

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Martin Keller,
Castrop-Rauxel

Nr. 808

Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr



Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 12

Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Dipl.-Ing. Martin Keller,
Castrop-Rauxel

Nr. 808

Trajektorienplanung
zur Kollisionsvermeidung
im Straßenverkehr

VDI verlag

Keller, Martin

Trajektorienplanung zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 808. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

140 Seiten, 66 Bilder, 9 Tabellen.

ISBN 978-3-18-380812-0, ISSN 0178-9449,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Trajektorienplanung – Trajektorienoptimierung – Kollisionsvermeidung – Fahrdynamikregelung – Positionsregelung – Trajektorienregelung – Fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme – Automatisierte Fahrfunktionen – Emergency Steering Assist – Modellprädiktive Regelung

Um die Unfallzahlen im öffentlichen Straßenverkehr zu senken, werden zusätzlich zu den klassischen Fahrstabilisierungssystemen neuartige Fahrerassistenzsysteme benötigt, die neben fahrdynamischen Größen auch Informationen über das Fahrzeugumfeld in die Funktionalität miteinbeziehen. Automatische Bremsengriffe waren der erste Schritt in diese Richtung, jedoch wird die Fahrzeugquerführung bisher nicht eingesetzt, um das gesamte Kollisionsvermeidungspotential von Fahrzeugen zu nutzen.

In der vorliegenden Arbeit werden vier verschiedene Verfahren zur Fahrzeugführung im Sinne der Kollisionsvermeidung in Notsituationen entwickelt. Die Komplexität der Verfahren reicht von einfachen Bahnplanern, über massenpunktbasierte Optimierungen bis hin zu modellprädiktiven Verfahren, welche fahrdynamische Effekte explizit berücksichtigen. Die Arbeit zeigt die unterschiedlichen Eigenschaften, Möglichkeiten, Herausforderungen und Grenzen der Verfahren auf, bewertet und vergleicht diese miteinander.

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>.

Dissertation TU Dortmund

© 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 0178-9449

ISBN 978-3-18-380812-0

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dortmund und resultiert aus einem kooperativen Forschungsprojekt mit dem Unternehmen TRW Automotive GmbH.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram für die Möglichkeit zur freien Gestaltung meiner wissenschaftlichen Arbeit und die ausgezeichnete Betreuung, welche diese Arbeit überhaupt erst ermöglichte.

Ebenfalls möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Mitberichts danken.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Stephan Frei als drittem Prüfer und Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Neyer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Regelungssystemtechnik bedanke ich mich für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Herrn apl. Professor Dr. rer. nat. Frank Hoffmann danke ich für zahlreiche Anregungen und Ratschläge. Dr.-Ing. Jörn Malzahn gilt mein Dank für hilfreiche Diskussionen über regelungstechnische Fragestellungen. Artemi Makarow danke ich für seine umfassende und unermüdliche Unterstützung in jeder Hinsicht. Christoph Rösmannt gilt mein Dank für die Bereitstellung des MPC Frameworks, Christian Götte und Andreas Homann für den regen Austausch im Bereich der Fahrzeugsystemtechnik. Meinen langjährigen Bürokollegen Dr.-Ing. Javier Antonio Oliva Alonso, Malte Oeljeklaus und Christian Wissing danke ich für den kollegialen Umgang. Für die stets freundliche Unterstützung im technischen und administrativen Bereich bedanke ich mich bei Gabriele Rebbe, Mareike Leber, Jürgen Limmhoff und Rainer Müller-Burtscheid.

Einige Ideen der vorliegenden Arbeit entstanden auch im Rahmen von studentischen Arbeiten. Den beteiligten Studierenden möchte ich ebenfalls danken.

Allen beteiligten Mitarbeitern der TRW Automotive GmbH danke ich für die gute Zusammenarbeit. Dr.-Ing. Alois Seewald gilt mein Dank für die Förderung des Kooperationsprojektes. Bei Dr.-Ing. Carsten Haß bedanke ich mich für die Initiierung des Kooperationsprojektes sowie für die sehr gute und persönliche Betreuung. Markus

Buß möchte ich für die technische Unterstützung und für viele unterhaltsame Stunden und Tage auf der Teststrecke danken.

Mein Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, welche ein Umfeld geschaffen haben, welches zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Ganz besonders danke ich meinen Eltern Heidrun Ingrid und Rainer Jürgen Keller für die Unterstützung auf meinem Lebensweg.

Meiner Lebensgefährtin Sandy Hentschel danke ich ganz herzlich für die jahrelange Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Grundaufgaben eines Kollisionsvermeidungssystems	3
1.3. Stand der Forschung und Technik	4
1.4. Inhalt und Ziel der Arbeit	12
1.5. Gliederung	13
2. Entwicklungsumgebungen	14
2.1. Durchgängige Entwicklungsmethode	14
2.2. Fahrsimulator	16
2.3. Anwendung des Fahrsimulators in der Probandenstudie	18
2.4. Prototypisches Versuchsfahrzeug	21
3. Prädiktionsmodelle	25
3.1. Massenpunktmodell	25
3.2. Fahrdynamikmodelle	26
3.3. Modellierung der Aktuatorregelkreise	31
3.4. Auswahl des vollständigen Prädiktionsmodells	32
4. Bahnfolgeverfahren	35
4.1. Beschreibung von Ausweichbahnen durch Funktionen	36
4.2. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung	37
4.3. Fahrzeugquerregelung	39
4.4. Fahrzeuglängsregelung	43
4.5. Ergebnisse	44
4.6. Verifikation im Versuchsfahrzeug	49
5. Online-Trajektorienoptimierungsverfahren	51
5.1. Beschreibung der Fahrzeugbewegung mit Timed Elastic Bands	52
5.2. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung	54
5.2.1. Anforderungen an das Gütemaß	54
5.2.2. Aufbau des Gütemaßes	55
5.2.3. Zielkonflikte zwischen Gütemaßanteilen	57

5.2.4. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung	58
5.3. Fahrdynamikregelung	58
5.4. Ergebnisse	61
6. Modellprädiktives Planungs- und Regelungsverfahren	65
6.1. Formulierung des Optimalsteuerungsproblems	68
6.2. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung	69
6.2.1. Aufbau des Gütemaßes	69
6.2.2. Zielkonflikte zwischen Gütemaßanteilen	70
6.2.3. Wahl der Gewichtungsfaktoren	71
6.2.4. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung	72
6.3. Ergebnisse	72
7. Modellprädiktives Trajektorienscharverfahren	76
7.1. Trajektorienschar und suboptimale Lösung des Optimalsteuerungsproblems	77
7.2. Adaptive Stellgrößendiskretisierung	78
7.3. Entwurf des Gütemaßes zur Kollisionsvermeidung	79
7.3.1. Aufbau des Gütemaßes	79
7.3.2. Wahl der Gewichtungsfaktoren	80
7.3.3. Kritikalitätsmaß und Eingriffsentscheidung	81
7.4. Ergebnisse	82
8. Analyse, Vergleich und Bewertung der Verfahren	87
8.1. Auswahl von Vergleichsmethoden	87
8.2. Vergleich in einer Beispielsituation	88
8.3. Vergleich mit der Nutzwertanalyse	90
8.4. Modifikationen und Kombinationen der Verfahren	95
8.5. Fazit	97
9. Zusammenfassung und Ausblick	99
A. Anhang	101
A.1. Definitionen	101
A.1.1. Begriffe des Straßenbaus	101
A.1.2. Begriffe der Fahrzeugführung	102
A.1.3. Zur Kritikalität von Verkehrssituationen	103
A.1.4. Weitere Definitionen	106
A.2. Modellprädiktive Trajektorienscharregelung	107
Literatur	113

Nomenklatur

Abkürzungen und Akronyme

ABS	Anti-lock Braking System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACR	Active Control Retractor
AEB	Autonomous Emergency Braking
ASR	Antriebsschlupfregelung
AWP	Anfangswertproblem
CAN	Controller Area Network
ESA	Emergency Steering Assist
ESC	Electronic Stability Control
ESM	Einspurmodell
HMI	Human Machine Interface
KVT	Kollisionsvermeidungstrajektorie
LGA	Lane Guidance Assist
LKA	Lane Keeping Assist
LKW	Lastkraftwagen
LRW	Lenkradwinkel
LWR	Lenkwinkelregler
MPC	Model Predictive Control
MPPC	Model Predictive Planning and Control
MPTSA	Model Predictive Trajectory Set Approach
MPTSC	Model Predictive Trajectory Set Control
MSR	Motorschleppmomentenregelung
NRMSE	Normalised Root Mean Squared Error
OTO	Online-Trajectory Optimization
PFA	Path Following Approach
PKW	Personenkraftwagen
RCP	Rapid Control Prototyping
SP	Schwerpunkt
TEB	Timed Elastic Band
TTC	Time To Collision
bzw.	beziehungsweise
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

Griechische Symbole

Δ_{\max}	maximale Abweichung der Istbahn von der Sollbahn
$\Delta\Psi$	relativer Gierwinkel zur Fahrbahn
ΔT	Zeitdifferenz
Δt	Schrittweite des Euler-Vorwärts-Integrationsverfahrens
ΔX	Abstand des Schwerpunktes des Hindernisses zur Wendestelle der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
ΔY	Entfernung des Fahrzeugschwerpunktes zur Spurmitte
Γ	Kostenterm
Γ_l	linker Teil des Umgebungsmodell
Γ_r	rechter Teil des Umgebungsmodell
$\Gamma_{pf,k}$	Umgebungsmodell des MPTSA
Φ	relativer Gierwinkel zwischen Ego- und Hindernisfahrzeug
Ψ	Gierwinkel
Ψ_{\lim}	unterer Grenzwert der Gierrate
$\Psi_{\lim,krit}$	Grenzwert der Gierrate für die Bewertung der Kritikalität
$\Psi_{\lim,krit}$	Grenzwert des Gierwinkels für die Bewertung der Kritikalität
$\ddot{\Psi}_{\lim,stat}$	Grenzwert der Gierbeschleunigung für einen stationären Zustand
$\Psi_{\lim,stat}$	Grenzwert der Gierrate für die stationäre Kreisfahrt
Ψ_{mess}	gemessene Gierrate
Ψ_{sim}	simulierte Gierrate
Ψ_{soll}	Sollgierrate
$\Psi_{soll,ff}$	Vorsteueranteil des Positionsreglers
Ψ_{stat}	Kreisfahrtwerte der Gierrate
α	Schräglaufwinkel
α_h	Schräglaufwinkel hinten
α_v	Schräglaufwinkel vorne
$\alpha_{v,max}$	maximaler Schräglaufwinkel (Untersteuergrenze)
$\alpha_{v,min}$	minimaler Schräglaufwinkel (Untersteuergrenze)
β	Schwimmwinkel
$\beta_{\lim,krit}$	Grenzwert des Schwimmwinkels für die Bewertung der Kritikalität
$\beta_{\lim,stat}$	Grenzwert des Schwimmwinkels für die stationäre Kreisfahrt
$\dot{\beta}_{\lim,stat}$	Grenzwert der Schwimmwinkeländerung für einen stationären Zustand
β_{stat}	Kreisfahrtwerte des Schwimmwinkels
δ	Lenkradwinkel
δ_{aD}	adaptiv diskretisierter Lenkradwinkel
δ_{lD}	linear (äquidistant) diskretisierter Lenkradwinkel
δ_{\max}	maximaler Lenkradwinkel (Untersteuergrenze)
$\dot{\delta}_{\max}$	obere Grenze des Betrages der Lenkrate
$\delta_{\max,dis}$	maximaler Solllenkradwinkel für die diskrete Menge an möglichen Lenkradwinkeln
δ_{\min}	minimaler Lenkradwinkel (Untersteuergrenze)
$\dot{\delta}_{\min}$	untere Grenze des Betrages der Lenkrate

δ_{SH}	Lenkwinkelsollwert des Spurhaltereglers
δ_{soll}	Solllenkradwinkel
δ_{SW}	Lenkwinkelsollwert des Gierratenreglers für Spurwechsel
δ_v	Radlenkwinkel
ϵ	Abstandsparameter der Soft-Constraint Funktion
γ	Gewichtung
γ_a	Gewichtung der Beschleunigung
$\gamma_{a,SC}$	Gewichtung der Soft-Constraints der Beschleunigung
γ_{env}	Gewichtung des Umgebungsmodells
γ_j	Gewichtung des Rucks
$\gamma_{j,SC}$	Gewichtung der Soft-Constraints des Rucks
γ_λ	Gewichtung des Kurswinkels
γ_Ψ	Gewichtung des Gierwinkels
γ_s	Gewichtung des Sollschlupfes
γ_{sys}	Gewichtung der Gleichheitsnebenbedingung des MPPC (Einhaltung der Systemdynamik)
γ_u	Gewichtung der Ungleichheitsnebenbedingung des MPPC (Stellgrößenbeschränkung)
γ_X	Gewichtung der Längsabweichung von der Solltrajektorie
γ_Y	Gewichtung der Querabweichung von der Solltrajektorie
λ	Kurswinkel
ω	Raddrehzahl
τ	Menge der Zeitdifferenzen
Γ_{env}	Umgebungsmodell

Lateinische Symbole

A	Menge der diskreten Solllenkradwinkel
B	Menge der diskreten Sollschlupfwerte
B_{LWR}	Funktion zur Begrenzung der Lenkrate
B_y, B_x	Parameter der Reifenkennlinien
C_y, C_x, C_a, C_s	Parameter der Reifenkennlinien
D	Differentialregleranteil
D_y, D_x, D_a, D_s	Parameter der Reifenkennlinien
E_g	exponentieller Gewichtungsfaktor
E_y, E_x	Parameter der Reifenkennlinien
F_{max}	Maximalkraft
F_{tot}	Gesamtkraft
F_x	Längskraft (allgemein)
F_{x0}	Längskraft ohne Querschlupf
F_{xh}	Längskraft Hinterrad
F_{xv}	Längskraft Vorderrad
F_{xvr}	Längskraft Vorderrad in Radkoordinaten
F_y	Querkraft (allgemein)
F_{y0}	Querkraft ohne Längsschlupf
F_{yh}	Querkraft Hinterrad
F_{yv}	Querkraft Vorderrad

F_{yvr}	Querkraft Vorderrad in Radkoordinaten
G_{LS}	Übertragungsfunktion des Lenksystems
G_x	Gewichtungsfaktor der Längskraft (allgemein)
G_{xh}	Gewichtungsfaktor der Längskraft Hinterachse
G_{xvr}	Gewichtungsfaktor der Längskraft Vorderachse
G_y	Gewichtungsfaktor der Querkraft (allgemein)
G_{yh}	Gewichtungsfaktor der Querkraft Hinterachse
G_{yvr}	Gewichtungsfaktor der Querkraft Vorderachse
I	Integralregleranteil
$J_{a,y}$	Gütemaß zur Bewertung der Abweichung zwischen der gemessenen und der simulierten Querbesehleunigung
J_{ESM}	Gütemaß zur Identifikation des Einspurmodells
J_{LA}	Trägheit des Lenkaktuators
J_{LS}	Gütemaß des Riccati-Reglers des Lenksystems
J_{Lag}	Langrangesches Gütemaß
$J_{Lag,MPTSC}$	Lagrangesches Gütemaß des MPTSC
$J_{Lag,Ric}$	Lagrangesches Gütemaß des Riccati-Reglers
J_{MPPC}	Gütemaß des MPPC
J_{MPTSA}	Gütemaß des MPTSA
J_{MPTSC}	Gütemaß des MPTSC
J_{MR}	Gütemaß zur Optimierung des MPTSC
J_{Ψ}	Gütemaß zur Bewertung der Abweichung zwischen der gemessenen und der simulierten Gierrate
J_{Ric}	Gütemaß zur Optimierung der Gewichtungsmatrizen des Riccati-Reglers
J_{TEB}	Gütemaß des TEB
J_z	Gierträgheitsmoment des Fahrzeugs
K_{ges}	Gesamtkritikalität einer Verkehrssituation
KIB	Kritikalitätsindikator bezüglich des Nutzungsgrades der Bewegungspotentiale
KIU	Kritikalitätsindikator bezüglich der Unsicherheit über die Bewegung der Verkehrsteilnehmer
K_{pot}	Kritikalität bezüglich des Nutzungsgrades der Bewegungspotentiale
K_{uns}	Kritikalität bezüglich der Unsicherheit über die Bewegung der Verkehrsteilnehmer
M_{BS}	Führungsfilter des Beispielsystems
P	Proportionalregleranteil
P_k	Punkte des TEB
Q_{dyn}	dynamische GröÙe
$Q_{dyn,max}$	Maximalwert einer dynamischen GröÙe
Q_{TEB}	Menge der Punkte des Timed Elastic Band
ST	Strafterm zur Bestrafung von Kollisionen
T_a	Unterstützendes Lenkmoment
T_{BS}	Zeitkonstante des Beispielsystems
T_d	Lenkmoment (Drehmomentregler)

TEB	Timed Elastic Band
T_F	Lenkmoment des Fahrers
T_{Kol}	Horizont zur Überwachung von Kollisionen
T_{LWR}	Zeitkonstante des Lenkradwinkelregelkreises
T_m	Lenkmoment (Microcontroller)
T_O	Lenkmomentenüberlagerung (Torque Overlay)
T_{pr}	Prädiktionszeit
T_r	Lenkmoment (RCP System)
$T_{rück}$	Rückstellmoment der Vorderreifen
T_s	Zeitkonstante des Schlupfregelkreises
T_{sen}	am Torsionsstab gemessenes Drehmoment
T_{Σ}	Summenzeitkonstante
T_{TC}	Zeitkonstante des Drehmomentregelkreises
UWE	Überschwingweite
X	erd feste Koordinate
$X_{\Delta,max}$	Stelle in erdfesten Koordinaten, an der die maximale Abweichung der Istbahn von der Sollbahn auftritt
X_e	Endposition des Spurwechselpolynoms
X_{Obs}	Schwerpunktkoordinate des Hindernisses
X_{Oe}	Position der hinteren Kante des Hindernisses
Y	erd feste Koordinate
Y_0	Startwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
Y_e	Endposition des Spurwechselpolynoms
Y_{end}	Endwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
Y_{max}	oberer Grenzwert des Umgebungsmodells
Y_{min}	unterer Grenzwert des Umgebungsmodells
Y_{Obs}	Schwerpunktkoordinate des Hindernisses
Y_{Oe}	Position der hinteren Kante des Hindernisses
Y_{pol}	Spurwechselpolynom
Y_{safe}	Position mit Sicherheitsabstand zum Hindernis
Y_{soll}	Sollbahn
a	Beschleunigung
$a_{0,...5}$	Polynomkoeffizienten
$aD_{0...4}$	Koeffizienten des Polynoms für die adaptive Diskretisierung
a_{max}	maximale Gesamtbeschleunigung
a_n	Normalbeschleunigung
a_t	Tangentialbeschleunigung
a_{tot}	Gesamtbeschleunigung
a_x	Längsbeschleunigung
$a_{x,soll}$	Solllängsbeschleunigung
a_y	Querbeschleunigung
$a_{y,lim}$	unterer Grenzwert der Querbeschleunigung
$a_{y,mess}$	gemessene Querbeschleunigung
$a_{y,sim}$	simulierte Querbeschleunigung
b_{LA}	Viskose Reibung des Lenkaktors
b_{Obs}	Breite des Hindernisses

c_i	Polynomkoeffizienten
d_1, d_2	Abstandsparameter des Umgebungsmodells des MPTSA
d_{BS}	Dämpfungskonstante des Beispielsystems
d_{Lag}	relative Änderung des Lagrangeschen Gütemaßes
d_{Limit}	Grenzwert des Umgebungsmodells des MPTSA
d_{LWR}	Dämpfungskonstante des Lenkradwinkelregelkreises
$d_{min,X}$	Abstand des Hindernisses zur Wendestelle der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
$d_{min,Y}$	Abstand des Hindernisses zum oberen Grenzwert der Sigmoidfunktion des Umgebungsmodells
d_{Obs}	kleinster Abstand der vier Ecken des Ego-Fahrzeugs zum Schwerpunkt des Hindernisses
fit	Fit-Wert
f_{Obs}	Funktion des Umfeldmodells
f_p	Formungsparameter des Umgebungsmodells des MPTSA
f_{SC}	Soft-Constraint Funktion
g	Erdbeschleunigung
g_u	Gewichtungsfunktion einer Stellgröße
g_y	Gewichtungsfunktion einer Ausgangsgröße
h	Gleichheitsnebenbedingung des MPPC
i, j, k	Laufindex
i_s	Lenkübersetzung
j_n	Normalruck
j_t	Tangentialruck
k_{LS}	Verstärkungsfaktor des Lenksystems
k_{LWR}	Verstärkungsfaktor des Lenkradwinkelregelkreises
k_s	Verstärkungsfaktor des Schlupfregelkreises
l_h	Abstand der Hinterachse vom Fahrzeugschwerpunkt
l_{Obs}	Länge des Hindernisses
l_v	Abstand der Vorderachse vom Fahrzeugschwerpunkt
m	Fahrzeugmasse
n_c	Kontrollhorizont
n_γ	Anzahl der Kostenterme des TEB
n_p	Prädiktionshorizont
$r_{Bx1}, r_{Bx2}, r_{By1}, r_{By2}$	Parameter der Reifenkennlinien
r_{dyn}	Dynamischer Radhalbmesser
s	Laplace Variable
s_{hl}	Schlupf des hinteren linken Rades
s_{hr}	Schlupf des hinteren rechten Rades
s_l	Schlupf
$s_{l,min}$	unterer Sollschlupfgrenzwert
s_{soll}	Sollschlupf
s_{vl}	Schlupf des vorderen linken Rades
s_{vr}	Schlupf des vorderen rechten Rades
t	Zeit
t_{la}	Vorausschauzeit

$u_{BS,max}$	obere Stellgrößenbeschränkung des Beispielsystems
$u_{BS,min}$	untere Stellgrößenbeschränkung des Beispielsystems
v	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{init}	initiale Geschwindigkeit, mit der ein Notmanöver begonnen wird
$v_{x,rad}$	Längsgeschwindigkeit in Radkoordinaten
$v_{y,rad}$	Quergeschwindigkeit in Radkoordinaten
y_{BS}	Ausgangsgröße des Beispielsystems
y_{MPTSC}	Ausgangsgröße des mit einem MPTSC geregelten Systems
y_{Ref}	Referenzgröße
y_{Ric}	Ausgangsgröße des mit einem Riccati-Regler geregelten Systems
z	Variable der Soft-Constraint Funktion
z_m	Grenzwert (Constraint) der Soft-Constraint Funktion
A_{BS}	Systemmatrix des Beispielsystems
P	Gewichtungsmatrix der Gleichheitsnebenbedingung beim MPPC
Q	Gewichtungsmatrix der Zustandsgrößen beim MPPC
Q_{LS}	Gewichtungsmatrix für die Lenksystemregelung
Q_n	Gewichtungsmatrix des Endwertes beim MPPC
Q_{Ric}	Gewichtungsmatrix des Riccati-Reglers
R	Gewichtungsmatrix der Stellgrößen beim MPPC
R_{Ric}	Gewichtungsmatrix des Riccati-Reglers
S	Gewichtungsmatrix der Änderung der Stellgrößen beim MPPC
S_{LS}	Gewichtungsmatrix für die Lenksystemregelung
b_{BS}	Eingangsvektor des Beispielsystems
c_{BS}	Ausgangsvektor des Beispielsystems
e_n	normaler Einheitsvektor
e_t	tangentialer Einheitsvektor
f	(nichtlineare) mehrdimensionale Funktion
g	Ungleichheitsnebenbedingung
k_{BS}	Verstärkungsvektor des Zustandsreglers des Beispielsystems
u	Stellvektor
x	Zustandsvektor
x_{BS}	Zustandsvektor des Beispielsystems
x_λ	reduzierter Zustandsvektor zur Kurswinkelregelung
x_v	reduzierter Zustandsvektor zur Geschwindigkeitsregelung

Kurzfassung

In kritischen Situationen sind viele Fahrer von PKWs mit der Fahrzeugführungsaufgabe überfordert. Die Unfallzahlen konnten bis 2013 auch durch die Einführung von aktiven Fahrerassistenzsystemen wie ABS, ASR und ESC gesenkt werden. In den folgenden Jahren ist ein leichter Anstieg zu verzeichnen. Um die Unfallzahlen wieder zu senken, werden neue Fahrerassistenzsysteme benötigt, die neben fahrdynamischen Größen auch Informationen über das Fahrzeugumfeld miteinbeziehen. Dies kann durch assistierende Funktionen, welche der Fahrer im Fehlerfall übersteuern kann, und/oder durch automatisierte Fahrfunktionen realisiert werden. Die Arbeit beschreibt und vergleicht vier verschiedene Verfahren zur Fahrzeugführung, die zur Kollisionsvermeidung im Straßenverkehr eingesetzt werden können. Das Bahnfolgeverfahren verwendet eine analytische Funktion zur Beschreibung der Ausweichbahn und eine Folgeregelung zur Führung des Fahrzeugs entlang der Bahn. Es ist ein einfaches Konzept, welches mit wenig Rechenleistung auskommt, sich aber nicht an viele verschiedene Situationen anpassen lässt. Deshalb wird das Online-Trajektorienoptimierungsverfahren entwickelt. Zur Berechnung der Ausweichtrajektorien wird ein Gütemaß minimiert, welches Anteile zur Kollisionsvermeidung und zur Minimierung fahrdynamischer Reaktionen enthält. Die Realisierung der fortlaufend neu geplanten Trajektorie wird mit einer unterlagerten Geschwindigkeits- und Kurswinkelregelung durchgeführt. Das modellprädiktive Planungs- und Regelungsverfahren löst analog zum Online-Trajektorienoptimierungsverfahren in jedem Abtastschritt ein Optimierungsproblem. Die kollisionsfreie Trajektorie wird zusätzlich an die Dynamikgleichungen eines Einspurmodells angepasst. Das Optimierungsproblem ist daher ein Optimalsteuerungsproblem, dessen Lösung neben der optimalen Trajektorie auch die zugehörigen Stellgrößen enthält. Die bisher getrennt behandelten Probleme, Trajektorienplanung und Folgeregelung, werden also in einem Schritt gelöst. Der Nachteil dieses Verfahrens ist der nochmals höhere Rechenaufwand im Vergleich zum Online-Trajektorienoptimierungsverfahren. Durch die Beschränkung auf konstante Stellgrößen während der Prädiktion und eine grobe Stellgrößendiskretisierung weist das modellprädiktive Trajektorienscharverfahren eine deutlich niedrigere Rechenlast auf. Die Vorteile der modellprädiktiven simultanen Planung und Regelung bleiben erhalten, jedoch können auf Grund des kurzen Prädiktionshorizontes weiter entfernte Hindernisse nicht in der Planung berücksichtigt werden. Durch die adaptive Wahl der Diskretisierung wird auch im stationären Zustand eine hohe Regelungsgüte erreicht. Der abschließende Vergleich durch eine Nutzwertanalyse zeigt, dass die vier Verfahren, in Abhängigkeit des Anwendungsfalles, unterschiedlich gut geeignet sind.