Zeitoptimale Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren bis in den fahrdynamischen Grenzbereich

Ingmar Gundlach

Zeitoptimale Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren bis in den fahrdynamischen Grenzbereich

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Ingmar Helge Gundlach

geboren am 11. September 1986

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann
Tag der Einreichung:	13.03.2020
Tag der Prüfung:	17.07.2020

D 17 · Darmstadt 2020

Berichte aus der Automatisierungstechnik

Ingmar Gundlach

Zeitoptimale Trajektorienplanung für automatisiertes Fahren bis in den fahrdynamischen Grenzbereich

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2020

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7573-1
ISSN 0945-4659

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik (RTM) der TU Darmstadt im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit der Konzernforschung der Volkswagen AG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski für die hervorragende Betreuung. Als Fachgebietsleiter ließ er den Mitarbeitern Freiraum, brachte ihnen viel Vertrauen entgegen und nahm sich stets Zeit, um über Fragen oder Probleme zu sprechen, was zu einer überaus angenehmen Arbeitsatmosphäre führte. Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann für die Übernahme des Korreferats und das Interesse an meiner Arbeit.

Ganz herzlich bedanke ich mich beim gesamten (aktuellen und ehemaligen) RacePilot-Team von VW für die unübertreffliche Zusammenarbeit, insbesondere bei Dr. Paul Hochrein, Dr. Jens Hoedt, Jonas Kaste, Dr. Björn Mennenga und Dr. Kristof van Ende. Neben den zahlreichen sehr konstruktiven und zielgerichteten fachlichen Diskussionen werde ich mich natürlich immer voller Freude an die wunderbaren Erprobungsfahrten mit einem großartigen Team erinnern. Vielen Kollegen aus dem Team bleibe ich freundschaftlich verbunden. Außerdem gilt mein Dank Thomas Behrens von der KST innovations GmbH für seine große Hilfsbereitschaft bei der Software-Integration und Inbetriebnahme sowie Dr. Dirk Schütte von der IAV GmbH für seine Unterstützung u. a. während der Erprobungen.

Am Fachgebiet RTM, wo ich meinen Arbeitsplatz hatte, habe ich eine angenehm familiäre Atmosphäre unter den Kollegen genossen. Das schließt auch die Mitarbeiterinnen des Sekretariats Corina Fischer und Ilse Brauer sowie Brigitte Hoppe, deren Verlust uns alle hart getroffen hat, mit ein. Durch ihre vorbildliche Organisation und Unterstützung trugen sie wesentlich dazu bei. Selbiges gilt auch für den Systemadministrator Alfred Gross, der in jeder Angelegenheit äußerst hilfsbereit und unkompliziert unterstützte. Ein besonderer Dank gilt Dr. Eric Lenz, der sich wie kaum ein anderer umgehend in eine Thematik eindenken und fundierte Ratschläge geben kann. Ihm wie auch Dr. Jens Hoedt danke ich zudem für das Korrekturlesen dieser Arbeit und Dr. Jakob Bechtloff für die interessanten Gespräche über Fahrdynamik.

Nicht zuletzt gilt mein inniger Dank meinen Eltern, die mir zunächst mein Studium der Elektro- und Informationstechnik ermöglichten und mich in vielerlei Hinsicht all die Jahre liebevoll unterstützten.

Ingolstadt, August 2020
Ingmar Gundlach

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung	Einheit
a	Beschleunigung	$\mathrm{m\,s^{-2}}$
A	Querspantfläche	$\mathrm{m^2}$
B	PACEJKA-Reifenmodell-Parameter	1
C	PACEJKA-Reifenmodell-Parameter	1
$\boldsymbol{c}(\mathbf{x}_{\mathrm{opt}})$	Funktion der Nebenbedingungen im Optimierungsproblem	
C_{acc}, C_{dec}	Funktion zur Definition des Komfort-Gütemaßes	
c_{w}	Luftwiderstandsbeiwert	1
$c_\theta c_\phi$	$c_\theta c_\phi := \cos(\theta)\cos(\phi)$	1
d	Querversatz zur Referenzlinie	m
D	PACEJKA-Reifenmodell-Parameter	N
$\mathbf{D}_n$	Matrix für den n-ten Differenzenquotienten nach dem Weg	m^{-n}
$\mathrm{d}s$	Streckeninkrement projiziert auf die Referenzlinie	m
$\mathrm{d}s_{\mathrm{t}}$	Streckeninkrement parallel zur Referenzlinie	m
$\mathrm{d}s_{\mathrm{v}}$	Streckeninkrement in Richtung des Geschwindigkeitsvektors	m
E	PACEJKA-Reifenmodell-Parameter	1
$f(\mathbf{x}_{\mathrm{opt}})$	Gütefunktion eines statischen Optimierungsproblems	
F_{B}	Reifen-/Achslängskraft durch die Betriebsbremse	N
F_{Lx}	Luftwiderstand in Fahrzeuglängsrichtung	N
F_{M}	Reifen-/Achslängskraft durch den Antrieb	N
$F_{\mathrm{max,r}}$	Maximal übertragbare Horizontalkraft am Reifen / an der Achse	N
$F_{\mathrm{x_r}}$	Umfangskraft am Reifen / an der Achse	N
$F_{\mathrm{y_r}}$	Seitenkraft am Reifen / an der Achse	N
F_{w}	Widerstandskraft	N
$F_{\mathrm{z_r}}$	Aufstandskraft / Achslast	N
g	Erdbeschleunigung $g = 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$	$\mathrm{m\,s^{-2}}$
G	Gesamte Gewichtskraft in z-Richtung	N
$\boldsymbol{g}(\mathbf{x}_{\mathrm{opt}})$	Funktion für Gleichungsnebenbedingungen	
h	Schrittweite entlang der Referenzlinie	m
$\boldsymbol{h}(\mathbf{x}_{\mathrm{opt}})$	Funktion für Ungleichungsnebenbedingungen	
h_{SP}	Schwerpunkthöhe	m
$\mathbf{i}$, $\mathbf{I}$	Einsvektor, Einheitsmatrix	1
J	Gütefunktional	
$\mathbf{J}_{\mathrm{f}}(\mathbf{x})$	JACOBI-Matrix einer Funktion $\boldsymbol{f}(\mathbf{x})$, siehe Notation auf S. 8	
j_{x}	Längsruck	$\mathrm{m\,s^{-3}}$

Zeichen	Beschreibung	Einheit
J_z	Trägheitsmoment des Fahrzeugs um die z-Achse	$kg\,m^2$
k_{BV}, k_{MV}	Bremskraft- bzw. Motorkraftverteilung	1
k_{Fz}	Degressivitätsfaktor für den Einfluss der Achslast	1
k_{Lx}	Proportionalitätsfaktor des Luftwiderstands $k_{Lx} = \frac{1}{2} c_w A \rho_L$	$kg\,m^{-1}$
l	Radstand	m
$\mathcal{L}$	LAGRANGE-Funktion	
l_h, l_v	Abstand Gesamtschwerpunkt – Hinter- bzw. Vorderachse	m
m, m_h, m_v	Masse des Fahrzeugs insgesamt / Hinterachse / Vorderachse	kg
$\vec{n}$	Normalenvektor	
N	Anzahl der Streckensegmente bei diskretisiertem Streckenverlauf	1
N_{opt}	Anzahl der Optimierungsvariablen	1
$\mathbf{p}$	*Nur Kapitel 4:* Suchrichtung	
$\vec{p}$, P	Ortsvektor bzw. Punkt im kartesischen Koordinatensystem	
p_{acc}, p_{dec}	Parameter im Komfort-Gütemaß für Längsbeschleunigung	%
P_M	Antriebsleistung	W
q	Parameter im Komfort-Gütemaß für Querbeschleunigung	%
r	Radius	m
s	$\begin{cases} \text{Bogenlänge (ohne Index: von der Referenzlinie)} \\ \textit{Nur bei Übertragungsfunktionen: } \text{LAPLACE-Variable} \end{cases}$	m $rad\,s^{-1}$
$\mathbf{s}$	*Nur Kapitel 4:* Schlupfvariable	
S	Wegstrecke	m
s_r	Reifenschlupf	1
t	Zeit	s
T	Zeitdauer	s
$\mathbf{u}$	Stellgrößenvektor	
v	Geschwindigkeit	$m\,s^{-1}$
w_{acc}, w_{dec}	Gewichtung im Komfort-Gütemaß	s
x	Fzg-feste Koordinate vom SP in Fahrzeuglängsrichtung	m
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor	
x_0	Globale Koordinate	m
$\mathbf{x}_{opt}$	Vektor der Optimierungsvariablen	
x_r	Radfeste Koordinate in Radlängsrichtung	m
y	Fzg-feste Koordinate vom SP horizontal, senkrecht zur x-Achse	m
y_0	Globale Koordinate horizontal, senkrecht zur x_0-Achse	m
y_r	Radfeste Koordinate horizontal, senkrecht zur x_r-Achse	m
z	Fzg-feste Koordinate vom SP vertikal nach oben	m
z_B	Abbremsung $z_B = -a_x/g$	1

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Beschreibung	Einheit
α	Schräglaufwinkel *Nur Kapitel 4:* Schrittweite bei Liniensuche	rad 1
β	Schwimmwinkel	rad
γ	Winkel zwischen x_0-Koordinate und Referenzlinie	rad
δ	Lenkwinkel	rad
ε	Maschinengenauigkeit	
ζ	Parameter bei der Diskretisierung der Referenz (Abschnitt 6.1.4)	1
θ	Fahrbahnneigungswinkel in Längsrichtung	rad
ϑ	Funktion für den MAYER-Term	
κ	Krümmung (ohne Index: von der Referenzlinie)	m^{-1}
λ	Gewichtungsfaktor im Gütemaß	
$\boldsymbol{\lambda}$	*Nur Kapitel 4:* LAGRANGE-Multiplikator	
μ	Kraftschlussbeiwert *Nur Kapitel 4:* Barriereparameter	1 1
ρ	Radius der Bahnkurve	m
ρ_{L}	Luftdichte	$\mathrm{kg\,m^{-3}}$
σ	Umrechnungsfaktor $\sigma = \mathrm{d}t\,/\,\mathrm{d}s$	$\mathrm{s\,m^{-1}}$
σ_μ	*Nur Kapitel 4:* Centering-Parameter der Barrierefunktion	1
τ	Zeitkonstante	s
ϕ	Fahrbahnneigungswinkel in Querrichtung	rad
φ	Gütefunktion in einem dynamischen Optimierungsproblem	
Φ	Gütefunktion in einem statischen Optimierungsproblem	
χ	Kurswinkel	rad
ψ	Gierwinkel	rad
ψ_{t}	Auf die Referenz bezogener Gierwinkel $\psi_{\mathrm{t}} = \psi - \gamma$	rad

Häufig verwendete Indices

Index	Beschreibung
++	Erweitert einen Vektor $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$ um den Abtastwert x_{N+1}, sodass $\mathbf{x}_{++} \in \mathbb{R}^{N+1}$
Ab	(Strecken-)Abschnitt (im Gegensatz zu Rk für Rundkurs)
acc	acceleration (positive Längsbeschleunigung)
B	Bremse
c	Zentripetal(-beschleunigung) / Komfort-Gütemaß
dec	deceleration (Verzögerung)
end	Endwert
h	Hinterachse
krit	kritischer Wert
L	Luft bzgl. Aerodynamik

Index	Beschreibung
lap	Rundenzeit, Fahrzeit (lap time)
lb	Untergrenze (lower bound)
li	links
M	Motor, Antrieb
max	Maximaler Wert
n	normiert (bei Vektoren)
opt	Optimierungsvariable
r	Rad / Reifen
re	rechts
ref	Referenzlinie
Rk	Rundkurs (im Gegensatz zu Ab für Abschnitt)
rl	Fahrlinie (raceline)
sys	Funktion im Fahrzeugmodell
t	Tangential zur Referenzlinie
ub	Obergrenze (upper bound)
v	Vorderachse
w	Widerstandskraft
x, y, z	Koordinatenrichtung in Fahrzeugkoordinaten
$\mathrm{x_r}$, $\mathrm{y_r}$, $\mathrm{z_r}$	Koordinatenrichtung in Radkoordinaten

Mathematische Symbole und Operatoren

Symbol	Bedeutung
$\lVert\mathbf{x}\rVert_n$	ℓ_n-Norm von $\mathbf{x}$
$\mathbf{x} \odot \mathbf{y}$	Elementweise Multiplikation (HADAMARD-Produkt) von $\mathbf{x}$ und $\mathbf{y}$
$\mathbf{x}^{\circ i}$	Elementweise i-te Potenz von $\mathbf{x}$, siehe Gl. (5.15) auf S. 71
x^*	Optimaler Wert der Größe x
$\overline{x}$	Arithmetisches Mittel einer Folge (x_i)
$\hat{x}$	Maximum von x
$\dot{x}$	Ableitung von x nach der Zeit
x'	Ableitung von x nach dem Weg
$x^{(n)}$	n-te Ableitung von x nach dem Weg
Δ	Differenz zweier Werte: • Mit Index als Vorwärtsdifferenz: $\Delta x_k := x_{k+1} - x_k$ • Bei Messdaten oder im Regelkreis: $\Delta x := x_{\text{soll}} - x_{\text{ist}}$
$\frac{\Delta^n x}{\Delta s^n}$	Differenzenquotient n-ter Ordnung von x nach s
∇f	Gradient von f, siehe Notation auf S. 8
$\nabla^\top f$	Liegender Gradient von f, siehe Notation auf S. 8
$\nabla^2 f$	HESSE-Matrix von f, siehe Notation auf S. 8
$f \circ g$	Komposition/Verkettung zweier Funktionen: $(f \circ g)(x) = f(g(x))$

Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control
AD	Automatisches Differenzieren
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework
ALU	Arithmetic Logic Unit
AVX	Advanced Vector Extensions
BKV	Bremskraftverteilung
BLAS	Basic Linear Algebra Subprograms
CPU	Central Processing Unit
DGL	Differentialgleichung
DGPS	Differential Global Positioning System
DoF	Degree of Freedom (Freiheitsgrade)
DP	Diskretisierungspunkt
E/A	Eingang/Ausgang
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenzsystem
Fzg	Fahrzeug
GNB	Gleichungsnebenbedingung
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
INS	Inertial Navigation System
IP	Interior-Point(-Methode)
Ipopt	Interior Point Optimizer [86]
KKT	KARUSH-KUHN-TUCKER(-Bedingungen)
LAPACK	Linear Algebra Package
LGS	Lineares Gleichungssystem
LICQ	Linear Independence Constraint Qualification
LKA	Lane Keeping Assistent
MBK	Motor-/Brems-Kontravalenz (Komplementärbedingung)
MIMD	Multiple Instruction, Multiple Data
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MKL	Math Kernel Library von Intel® [44]
MPC	Model Predictive Control
NB	Nebenbedingung
o. B. d. A.	Ohne Beschränkung der Allgemeinheit
QP	Quadratisches Programm (Optimierungsproblem)
QSS	Quasi-steady state (quasi-statisch)
SIMD	Single Instruction, Multiple Data
SISO	Single Input, Single Output
SKF	Super-Kappa-Filter
SP	Schwerpunkt

SQP	Sequentiell quadratische Programmierung
SSE	Streaming SIMD Extensions
TTC	Time To Collision
u. B. v.	Unter Beschränkung von
UNB	Ungleichungsnebenbedingung

Kurzfassung

Um ein Gesamtsystem zum automatisierten Fahren bis in den fahrdynamischen Grenzbereich zu entwickeln und zu testen, eignet sich eine zeitoptimale Trajektorienplanung am besten, weil die Zeitoptimalität erfordert, dass sich die Trajektorie permanent an einer physikalischen Grenze befinden muss. Situationen am fahrdynamischen Limit können nicht nur bei plötzlichen Ausweichmanövern auftreten, sondern auch durch Witterungseinflüsse wird das Limit mitunter schon bei moderaten Fahrmanövern erreicht.

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Entwicklung und Umsetzung einer Trajektorienplanung, die unter Berücksichtigung fahrdynamischer Eigenschaften von Serienfahrzeugen die Fahrzeit durch numerische nichtlineare Optimierung minimiert. Drei wesentliche Aspekte liegen dem Konzept zugrunde: Erstens wird der Lösungsraum der Planung nicht a priori auf vorgegebene Trajektorien oder Bewegungsmuster eingeschränkt. Zweitens erfolgen Quer- und Längsplanung simultan, also in einer gemeinsamen Optimierung. Und drittens wird als unabhängiger Parameter der Differentialgleichungen nicht die Zeit, sondern die Bogenlänge einer Referenzlinie, die entlang der Fahrbahn verläuft, verwendet. Dafür werden alle zeitabhängigen Gleichungen anhand kinematischer Beziehungen transformiert. Diese nichtlineare Transformation ermöglicht es, ein Gütefunktional aufzustellen, das die tatsächliche Fahrzeit entlang der Wegstrecke beschreibt. So muss kein Optimierungsproblem mit freier Endzeit gelöst werden. Zudem hat sie den Vorteil, dass statische Elemente, wie der Fahrbahnverlauf oder die Position der Leitplanken, im mathematischen Problem statisch bleiben.

Als Fahrzeugmodell kommt ein nichtlineares Einspurmodell mit einer PACEJKA-Reifenkennlinie zum Einsatz, welches um eine Achslast- und Bremskraftverteilung erweitert ist. Die Aktordynamik (Motor, Bremse, Lenkung) wird über einen speziellen Ansatz abgebildet, der im Optimierungsproblem die Nebenbedingungen in Abhängigkeit der Aktorausgänge angibt, was die Dimension des Optimierungsproblems reduziert. Zudem werden diese Nebenbedingung in Straffunktionen mit einer geschwindigkeitsabhängigen „semi-quadratischen" Form umgewandelt. Der Ansatz erhöht nicht nur die Konvergenz, sondern führt auch zu sehr glatten Trajektorien, deren Krümmung bis mindestens zur zweiten Ableitung stetig ist, was man im Fahrverhalten deutlich spürt.

Da die Trajektorienplanung sowohl offline zur Berechnung eines gesamten Rundkurses als auch zur echtzeitfähigen zyklischen Planung unter Berücksichtigung statischer Hindernisse eingesetzt wird, liegt der Fokus auf einer effizienten Umsetzung, was sich sowohl in der Modellbildung und Problemformulierung als auch der Implementierung widerspiegelt. So wird bspw. ein 4,5 km langer Rundkurs mit IPOPT auf einer Mobile-CPU in unter 2 s berechnet. Die zyklische Planung benötigt bei einem krümmungsabhängigen Planungshorizont von mindestens 126 m bzw. 6,6 s (testweise) durchschnittlich 40 ms. Somit ist diese Trajektorienplanung schneller als vergleichbare Ansätze aus der Literatur.

Eine Eigenschaft der dargelegten zeitoptimalen Planung ist die harmonische Verbindung von Quer- und Längsdynamik. Daher ist sie zum einen perfekt geeignet, um optimale Brems-/Ausweich-Kombinationen zu berechnen. Zum anderen bietet sie auch eine gute Basis für eine komfort-orientierte Trajektorienplanung, welche als Erweiterung der bestehenden Planung entwickelt wurde.

Im Rahmen der Toolchain der Trajektorienplanung wurde u. a. ein Algorithmus entwickelt, der mittels quadratischer Programmierung verrauschte Kurvenverläufe innerhalb vorgegebener Grenzen glättet. Er wird primär zum Glätten der Referenzlinie eingesetzt, kann aber auch sehr gut zur approximativen Berechnung von Ideallinien verwendet werden.

Die Trajektorienplanung wurde mit der Volkswagen AG Konzernforschung, Wolfsburg auf diversen Rennstrecken und Handlings-Kursen erfolgreich erprobt, wie auch die abgebildeten Messdaten zeigen.

Abstract

In order to develop and test a complete system for automated driving up to the driving dynamic limit, time-optimal trajectory planning is best suited. This is because time optimality requires the trajectory to be permanently at a physical limit. Situations at the limit of driving dynamics do not only occur during sudden evasive maneuversmaneuvers: the limit is sometimes also reached during moderate drinving maneuvers e.g. due to weather influences.

The present thesis describes the development and implementation of a trajectory planning algorithm, which minimizes the driving time by numerical nonlinear optimization, taking into account the dynamic properties of series production vehicles. The concept is based on three essential aspects: Firstly, the solution space for the planning is not limited a priori to given trajectories or movement patterns. Secondly, lateral and longitudinal planning are performed simultaneously, i.e. in a combined optimization. And thirdly, the independent parameter of the differential equations is not the time, but the arc length of a reference line along the track. For this purpose, all time-dependent equations are transformed using kinematic relations. This nonlinear transformation enables to set up an objective functional that describes the actual driving time along the path. This optimization problem can be solved without free end time. It also has the advantage that static elements, such as the course of the road or the position of the guard rails, remain static in the mathematical problem.

The vehicle model used is a non-linear single-track model with a PACEJKA magic tyre formula. It is extended by an axial load and brake force distribution. The actuator dynamics (engine, brake, steering) are mapped using a special approach which specifies the constraints in the optimization problem as a function of the actuator outputs. Thus, the dimension of the optimization problem is reduced. In addition, these constraints are converted into penalty functions that have a velocity-dependent "semi-quadratic" form. This approach not only increases the convergence, but also leads to very smooth trajectories, whose curvature is continuous up to at least the second derivative. The smoothness is significantly noticeable in the driving behavior.

Since trajectory planning is used both offline for the calculation of an entire circuit and for real-time moving horizon planning taking static obstacles into account, the focus is on efficient implementation. This is reflected in the modelling and problem formulation as well as in the implementation. As a result, a 4.5 km long circuit can be calculated with IPOPT on a mobile CPU in less than 2 s. The moving horizon planning requires an average of 40 ms with a curvature-dependent planning horizon of at least 126 m or 6.6 s, respectively. Thus, this trajectory planning algorithm is faster than comparable approaches from the literature.

One characteristic of the proposed time-optimal planning is the harmonious combination of lateral and longitudinal dynamics. Therefore it is perfectly suited for calculating optimal brake/evasion

combinations. On the other hand, it also offers a good basis for a comfort-oriented trajectory planning, which was developed as an extension of the existing planning.

Within the toolchain of the trajectory planning an algorithm was developed, which smoothes noisy curves within given limits by quadratic programming. It is primarily used for smoothing the reference line, but can also be used very well for the approximate calculation of racing lines.

The trajectory planning was successfully tested with Volkswagen AG Group Research, Wolfsburg on various race tracks and handling parkours, as the measurement data presented in this thesis also demonstrates.