



HELMUT SCHMIDT  
UNIVERSITÄT

Universität der Bundeswehr Hamburg

Gregory Föll

---

# Hinderniserkennung für mobile Arbeitsmaschinen durch Fusion von Radar- und Videodaten

Berichte aus dem Institut für  
Konstruktions- und Fertigungstechnik

# Hinderniserkennung für mobile Arbeitsmaschinen durch Fusion von Radar- und Videodaten

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

DISSERTATION  
vorgelegt von

Gregory Föll  
aus Oktjabrskij

Hamburg 2022

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Alice Kirchheim

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Juni 2022

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und  
Fertigungstechnik

Band 54

**Gregory Föll**

**Hinderniserkennung für mobile Arbeitsmaschinen  
durch Fusion von Radar- und Videodaten**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8680-5

ISSN 1861-5260

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während und im Anschluss an meine Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns für die vielen fachlichen Anregungen und die gewährten Freiräume in der Gestaltung meiner Forschungstätigkeit.

Ich danke der Dr. Friedrich Jungheinrich-Stiftung. Ohne die wertvolle Unterstützung wäre die Arbeit in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Frau Prof. Dr.-Ing. Alice Kirchheim danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Bei Werner Albe, Bernfried Heinken und Holger Kumpfert möchte ich mich für die tatkräftige Unterstützung bei konstruktiven, organisatorischen und praktischen Fragen bedanken.

Weiterhin danke ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die angenehme Atmosphäre, für viele aufschlussreiche Diskussionen und für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie für ihre geduldige Unterstützung und ihr Vertrauen bedanken.

Hamburg, im Juni 2022

Gregory Föll



# Kurzfassung

Fahrerlosen Transportsystemen und Fahrerassistenzsystemen wurde in den letzten drei Dekaden viel Aufmerksamkeit geschenkt. Auch im industriellen Umfeld werden diese Systeme zunehmend wichtiger. Sie tragen unter anderem zur Kostenoptimierung und Sicherheit bei. Vor allem spielt die Reduzierung der Unfallfolgen und damit die passive Sicherheit für Verkehrsteilnehmer und Arbeiter eine bedeutende Rolle. Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von fahrerlosen Transportsystemen müssen zukünftige fahrerlose Transportfahrzeuge vorausschauend und situationsabhängig auf Hindernisse in den Verkehrswegen reagieren können. Dazu bedarf es einer automatischen Hinderniserkennung, die die Objekte in der Umgebung des Fahrzeuges möglichst vollständig und genau erfasst.

Viele heutige Lösungen für eine Hinderniserkennung basieren auf einem bestimmten Sensortyp. Im dichten Verkehr einer urbanen Umgebung oder in unstrukturierten industriellen Umgebungen entstehen hochkomplexe Situationen, die sich mit nur einem Sensortyp nicht bewältigen lassen. Um die Einsatzgebiete von fahrerlosen Transportsystemen auszuweiten und die Zuverlässigkeit der Systeme zu verbessern, können die Daten mehrerer unterschiedlicher Sensortypen fusioniert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine automatische Hinderniserkennung für mobile Arbeitsmaschinen, wie zum Beispiel Stapler und andere Flurförderzeuge entwickelt. Dabei werden die Daten eines Radar- und eines Kamerasensors sinnvoll miteinander kombiniert. Die Hinderniserkennung wird durch Freiraumerkennung realisiert. Dazu wird im Kamerabild die für das Fahrzeug befahrbare Fläche segmentiert. Alle anderen Objekte im Bild werden als Hindernisse interpretiert.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thematische Eingrenzung und Motivation . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	4
1.3 Zielsetzung . . . . .	8
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	9
<b>2 Sensorik</b>	<b>11</b>
2.1 Radarsensoren . . . . .	11
2.1.1 Radarstrahlen . . . . .	12
2.1.2 Geschwindigkeitsmessung . . . . .	15
2.1.3 Abstandsmessung . . . . .	17
2.1.4 Winkelmessung . . . . .	17
2.1.5 FMCW-Radar . . . . .	18
2.1.6 Verwendeter Sensor . . . . .	22
2.2 Kamerasensoren . . . . .	23
2.2.1 Leistungsparameter . . . . .	24
2.2.2 Verwendeter Sensor . . . . .	28
2.2.3 Kameramodelle . . . . .	28
2.2.4 Koordinatensysteme . . . . .	32
2.2.5 Kamerakalibrierung . . . . .	33
<b>3 Sensordatenfusion</b>	<b>47</b>
3.1 Definition . . . . .	47

3.2	Verarbeitungsschritte der Sensordaten . . . . .	49
3.3	Fusionsebenen . . . . .	50
3.4	Synchronisierung . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Bildsegmentierung</b>	<b>55</b>
4.1	Segmentierungsverfahren . . . . .	56
4.2	Morphologische Grundlagen . . . . .	58
4.2.1	Strukturelement . . . . .	59
4.2.2	Dilatation . . . . .	60
4.2.3	Erosion . . . . .	61
4.2.4	Gradient . . . . .	63
4.3	Wasserscheidentransformation . . . . .	66
4.3.1	Simulation von Überflutungen . . . . .	68
4.3.2	Bau von Dämmen . . . . .	70
4.3.3	Flutungsprozess . . . . .	73
4.3.4	Visualisierung der Flutung . . . . .	74
4.3.5	Markerkontrollierte Segmentierung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Systembeschreibung</b>	<b>81</b>
5.1	Experimenteller Systemaufbau . . . . .	82
5.1.1	Koordinatentransformation . . . . .	83
5.2	Generieren von Vordergrundmarkern . . . . .	86
5.2.1	Statischer Marker . . . . .	86
5.2.2	Dynamischer Marker . . . . .	87
5.3	Generieren von Hintergrundmarkern . . . . .	92
5.3.1	Statischer Marker . . . . .	92
5.3.2	Radargenerierte Marker . . . . .	93
5.3.3	Vertikale Linien . . . . .	95
5.4	Systemarchitektur . . . . .	97
5.5	Hindernisse im Umfeld von mobilen Arbeitsmaschinen . . . . .	99
5.6	Ergebnisse . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>

# Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Bedeutung
ACC	Adaptive Cruise Control (englisch)
CAN	Controller Area Network (englisch)
CCD	Charge Coupled Device (englisch)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (englisch)
CW-Radar	Continuous Wave Radar (englisch)
FAS	Fahrerassistenzsystem
FMCW-Radar	Frequency Modulated Continuous Wave Radar (englisch)
FTF	fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	fahrerloses Transportsystem
Kfz	Kraftfahrzeug
KNN	Künstliches neuronales Netz
Lidar	Light Detection and Ranging (englisch)
Lkw	Lastkraftwagen
NIR	Near-infrared (englisch)
Pkw	Personenkraftwagen
Radar	Radio Detection and Ranging (englisch)
RCS	Radar Cross Section (englisch)



# Verzeichnis der Formelzeichen

## Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A(M)$	–	Auffangbecken, das mit dem regionalen Minimum $M$ assoziiert ist
$A_e$	–	Empfangsamplitude
$A_h$	–	Menge der Punkte aller Auffangbecken, die eine Höhe besitzen, die kleiner oder gleich $h$ ist
$A_s$	–	Sendeamplitude
$b_H$	mm	Breite eines Radarziels
$C$	–	optische Achse
$c$	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$c_x, c_y$	–	homogenen Koordinaten des Bildmittelpunktes auf die Pixelgröße skaliert
$D$	–	Richtfaktor (Radar), Distanztransformation (Bildverarbeitung)
$D_g$	–	Definitionsbereich des Gradientenbildes $g$
$D_f$	–	Definitionsbereich des Bildes $f$
$d$	<i>Pixel</i>	Distanz
$F'$	–	Brennpunkt
$f$	mm, –	Brennweite (Kamera), Bild (Bildverarbeitung)
$\nabla f$	–	Gradient von $f$
$f_D$	Hz	Dopplerfrequenz
$f_S$	–	dilatierte oder erodierte Pixelmenge
$f_s$	Hz	Sendefrequenz

## Verzeichnis der Formelzeichen

$\Delta f_{ab}$	Hz	Differenzfrequenz für die abfallende Flanke
$\Delta f_{an}$	Hz	Differenzfrequenz für die ansteigende Flanke
$f_x, f_y$	–	Brennweite auf die Pixelgröße skaliert
$f_\tau$	Hz	Entfernungsfrequenz
$f \ominus S$	–	Erosion von $f$ durch $S$
$f \oplus S$	–	Dilatation von $f$ durch $S$
$G$	dB	Antennengewinn
$G_e$	dB	Antennengewinn (Empfangsantenne)
$G_s$	dB	Antennengewinn (Sendeantenne)
$g$	–	Gradientenbild
$g(f)$	–	morphologischer Gradient von $f$
$h_B$	m	Abbildungsgröße
$h_O$	m	Objektgröße
$h_{max}$	–	der größte Grauwert eines Grauwertbildes
$h_{min}$	–	der kleinste Grauwert eines Grauwertbildes
$K$	–	Kalibrierungsmatrix
$k_1 \dots k_5$	–	kameraabhängige Verzerrungskoeffizienten
$L_{11} \dots L_{34}$	–	Unbekannte einer Projektionsmatrix
$M$	–	regionales Minimum
$m$	–	Markierungsbild
$m_x/m_y$	–	Seitenverhältnis eines Pixels
$P$	W, –	Strahlungsleistung (Radar), Projektionsmatrix (Kamera)
$P_B$	–	Bildpunkt
$P_e$	W	entnommene elektrische Leistung (Empfangsantenne)
$P_{e0}$	W	abgegebene elektrische Leistung (Empfangsantenne)
$P_{ges}$	W	gesamte Strahlungsleistung eines Kugelstrahlers
$P_i$	W	am Radarziel einfallende Leistungsdichte
$P_s$	W	Strahlungsleistung in Hauptkeule (Sendeantenne)
$P_{s0}$	W	gesamte elektrisch zugeführte Leistung (Sendeantenne)
$P_r$	W	vom Radarziel reflektierte Leistungsdichte
$P_W$	–	Weltpunkt
$\tilde{P}$	–	verzerrter Bildpunkt
$p$	–	Pixel
$p_B$	–	Bildpunkt

$p_W$	–	Weltpunkt
$(p_x, p_y, 1)^T$	–	homogenen Koordinaten des Bildmittelpunktes
$Q$	–	Menge der zusammenhängenden Komponenten
$q$	–	zusammenhängende Komponente
$R$	–	Rotationsmatrix
$R(\tilde{r})$	–	Einfluss der radialen Verzeichnung
$r$	m, m, rad	Entfernung vom Radarziel zum Radarsensor (Radar), Radius eines unverzerrten Bildpunktes (Kamera), Rotationswinkel (Kamera)
$\tilde{r}$	m	Radius eines verzerrten Bildpunktes
$s$	–	skew
$S$	–	Strukturelement
$T_h$	–	Menge aller Punkte im $D_f$ , die kleiner oder gleich der Höhe $h$ sind
$T(\tilde{x}, \tilde{y})$	–	Einfluss der tangentialen Verzeichnung
$t$	s, –	Zeit, Translationsvektor (Kamera)
$t_H$	–	Translationsvektor: Kamera – Radarsensor – Hindernis
$t_M$	–	Translationsvektor: Kamera – Schachbrettmuster
$t_R$	–	Translationsvektor: Kamera – Radarsensor
$t_{max}$	–	höchster Wert im Definitionsbereich eines Bildes
$t_x, t_y, t_z$	–	Koordinaten eines Translationsvektors
$u_e$	V	Empfangssignal
$u_s$	V	Sendesignal
$v_r$	m/s	Relativgeschwindigkeit
$w_B$	m	Bildweite
$w_O$	m	Objektweite
$X_B$	m	$x$ -Achse Bildkoordinatensystem
$X_W$	m	$x$ -Achse Weltkoordinatensystem
$X_K$	m	$x$ -Achse Kamerakordinatensystem
$\Delta x$	m	Entfernung zwischen dem Mittelpunkt des Radarsensors und der linken oberen Ecke des Schachbrettmusters
$x_B$	m	$x$ -Koordinate eines Bildpunktes
$x_H$	m	$x$ -Komponente des Translationsvektors $t_H$

## Verzeichnis der Formelzeichen

$x_R$	m	$x$ -Ursprungskoordinate des Radarsensors im Weltkoordinatensystem
$x_W$	m	$x$ -Koordinate eines Weltpunktes
$x_r$	m	kartesische $x$ -Koordinate eines Radarziels
$\tilde{x}$	m	$x$ -Koordinate eines verzerrten Bildpunktes
$Y_B$	m	$y$ -Achse Bildkoordinatensystem
$Y_W$	m	$y$ -Achse Weltkoordinatensystem
$Y_K$	m	$y$ -Achse Kamerakoordinatensystem
$y_B$	m	$y$ -Koordinate eines Bildpunktes
$y_H$	m	$y$ -Komponente des Translationsvektors $t_H$
$y_R$	m	$y$ -Ursprungskoordinate des Radarsensors im Weltkoordinatensystem
$y_W$	m	$y$ -Koordinate eines Weltpunktes
$y_r$	m	kartesische $y$ -Koordinate eines Radarziels
$\tilde{y}$	m	$y$ -Koordinate eines verzerrten Bildpunktes
$Z_W$	m	$z$ -Achse Weltkoordinatensystem
$Z_K$	m	$z$ -Achse Kamerakoordinatensystem
$z_R$	m	$z$ -Ursprungskoordinate des Radarsensors im Weltkoordinatensystem
$z_H$	m	$z$ -Komponente des Translationsvektors $t_H$
$z_W$	m	$z$ -Koordinate eines Weltpunktes
$z_r$	m	$z$ -Koordinate eines Radarziels
$\Delta z$	m	Entfernung vom Boden zum Mittelpunkt des Radarsensors
$\mathbb{Z}$	–	Menge der ganzen Zahlen

**Griechische Buchstaben**

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\alpha, \beta, \gamma$	$^\circ$	Rotationswinkels
$\eta$	–	Antennenwirkungsgrad
$\eta_e$	–	Antennenwirkungsgrad (Empfangsantenne)
$\eta_s$	–	Antennenwirkungsgrad (Sendeantenne)
$\vartheta$	$^\circ$	Azimutwinkel
$\lambda_s$	m	Wellenlänge der Sendefrequenz
$\pi$	–	Kreiszahl
$\sigma$	dBsm	Radarrückstreuquerschnitt (RCS)
$\phi$	$^\circ$	Elevationswinkel
$\varphi$	rad, $^\circ$	Phase, Winkellage eines Radarziels
$\varphi_e$	rad	Empfangsphase
$\varphi_s$	rad	Sendephase
$\Delta\varphi$	rad	Phasenverschiebung