten des Laserscannerkoordinatensystems
${}^r \mathbf{x}$	kartesische Koordinaten des Kreiskoordinatensystems
${}^v \mathbf{x}$	kartesische Koordinaten des Fahrzeugkoordinatensystems

$\mathbf{y}(t_k)$ Messvektor zum Zeitpunkt t_k

Griechische Buchstaben

α	Wichtungsfaktor
$\gamma(t_k)$	Gierwinkel zum Zeitpunkt t_k
$\dot{\gamma}(t_k)$	Gierrate zum Zeitpunkt t_k
$\Gamma(T_k)$	Rauschverstärkungsmatrix
λ_1, λ_2	Eigenwerte
μ_{pq}	zentrale Momente der Ordnung $p + q$
$v(t_k)$	Längsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt t_k
ϕ	Orientierungswinkel des Bildsegmentes
${}^i\varphi$	Koordinate des polaren Laserscannerkoordinatensystems
Ω	Rotationsgeschwindigkeitsvektor

Kapitel 3:

Lateinische Buchstaben

A	Matrix zur Beschreibung der internen Kraft bei aktiven Konturen
C_h	Schwellwert für die Homogenität der lokalen Bildstruktur
C_i	Schwellwert für die Isotropie der lokalen Bildstruktur
\mathbf{c}	Vektor zur Beschreibung der Differenz zweier benachbarten Kontursegmente
D	Diffusionskonstante -funktion oder -matrix
D^p	Ableitungsoperator der Ordnung p
d	euklidisches Abstandsmaß
d_{mn}	Einträge der Diffusionsmatrix
\mathbf{d}	Vektor zur Beschreibung eines Kontursegmentes
E	Energiefunktional einer aktiven Kontur
E_{int}	interne Konturenergie
E_{ext}	externe Energie (Bildenergie)
\hat{F}	Fouriertransformierte des Regularisierungsoperators
$\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_y$	partielle Ableitungen der externen Energie bei aktiven Konturen (externe Kraft)
G	Bild oder Bildausschnitt
\bar{G}	geglättete Version des Bildes G
H	Hypothese
h	Schrittweite der Konturdiskretisierung

I	Einheitsmatrix
I	Identitätsoperator
J_{pq}	Strukturtenor
\hat{j}_1, \hat{j}_2	Eigenwerte des Strukturtenors
$K(q)$	parametrische Darstellung der Objektkontur
K_i	diskrete Darstellung der Objektkontur
K_k	Klassenkovarianzmatrix
N_a	Anzahl der Bildpunkte in der Bildregion A
\mathbf{n}	Normaleneinheitsvektor
n	Anzahl der Punkte einer Objektkontur
q	Konturparameter
$P(..)$	Wahrscheinlichkeitswert
S	Schwellwert
\tilde{s}	normierte Wellenzahl
T	Anzahl der Basisklassifikatoren
t	Iterationsschritt
\mathbf{v}_i	Vektor des Merkmalsraumes
v_1, v_2	orthonormale Eigenvektoren des Strukturtenors
$w(\mathbf{x}')$	Fensterfunktion
x_i, y_i	Bildkoordinaten eines Konturpunktes
z_n	komplexe Punktfolge
\hat{z}_k	komplexe Fourierkoeffizienten einer Punktfolge

Griechische Buchstaben

α, β	Wichtungsfaktoren
γ	Schrittweite des Iterationsprozesses bei aktiven Konturen
Δ	Laplace-Operator
ϵ	Trainingsfehler
ϵ_H	Klassifikationsfehler
λ_1, λ_2	Eigenwerte
μ_k	Klassenschwerpunktvektor
$\hat{\sigma}_a$	Schätzwert der Varianz aus der Bildregion A
ϕ	Orientierungswinkel der lokalen Bildstruktur