Henning Ritter

Fußgängererkennung und Situationsanalyse mit 24 GHz Radarsensoren

Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Fußgängererkennung
und Situationsanalyse
mit 24 GHz Radarsensoren

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Fußgängererkennung und Situationsanalyse mit 24 GHz Radarsensoren

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von
Henning Ritter

aus
Geesthacht

2013

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2013
Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2013

978-3-95404-377-4

1. Gutachter:	Prof. Dr. rer.nat. Dr. h.c. Hermann Rohling
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Rolf Kraemer
Tag der mündlichen Prüfung:	04.03.2013

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2013
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-95404-377-4

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Vorwort

Es ist eine große Bereicherung, vier Jahre an einer Universität forschen, arbeiten und lehren zu dürfen. Die Vielfältigkeit der Aufgaben übertraf meine Erwartungen und bot unbeschränkte Möglichkeiten zur eigenen Weiterbildung. Das Klima an einer Hochschule ist ein besonderes. Neben der Kontinuität der sich wiederholenden Vorlesungen und Semester herrscht beständige Aufbruchstimmung in Forschungsprojekten, bei Absolventen sowie auch bei den Studienanfängern. Dieser frische Wind ist einzigartig und hat mich stets motiviert. Allen Unterstützern dieser Arbeit spreche ich meinen herzlichen Dank aus. Es können nur wenige namentlich genannt werden.

Für die wissenschaftliche Betreuung bei meiner Dissertation möchte ich mich bei Prof. Dr. Hermann Rohling bedanken. Auf seine Initiative hin habe ich das Thema Fußgängererkennung am Institut aufgenommen und neben Projekten mit der Industrie bearbeiten dürfen. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr. Rolf Kraemer und Prof. Dr. Ernst Brinkmeyer für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens bzw. des Prüfungsvorsitzes.

Auch meinen Kollegen, allen Mitarbeitern sowie den Studenten am Institut, gilt großer Dank. Hilfreiche Diskussionen, tatkräftige Unterstützung und das besonders gute Arbeitsklima haben mir große Freude bereitet. Mit Markus Böhning, Christof Möller und Stephan Müller habe ich in unterschiedlichen Projekten viele Untersuchungen und Messungen gemeinsam durchführen dürfen. Ich danke Euch für die hervorragende Teamarbeit und unvergessliche Erlebnisse.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Besonderer Dank gilt meiner Familie. Meine Eltern und mein Bruder Stephan unterstützen mich liebevoll auf meinem ganzen Lebensweg und geben mir Rückhalt. Meiner Frau Lena danke ich in Bezug auf diese Arbeit speziell für die zusätzliche Geduld und Zeit, die sie mir geschenkt hat. Auch unseren beiden Söhnen Noah und Jonah gilt Dank. Jede Ablenkung zum Spielen hat mir Freude bereitet und mich danach noch darin bestärkt die Dissertation voranzutreiben. Vielen Dank!

Lübeck, März 2013 Henning Ritter

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Anwendungsgebiete für 24 GHz Radarsensoren **5**

2.1 Radarsensoren für Kraftfahrzeuge 6

2.2 Geländeüberwachung mit Radarsensoren 10

2.3 Aufgabenstellung 13

3 24 GHz Radarsensorik **19**

3.1 Messgrößen 21

3.1.1 Entfernungsmessung 22

3.1.2 Radiale Geschwindigkeit 22

3.1.3 Empfangsamplitude 24

3.1.4 Azimutwinkel 24

3.2 Sendesignalformen 29

3.2.1 Pulsradar 30

3.2.2 Puls-Doppler-Radar 32

3.2.3 Monofrequentes Radar 34

3.2.4 Linear frequenzmoduliertes Radar 35

3.2.5 Frequenzumtastendes Meßverfahren 37

3.2.6 Linear modulierte Frequenzumtastung 39

3.3 Zieldetektion 40

3.3.1 CA-CFAR 42

3.3.2 CAGO-CFAR 43

3.3.3 OS-CFAR 44

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.4 Clusterbildung 46
3.5 Tracking 47

4 Fußgängererkennung mit 24 GHz Radarsensoren 53
4.1 Modellbildung 56
4.1.1 Reflexionsmodell eines Fußgängers 57
4.1.2 Reflexionsmodell eines Kraftfahrzeuges 65
4.2 Radarsimulation 66
4.2.1 Simulation von Entfernungsprofilen (Bandbreite) 67
4.2.2 Simulation von Dopplerspektren (Time-on-Target) 68
4.3 Messtechnische Validierung 71
4.3.1 Entfernungsprofile 73
4.3.2 Dopplerspektren 74
4.4 Signalmerkmale für den Klassifikationsprozess 77
4.4.1 Entfernungsprofilbreite 79
4.4.2 Dopplerprofilbreite 83
4.4.3 Empfangsamplitude 87
4.5 Klassifikationsergebnisse 89
4.5.1 Klassifikationsergebnisse für die radiale Ausdehnung 90
4.5.2 Klassifikationsergebnisse für das Geschwindigkeitsprofil 90
4.5.3 Klassifikationsergebnisse für die Empfangsamplitude 91
4.5.4 Klassifikationsergebnisse bei Merkmalskombination 92
4.5.5 Klassifikationsergebnisse auf Trackebene 93

5 Situationsanalyse mit 24 GHz Radarsensoren 97
5.1 Testfahrzeug 98
5.1.1 Radarsensoren 99
5.1.2 Sensoren zur Messung der Eigenbewegung 102
5.1.3 Verarbeitungsprogramm 103
5.2 Abbildung der Eigenbewegung 104
5.3 Objekttrajektorien 106
5.3.1 Bewegungskompensation 107
5.3.2 Laterale Geschwindigkeit von Objekten 110

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.3 Güte von Objekttrajektorien 116
5.4 Abbildung von Situationen 118
5.5 Quantitative Beschreibung der Kollisionsgefahr 121
5.5.1 Simulation 125
5.5.2 Auswertung von Messdaten 127

6 Zusammenfassung **131**

Anhang **135**

A Puls-Doppler-Radar **135**

B Signalverarbeitungskette **139**
B.1 Rohdaten 141
B.2 Verstärkungs- und Phasenkorrektur 142
B.3 Überführung in den Spektralbereich 144

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Kapitel 1

Einleitung

Der technische Fortschritt hat in den letzten einhundert Jahren das Leben der Menschen in den Industrieländern revolutioniert. Heute finden wir Technik in allen Bereichen des Alltags. Eine wichtige technische Errungenschaft, die aus dem Leben der meisten Menschen nicht mehr wegzudenken ist, ist das Automobil. Im Jahr 2010 waren bei einer Einwohnerzahl von ca. 68 Mio. volljährigen Bundesbürgern über 41 Mio. Personenkraftwagen zugelassen [Bun10a]. Statistisch gesehen teilten sich also nur 1,7 Erwachsene ein Auto. Die Tendenz ist steigend. Die fast unbegrenzte Mobilität bringt nicht nur Annehmlichkeiten mit sich. Mit der stetig steigenden Zahl der zugelassenen Fahrzeuge stieg bis 1970 ebenso die Zahl der getöteten Verkehrsteilnehmer. Das Sicherheits- und Gesundheitsbewußtsein der Menschen rückt in den letzten Jahrzehnten immer mehr in den Vordergrund. Dies ist auch an der Entwicklung der Sicherheitssysteme in Kraftfahrzeugen zu sehen, die in ihrer über 125 jährigen Geschichte eine enorme Wandlung vollzogen haben (Abbildung 1.1). Zunächst kamen in den 70er Jahren passive Systeme wie Sicherheitsgurte und Kopfstützen auf den Markt [BS03]. Die Anzahl der in Deutschland getöteten Verkehrsteilnehmer nahm infolgedessen von 21332 im Jahr 1970 auf 15050 im Jahr 1980 rapide ab, obwohl der Bestand an Fahrzeugen im gleichen Zeitraum um über 50% anstieg [Bun10b]. Bremsleuchten sind eine frühe Form der aktiven und elektronischen Sicherheitssysteme. Die Serieneinführung von Antiblockiersystemen (ABS) und Airbags bei den großen Automobilherstellern in den 80er Jahren brachte erneut einen enormen Sicherheitsvorteil und half mit, die Anzahl der Verkehrstoten weiter sinken zu lassen. Im Jahr 2010 sind 3648 Menschen in Deutsch-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 1.1: Benz Patent-Motorwagen 1 von 1886

land bei Verkehrsunfällen getötet worden. Die Sicherheit im Automobil ist heute sehr hoch, doch bei der Sicherheit im Straßenverkehr, z.B. für Fußgänger, gibt es noch enorm viel Verbesserungspotential.

In den Anfängen der Technik gab es kaum oder gar keine Sensoren. Der Bediener einer Maschine übernahm die Aufgaben der Sensorik, steuerte und regelte alle notwendigen Einstellungen selbst. Heute begegnen uns Sensoren in fast allen technischen Produkten und nehmen uns Aufgaben ab oder erhöhen die Bedienungssicherheit. Wollen wir in unser Auto einsteigen und öffnen dazu die Autotür, geht wie selbstverständlich die Innenraumbeleuchtung an. Ein einfacher Schalter in der Türzarge ist der Sensor, der das Öffnen der Tür erkennt und uns die Aufgabe des Einschaltens abnimmt. Beim Starten des Motors überwachen Sensoren die Abgase und den Tankfüllstand.

In dieser Arbeit geht es um Radarsensoren. Autofahrer schätzen kontinuierlich Entfernung und Geschwindigkeit, allerindgs mit einer sehr limitierten Genauigkeit. Radarsensoren unterstützen den Autofahrer und messen die Objektparameter mit hoher Genauigkeit. Aufgrund ihrer geringen Baugröße sind sie sehr einfach in Automobilen zu integrieren. Längst haben Radarsensoren Einzug in die Modelle der Oberklasse aller großen Automobilherstel-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ler gehalten. Dort bedienen sie heute Funktionen wie die automatische Abstandsregelung (ACC) und den Spurwechselassistenten (SWA). In diesen Anwendungen werden die gemessene Objektentfernung und die -geschwindigkeit ausgewertet. Der Einsatz ist für einfache Verkehrssituationen auf Autobahnen ausgerichtet. Eine detaillierte Situationsanalyse ist in diesem Fall nicht erforderlich.

Die Sensoren sind derzeit in den meisten Einsatzfällen jeweils ausschließlich für eine Funktion zuständig und sie messen nur die für die Applikation notwendigen Daten. Der ACC-Radarsensor beispielsweise abstrahiert die Zielinformationen so weit, dass er nur noch Befehle zum Gasgeben und Abbremsen an die Motorsteuerelektronik übermittelt. Es werden lediglich die Parameter aus dem Empfangssignal des Radarsensors extrahiert, welche für die Applikation unmittelbar benötigt werden. Das minimiert den technischen Aufwand, unterbindet aber die gewinnbringende Ausnutzung der Parameter auch in anderen Assistenzfunktionen. An dieser Stelle besteht großes Potential für Verbesserungen, denn im Empfangssignal eines Radarsensors sind viele bisher ungenutzte Parameter enthalten, die durch geschickte Prozessierung extrahiert werden können. Zwei Erweiterungen werden behandelt, die eine wichtige Grundlage für den Einsatz von radarbasierten Komfort- und Sicherheitssystemen im komplexen und unübersichtlichen Stadtverkehr bilden. Zum einen handelt es sich um die automatische Objekterkennung von Fußgängern und Fahrzeugen, zum anderen wird eine umfangreiche Situationsanalyse vorgestellt. Durch Extraktion aller im Radarrückstreusignal verfügbaren Merkmale wird ein weitaus detaillierteres digitales Abbild der Umwelt erstellt, als es bisher in Anwendungen der Fall ist. Ohne die Sensorik selbst zu verändern, können damit neue Funktionen bedient werden. Dem Messvektor $y(k)$ werden neben den üblichen Messgrößen eines Radarsensors, bestehend aus Objektentfernung r, radialer Objektgeschwindigkeit v_r und Azimutwinkel φ, auch die Klassenzugehörigkeit *Fahrzeug* oder *Fußgänger* und weitere die Verkehrsituation beschreibende Merkmalswerte angehängt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Kapitel 2

Anwendungsgebiete für 24 GHz Radarsensoren

Die Radartechnik blickt auf eine über 100-jährige Geschichte zurück. Damals beschäftigte sich Christian Hülsmeyer mit der Frage, wie die Schifffahrt bei schlechter Sicht sicherer gemacht werden könnte. Seine Lösung war das erste Radargerät der Welt. Im April 1904 meldete Hülsmeyer seine Erfindung zum Patent an [Hül04] und führte schon am 18. Mai 1904 an der Hohenzollernbrücke am Rhein der Öffentlichkeit ein von ihm Telemobiloskop genanntes Gerät vor [Hol02]. Das Telemobiloskop war in der Lage, sich nähernde Schiffe durch ein Klingeln im Empfänger zu signalisieren und wurde von einer Batterie mit elektrischer Energie versorgt. Das Telemobiloskop war um 360 ° drehbar und es konnte daher auch die Richtung bestimmen, aus der das beobachtete Schiff kam.

Heute sind 24 GHz Radarsensoren ein kostengünstiges Serienprodukt und werden z.B für automatische Türöffner genutzt. Sich auf die Tür zubewegende Personen und Gegenstände werden erkannt und eine Tür rechtzeitig automatisch geöffnet. Diese Aufgabe kann mit einfachen monofrequenten Dopplersensoren gelöst werden, welche ausschließlich bewegte Ziele in ihrem Beobachtungsbereich auf ihre radiale Geschwindigkeit zum Radar hin vermessen. Diese Sensoren sind weder in der Lage Entfernungen zu messen, noch diese zu schätzen. Nach gleichem Prinzip arbeiten auch einfache Radarpistolen (Abbildung 2.1), mit denen die Geschwindigkeit von reflektierenden Objekten sehr präzise vermessen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

werden kann. Dopplersensoren blenden nicht bewegte Ziele aus, was für die genannten Einsatzzwecke von großem Vorteil ist.

Abbildung 2.1: Radarpistole zur Vermessung der radialen Geschwindigkeit

Die Miniaturisierung der Elektronik und die Verfügbarkeit von leistungsfähigen aber kostengünstigen digitalen Signalprozessoren machte in den letzten 20 Jahren die Entwicklung von kleinen Radarsensoren mit eigener integrierter Signalverarbeitung möglich. Für den Betrieb benötigen diese ausschließlich eine externe Energieversorgung. Die intelligenten Sensoren bestimmen nicht nur die Position und relative Geschwindigkeit von Objekten, sondern führen auch das Tracking selbständig durch. Hierbei werden bei der Beobachtung eines Objektes die zeitlich aufeinanderfolgenden Zielmeldungen als Bewegungsspur gesammelt. Die entstehenden Ziel- und Tracklisten werden an die Applikationen über einen Datenbus weitergereicht. Durch die universelle Einsetzbarkeit steigt die Verbreitung im Automobilbereich und zahlreichen anderen Aufgabenfeldern, wie der Geländeüberwachung, stetig an.

2.1 Radarsensoren für Kraftfahrzeuge

In Kraftfahrzeugen werden heute Radarsensoren für verschiedene Aufgaben genutzt. Menschen können sowohl die Entfernung zu anderen Fahrzeugen oder Objekten im Straßenverkehr als auch deren Geschwindigkeit nur sehr ungenau schätzen. Diese Tatsache ist Ursache für viele Auffahrunfälle. Radarsensoren spielen hier ihre Stärken aus. Sie können

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

die fehlenden Parameter präzise vermessen und leiten sie an die Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme weiter.

Gegenüber den klassischen Anwendungsgebieten in der Luft- und Schifffahrt stellt die Beobachtung des Straßenverkehrs eine besondere Herausforderung an die Sensorik dar. Die große Anzahl von Objekten auf engem Raum im Sichtbereich führt zu vielen Detektionen im Sensor. Diese Szenarien werden als Mehrzielsituationen bezeichnet. Der Radarsensor muss in der Lage sein, alle Ziele zu detektieren und voneinander zu trennen. Das kann über eine hohe Entfernungs- und Geschwindigkeitsauflösung sowie mit speziellen Sendesignalformen [RM08] und dem Tracking erreicht werden. Weiterhin werden im Automobilbereich eine kurze Messzeit sowie die wirksame Unterdrückung von falschen Detektionen gefordet.

Die Reichweite von Automobilradaren beginnt bei 50 m für Kurzbereichsradare und geht bis zu 250 m für Weitbereichsradare. Die Kurzbereichsradare haben dabei einen viel breiteren Sichtbereich von typischerweise $\pm 25°$ gegenüber den Weitbereichsradaren mit Öffnungswinkeln von typischerweise $\pm 10°$. Von der Applikation hängt es ab, welcher Sensortyp eingesetzt werden kann. Weitbereichstypen sind hauptsächlich für den Einsatz auf Autobahnen gedacht und kommen beim ACC zum Einsatz. Auch die Messung des horizontalen Winkels (Azimutwinkel) ist für den Einsatz im Automobil wichtig. Die Entfernung und der Azimutwinkel zum Objekt sind vollständige Polarkoordinaten und beschreiben eine eindeutige Position in der Ebene. Erst mit dieser Messgröße kann z.B. die Zuordnung der Fahrspur zu einem bewegten Objekt durchgeführt werden.

Die automatische Abstandsregelung (ACC) war die erste serienreife Anwendung verkehrsbeobachtender Radarsensoren in Automobilen und war zunächst ausschließlich für die Nutzung auf Autobahnen konzipiert. 1997 brachte Toyota den ersten abstandsgeregelten Tempomaten im Lexus LS auf den japanischen Markt. Ein Radarsensor im Kühlergrill vermisst die Position und relative Geschwindigkeit aller vorausfahrenden Fahrzeuge und führt mit dem integrierten Objekttracking auch eine Fahrspurzuordnung der Objekte durch. Als Eingangsgröße für das Tracking empfängt der ACC-Radarsensor die Eigengeschwindigkeit, den Lenkwinkel und den Kurvenradius des eigenen Fahrzeuges. Diese zusätzlichen Messgrößen sind zur Schätzung der Fahrspur notwendig.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.