

Schriftenreihe  
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme  
am Institut für Fahrzeugtechnik,  
TU Braunschweig



**Nr: 4**

M.Sc.  
**Mingkang Li**  
**2021**

# Umfeldmodellierung und Aktionsplanung mit hochauflösendem Automobilradar

---

Herausgegeben von:  
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

# Umfeldmodellierung und Aktionsplanung mit hochauflösendem Automobilradar

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Mingkang Li, M. Sc.  
geboren in (Geburtsort): Jiangxi, China

eingereicht am: 21.07.2020  
mündliche Prüfung am: 18.01.2021

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor  
Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze  
Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer



Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme  
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 4

**Mingkang Li**

**Umfeldmodellierung und Aktionsplanung mit  
hochauflösendem Automobilradar**

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7891-6

ISSN 2700-046X

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 meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH am Standort Leonberg in Kooperation mit dem Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze für die universitätsseitige Betreuung und den Freiraum bei der Gestaltung des Promotions-themas recht herzlich bedanken. Für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Victor für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay danke ich für die konstruktiven Anregungen bei der Wissenschaftsbesprechung. Besonders hervorheben möchte ich Florian Krauns und Dr.-Ing. Adrian Sonka für die organisatorische Hilfe.

Mein besonderer Dank gilt meinem fachlichen Betreuer bei der Robert Bosch GmbH Dr.-Ing. Martin Kunert für die zahlreichen Diskussionen und Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ich bedanke mich bei meinen Kollegen in XC/PJ-RAD und XC/ENA für die fachlichen Gespräche und die freundliche Arbeitsatmosphäre. Darunter sind vor allem Dr.-Ing. Zhaofei Feng, Dr.-Ing. Martin Stolz, Dr.-Ing. Frank Meinel und Dr.-Ing. Eugen Schubert. Einen großen Dank schulde ich ebenso meinen Studenten für den wertvollen Beitrag.

Des Weiteren danke ich allen Projektpartnern der öffentlich geförderten Projekte PROSPECT und iFUSE für die erfolgreiche und offene Zusammenarbeit.

Abschließend danke ich meiner Frau Yijuan Yang und meiner Familie von ganzem Herzen, die meinen persönlichen und beruflichen Werdegang stets uneingeschränkt unterstützen.

Leonberg, Januar 2021

Mingkang Li



# Kurzfassung

In den letzten Jahren hat die Radartechnik im Automobilbereich große Fortschritte erzielt. Der hochauflösende Radarsensor ist aktuell in der Lage, die Fahrzeugumgebung mittels mehrerer tausend Detektionen innerhalb eines Messzyklus sehr präzise wahrzunehmen. Im Zuge der immer besser werdenden Radarperzeption sind in der Zukunft auch geeignetere und performantere Ansätze der Umfeldmodellierung und der Aktionsplanung für das radarbasierte Fahrerassistenzsystem zu entwickeln. Viele neuartige Algorithmen sind im Kamera- und Lidarbereich bereits bekannt und müssen für den Einsatz bei Radardaten den Anwendungen entsprechend an die Anforderungen und Eigenschaften des Radars angepasst werden.

Diese Arbeit stellt ein neues Konzept der Umfeldmodellierung mit hochauflösenden Radardaten vor. Aus den statischen Detektionspunkten wird eine Belegungsgitterkarte anhand eines auf der Reflexionsamplitude beruhenden Radar-Sensormodells erstellt. Anschließend wird ein intervallbasiertes Freiraummodell entlang der prädi-zierten Fahrzeugtrajektorie definiert und in der Belegungsgitterkarte verortet. Zur Eigenlokalisierung werden verschiedene SLAM-Methoden implementiert, optimiert und dann verglichen, um ein leistungsfähiges Radar-SLAM zu realisieren. Mithilfe dieser Radar-Odometrie ist es möglich, das Egofahrzeug in der erstellten Umfeldkarte zu lokalisieren. In der dynamischen Umgebungsrepräsentation ergibt sich eine modellbasierte Objektliste aus der Gruppierung der bewegten Detektionspunkte. Die effiziente Clustermethode verwendet ein 3D-Gitter aus der Range-Doppler-Matrix der 2D-FFT und der Winkelschätzung, um das Cluster-Fenster anhand der Zellindizes abzubilden. Darüber hinaus passt sich das Cluster-Fenster adaptiv an die verfolgte Objektkontur und -geschwindigkeit an.

Für die Aktionsplanung definiert eine Kostenfunktion unterschiedliche Bewertungsaspekte und -kriterien, um alle relevanten Informationen aus der Umfeldmodellierung, das potentielle Risiko und die Durchführbarkeit eines Manövers zu berücksichtigen. Nach diesen Kriterien werden die Kostenwerte berechnet, um mögliche Brems- oder Ausweichmanöver in einer kritischen Situation zu vergleichen. Das geeignetste Manöver davon wird entsprechend ausgewählt, das sowohl die Kollision vermeiden und gleichzeitig andere Verkehrsteilnehmer schützen kann.

Bei der Auswertung mit Messdaten haben die entwickelten Ansätze der Umfeldmodellierung und der Aktionsplanung eine sehr gute Performance erzielt.



# Abstract

Automotive radar technology has made enormous progress in recent years. The high-resolution radar sensor has the ability to perceive the vehicle's surrounding environment precisely through thousands of detection points in each measurement cycle. As a consequence, it is necessary to develop suitable approaches for environmental modeling and action planning in the radar-based driver assistance system. Many novel algorithms are well-known to process camera and lidar data. They need adaptation and improvement to satisfy the requirements and properties of a high-performance radar.

This work presents a concept of environmental modeling with high-resolution radar data. An occupancy grid map is created from the static detection points by a special radar sensor model built on the basis of the reflection amplitude. An interval-based free space model is defined along the future trajectory of the vehicle and then recognized in the occupancy grid map. For the task of self-localization, various Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) methods are implemented, optimized and then compared for realizing a suitable radar SLAM technique. This makes radar odometry possible. It means that the position of the vehicle in an environment map can be determined by relying solely on radar data. By grouping the moving detection points that belong to the same object, a model-based object list is generated to model the dynamic environment. An efficient clustering approach utilizes the 3D-grid originally from the 2D-FFT (i.e. Range-Doppler Matrix) and the following angle estimation. This forms a clustering window decided by the grid indices. In addition, the clustering window can be adapted according to the tracked contour and speed of an object.

For the action planning, a dedicated cost function defines diverse evaluation aspects and criteria, in order to take all relevant information from the environmental model, the potential risk and the feasibility of a maneuver into account. Using the cost values according to the criteria, the possible braking and evasive maneuvers in a critical situation can be compared. The most suitable one is then selected, which can both avoid the imminent collision and protect other road users at the same time.

By validation with various measurement data, the developed approaches of environmental modeling and action planning have achieved very high performance.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Hintergrund und Zielsetzung der Arbeit.....	1
1.2. Inhalt der Arbeit.....	2
<b>2. Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1. Fahrerassistenzsystem.....	4
2.2. Perzeption.....	6
2.2.1. Umfeldmodellierung.....	7
2.2.2. Eigenlokalisierung.....	8
2.3. Aktionsplanung.....	10
2.3.1. Situationsanalyse.....	10
2.3.2. Entscheidungsstrategie der Manöverauswahl.....	13
<b>3. Hochauflösender Radarsensor und Systemkonzept.....</b>	<b>16</b>
3.1. Hochauflösender Radarsensor.....	16
3.1.1. Hardware und Signalverarbeitung.....	16
3.1.2. Transformation der Koordinaten.....	18
3.1.3. Bestimmung des Bewegungszustands.....	18
3.2. Konzept des radarbasierten Systems.....	19
<b>4. Statische Umgebungsmodellierung.....</b>	<b>22</b>
4.1. Stand der Technik.....	22
4.2. Koordinatensystem der Belegungsgitterkarte.....	24
4.3. Belegungsgitterkarte.....	27
4.3.1. Radar-Sensormodel.....	28
4.3.2. Belegungswahrscheinlichkeit.....	31
4.3.3. Ergebnis und Diskussion.....	35
4.4. Freiraumdetektion.....	37
4.4.1. Bestimmung des Belegungsstatus.....	37
4.4.2. Clustern der Gitterzellen.....	39
4.4.3. Randerkennung.....	40
4.4.4. Freiraummodell.....	41
4.4.5. Ergebnis und Diskussion.....	43
4.5. Zusammenfassung.....	44
<b>5. Fahrzeuglokalisierung.....</b>	<b>46</b>

## *Inhaltsverzeichnis*

5.1. Stand der Technik .....	46
5.2. Radar-SLAM .....	47
5.2.1. Messfaktor .....	48
5.2.2. Bewegungsfaktor .....	59
5.2.3. Graph-Optimierung.....	59
5.2.4. Ergebnis und Diskussion .....	60
5.3. Lokalisierung in gespeicherter Karte.....	62
5.3.1. Kartenerstellung.....	63
5.3.2. Lokalisierung mit Radar-Odometrie.....	66
5.4. Zusammenfassung .....	69
<b>6. Dynamische Umgebungsmodellierung .....</b>	<b>71</b>
6.1. Vorgehensweise zur Erstellung der Objektliste .....	71
6.2. Clustern der Detektionspunkte .....	73
6.2.1. Analyse der DBSCAN-Clustermethode .....	73
6.2.2. 3D-Gitter .....	77
6.2.3. Gitterbasierter DBSCAN-Algorithmus .....	79
6.2.4. Ergebnis und Diskussion .....	81
6.3. Objektklassifikation und -verfolgung.....	84
6.4. Adaptive Clustermethode .....	88
6.4.1. Problemanalyse.....	88
6.4.2. Modellbasiertes Cluster-Fenster .....	90
6.4.3. Ergebnis und Diskussion .....	92
6.5. Zusammenfassung.....	93
<b>7. Aktionsplanung zur Kollisionsvermeidung.....</b>	<b>95</b>
7.1. Definition des Manövers .....	95
7.2. Bewertungsaspekte und -kriterien .....	97
7.2.1. Nutzen .....	98
7.2.2. Umgebung.....	100
7.2.3. Risiko .....	100
7.2.4. Durchführbarkeit.....	101
7.2.5. Akzeptanz .....	102
7.3. Kostenfunktion .....	102
7.3.1. Kosten nach Kriterien .....	102
7.3.2. Kosten unter unterschiedlichen Aspekten .....	104
7.3.3. Gesamtkosten.....	105
7.4. Simulationen und Ergebnisse .....	106

7.5. Messungen und Ergebnisse.....	110
7.6. Zusammenfassung.....	113
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>115</b>
8.1. Zusammenfassung der Ergebnisse.....	115
8.2. Ausblick.....	117
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>119</b>
<b>Veröffentlichungen im Rahmen der Arbeit.....</b>	<b>130</b>

# Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

ADAS	Fahrerassistenzsysteme Advanced Driver Assistance Systems
ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
AEB	Autonomes Notbremsssystem Autonomous Emergency Braking
BASD	Binary Annular Statistics Descriptor
BRISK	Binary Robust Invariant Scalable Keypoints
CAN	Controller Area Network
CCL	Connected Component Labelling
CFAR	Constant False Alarm Rate
CTRA	Constant Turn Rate and Acceleration
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DML	Deterministic Maximum Likelihood
EKF	Extended Kalman Filter
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EuroNCAP	European New Car Assessment Programme
FANN	Fast Approximate Nearest Neighbors
FAST	Features from Accelerated Segment Test
FFT	Schnelle Fourier-Transformation Fast Fourier Transformation
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FN	Falsch Negativ
FoV	Sichtfeld, Field of View
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FSCD	Features from Scattering Center Detector
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ID	Identifikator
IMU	Inertiale Messeinheit Inertial Measurement Unit
KOS	Koordinatensystem
Lkw	Lastkraftwagen
MNT	Moore-Neighbor Tracing
MTI	Moving Target Indication
RANSAC	RANdom SAMple Consensus
RGB	Rot, Grün und Blau
RMSD	Quadratisches Mittel der Abweichung Root-Mean-Square-Deviation
RO	Radar-Odometrie
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping

SURF	Speeded Up Robust Features
TTC	Time To Collision
TTE	Time To Enter
TTL	Time To Leave
TTR	Time To Reaction
UP	Unvollständig Positiv
VP	Vollständig Positiv

## Notationsvereinbarungen

$O_{ego}$	Variable des Egofahrzeuges
$O_{obj}, O_o$	Variable des Objektes
$O_i$	Variable des $i$ -ten Detektionspunktes
$O_x$	Variable in $x$ -Richtung
$O_y$	Variable in $y$ -Richtung
$O_k$	Variable im $k$ -ten Messzyklus
$O^g$	Variable im Koordinatensystem der Gitterkarte
$ A $	Menge der Elemente in $A$
$sgn()$	Signumfunktion
$abs()$	Betragsfunktion
$A?B;C$	Wenn die Bedingung A wahr ist, dann ist es B. Ansonsten C.

## Häufig verwendete Symbole

$\Delta a$	Änderungsrate der Längsbeschleunigung
$a_{ego}$	Längsbeschleunigung des Egofahrzeuges
$A_i$	Reflexionsamplitude eines Detektionspunktes
$A_i^N$	Kompensierte Reflexionsamplitude
$A_l$	Reflexionsamplitude einer Landmarke
$a_{l,max}$	Maximale Längsbeschleunigung
$a_m$	Längsbeschleunigung eines Manövers
$a_{max}$	Maximale Gesamtbeschleunigung
$a_{q,max}$	Maximale Querb beschleunigung
$a_0$	Längsbeschleunigung zu Beginn eines Manövers
$\vec{B}_l$	Vergleichsergebnisse der statistischen Elemente im BASD
$\mathcal{C}$	Detektionspunkte in einem Cluster
$d_{lat}$	Maximaler seitlicher Versatz zur Referenztrajektorie
$d_{min}$	Minimaler Abstand zwischen dem Egofahrzeug und dem Zielobjekt
$\Delta d_{n,i}$	Abstand zwischen $P_i$ und dem nächstgelegenen Punkt
$d_r$	Räumlicher Abstand in der $r$ -Dimension
$d_{rel}$	Relativer Abstand in Richtung des Objektes
$d_{statisch}$	Minimale Breite des Freiraums
$D(\mathbf{R}_r, \vec{T}_r)$	Residuen bei der Methode der kleinsten Quadrate

## Symbolverzeichnis

$d_{sw}$	Schwellenwert des Abstandes zwischen einem Punkt und seinem Nachbarpunkt
$d_v$	Geschwindigkeitsdifferenz in der $v$ -Dimension
$d_\theta$	Räumlicher Abstand in der $\theta$ -Dimension
$\vec{E}$	Kinematische Daten des Egofahrzeuges
$\vec{E}_{l,j}$	Statistische Elemente eines Ringes im BASD
$f(\vec{X})$	Prädiktionsfunktion
$g$	Erdbeschleunigung
$\mathbf{H}$	Beobachtungsmatrix
$H_{a-b}$	Hamming-Abstand zwischen Merkmalsvektoren der zwei Landmarken
$\mathbf{I}$	Identitätsmatrix
$i_{r,i}$	Index des Radialabstandes
$i_{v,i}$	Index der Dopplergeschwindigkeit
$i_{\theta,i}$	Index des Einfallwinkels
$J(\vec{X})$	Jacobi-Matrix von $f(\vec{X})$
$\mathbf{K}$	Kalman-Gain-Matrix
$k_{ab}$	Abschwächungsfaktor des Detektionswertes
$k_m$	Kosten eines Manövers
$k_N$	Kosten unter einem Aspekt
$l_c$	Länge eines Objektes
$\ell_k$	Log-Odds-Ratio der A-posteriori-Wahrscheinlichkeit
$\ell_o$	Log-Odds-Ratio der initialen A-posteriori-Wahrscheinlichkeit
$n_c$	Menge der gruppierten Punkte
$n_m$	Menge der gemessenen Punkte
$n_r$	Menge der Ringe im BASD
$n_{sw}$	Schwellenwert der Menge der Nachbarpunkte
$N_i$	Nachbarpunkte eines Detektionspunktes
$P_i$	Detektionspunkt
$\mathbf{P}_k$	Kovarianzmatrix
$p_k$	Detektionswahrscheinlichkeit
$p_k^S$	Skalierter Wert der Detektionswahrscheinlichkeit
$p_{th}$	Detektionswahrscheinlichkeit in der Prognosemethode
$p_{1:k}$	A-posteriori-Wahrscheinlichkeit
$\mathbf{Q}$	Matrix des Prozessrauschens
$\mathbf{R}$	Matrix des Messrauschens
$\Delta r$	Zellengröße in der $r$ -Dimension
$r_i$	Radialabstand eines Detektionspunktes
$r_{inner}$	Innenradius des Rings im FSCD
$r_j$	Radius des Kreises im BASD
$r_{min}$	Minimaler Kurvenradius einer Trajektorie
$r^N$	Bezugsabstand zur Kompensation der Reflexionsamplitude
$r_{outer}$	Außenradius des Rings im FSCD
$\mathbf{R}_r$	Rotationsmatrix

$S_{\text{überlapp}}$	Größe des Überlappungsbereichs der Kollision
$T$	Prädiktionsdauer
$\Delta t$	Schrittweite der Prädiktion
$t_{\text{invert}}$	Zeit bis zur Richtungsänderung der Gierrate
$t_k$	Zeitpunkt der Prädiktion
$t_{l,a}, t_{l,\dot{\varphi}}$	Latenzzeit
$\vec{T}_r$	Translationsvektor
$t_{TTC}$	Modifizierte TTC
$t_{-\dot{\varphi}_m}$	Latenzzeit der Richtungsänderung der Gierrate
$\Delta v$	Zellengröße in der $v$ -Dimension
$v_c$	Durchschnittliche Geschwindigkeit einer Clustergruppe
$v_{ego}$	Geschwindigkeit des Egofahrzeuges
$v_{end}$	Geschwindigkeit am Manöverende
$v_i$	Dopplergeschwindigkeit eines Detektionspunktes
$v_{kol}$	Kollisionsgeschwindigkeit
$\mathbf{V}_{l,j}$	Amplituden aller Gitterzellen im Ring im BASD
$v_{MTI}$	Schwellenwert der Geschwindigkeitsdifferenz beim MTI
$\Delta v_{n,i}$	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen $P_i$ und dem in der $v$ -Dimension nächsten Punkt
$v_{rad}$	Geschwindigkeit des Radarsensors
$v_{rel}$	Relative Geschwindigkeit in Richtung des Objektes
$\mathbf{U}_{Rot}$	Kompensationsmatrix der Bewegung des Egofahrzeuges
$\vec{U}_{Trans}$	Kompensationsvektor der Bewegung des Egofahrzeuges
$\mathbf{W}$	Datensatz einer Punktwolke
$w_k$	Detektionswert einer Gitterzelle
$w_N$	Gewichtung eines Aspektes
$w_{th,max}$	Obergrenze des Detektionswertes
$w_{th,min}$	Untergrenze des Detektionswertes
$\vec{X}_{ego}$	Zustandsvektor des Egofahrzeuges im EKF
$\vec{X}_O$	Zustandsvektor des Objektes im EKF
$x_c, y_c$	Position des Mittelpunktes einer Clustergruppe
$x_{ego}, y_{ego}$	Position des Egofahrzeuges
$x_i, y_i$	Position eines Detektionspunktes
$x_l, y_l$	Position einer Landmarke
$x_{rad}, y_{rad}$	Einbauposition des Radarsensors
$\vec{Z}$	Beobachtungsvektor
$\mathbf{Z}_{N,i}$	Nachbarzellen eines Detektionspunktes
$Z(P)$	Belegte Gitterzelle eines Detektionspunktes
$\mathbf{Z}_W$	Belegte Gitterzellen einer Punktwolke
$\alpha_{kol}$	Kollisionswinkel
$\alpha_r$	Verhältnis zwischen den Kreisradien im BASD
$\Delta\theta$	Zellengröße in der $\theta$ -Dimension
$\theta_i$	Einfallwinkel eines Detektionspunktes

## *Symbolverzeichnis*

$\theta_{v,i}$	Winkel zwischen Geschwindigkeiten des Radarsensors und eines Detektionspunktes
$\Delta\dot{\varphi}$	Änderungsrate der Gierrate
$\varphi_{ego}$	Gierwinkel des Egofahrzeuges
$\dot{\varphi}_{ego}$	Gierrate des Egofahrzeuges
$\Delta\varphi_{end}$	Gierwinkelabweichung am Manöverende
$\dot{\varphi}_m$	Gierrate eines Manövers
$\dot{\varphi}_0$	Gierrate des Egofahrzeuges zu Beginn eines Manövers