

Sylvia Horn

Ein mengenbasierter Multifusionsansatz zur Navigation mobiler
Plattformen mit garantierter Kollisionsfreiheit

Beiträge aus der Automatisierungstechnik

Sylvia Horn

**Ein mengenbasierter Multifusionsansatz zur
Navigation mobiler Plattformen mit garantierter
Kollisionsfreiheit**

 VOGT

Dresden 2014

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2014

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation „Ein mengenbasierter Multifusionsansatz zur Navigation mobiler Plattformen mit garantierter Kollisionsfreiheit“ von Sylvia Horn überein.

© Jörg Vogt Verlag 2014

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-78-6

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Automatisierungstechnik

**Ein mengenbasierter Multifusionsansatz zur
Navigation mobiler Plattformen mit garantierter
Kollisionsfreiheit**

Sylvia Horn

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. K. Röbenack (TU Dresden)

Gutachter: Prof. Dr. techn. K. Janschek (TU Dresden)
Prof. Dr.-Ing. J. Adamy (TU Darmstadt)

Tag der Einreichung: 06.01.2014

Tag der Verteidigung: 28.07.2014

Über die Autorin

Sylvia Horn wurde am 30. April 1978 in Freiberg (Sachs.) geboren. Nach dem Abschluss des Abiturs 1996 am Gymnasium „Geschwister Scholl“ in Freiberg (Sachs.) und einen halbjährigen Aufenthalt in Großbritannien begann sie das Studium im Fach Elektrotechnik an der Technischen Universität Dresden mit der Vertiefungsrichtung Automatisierungs- und Regelungstechnik. Dabei absolvierte sie mehrere Praktika, unter anderem bei der AUDI AG in Ingolstadt, und arbeitete als studentische Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden. Nach ihrem Diplomabschluss im Sommer 2003 arbeitete sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Automatisierungstechnik der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden. Dort promovierte sie im Juli 2014 mit der vorliegenden Arbeit zum Doktor-Ingenieur. Aktuell ist sie am Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) beschäftigt.

Danksagung

Die Anfertigung dieser Dissertation wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung, die ich von vielzähligen Personen erhalten habe und denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Mein erster großer Dank gebührt dem Betreuer meiner wissenschaftlichen Arbeit Prof. Dr. techn. Klaus Janschek, der mir die Promotion am Institut ermöglichte, über die Jahre immer an meiner Arbeit interessiert war und diese aktiv förderte. Die vielfältigen Aufgaben am Institut, die Lehrtätigkeit und die familiäre Atmosphäre in meiner Arbeitsgruppe habe ich sehr genossen. Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens sowie wertvolle ergänzende Hinweise.

Meinen Kollegen danke ich für ihr Engagement, welches in jeder Hinsicht vielseitig war. So waren es die kleinen Hilfestellungen bei technischen und administrativen Fragen oder die regelmäßigen Kaffeerunden, die ein flüssiges

Arbeiten ermöglichten. Auf die vielen wissenschaftlichen Diskussionen, die anregenden Gespräche über Alltägliches und die Exkursionen jenseits des S-Ganges blicke ich gern zurück. Unvergessen bleiben die Einführung in die Stein- und Sternenkunde, die ich durch meinen langjährigen Freund und Bürogenossen Martin Beck erhalten habe, die vielen Späße Matthias Hennigs oder all die vietnamesischen Köstlichkeiten Ngoc Anh Mais. Es ist sehr schade, dass wir jetzt nicht alle zusammen feiern konnten.

Einen großen Beitrag haben auch all jene Studenten geleistet, die ich innerhalb meiner Zeit am Institut betreuen durfte und die ihre Seminar-, Studien- und Diplomarbeiten unter meiner Verantwortung fertigstellten. Ihre Fragen und Einwände haben mich beständig dazu angehalten meine Überlegungen und Ausführungen kritisch zu überdenken.

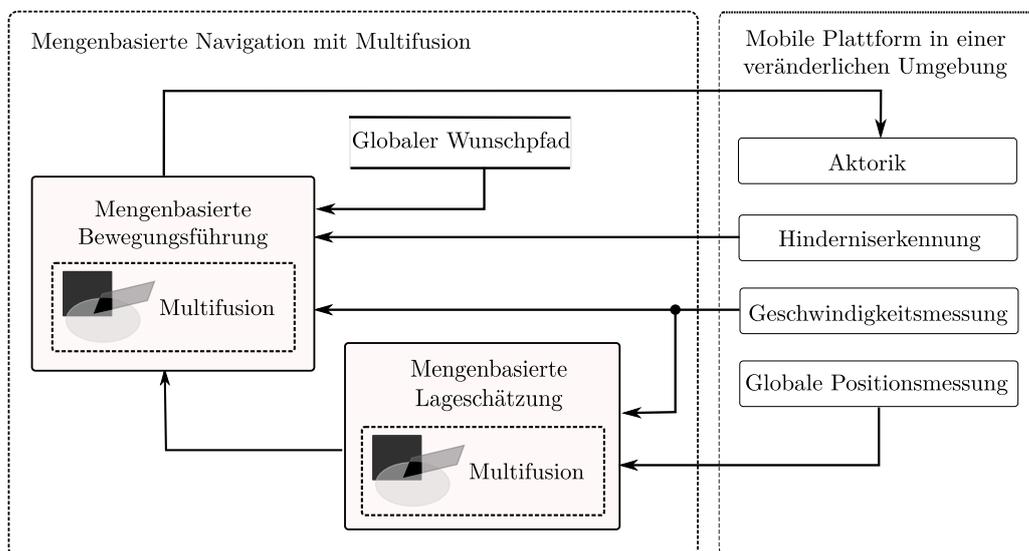
Nun bleibt mir nur noch zu sagen, dass das Vorhaben „Promotion“ ohne meine Familie und Freunde nicht möglich gewesen wäre, deren stetige Aufmunterung und Zuversicht mich bis ins Ziel getragen hat. Ausdrücklich danke ich Frank Schnitzer für seine ungezählten kritischen Kommentare und Katharina Susanne Jamet-Romahn für die eifrige Suche nach Stil- und Rechtschreibfehlern. Ebenso bin ich glücklich über die moralische und auch tatkräftige Unterstützung, die ich durch meine Eltern erhalten habe. Ihr wart und seid immer meine Vorbilder.

Zum Schluss möchte ich mich nun von ganzem Herzen bei meinem Ehemann André und meinen Kindern Theodor, Marla und Jonathan bedanken. Ihr habt mich mit eurem Vertrauen, eurer Liebe und mit unendlich viel Geduld immer auf meinem langen Weg zum Doktor unterstützt. Ich bin sicher, Ihr seid nun ebenso froh, dass es endlich soweit ist.

Sylvia Horn

Kurzfassung

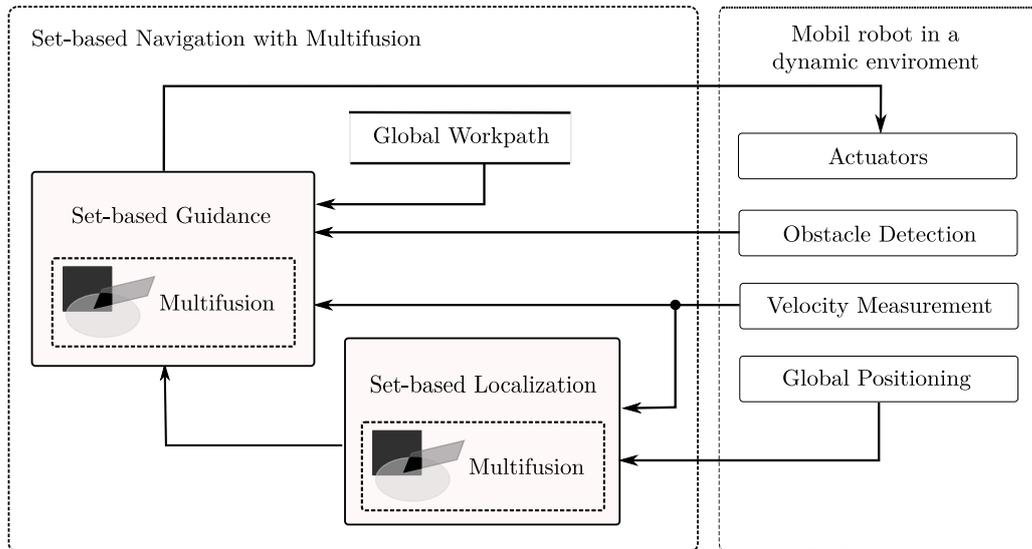
Eine autonome, mobile Plattform muss in der Lage sein, in einer ihr teilweise unbekannt und sich stetig ändernden Umwelt zu agieren. Damit verbunden ist die Erfassung von verschiedenen Informationen. Diese sind dabei grundsätzlich mit Störungen behaftet. Unter der Annahme, dass die Unbestimmtheiten sicher begrenzt sind, können die interessierenden Schätzgrößen als Mengen modelliert werden.



In dieser Arbeit wird ein mengenbasiertes Navigationskonzept vorgestellt, das die gegebenen Informationen sicher und zielführend verarbeiten kann. Um die notwendige hohe Genauigkeit bei der Lageberechnung der Plattform zu erreichen, werden möglichst vielfältige Informationen unterschiedlichster Quellen gesammelt und fusioniert, so dass ein insgesamt präziseres Schätzgebiet entsteht. Diese Verschmelzung der Informationen wird mengenbasierte Multifusion genannt. Das Prinzip der Multifusion lässt sich auch auf die Bewegungsführung übertragen. Bei dieser werden verschiedene Informationen verknüpft, um einen zielgerichteten und kollisionsfreien Pfad durch eine Umgebung mit unbekannt statischen und dynamischen Hindernissen zu berechnen. Die Verifikation der vorgestellten mengenbasierten Algorithmen erfolgt mit realen und simulierten Experimenten.

Abstract

An autonomous mobile platform must be able to operate in a partially unknown and dynamic environment. This requires the acquisition of diverse environmental information, which is generally affected by noise. Assuming that the probability distributions of the uncertainties are unknown, but bounded, interesting estimates can be modeled as sets.



This thesis introduces a novel set-based navigation concept, which handles set-based information safely and productive. To achieve a high degree of accuracy in the platform localization, multifarious information from different sources is gathered and merged to obtain a more precise pose estimation area. This merger is called set-based multifusion.

Similarly the principle of multifusion can be applied to the platform guidance. Here diverse information has also to be combined to calculate a collision-free path to the goal. The verification of the presented set-based algorithms was conducted via real and simulated experiments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.1.1	Mengenbasierte Verfahren zur Lokalisierung	3
1.1.2	Mengenbasierte Verfahren zur Bewegungsführung	6
1.2	Offene Probleme und eigene Beiträge	7
1.3	Anwendungsbeispiel	9
1.4	Aufbau der Arbeit	10
2	Mengentheoretische Grundlagen	13
2.1	Notation	13
2.2	Konvexe Mengen	14
2.2.1	Hyperquader	15
2.2.2	Parallelotope	16
2.2.3	Ellipsoide	17
2.3	Berechnung von Schnittmengen	17
2.4	Umschreibung von Mengen	20
3	Mengenbasierte Informationsfusion mittels Multifusionsansatz	23
3.1	Modellierung einer Größe als Menge	25
3.2	Prinzip der mengenbasierten Multifusion	25
3.3	Ablauf der mengenbasierten Multifusion	27
3.4	Umgang mit unterschiedlichen Dimensionen	30
4	Mengenbasierte Lageschätzung einer bewegten Plattform	33
4.1	Systembeschreibung	34
4.2	Mengenbasierte Zustandsschätzung mit Multifusion	34
4.2.1	Prädiktionsschritt	35
4.2.1.1	Prädiktion	35
4.2.1.2	Prädiktionsfusion	38
4.2.2	Aktualisierungsschritt	38
4.3	Ergebnis der mengenbasierten Zustandsschätzung	39
4.4	Mengenbasierte Lageschätzung mit Multifusion	39
4.5	Umgang mit Fehlerquellen	42

5	Ein mengenbasierter Ansatz zur Bewegungsführung	45
5.1	Dynamic Window Approach	46
5.2	Global Dynamic Window Approach	48
5.3	Set-based Global Dynamic Window Approach	50
5.3.1	Schätze Zustandsmenge bis Stillstand	51
5.3.2	Berechne Hindernismenge	55
5.3.3	Berechne Menge der erlaubten Geschwindigkeiten	58
5.3.4	Berechne Pfadpunktmenge	59
5.3.5	Wähle Stellbefehl	62
5.4	Umgang mit unbekanntem Hindernissen	66
6	Experimente und Verifikation	69
6.1	Demonstrator MP2	70
6.2	Demonstrator IfAbot	71
6.3	Adaption der mengenbasierten Lageschätzung	72
6.4	Lageschätzung – Experimente MP2	75
6.5	Lageschätzung – Simulationsexperimente IfAbot	78
6.5.1	Experimentreihe UBBkonform	79
6.5.1.1	Szenario Pfadfolgen UBBkonform	81
6.5.1.2	Szenario Kreis UBBkonform	84
6.5.1.3	Szenario Geradeaus UBBkonform	87
6.5.1.4	Szenario Zufall UBBkonform	87
6.5.2	Experimentreihe UBBähnlich	88
6.5.3	Experimentreihe UBBkonform RFID	90
6.6	Adaption des SGDWA	93
6.7	Experimente zur mengenbasierten Navigation	94
6.8	Benötigte Rechenzeit	104
7	Zusammenfassung und Ausblick	109
Anhang A	Weiterführende Grundlagen	115
A.1	Linearisierung nichtlinearer Gleichungen	115
A.2	Intervallarimetische Grundlagen	115
A.3	Schnittpunkte zweier Parallelotope	117
A.4	Berechnungen mit Ellipsoiden	118
A.4.1	Der shift-Operator	118
A.4.2	Überlappungstest für zwei Ellipsoide	118
A.4.3	Schnittmenge zweier Ellipsoiden	119
A.4.4	Minkowskisumme zweier Ellipsoiden	120

Anhang B Durchgeführte Experimente	123
B.1 Demonstrator MP2: Technische Details	123
B.2 Demonstrator IfAbot: Technische Details	126
B.2.1 Eingesetzte Hardware	127
B.2.2 Simulationsmodell des IfAbots	128
B.2.2.1 Plattformbewegung und Messung	128
B.2.2.2 Abstandsmessung mittels Laserscanner	129
B.2.2.3 Globale Positionsbestimmung	130
B.2.2.4 Eingesetzte Toolboxen	131
B.3 Demonstrator IfAbot: Lageschätzung	133
B.3.1 Experimentreihe UBBkonform	134
B.3.2 Experimentreihe UBBähnlich	139
B.3.3 Experimentreihe RFID UBBkonform	141
B.4 Demonstrator IfAbot: Navigation	146
Literaturverzeichnis	151

Abbildungsverzeichnis

1.1	Systemaufbau und Konfiguration des Anwendungsbeispiels. . .	9
1.2	Definition der verwendeten Koordinatensysteme	10
2.1	Darstellung konvexer und nichtkonvexer Mengen	15
2.2	Hyperquader, Parallelotop und Ellipsoid in \mathbb{R}^2	17
2.3	Darstellung der verschiedenen Schnittmengen	18
2.4	Darstellung der verschiedenen Umschreibungen	21
3.1	Ausgangslage	26
3.2	Ablauf der mengenbasierten Multifusion	28
3.3	Prinzip der Dimensionsanpassung	31
4.1	Ablauf der Zustandsschätzung mit Multifusion	35
4.2	Der <i>wrapping</i> -Effekt	36
4.3	Systemdefinition bei der mengenbasierten Lageschätzung . . .	40
5.1	Positions- und Geschwindigkeitsraum beim DWA	47
5.2	Prinzip des GDWA	50
5.3	Prinzip des SGDWA	51
5.4	Schätze Zustandsmenge bis Stillstand	53
5.5	Berechne Hindernismenge	56
5.6	Berechne Menge der erlaubten Geschwindigkeiten	58
5.7	Berechne Pfadpunktmenge	60
5.8	Berechne lokalen Ausweichpfad	63
6.1	Verwendete Demonstratoren	70
6.2	Bildung der globalen Positionsmessmenge	74
6.3	MP2: Ergebnisse der Lageschätzung	76
6.4	IfAbot Lageschätzung: Verteilung der RFID-Lesebereiche . . .	78
6.5	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Gefahrene Trajektorien .	80
6.6	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Pfadfolgen – Verteilung und Volumenverlauf	82
6.7	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Pfadfolgen – Lauf 71 . .	83

Abbildungsverzeichnis

6.8	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Kreisfahrt – Verteilung und Volumenverlauf	84
6.9	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Kreisfahrt – Lauf 420	85
6.10	IfAbot Lageschätzung UBBkonform: Geradeausfahrt – Lauf 45	86
6.11	Prinzip einer Positiv-Falschmessung	90
6.12	IfAbot Lageschätzung UBBkonform RFID: Lauf 161 und 432	92
6.13	Navigation: Verwendete RFID-Sensorsysteme, Teil 1	96
6.14	Navigation: Trajektorie eines repräsentativen Laufes	98
6.15	Navigation: Verwendete RFID-Sensorsysteme, Teil 2	102
6.16	Prinzip der Verklemmung bei großen Lageunbestimmtheiten	103
B.1	MP2: Prinzipieller Experimentaufbau	123
B.2	Demonstrator IfAbot: Steuerungssystem	126
B.3	Bewegungsmodell IfAbot	129
B.4	Simuliertes RFID-Sensorsystem	131
B.5	Lageschätzung: Anfangs- und Geschw.-fehler UBBkonform	134
B.6	Lageschätzung: Szenario Pfadfolgen UBBkonform	135
B.7	Lageschätzung: Szenario Kreisfahrt UBBkonform	136
B.8	Lageschätzung: Szenario Geradeausfahrt UBBkonform	137
B.9	Lageschätzung: Szenario Zufallsfahrt UBBkonform	138
B.10	Lageschätzung: Anfangs- und Geschw.-fehler UBBähnlich	139
B.11	Lageschätzung: Gefahrene Trajektorien UBBähnlich	140
B.12	Lageschätzung: Einfluss des RFID-Sensorsystems 1	141
B.13	Lageschätzung: Einfluss des RFID-Sensorsystems 2	142
B.14	Lageschätzung: Einfluss des RFID-Sensorsystems 3	143
B.15	Lageschätzung: Einfluss des RFID-Sensorsystems 4	144
B.16	Lageschätzung: Einfluss des RFID-Sensorsystems 5	145
B.17	Navigation: Gefahrene Trajektorien der Reihen 1, 2 und 3	147
B.18	Navigation: Gefahrene Trajektorien der Reihen 4, 5 und 6	148
B.19	Navigation: Gefahrene Trajektorien der Reihen 7, 8 und 9	149

Tabellenverzeichnis

3.1	Pseudocode: Ablauf der mengenbasierten Multifusion	29
4.1	Pseudocode: Mengenbasierte Lageschätzung mit Multifusion .	41
5.1	Pseudocode: Schätze Zustandsmenge bis Stillstand	54
5.2	Pseudocode: Berechne Hindernismenge	57
5.3	Pseudocode: Berechne Menge der erlaubten Geschwindigkeiten	59
5.4	Pseudocode: Berechne Pfadpunktmenge	61
5.5	Pseudocode: Wähle Stellbefehl	64
6.1	Ergebnisse der Experimentreihe Pfadfolgen UBBähnlich . . .	89
6.2	Einfluss des RFID-Sensorsystems auf die Lageschätzung . . .	91
6.3	Mengenbasierte Navigation: Versuchsreihen	95
6.4	Mengenbasierte Navigation: Ergebnisse	99
6.5	Benötigte Rechenzeit	104
B.1	Demonstrator MP2: Plattformspezifische Größen	125
B.2	Demonstrator MP2: Experimentparameter	125
B.3	Demonstrator IfAbot: Plattformspezifische Parameter	132
B.4	Parameter der mengenbasierten Lageschätzung	133
B.5	Lageschätzung UBBähnlich: Parameter	139
B.6	Parameter der mengenbasierten Navigation	146

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

UBB	<u>U</u> nknown <u>B</u> t <u>B</u> ounded
DWA	<u>D</u> ynamic <u>W</u> indow <u>A</u> pproach
GDWA	<u>G</u> lobal <u>D</u> ynamic <u>W</u> indow <u>A</u> pproach
SGDWA	<u>S</u> et-based <u>G</u> lobal <u>D</u> ynamic <u>W</u> indow <u>A</u> pproach
NF1	<u>N</u> avigation <u>F</u> unction <u>1</u>

Symbole für Vektoren und Matrizen

a, A	Skalar
\mathbf{a}	Vektor
\mathbf{A}	Matrix
\mathbf{A}^{-1}	invertierte Matrix
\mathbf{A}^\top	transponierte Matrix
$\text{diag } \mathbf{a}$	Diagonalmatrix
\mathbf{I}	Einheitsmatrix
$\mathbf{0}$	Nullmatrix
$\ \mathbf{a}\ _2$	Euklidische Norm
$\ \mathbf{a}\ _\infty$	Maximumsnorm

Symbole für Intervalle und Mengen

$[a]$	Intervall
a^-	untere Schranke eines Intervalls
a^+	obere Schranke eines Intervalls
$\text{diam } [a]$	Durchmesser eines Intervalls
$\text{mid } [a]$	Mittelpunkt eines Intervalls
$[\mathbf{a}]$	Intervallvektor
$[\mathbf{A}]$	Intervallmatrix
\mathcal{A}	Menge
$\hat{\mathbf{a}}$	Mittelpunkt einer Menge
$\sup \mathcal{A}$	obere Schranke einer konvexen Menge
$\inf \mathcal{A}$	untere Schranke einer konvexen Menge
\emptyset	leere Menge
V	Volumen
$\text{proj } (\mathcal{A}, \langle * \rangle)$	Projektion einer Menge \mathcal{A} in einen Unterraum $*$
$\mathring{\mathcal{A}}$	Hyperquader

Tabellenverzeichnis

$\overset{\square}{\mathbf{a}}, \overset{\square}{\mathbf{A}}$	Mittelpunktvektor und Definitionsmatrix eines Hyperquaders
$\text{Pkt}_{\overset{\square}{\mathbf{A}}}$	Eckpunkte eines Hyperquaders
$\overset{\square}{V}$	Volumen eines Hyperquaders
$\overset{\square}{\mathcal{I}}$	Einheitshyperquader
$\text{Pkt}_{\overset{\square}{\mathcal{I}}}$	Eckpunkte des Einheitshyperquaders
$\overset{\diamond}{\mathbf{A}}$	Parallelotop
$\overset{\diamond}{\mathbf{a}}, \overset{\diamond}{\mathbf{A}}$	Mittelpunktvektor und Definitionsmatrix eines Parallelotops
$\text{Pkt}_{\overset{\diamond}{\mathbf{A}}}$	Eckpunkte eines Parallelotops
$\overset{\diamond}{V}$	Volumen eines Parallelotops
$\overset{\circ}{\mathbf{A}}$	Ellipsoid
$\overset{\circ}{\mathbf{a}}, \overset{\circ}{\mathbf{A}}^{-1}$	Mittelpunktvektor und Definitionsmatrix eines Ellipsoids
$\overset{\circ}{V}$	Volumen eines Ellipsoids
$\Gamma(\ast)$	Gamma-Funktion
λ, κ	Parameter für die Ellipsoidschnitt- und Summenbildung
V^{\min}	kleinstes Volumen der geschätzten Mengen

Akzente und Indizes

$\overset{\text{I}}{\ast}$	Angabe in Inertialkoordinaten
$\overset{\text{P}}{\ast}$	Angabe in Plattformkoordinaten
$\tilde{\ast}$	gemessener Wert
$\bar{\ast}$	Mittelwert
$\hat{\ast}$	Mittelpunkt bzw. Arbeitspunkt
\ast_k	Zeitschritt
$\ast_{k,l}$	Vorhersage ausgehend von k für den Zeitpunkt $k + l$
$\ast^{\overset{\text{F}}{\square}}$	Zwischenergebnis einer Multifusion
\ast^{F}	Ergebnis einer Multifusion
$\ast_{k k-1}^{\text{P}}$	Ergebnis der Zustandspropagation
$\ast_{k k-1}^{\text{F}}$	Ergebnis der Prädiktionsfusion
\ast_{\max}	größtmöglicher Wert einer Größe
\ast_{\min}	kleinstmöglicher Wert einer Größe

Symbole für die Beschreibung eines Prozesses

\mathbf{x}	Zustandsvektor
\mathbf{u}	Eingangsvektor
\mathbf{y}	Messvektor
\mathbf{A}	Zustandsmatrix
\mathbf{B}	Eingangsmatrix
ϵ^{\ast}	Störung einer verrauschten Größe \ast
\mathbf{q}	Störung eines Eingangsvektors

\mathbf{r}	Störung eines Messvektors
\mathcal{X}^*	Einschlussmenge einer verrauschten Größe *
\mathcal{X}	Einschlussmenge einer Zustandsgröße
\mathcal{U}	Einschlussmenge einer Eingangsgröße
\mathcal{Y}	Einschlussmenge einer Messgröße
\mathcal{Q}	Einschlussmenge eines Eingangsrauschens
\mathcal{R}	Einschlussmenge eines Messrauschens
n	Anzahl der Zustände
m	Anzahl der Eingangsgrößen
Symbole für die Bewegungsmodellierung der mobilen Plattform	
T_a	Abtastzeit
T_m	Messzeit
$(x,y)^T$	Position
ϕ	Orientierung
v	translatorische Geschwindigkeit der Plattform
ω	Drehgeschwindigkeit der Plattform
v^r	transl. Geschwindigkeit des rechten Rades
v^l	transl. Geschwindigkeit des linken Rades
$v^{r,\text{ideal}}$	Ideale transl. Geschwindigkeit des rechten Rades
$v^{l,\text{ideal}}$	Ideale transl. Geschwindigkeit des linken Rades
ϵ^{v^r}	Rauschen auf rechter Radgeschwindigkeit
ϵ^{v^l}	Rauschen auf linker Radgeschwindigkeit
ϵ^{q^r}	Rauschen auf Messwert der rechten Radgeschwindigkeit
ϵ^{q^l}	Rauschen auf Messwert der linken Radgeschwindigkeit
a	translatorische Beschleunigung der Plattform
α	rotatorische Beschleunigung der Plattform
a^r	transl. Beschleunigung des rechten Rades
a^l	transl. Beschleunigung des linken Rades
$\mathbf{c} = (c^v, c^\omega)^T$	Stellbefehl für v und ω
c^r, c^l	Stellbefehl für die rechte bzw. die linke Radgeschwindigkeit
t_s	Zeit bis zum Stillstand der Plattform
R	Radabstand
\tilde{r}	Distanzwert einer Abstandsmessung
$\tilde{\theta}$	Winkelwert einer Abstandsmessung
Symbole für die mengenbasierte Navigation	
$\Omega = (v, \omega)$	Geschwindigkeitstupel
Ω	alle möglichen Geschwindigkeitstupel
Ω^a	alle erreichbaren Geschwindigkeitstupel
Ω^v	alle verbotenen Geschwindigkeitstupel

Tabellenverzeichnis

Ω^p	alle erlaubten Geschwindigkeitstupel
\mathcal{X}^a	Menge aller erreichbaren Zustände
\mathcal{X}^p	Menge aller erlaubten Zustände
\mathcal{X}^v	Menge aller verbotenen Zustände
\mathcal{V}^v	Menge aller verbotenen Geschwindigkeiten
\mathcal{V}^p	Menge aller erlaubten Geschwindigkeiten
dist	Bewertungskomponente für Hindernisentfernung
goal	Bewertungskomponente für Zielerkennung
gradient	Bewertungskomponente für Pfadgeschwindigkeit
heading	Bewertungskomponente für Orientierung
nfl	Bewertungskomponente für Pfadorientierung
smoothness	Bewertungskomponente für Drehgeschwindigkeit
velocity	Bewertungskomponente für Geschwindigkeit
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Wichtungsfaktoren
τ	Glättungsfaktor
h	gemessene Hindernisinformation
\mathcal{H}	Hindernismenge
\mathcal{C}	Menge in Form eines Kreisringsektors
\mathcal{P}	Plattformmenge
\mathcal{T}	Menge in Form eines Trapezes
W	globaler Wunschpfad
w^i	iter Pfadpunkt
$w^{x,i}, w^{y,i}$	iter Pfadpunkt x -Wert, iter Pfadpunkt y -Wert
$[w]^i$	ites Pfadpunktintervall
\mathcal{W}^i	ite Pfadpunktmenge
S	Schwerpunkt einer Pfadpunktmenge
L	lokaler Ausweichpfad
ϕ_{soll}	gewünschte Orientierung
q	Wiederholgenauigkeit
μ^{Vmin}	Mittelwert des kleinsten Schätzvolumens
t_{Fahrt}	Durchschnittliche Fahrzeit
$\sigma^{t_{\text{Fahrt}}}$	Standardabweichung der Fahrzeit
l	Vorhersagehorizont
o	Anzahl der Hindernisinformationen
p	Anzahl der gegebenen Wunschpfadpunkte

1 Einleitung

Noch im Sommer des Jahres 2013 konnte ein deutscher Autohersteller auf sich aufmerksam machen, als er einen autonomen Oberklassewagen auf öffentlichen Straßen ohne menschliches Zutun über 100km von Mannheim nach Pforzheim fahren ließ. Ein internationaler Logistikkonzern plant gerade den Einsatz autonom agierender Flugobjekte für die Paketauslieferung und in den Elektrofachgeschäften findet man schon seit längerem autonome Staubsauger und Rasenmäher in allen Preisstufen oder kindgerechte Bausätze für den Aufbau einfacher mobiler Plattformen. Doch die Vision des allseits präsenten robotischen Helfers, die einige Forscher bereits in den 1970er Jahren hegten, hat sich immer noch nicht erfüllt. Der autonome, mobile Roboter – ob er nun läuft, fährt oder fliegt – hat zwar viele Nischen erobert, aber noch keinen festen Platz in unserer Gesellschaft einnehmen können. Die Gründe dafür sind vielfältig. So fehlen im Bereich der Hardware noch Konzepte für eine zuverlässige langanhaltende Stromversorgung oder universal einsetzbare Sensor(-verarbeitungs-)systeme, die eine robuste Perzeption der Umwelt unter verschiedensten Einsatzbedingungen ermöglichen. Ebenso fehlt es noch an einer preiswerten Aktorik, die in der von uns geschaffenen abwechslungsreichen Umgebung mit Absätzen, Treppen, Schrägen oder Türen problemfrei einsatzfähig ist. Auch im Bereich der Software sind noch viele Fragen ungelöst. Dies betrifft Herausforderungen bei der Weiterverarbeitung der Informationsflut von visuellen Sensoren, das Auffinden aufgabenorientierter Problemlösungen oder die zielgerichtete Navigation in veränderlichen Umgebungen. Mit letzterem beschäftigt sich die vorliegende Arbeit.

Dieses einleitende Kapitel gliedert sich wie folgt: Ausschnitte der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Navigation mobiler Roboter sind in Abschnitt 1.1 zusammengetragen. Daraus abgeleitet werden in Abschnitt 1.2 die an die vorliegende Arbeit gestellten Anforderungen definiert und der ausgewählte Ansatz zur Lösung der gegebenen Aufgabe präsentiert. Für eine experimentelle Verifizierung wurde ein typisches Anwendungsbeispiel aus dem Bereich der mobilen Robotik ausgewählt. Dieses wird in Abschnitt 1.3 vorgestellt. Die Unterteilung der Arbeit in die einzelnen Kapitel wird in Abschnitt 1.4 wiedergegeben.

1.1 Stand der Technik

Eine autonome, mobile Plattform muss in der Lage sein, mit uns in einer ihr zumindest teilweise unbekanntem und sich stetig ändernden Umwelt zu interagieren. Eine damit verbundene Aufgabe ist die präzise Erfassung (Messung) von verschiedenen Informationen. Wie bei allen Messaufgaben kann auch hier das Ergebnis einer Messung immer nur als eine Schätzung des zu messenden Wertes angenommen werden. Der wahre Wert bleibt grundsätzlich unbekannt. Um nun eine quantifizierbare Aussage über die Güte der Messung zu geben, muss neben dem Messwert eine Angabe der Messunsicherheit erfolgen, d. h. eine wahrscheinlichkeitsbasierte Aussage darüber getroffen werden, inwieweit die Schätzung mit dem wahren Wert übereinstimmt. Ein bekannter Ansatz, Messfehler in weiterverarbeitende Algorithmen zu integrieren, ist die Verwendung von probabilistischen Methoden wie das *Kalman Filter* [Kalman, 1960] bei linearen Systemen oder das *Extended Kalman Filter* [Welch und Bishop, 1995] bzw. das *Partikelfilter* [Fox u. a., 2001] bei nichtlinearen Systemen. Diese Ansätze haben jedoch den bekannten Nachteil, dass sie für eine hinreichend genaue Weiterverarbeitung eine exakte Kenntnis der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung des Messfehlers benötigen. Häufig lässt sich diese jedoch nur schwer oder gar nicht ermitteln. Geht man allerdings von falschen Annahmen aus, kann es bei der Anwendung der Filter zu Inkonsistenzproblemen kommen [Bailey u. a., 2006; Huang und Dissanayake, 2007; Julier und Uhlmann, 2001].

In diesen Fällen bietet sich ein allgemeingültiger, mengentheoretischer Ansatz an. Dabei werden unter der Voraussetzung, dass die den Unsicherheiten zugrundeliegenden Verteilungen zwar unbekannt, aber begrenzt sind, geometrische Eigenschaften der Unsicherheiten verwendet und diese als (nicht) konvexe Mengen beschrieben. Dieser Ansatz ermöglicht für fehlerbehaftete Systemgrößen die Berechnung eines Einschlussgebietes, welches den wahren Wert garantiert umschließt.

Einer der Pioniere der mengenbasierten Zustandsschätzung war Fred C. Schewpe. Bereits 1968 setzte er in [Schewpe, 1968] Ellipsoide für die Beschreibung von Unbestimmtheiten ein und entwickelte ein darauf aufbauendes Schätzfilter. Parallel dazu etablierte sich der Einsatz mengenbasierter Algorithmen im Bereich der Fehlerrechnung. Mit dem vermehrten Einsatz der Rechentechnik stellte sich die Frage, welche Genauigkeiten die ausgeführten Rechnungen aufgrund der durch die eingesetzte Hardware festgelegten Rundungsfehler erreichen können. Die damals verstärkt aufkommende Intervallarithmetik [Alefeld und Herzberger, 1983; Hansen, 1992; Moore, 1979]

lieferte hierzu eine schnelle und sichere Antwort. Allerdings haben die daraus entstandenen intervallbasierten Zustandsschätzer neben ihren Vorteilen (dazu gehören die einfache Implementierbarkeit und die sehr performanten Algorithmen) den Nachteil, dass sich prinzipbedingt zumeist sehr konservative Schätzergebnisse ergeben. Das Einschlussgebiet umfasst also zu einem großen Teil Zustände, die das System niemals einnehmen wird.

Um eine präzisere Schätzung zu erreichen, wurde in [Lohner, 1988] die Parallelotopbeschreibung eingeführt, mit der eine genauere Eingrenzung der Ergebnisse möglich wurde. Ein ähnlicher Weg wurde auch von [Vicino und Zappa, 1994] und [Chisci, Garulli und Zappa, 1996] vorgeschlagen. Unterschiede finden sich vor allem in der mathematischen Darstellung der Parallelotope und in den daraus abgeleiteten Algorithmen. Eine neue, weitere Verallgemeinerung der Parallelotope stellen die Zonotope [Alamo, Bravo und Camacho, 2005; Kühn, 1998] dar. Zonotope haben im Gegensatz zu Intervallen und Parallelotopen keine durch die Dimension definierte Anzahl von äußeren Begrenzungsflächen und eignen sich damit besonders für die mengenbasierte Propagation. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch die Komplexität der für die Verarbeitung notwendigen Berechnungen.

Seit dem Ende der 1990er Jahre wurde die mengenbasierte Idee auch im Bereich der Navigation mobiler Plattformen aufgegriffen. Der Begriff *Navigation* impliziert zwei Teilaufgaben. Zum einen muss die Plattform die Fähigkeit besitzen, ihre eigene Position selbstständig bestimmen zu können (*Lokalisierung* oder *Lageschätzung* genannt) und zum anderen muss sie davon ausgehend einen (möglichst optimalen) Pfad zum Zielpunkt ermitteln und diesem folgen können (*Bewegungsführung*). Die im nächsten Absatz zusammengestellte Auswahl mengenbasierter Anwendungen folgt dieser Einteilung.

1.1.1 Mengenbasierte Verfahren zur Lokalisierung mobiler Plattformen

Bei der klassischen Lokalisierung oder Lageschätzung berechnet sich die aktuelle Lage, also der Vektor aus aktueller Position und Orientierung der Plattform, aus der bekannten Anfangslage und den zusätzlich gemessenen Lageänderungen. Dieses iterative Verfahren führt in der Regel zu einer schnell anwachsenden Unsicherheit, die durch eine Fusion mit einem globalen Messwert verkleinert werden kann. Je nach Aufgabenstellung und Verfasser werden dabei intervallbasierte, parallelotopbasierte und ellipsoidbasierte Verfahren eingesetzt. Zonotopbasierte Verfahren zur Lokalisierung einer mobilen Plattform konnten im Rahmen der hier durchgeführten Literaturanalyse nicht gefunden werden.

Intervallbasierte Verfahren. Bei diesen werden die den Messungen anhaftenden Unbestimmtheiten als Intervalle (diese werden auch als Hyperquader bezeichnet) modelliert und innerhalb des Schätzfilters weiterverarbeitet. So verwenden beispielsweise [Gning und Bonnifait, 2005; Jaulin u. a., 2002] einen intervallbasierten Zustandsschätzer für die Lokalisierung einer bewegten Plattform in einer ebenen Umgebung. Unterschiede finden sich vor allem in der eingesetzten Sensorik. In [Caiti u. a., 2005] wird ein U-Boot als Plattform genutzt. Die globale Position ergibt sich aus aufgenommenen Signalen mehrerer Bojen und wird ebenfalls mit Hilfe eines Hyperquaders modelliert.

Um die mengenbasierte Idee auch für Anwendungen in weiträumigen Umgebungen nutzbar zu machen, adaptiert [Gning und Bonnifait, 2005] das Konzept des Partikelfilters. Die einzelnen Partikel sind aber keine Punktgrößen mehr, sondern entsprechen Hyperquadern, die durch die vorliegenden Messunbestimmtheiten definiert werden. Für die Berechnungen kann damit die Modellierung der im klassischen Partikelfilter notwendigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen vermieden werden.

SLAM-Verfahren (*Simultaneous Localization and Mapping*) berechnen aus den aufgenommenen Messwerten nicht nur die Lage der Plattform, sondern bauen parallel dazu eine Umgebungskarte auf. Dies ermöglicht den Einsatz in unbekanntem oder stark dynamischen Umgebungen. Da hierbei ein größerer Rechenaufwand notwendig ist, eignen sich besonders die sehr schnellen Intervallrechnungen. In einem ersten Entwurf wird in [Drocourt u. a., 2005] von einer unvollständig vorliegenden Karte ausgegangen, welche die Plattform zeitgleich zur stattfindenden Lageschätzung aktualisiert. Eine Erweiterung hierzu stellt [Jaulin, 2009] dar. Aus den aufgenommenen Daten der Fahrt eines Unterwasserfahrzeuges werden im Nachhinein der abgefahrte Pfad und eine Umgebungskarte erstellt.

Im Rahmen der SLAM-Verfahren ist vor allem der Einsatz mehrerer kooperierender Plattformen interessant. Das so schnell gesammelte und redundante Wissen muss aufgabenorientiert und konsistent verküpft werden. Hierfür eignen sich die mit der mengenbasierten Zustandsschätzung einhergehenden Einschlussgebiete besonders, wie [Marco u. a., 2003b] für einen einfach gehaltenen Anwendungsfall darstellt.

Parallelotopbasierte Verfahren. Wie bereits erwähnt, ermitteln intervallbasierte Verfahren im Allgemeinen ein sehr konservatives Einschlussgebiet der wahren Plattformlage. Dies verringert die Möglichkeiten, effiziente Trajektorien Richtung Ziel zu ermitteln und einzuhalten. Dass dies durch Einsatz pa-

parallelotopbasierter Schätzverfahren umgangen werden kann, zeigt [Garulli und Vicino, 2001]. Um die gute Performanz der parallelotopbasierten Schätzung zu unterstreichen, wird parallel auch eine hyperquaderbasierte Schätzung berechnet und ein Vergleich der erreichten Ergebnisse durchgeführt. Wie erwartet, kann die Schätzung durch Einsatz der Parallelotopbeschreibung entscheidend präzisiert werden. Ein Nachteil der parallelotopbasierten Algorithmen liegt jedoch in der benötigten Rechenzeit. Insbesondere eine steigende Anzahl an zu schätzenden Zuständen erschwert echtzeitfähige Implementierungen.

Ellipsoidbasierte Verfahren. Bei ellipsoidbasierten Verfahren werden die beschränkten Unbestimmtheiten nicht mit Hilfe von Intervallen, sondern als Abstandsangabe um einen Mittelpunkt modelliert. Je nach Unbestimmtheit kann damit eine viel präzisere Beschreibung der Unbestimmtheit erreicht werden. Setzt man darüber hinaus diese Abstandsangabe auf das Dreifache einer möglicherweise bekannten Standardabweichung eines Gaußprozesses, enthält die so beschriebene Menge statistisch 99,7% aller auftretenden Werte. Auf diese Weise können auch normalverteilte Messwerte recht gut in die mengenbasierte Schätzung integriert werden.

Für die Anwendung als Lageschätzer stellt [Hanebeck und Schmidt, 1996] ein Verfahren vor, das die prädizierte Lage einer Plattform anhand von Winkelmessungen und Distanzmessungen zu verschiedenen Landmarken aktualisiert. Die praktische Einsatzfähigkeit der Algorithmen wurde hier anhand einer omnidirektionalen Plattform namens ROMAN gezeigt. In [Hanebeck und Horn, 2000; Noack u. a., 2010] beschäftigt sich Hanebeck zudem mit der simultanen Verarbeitung von Informationen, die entweder als Normalverteilung oder aber als beschränkt modelliert werden können. Das vorgestellte Filter verbindet dafür die Konzepte der Kalmanfilterung mit der mengenbasierten Zustandsschätzung. So wird eine robustere und zuverlässigere Schätzung der Plattformposition erreicht.

Weitere Untersuchungen widmen sich der Problematik des benötigten linearen Zustandsgleichungssystems. In [Scholte und Campbell, 2003], [He, Tan und Wanshan, 2010; Zhou, Han und Liu, 2008] und [Calafiore, 2005] werden Möglichkeiten vorgeschlagen, den bei der Linearisierung¹ der Bewegungsgleichungen entstehenden Fehler in die Berechnungen zu integrieren. Die zwei erstgenannten Ansätze bauen aufeinander auf. So wird von Scholte eine intervallbasierte Abschätzung des entstehenden Fehlers mit Hilfe des

¹Die Berechnung des erforderlichen linearen Gleichungssystems mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung ist in Abschnitt A.1 dargestellt.

Restglied nach Lagrange vorgeschlagen. Modifikationen, welche die numerische Stabilität der so entstandenen Algorithmen erhöhen sollen, werden von Zhou eingeführt. Calafiore hingegen integriert den Linearisierungsfehler direkt in die entstehende lineare Zustandsmatrix und stellt diese als Intervallmatrix dar. Die resultierenden Zustandsmengen ergeben sich anschließend mittels semidefiniter Programmierung. Sowohl in [Calafiore, 2005] als auch in [He, Tan und Wanshan, 2010] wird die ellipsoidbasierte Zustandsschätzung mit dem Einsatz eines erweiterten Kalmanfilters verglichen. Die Ergebnisse bestätigen, dass das erweiterte Kalmanfilter in der Regel zwar Schätzergebnisse mit einer kleineren Unbestimmtheit liefert, liegen jedoch Störungen vor, deren zugrundeliegende Wahrscheinlichkeitsverteilungen nicht als reine Normalverteilung approximiert werden können oder treten durch die Linearisierung größere Fehlerterme auf, ergeben sich zu optimistische Schätzungen, d. h. der wahre Wert befindet sich über längere Zeitabschnitte außerhalb des berechneten Kovarianzschlauches. Die Einschlussgebiete der mengenbasierten Zustandsschätzung sind wiederum sehr konservativ. Diese beinhalten zwar den wahren Wert, führen aber zu weitaus größeren Unbestimmtheiten.

Eine aktuelle Anwendung der mengenbasierten Lokalisierung stellt [Gu u. a., 2011] vor. Dort ist die Lage mehrerer kooperierend fliegender Plattformen bekannt, gesucht wird die Position eines konkreten Zielobjektes. Diese wird mittels eines mengenbasierten Schätzfilters aus der Lageänderung der Flugobjekte und den aufgenommen Abstandsmesswerten zum Zielobjekt berechnet.

1.1.2 Mengenbasierte Verfahren zur Bewegungsführung

Unter dem Begriff Bewegungsführung werden zwei Problemstellungen zusammengefasst. So muss einerseits ein globaler, zielführender Pfad berechnet und andererseits sichergestellt werden, dass die Plattform lokal, während sie diesem Pfad folgt, statischen oder dynamischen Hindernissen ausweichen kann. Dies wird als *Pfadplanung* und *Hindernisvermeidung* bezeichnet. Zu den globalen Pfadplanern zählen dabei unter anderem die *Road Map*-Verfahren, wie das bekannte *Voronoi*-Diagramm und der *Visibility Graph*, Zellzerlegungsstrategien oder Potentialfeldmethoden. Der *Bug*-Algorithmus, Vektorfeldhistogramme oder der *Dynamic Window*-Ansatz gehören zu den lokalen Hindernisvermeidungsstrategien. [Siegwart und Nourbakhsh, 2004] liefert hierfür ausführliche Erläuterungen, so dass im folgenden Absatz auf die mengenbasierten Ansätze eingegangen werden kann.

Die Anforderungen an einen Pfadplaner sind durchaus vielfältig und oftmals widersprüchlich. So soll zumeist ein möglichst kurzer, schnell abzufahrender und sicherer Pfad berechnet werden. Nun kann kurz bedeuten, dass der Pfad viele Kurven beinhaltet. Da Plattformen jedoch oft so angesteuert werden, dass sie entweder eine translatorische oder eine rotatorische Geschwindigkeit einnehmen, muss ein kurzer Pfad nicht unbedingt einem schnellen Pfad entsprechen. Ein sicherer Pfad hingegen symbolisiert einen Pfad, den die Plattform auch über einen längeren Zeitraum ungestört befahren kann. Das bedingt nicht nur eine Hindernisfreiheit², sondern auch eine möglichst hohe Lokalisierungsgenauigkeit. Um diese zu erreichen, wird in [Ceccarelli u. a., 2004] die erreichbare Schätzgenauigkeit für jeden Punkt der Umgebung berechnet und davon ausgehend ein Pfad in Richtung Ziel generiert. Arbeiten mehrere Plattformen in einer Umgebung, müssen die einzelnen Hindernisvermeidungsstrategien aufeinander abgestimmt sein. [Marco u. a., 2003a] nutzt ein parallelotopbasiertes Verfahren zur Schätzung des möglichen Kollisionszeitpunktes zwischen Plattform und bewegtem Hindernis. Ausgehend von der verbleibenden Restzeit bis zur Kollision ergeben sich die von der Plattform auszuführenden Bewegungen. In [Claes u. a., 2012] sollen mobile Plattformen miteinander kooperieren und Trajektorien bestimmen, welche die Aufgabenerfüllung aller Beteiligten gewährleisten. Die Lage der Plattformen liegt jeweils als beschränkte Menge vor. Darauf aufbauend werden kollisionsfreie Sollgeschwindigkeiten für jede Plattform berechnet. Der vorgestellte Algorithmus enthält keinen globalen Pfadplaner. Daraus ergibt sich das Problem, dass in Gebieten mit einer hohen Roboterdichte keine alternativen Pfade berechnet werden können. Die Missionserfüllung ist in diesen Fällen nicht gegeben.

1.2 Offene Probleme und eigene Beiträge

Im vorangegangenen Abschnitt wurde eine ausführliche Literaturanalyse vorgenommen. Daraus können mehrere Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Für die mengenbasierte Lageschätzung werden üblicherweise drei unterschiedliche Verfahren verwendet – Hyperquader-, Parallelotop- oder Ellipsoidverfahren. Jedes Verfahren hat eigene spezifische Vor- und Nachteile.

²Viele Pfadplaner arbeiten mit einer punktförmigen Ausdehnung der Plattform und/oder der Hindernisse. Die dabei entstehenden Pfade können auch für bekannte Hindernisse keine Kollisionsfreiheit garantieren.

2. Liegt den auftretenden Störungen kein reiner Gaußprozess zugrunde, eignen sich (erweiterte) Kalmanfilter nur bedingt für die Zustandsschätzung. Mengenbasierte Verfahren erreichen zwar Ergebnisse mit größeren Unbestimmtheiten, enthalten aber garantiert den wahren Wert.
3. Es existieren allgemein nur wenige mengenbasierte Pfadplaner bzw. Hindernisvermeidungsstrategien. Dies liegt unter anderem an der Herausforderung, das als Menge repräsentierte Wissen in einen konkreten Steuerbefehl überführen zu müssen.
4. Weiterhin existiert kein Konzept einer zusammenhängenden, mengenbasierten Navigation. Die vorgestellten Ansätze beschäftigen sich entweder mit der Lokalisierung oder mit der Bewegungsführung einer Plattform.

Ziel der vorliegenden Aufgabe ist es, diese Lücke zu schließen und einen Ansatz zur mengenbasierten Navigation einer mobilen Plattform in einer veränderlichen Umwelt vorzustellen. Dies bedeutet die konsistente Verknüpfung eines mengenbasierten Lageschätzers mit einer darauf aufbauenden Bewegungsführung. Hierfür wird eine möglichst genaue Lokalisierung benötigt. Jedoch zeigen weder Hyperquader noch Parallelotope oder Ellipsoide im Allgemeinen eine die anderen Verfahren überragende Performanz. Die Idee ist nun, möglichst vielfältige Informationen unterschiedlichster Quellen – dies können neben den Schätzergebnissen auch zusätzliche Sensorinformationen sein – zu sammeln und diese mit dem Ziel zu fusionieren, ein präziseres Schätzgebiet zu erhalten. Diese Fusion wird im Weiteren mengenbasierte Multifusion genannt. Das Prinzip der Multifusion lässt sich aus der Lageschätzung heraus gleichermaßen auf die Bewegungsführung übertragen. Auch an dieser Stelle müssen verschiedene Informationen verknüpft werden, um einen zielgerichteten und kollisionsfreien Pfad zu berechnen. Zusätzlich ermöglicht die mengenbasierte Repräsentation eine sichere Angabe der gesuchten Größen. Bezogen auf die Bewegungsführung bedeutet dies, dass auch unter Einbeziehung gestörter Messwerte fest definierte Hindernisgebiete bestimmt werden können. Vermeidet die Plattform diese, können keine Kollisionen entstehen.

Der Inhalt dieser Arbeit ist somit die Entwicklung eines konsistenten Navigationskonzeptes, bestehend aus einem mengenbasierten Lageschätzer und einer dazu passenden Bewegungsführung. Für die Verknüpfung mengenbasierter Informationen wird dazu eine Multifusion durchgeführt, um eine möglichst präzise Angabe der gesuchten Größen zu erreichen und eine zielorientierte Fahrt sicherzustellen. Teilergebnisse wurden bereits in [Horn und Janschek, 2006, 2007a,b] und [Horn und Janschek, 2010] veröffentlicht.

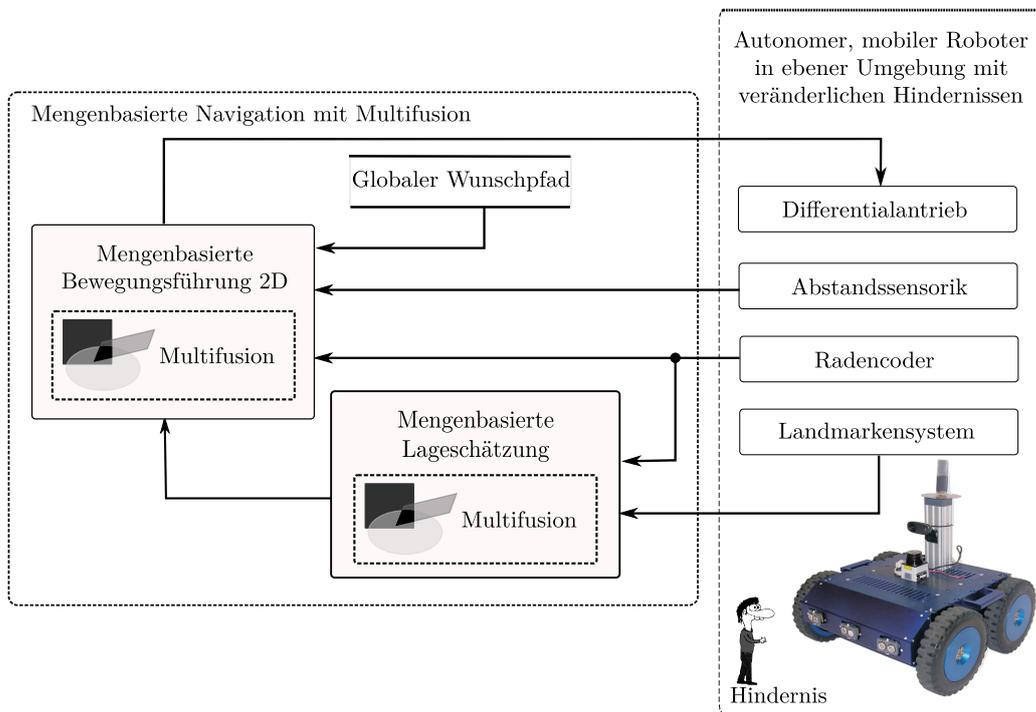


Abbildung 1.1: Systemaufbau und Konfiguration des Anwendungsbeispiels.

1.3 Anwendungsbeispiel: Sichere Navigation einer mobilen Plattform in einer veränderlichen Umwelt

Die Vorteile des entstehenden mengenbasierten Navigationsansatzes sollen neben den theoretischen Erläuterungen auch praktisch mit Hilfe eines Anwendungsbeispiels untermauert werden. Hierfür wurde eine Standardaufgabe aus dem Gebiet der mobilen Robotik gewählt.

Gegeben sei, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, eine mobile Plattform in einer ebenen, veränderlichen Umgebungen. Die Aktorik der eingesetzten Plattform entspricht einem Differentialantrieb. Weiterhin ist sie mit einer Abstandssensorik zur Hinderniserkennung, Radencodern zur Geschwindigkeitsmessung sowie einem Landmarkensystem zur globalen Positionierung ausgestattet. Alle Messungen werden als gestört angenommen und es existieren keine redundanten Messwerte. Ferner kann eine für die Steuerung der Plattform relevante Größe, die Orientierung, nicht direkt gemessen werden, sondern muss aus der Bewegung hergeleitet werden. Neben den durchgeführten Messungen stehen der Plattform für die Abarbeitung ihrer Aufgabe noch a priori Informationen

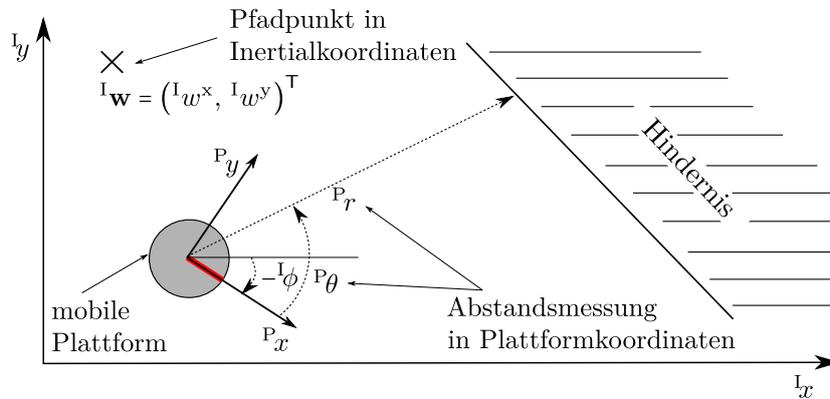


Abbildung 1.2: Definition der verwendeten Koordinatensysteme. I_* kennzeichnet inertielle und P_* plattformzentrische Angaben.

über die eigene Anfangslage, die Position der Landmarken sowie über den Wunschkpfad bzw. den anzufahrenden Endpunkt zur Verfügung. Ziel ist es, die Plattform unter Verwendung des mengenbasierten Navigationsansatzes sicher, schnell und berührungsfrei durch die veränderliche Umgebung zu leiten.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird zwischen Inertialkoordinaten und Plattformkoordinaten unterschieden. Diese sind jeweils mit einem linken Hochindex I_* (Angaben in Inertialkoordinaten) bzw. P_* (plattformzentrische Angaben) gekennzeichnet. Eine anschauliche Definition der beiden Koordinatensysteme und deren Verknüpfung ist in Abbildung 1.2 gegeben.

1.4 Aufbau der Arbeit

Für eine übersichtliche Herleitung des mengenbasierten Navigationskonzeptes mit anschließender Verifizierung ist die weitere Arbeit wie folgt gegliedert:

- **Kapitel 2** gibt einen kurzen Abriss über die in dieser Arbeit verwendeten mengentheoretischen Begriffe und schafft somit die Grundlage für den Aufbau des mengenbasierten Navigationskonzeptes. Weiterhin werden hier drei Varianten zur Beschreibung konvexer Mengen, der Hyperquader, das Parallelotop und das Ellipsoid, eingeführt und dazugehörige Schnitt- und Umschreibungsalgorithmen vorgestellt.
- Das Grundgerüst des vorgestellten Navigationskonzeptes ist die Fusion mengenbasierter Informationen aus unterschiedlichen Quellen – die sogenannte *Multifusion*. **Kapitel 3** stellt die dafür erforderlichen

Annahmen vor und erläutert die Vorteile der Mengenbeschreibung gestörter Größen bei der Informationsfusion. Anschließend wird der Ablauf der mengenbasierten Multifusion beschrieben und eine Lösung für den häufig auftretenden Fall angeboten, dass die zu fusionierenden Daten in unterschiedlichen Dimensionen vorliegen.

- Um sich sicher und zielgerichtet bewegen zu können, muss eine mobile Plattform eine genaue Kenntnis der eigenen Lage besitzen. Hierfür wird in **Kapitel 4** eine *mengenbasierte Lageschätzung* vorgestellt, die auf der parallelen Durchführung dreier verschiedener, mengenbasierter Zustandsschätzverfahren mit anschließender Fusion beruht. Durch dieses Vorgehen ergibt sich ein Einschlussgebiet des wahren Zustandswertes, das im Vergleich mit den einzelnen Schätzverfahren eine robustere, präzisere Vorhersage ermöglicht. Außerdem bietet die mengenbasierte Beschreibung und Schätzung der Zustandsgrößen Möglichkeiten, auftretende Modellierungs-, Linearisierungs- und Diskretisierungsfehler in die Rechnungen einzubeziehen. Damit kann die Einschlussicherheit der geschätzten Lage weiter erhöht werden.
- Das Ergebnis der mengenbasierten Lageschätzung mit Multifusion ist ein Einschlussgebiet der wahren Plattformlage. Innerhalb dieses Gebietes ist die Wahrscheinlichkeit eines Punktes, der wahren Lage zu entsprechen, für alle Punkte gleich hoch. Die Bewegungsführung muss nun also keine konkrete Punktgröße, sondern eine abgeschlossene Lagemenge für die aufgabenorientierte Steuerung der Plattform verarbeiten können. Ferner muss die durch die Hinderniserkennung gegebene Information so umgesetzt werden, dass Kollisionen mit Hindernissen vermieden werden. Hierfür wird in **Kapitel 5** das Hindernisvermeidungskonzept des *Dynamic Window*-Ansatzes aufgegriffen und entsprechend der gegebenen Anforderungen weiterentwickelt. Der entstehende, mengenbasierte Ansatz zur kollisionsfreien und sicheren Bewegungsführung erweitert das eingeführte Multifusionskonzept konsistent und schließt den Ablauf der vorgestellten mengenbasierten Navigation.
- Eine Validierung der vorgestellten Algorithmen wird in **Kapitel 6** vorgenommen. Hierfür werden verschiedene simulative und experimentelle Versuche vorgestellt und ihre Ergebnisse detailliert ausgewertet. Die notwendigen Änderungen zur Adaption des allgemein eingeführten Navigationskonzeptes auf die konkrete, zweidimensionale Aufgabenstellung

des Anwendungsbeispiels werden ebenfalls im Rahmen dieses Kapitels erläutert.

- Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erreichten Ergebnisse und einem Ausblick über mögliche Weiterentwicklungen in **Kapitel 7**.
- **Anhang A** enthält weiterführende Grundlagen, wie etwa Algorithmen zur Verarbeitung von Hyperquadern, Parallelotopen und Ellipsoiden, die der Vollständigkeit halber zusammengetragen wurden.
- Informationen zur Soft- und Hardware der eingesetzten mobilen Plattformen MP2 und IfAbot sind in **Anhang B** zusammengestellt. Ferner findet sich hier eine Beschreibung der konkreten Versuchsdurchführung inklusive der benötigten Parameter sowie zusätzliche Diagramme zur Experimentauswertung.