

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 10

Informatik/
Kommunikation

Nr. 858

M.Sc. Frank Künemund,
Dortmund

Navigationssystem für holonome Fahrerlose Transportfahrzeuge mit multikriterieller Optimierung



FernUniversität in Hagen
Schriften zur Informations-
und Kommunikationstechnik

Navigationssystem für holonome Fahrerlose Transportfahrzeuge mit multikriterieller Optimierung

Der Fakultät für Mathematik und Informatik der
FernUniversität in Hagen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.

eingereichte Dissertation

von
Frank Künemund, M.Sc.
aus
Dortmund

Referent: Prof. Dr.-Ing. Michael Gerke
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Christof Röhrig

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2017

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 10

Informatik/
Kommunikation

M.Sc. Frank Künemund,
Dortmund

Nr. 858

Navigationssystem für
holonome Fahrerlose
Transportfahrzeuge
mit multikriterieller
Optimierung



FernUniversität in Hagen
Schriften zur Informations-
und Kommunikationstechnik

Künemund, Frank

Navigationssystem für holonome Fahrerlose Transportfahrzeuge mit multikriterieller Optimierung

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 10 Nr. 858. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

214 Seiten, 93 Bilder, 11 Tabellen.

ISBN 978-3-18-385810-1, ISSN 0178-9627,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

Für die Dokumentation: Fahrerlose Transportfahrzeuge – Fahrerlose Transportsysteme – Mecanum-Rad – holonome mobile Roboter – omnidirektionale mobile Roboter – Bewegungsplanung mobiler Roboter – energieeffiziente Bewegungsplanung mobiler Roboter – Roboter in der Logistik – Roboter in der Produktion – State Lattice Planner

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure, Informatiker und Wissenschaftler die sich mit Fahrerlosen Transportsystemen oder mobilen Robotern für industrielle Anwendungen beschäftigen. Sie befasst sich mit Navigationssystemen für holonome Fahrerlose Transportfahrzeuge und insbesondere mit deren energieoptimierter Bewegungsplanung. Die Implementierung des vorgestellten hybriden Ansatzes erweitert die klassischen Fahrerlosen Transportsysteme um eine kollisionsfreie Trajektorienplanung und die eingesetzten Fahrzeuge um zusätzliche Autonomie. Im Fokus stehen holonome Fahrerlose Transportfahrzeuge mit Mecanum-Rädern, welche für den flexiblen Warentransport in industriellen Umgebungen eingesetzt werden. Am Beispiel verschiedener Intralogistik-Szenarien werden die Potentiale der entwickelten optimierten Bewegungsplanung zur Energieeinsparung aufgezeigt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at
<http://dnb.ddb.de>.

Schriften zur Informations- und Kommunikationstechnik

Herausgeber:

Wolfgang A. Halang, Lehrstuhl für Informationstechnik

Herwig Unger, Lehrstuhl für Kommunikationstechnik

FernUniversität in Hagen

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9627

ISBN 978-3-18-385810-1

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Intelligent Mobile System Lab im Fachbereich Informatik der Fachhochschule Dortmund.

Für die Möglichkeit eine kooperative Promotion durchzuführen gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Gerke auf Seiten der Fernuniversität Hagen und Prof. Dr.-Ing. Christof Röhrig auf Seiten der Fachhochschule Dortmund. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christof Röhrig möchte ich für die intensive Unterstützung bei meiner wissenschaftlichen Arbeit danken. Mein Interesse für die Navigation autonomer mobile Systeme wurde durch ihn geweckt und durch die Zusammenarbeit immer weiter vertieft. Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Gerke möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit, die Denkanstöße und die Übernahme des Referats herzlich danken.

Meinen Kollegen am Intelligent Mobile Systems Lab danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und die Denkanstöße die mir bei dieser Arbeit sehr geholfen haben. Insbesondere gilt mein Dank meinem langjährigen Bürokollegen und Freund Daniel Heß. Des weiteren danke ich den von mir betreuten Studenten, die durch ihre Studienarbeiten einen wertvollen Beitrag für diese Arbeit geleistet haben. Ebenfalls gilt mein Dank unseren Projektpartnern in den zahlreichen Forschungs- und Industrieprojekten, ohne die meine Forschungsarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für die Unterstützung im persönlichen Umfeld und auch die Korrektur dieser Arbeit möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern bedanken. Besonderer Dank gilt auch meinem langjährigen Freund Christoph Rosenbusch, welcher mir durch seine Kenntnisse in der Fahrzeugtechnik oft hilfreich zur Seite stand. Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Ehefrau Anna Lena, ohne deren Verständnis und tatkräftige Unterstützung die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Dortmund, im Oktober 2017

Frank Künemund

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	2
1.2 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
1.4 Notationen	6
1.5 Definitionen	7
2 Grundlagen Fahrerloser Transportsysteme	11
2.1 Stand der Forschung	12
2.2 Fahrerlose Transportsysteme (FTS)	14
2.2.1 Geschichte und Entwicklung der FTS	15
2.2.2 FTS der vierten Epoche	18
2.3 Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF)	20
2.3.1 Konzepte und Einsatzbereiche	20
2.3.2 Flexible holonome FTF der vierten Epoche	22
2.4 Bahn- und Bewegungsplanung	23
2.4.1 Arbeitsraum	25
2.4.2 Konfigurationsraum	26
2.4.3 Kinodynamische Einschränkungen	27
2.4.4 Optimierungskriterien	28
2.5 Kinematische Betrachtung	28
2.5.1 Holonome Zwangsbedingungen	29
2.5.2 Nicht-holonome Zwangsbedingungen	30
2.5.3 Kinematik eines FTF	30
2.5.4 Kinematisches Modell des Mecanum-Fahrwerks	33
2.5.5 Regelung eines Mecanum-Fahrwerks	36
3 Bewegungsplanung für holonome FTF	39
3.1 Stand der Forschung	40
3.2 Kinematik holonomer Fahrwerke	42
3.3 Kinodynamische Einschränkungen von FTF	43
3.4 Entkopplung von Bahn und Geschwindigkeitsprofilen	45

3.5	Iterative Berechnung der Geschwindigkeitsprofile	47
3.5.1	Funktionsdefinitionen	48
3.5.2	Algorithmus	50
3.5.3	Iterative Berechnung	52
3.5.4	Lineare Geschwindigkeitsfunktionen	54
3.5.5	Stetig differenzierbare Geschwindigkeitsfunktionen	62
3.6	Interpolation	72
3.6.1	Translatorisch	74
3.6.2	Rotatorisch	76
3.7	Parametrische Kurven	76
3.7.1	Geometrische Längenberechnung	77
3.7.2	Interpolation	80
3.8	Zusammenfassung holonome Bewegungsplanung	81
4	Hybride kinodynamische Navigation für FTS	83
4.1	Stand der Forschung	86
4.2	Struktur der hybriden kinodynamischen Navigation für FTS	92
4.3	Begrenzung kinodynamischer Parameter	94
4.4	Kartierung dynamischer industrieller Umgebungen	97
4.5	Lokalisierung der FTF	99
4.6	Holonomer kinodynamischer State Lattice Planner	101
4.6.1	Bewegungsplanung mit Suchalgorithmen	102
4.6.2	Suchalgorithmen für die Graphensuche	104
4.6.3	Bewegungsprimitive	108
4.6.4	Generierung der Bewegungsprimitive	112
4.6.5	Trajektorien mit holonomen Bewegungsprimitiven	116
4.7	Lokale dynamische Bewegungsplanung	119
4.7.1	Dynamische Kollisionsprüfung	119
4.7.2	Ausgleichstrajektorien	120
4.7.3	Dynamische Neuplanung	124
4.8	Experimentelle Ergebnisse	126
4.8.1	Evaluierung der Bewegungsprimitive	126
4.8.2	Optimierung der Berechnungszeiten	128
4.8.3	Einfluss der Parametrierung der Kostenfunktion	130
4.8.4	Evaluierung der dynamischen Kollisionsvermeidung	131
4.9	Zusammenfassung kinodynamische Navigation	135
5	Energieoptimierte Bewegungsplanung	138
5.1	Stand der Forschung	140
5.2	Dynamik des Mecanum-Fahrwerks	141
5.3	Energiemodell des Mecanum-Fahrwerks	144

5.3.1	Theoretisches Reibungsmodell für Räder	146
5.3.2	Reibungsmodell für Radgeschwindigkeiten	147
5.3.3	Reibungsmodell für Rollengeschwindigkeiten	152
5.3.4	Reibungsmodell bei Zuladung	156
5.4	Berechnung energieoptimaler Trajektorien	160
5.5	Experimentelle Ergebnisse	160
5.5.1	Experimentelle Untersuchung der Energieeffizienz	161
5.5.2	Validierung der energieoptimalen Bewegungsplanung	164
5.5.3	Vergleich energie- und zeitoptimaler Trajektorien	168
5.6	Zusammenfassung Energieoptimierte Bewegungsplanung	171
6	Zusammenfassung	175
Anhang		179
A.1	Experimentelle Ermittlung: Massenträgheitsmomente der Räder	179
A.2	Experimentelle Ermittlung: Masse eines FTF	181
A.3	Experimentelle Ermittlung: Massenträgheitsmoment eines FTF	182
A.4	Corioliskraft	185
Literaturverzeichnis		198

Symbolverzeichnis

Koordinatensysteme

F_A	Fahrzeugkoordinatensystem
\bar{F}_A	Koinzidentes Fahrzeugkoordinatensystem
F_{R_i}	Radkoordinatensystem
\bar{F}_{R_i}	Koinzidentes Radkoordinatensystem
F_W	Weltkoordinatensystem

Matrizen

A	Spaltenvektoren der konvexen Hülle einer Fahrzeugkontur
H	Masse und Massenträgheitsmoment eines Fahrzeugs
J	Jacobi-Matrix
J_e	Jacobi-Matrix mit Verkopplungsbedingung
J_{sw}	Jacobi-Matrix Mecanum-Rad
J_w	Jacobi-Matrix konventionelles Rad
${}^W P_A(\theta)$	Homogene Transformation von Fahrzeug- in Weltkoordinaten
P_Q	Splineparameter als Spaltenvektoren
${}^W T_A(\theta)$	Transformation von Geschwindigkeiten in Fahrzeug- zu Weltkoordinaten
${}^A T_W(\theta)$	Transformation von Geschwindigkeiten in Welt- zu Fahrzeugkoordinaten

Physikalische Skalare

c_ϕ	Motorkonstante
D	Dämpfungsfaktor Gleitreibung
E	Energie
\hat{E}	Modellenergie
E_{loss}	Energieverlust
F_C	Corioliskraft
F_G	Gravitationskraft

F_H	Kraft zum Überwinden der Haftreibung
F_N	Normalkraft
F_Z	Zentripetalkraft
I	Elektrischer Strom
J_M	Massenträgheitsmoment
L	Induktivität
M	Drehmoment
$\dot{\rho} \hat{M}_{\text{fric}}$	Modelldrehmoment für die Rollenreibung
$\dot{\varphi} \hat{M}_{\text{fric}}$	Modelldrehmoment für die Radreibung
\hat{M}	Modelldrehmoment
M_{loss}	Aufgebrachter Drehmoment für die Verlustleistung
μ_0	Haftreibungszahl
P_a	Antriebsleistung
P_e	Elektrische Leistung
P_{fric}	Leistung die für die Reibung aufgebracht werden muss
\hat{P}	Modellleistung
P_m	Mechanische Leistung
P_{loss}	Verlustleistung
R	Elektrischer Widerstand
U	Elektrische Spannung
U_A	Ankerspannung eines Elektromotors
U_{emf}	Gegenelektroromotorische Spannung
Räume	
C	Konfigurationsraum
C_{free}	Kollisionsfreier Konfigurationsraum
C_{occ}	Von Hindernissen belegter Konfigurationsraum
TC	Zustandsraum
TC_{free}	Zustandsraum mit zulässigen kinodynamischen Zuständen
W	Arbeitsraum
Skalare	
$\alpha_c, \beta_c, \gamma_c$	Gewichtung der Kostenfunktion: Zeitlich, Geschwindigkeiten, Energie
c_{circ}	Grenzkosten äußerer Fahrzeugradius
c_{incirc}	Grenzkosten innerer Fahrzeugradius (Kollision mit Hindernis)

c_C	Krümmung eines Bahnsegments
Δq	Translatorische und rotatorische Distanz im Geschwindigkeitsprofil
Δs	Translatorischer Distanzabschnitt
$\Delta \theta$	Rotatorischer Distanzabschnitt
Δt	Zeitraum
ϵ	Überbewertungsfaktor der Heuristik
$\dot{\varphi}$	Radgeschwindigkeiten um die Antriebsachse
γ	Orientierung der Rollen im Bezug auf das Radkoordinatensystem
$\omega_{\max}, \alpha_{\max}, \iota_{\max}$	Maximale rotatorische Geschwindigkeit, Beschleunigung und Beschleunigungsänderung (Ruck)
$\dot{q}_{\text{admin}}, \ddot{q}_{\text{admax}}$	Minimal und maximal zulässige Geschwindigkeiten im nächsten Zeitschritt
$\dot{q}_{\max}, \ddot{q}_{\max}, \dddot{q}_{\max}$	Maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung und Beschleunigungsänderung (Ruck)
$\dot{q}_\theta, \ddot{q}_\theta, \dddot{q}_\theta$	Rotatorische Geschwindigkeit, Beschleunigung und Beschleunigungsänderung (Ruck)
$\dot{q}_{xy}, \ddot{q}_{xy}, \dddot{q}_{xy}$	Translatorische Geschwindigkeit, Beschleunigung und Beschleunigungsänderung (Ruck)
r_C	Radius eines Kreisbogens
ϱ	Korrelationskoeffizient
r_R	Rollenradius Mecanum-Rad
$\dot{\rho}$	Rollengeschwindigkeiten
r_W	Radradius
s_g	Gesamtdistanz einer Trajektorie
s_{start}	Startdistanz einer Rotation auf der Bahn
t_g	Gesamtzeit einer Trajektorie
θ_g	Gesamter Drehwinkel einer Trajektorie
\hat{t}_{\max}	Zeit der länger andauernden Bewegung eines Bahnsegments
$t_{\text{plan}}, t_{\text{replan}}$	Zeiten für Planung und Neuplanung der Trajektorie
t_θ	Gesamtzeit des rotatorischen Geschwindigkeitsprofils
t_{xy}	Gesamtzeit des translatorischen Geschwindigkeitsprofils
t	Zeit
u	Parameter auf einer parametrischen Kurve

$v_{\max}, a_{\max}, j_{\max}$	Maximale translatorische Geschwindigkeit, Beschleunigung und Beschleunigungsänderung (Ruck)
x_D, y_D, θ_D	Fahrzeugkoordinaten im diskreten Zustandsraum
x_W, y_W, θ	Fahrzeugkoordinaten in F_W
ζ	Bahnwinkel eines Bahnsegments
ζ_D	Diskreter Bahnwinkel eines Bahnsegments
Mengen und Tupel	
$\mathcal{A}_D(\mathbf{q})$	Mittelpunkte der Zellen einer diskreten Fahrzeugkontur für die Konfiguration \mathbf{q} in F_W
$\mathcal{A}(\mathbf{q})$	Punkte einer Fahrzeugkontur für die Konfiguration \mathbf{q} in F_W
\mathcal{B}	Hindernisse im Arbeitsraum
\mathcal{CB}_i	Hindernisse im Konfigurationsraum
k_θ	Rotatorische kinodynamische Komponenten
k_{xy}	Translatorische kinodynamische Komponenten
p_l	Komponenten eines Bahnsegments l
Q_{adm}	Vereinigung aus Q_{\max} und Q_{next}
Q_g	Zielkonfigurationen
Q_{\max}	Maximale Geschwindigkeiten eines Fahrzeugs
Q_{next}	Maximale Geschwindigkeiten im nächsten Zeitschritt
Q_s	Startkonfigurationen
Q_T	Trajektorienfunktionen
$Q_{x,D}, Q_{y,D}, Q_{\theta,D}$	Zustände im diskreten Zustandsraum
\dot{Q}_{xy}	Diskrete Geschwindigkeitsstufen
i_j	Phase j eines Geschwindigkeitsprofil in kinodynamischer Einschränkung i
\mathcal{U}	Aktionsmenge aller Zustandsübergänge
$\mathcal{U}_{L,D}$	Aktionsmenge langer Bewegungsprimitive
$\mathcal{U}_{S,D}$	Aktionsmenge kurzer Bewegungsprimitive
Vektoren	
\mathbf{a}_i	Punkt einer Fahrzeugkontur
$\Delta \mathbf{q}_{\text{Loc}}$	Abweichung von geplanter Konfiguration
\mathbf{f}_A	Translatorische Kräfte und Drehmoment des FTF
$\mathbf{f}_{\text{wheel}}$	Tangentielle Kontaktkräfte der Räder

$\dot{\varphi}_p$	Modellparameter der Radreibung
\dot{p}_p	Modellparameter der Rollenreibung
p_l	Bahnpunkt auf einem berechneten Bahnsegment
q, q_W	Konfiguration in Weltkoordinaten
q_D	Konfiguration im diskreten Zustandsraum
$\dot{q}_A, \bar{F}_A T_{F_A}$	Geschwindigkeiten im Fahrzeugkoordinatensystem
$\dot{q}, \dot{q}_W, \bar{F}_W T_{F_W}$	Geschwindigkeiten im Konfigurationsraum (Weltkoordinatensystem)
q_{goal}	Ziel-Konfiguration einer Trajektorie
q_{init}	Initiale Konfiguration einer Trajektorie
s	Zustand im diskreten Zustandsraum
s'	Folgezustand von s im diskreten Zustandsraum
u	Zustandsübergangs- oder Aktionsvektor
x	Zustand einer Trajektorie

Abkürzungsverzeichnis

AD*	Anytime Dynamic A* (Suchalgorithmus)
ARA*	Anytime Repairing A* (Suchalgorithmus)
BLDC-Motor	Brushless Direct Current Motor
CAN	Controller Area Network
CDL	Curvature Distance Lookup
CEKF	Constrained Extended Kalman Filter
CLF	Control Lyapunov Function
CP	Continuous Path
DWA	Dynamic Window Approach
EKF	Extended Kalman Filter
EMK	Elektromotorische Kraft
ERP	Enterprise Resource Planning
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
HF	High-Frequency
HSLP	Holonomer State Lattice Planner
IMSL	Intelligent Mobile Systems Lab (FH Dortmund)
LAM	Lastaufnahmemittel
LiDAR	Light Detection and Ranging
LUT	Lookup-Table
MCP	Monte Carlo Particlefilter
MoM	Mobiler Manipulator

MPC	Model Predictive Control
NF	Navigation Function
PID-Regler	Proportional-Integral-Derivative Regler
PWM	Pulsweitenmodulation
QEKF	Quantized Extended Kalman Filter
QR-Code	Quick Response Code
RFID	Radio-Frequency IDentification
RHC	Receding Horizon Control
ROS	Robot Operating System
RRT	Rapidly-exploring Random Tree
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SLP	State Lattice Planner
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UKF	Unscented Kalman Filter
VFH	Vector Field Histogram