

Optimaltheoretische Modellierung und Identifizierung von Fahrereigenschaften

Am Fachbereich Informatik der
Technischen Universität Darmstadt
eingereichte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Math. **Torsten Butz**

Referenten der Arbeit: Prof. Dr. Oskar von Stryk
Prof. Dr.-Ing. Peter Eberhard,
Universität Stuttgart

Tag der Einreichung: 30. August 2004
Tag der mündlichen Prüfung: 3. Dezember 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Optimaltheoretische Fahrermodellierung	4
2.1	Zwei-Ebenen-Modell	5
2.1.1	Bahnplanungsebene	5
2.1.2	Stabilisierungsebene	6
2.1.3	Wahl der Sollgrößen	7
2.1.4	Problematik	8
2.2	Optimalsteuerungskonzept	8
2.2.1	Modellierung von Fahrereigenschaften	8
2.2.2	Identifizierung von Fahrereigenschaften	9
2.3	Stand der Forschung und Entwicklung	10
2.3.1	Fahrermodellierung	10
2.3.2	Optimalsteuerungstheorie	12
3	Technische Fahrregler	14
3.1	Regler-Mensch Modelle	15
3.1.1	Crossover- bzw. Schnittfrequenzmodell	15
3.1.2	Quasilineares Modell	15
3.1.3	Präzisionsmodell	16
3.1.4	Optimaltheoretisches (BBN) Modell	16
3.2	Fahrregler für die Fahrzeugquerführung	17
3.2.1	PID-Regler	17
3.2.2	STI-Modell von McRuer	18
3.2.3	Zwei-Ebenen-Modell von Donges	18

3.2.4	Zwei-Ebenen-Modell von Horn	19
3.2.5	Adaptive Querregelung bei Reichelt	19
3.2.6	Querdynamischer Regelkreis bei Apel	20
3.2.7	Zustandsregler und -beobachter bei Neculau	20
3.2.8	Weitere Modelle	21
3.3	Fahrregler für die Fahrzeuglängsführung	21
3.3.1	PID-Regler	22
3.3.2	Fahrzeugfolgeregelung bei Dreyer	22
3.3.3	Folge- und Kolonnenregelung bei Chen	22
3.3.4	Längsdynamischer Regelkreis bei Apel	23
3.3.5	Geschwindigkeits- und Momentenregelung bei Busch	23
3.3.6	Zustandsregler und -beobachter bei Neculau	24
3.4	Nichtlineare Regelkonzepte	25
3.4.1	Sampling Strategien	25
3.4.2	Time-to-Line-Crossing (TLC) und Time-to-Collision (TTC) Kriterien	25
3.4.3	Fuzzy-Logik	26
3.4.4	IPG Driver	26
3.4.5	Bahnfolgeregelung durch nichtlineare Systementkopplung und Regelung	27
4	Fahrdynamikmodelle und -simulation	29
4.1	Das nichtlineare Einspurmodell	29
4.2	Ein Vollfahrzeugmodell	32
4.2.1	Das Basisfahrzeug	32
4.2.2	Der Antriebsstrang	34
4.2.3	Modellierung der Reifen	35
4.3	Das Fahrdynamikprogramm veDYNA	37
4.3.1	Numerische Integration	37
4.3.2	Implementierung	38
4.4	Der Fahrregler veDYNA Driver	39
5	Parameterabhängige Optimalsteuerungsaufgaben	42
5.1	Grundaufgabe der optimalen Steuerung	42

5.2	Allgemeinere Optimalsteuerungsprobleme	43
5.3	Notwendige Optimalitätsbedingungen	47
6	Sensitivitätsanalyse für Optimalsteuerungsprobleme	50
6.1	Existenz der Sensitivitätsableitungen	50
6.2	Notwendige Bedingungen	52
6.3	Akzessorisches Minimumproblem	55
6.3.1	Problemformulierung	55
6.3.2	Optimalitätsbedingungen	57
6.4	Sensitivitätsanalyse des diskretisierten Problems	58
7	Optimierung und Parameterschätzung	60
7.1	Nichtlineare Optimierungsprobleme	60
7.1.1	Optimalitätsbedingungen	61
7.1.2	Spezialfälle	62
7.2	Parameteridentifizierung	63
7.2.1	Problemformulierung	63
7.2.2	Parameterschätzung in Optimalsteuerungsaufgaben	64
7.3	Numerische Optimierungsverfahren	65
7.3.1	Quadratische Optimierung	65
7.3.2	SQP-Verfahren	66
7.3.3	Gauß-Newton-artige Verfahren	67
8	Direkte Kollokationsverfahren für Steuerungs- und Sensitivitätsprobleme	69
8.1	Diskretisierung der Optimalsteuerungsaufgabe	69
8.2	Das Programm DIRCOL	72
8.3	Diskretisierung des Sensitivitätsproblems	74
8.4	Numerische Berechnung der Sensitivitäten	76
9	Optimale Bahnplanung beim doppelten Fahrspurwechsel	78
9.1	Optimalsteuerungsmodell	78
9.2	Kriterien für die Bahnoptimierung	82
9.2.1	Maximale Fahrdistanz	84

9.2.2	Minimaler Abstand von der Fahrbahnmitte	85
9.2.3	Minimale mittlere Querb beschleunigung	87
9.2.4	Weitere Kriterien	88
9.2.5	Auswahl von Optimierungskriterien	90
9.3	Vollfahrzeugsimulation mit fast-optimalen Bahnen	91
9.3.1	Sollkurs für maximale Fahrdistanz	92
9.3.2	Sollkurs für minimalen Abstand von der Fahrbahnmitte	93
9.3.3	Sollkurs für minimale mittlere Querb beschleunigung	95
9.4	Fazit	96
10	Identifizierung von Fahrerparametern	97
10.1	Problemformulierung	97
10.2	Parameterschätzung mit synthetischen Daten	99
10.2.1	Re-Identifizierung für maximale Fahrdistanz	99
10.2.2	Re-Identifizierung für minimalen Abstand von der Fahrbahnmitte	100
10.2.3	Re-Identifizierung für minimale mittlere Querb beschleunigung	101
10.2.4	Identifizierung für minimalen mittleren Gierwinkel	102
10.3	Parameterschätzung mit Simulationsdaten	102
10.3.1	Identifizierung mit dem Sollkurs für maximale Fahrdistanz	103
10.3.2	Identifizierung mit dem Sollkurs für minimalen Abstand von der Fahrbahnmitte	103
10.3.3	Identifizierung mit dem Sollkurs für minimale mittlere Querb beschleunigung	104
10.4	Parameterschätzung mit Versuchsdaten	105
10.4.1	Rekonstruktion der Fahrzeugbahn	106
10.4.2	Approximation der Längsdynamik	107
10.4.3	Numerische Ergebnisse	108
10.5	Fazit	114
11	Variation von Fahrerparametern	117
11.1	Problemformulierung	118
11.2	Spurwechsel mit 60 km/h	119
11.3	Spurwechsel mit 70 km/h	121

11.4 Spurwechsel mit 80 km/h	123
11.5 Fazit	125
12 Zusammenfassung und Ausblick	127
Literaturverzeichnis	128

Kapitel 1

Einführung

Bei der Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge stehen zunehmend die Erhöhung von Fahrsicherheit und Komfort sowie die Entlastung des Fahrers durch Assistenzsysteme im Vordergrund. Um die Zuverlässigkeit und die robuste Auslegung der dafür entwickelten Fahrzeugregelungen in praktischen Fahrsituationen zu gewährleisten, sind Untersuchungen des Fahrzeugverhaltens in großen Teilen des fahrdynamischen Bereichs notwendig. In der Regel kommt es aber weniger darauf an, das Fahrzeuggesamtsystem mit einigen wenigen Testfahrten und -fahrern zu erproben, als vielmehr Handlingstudien über ein möglichst breites Spektrum der in Frage kommenden Fahrertypen durchzuführen.

Verfahren zur Simulation der Fahrzeugdynamik im Rechner sind aus der Automobilentwicklung heute ebensowenig wegzudenken wie aus dem Entwurf und dem Test von Fahrdynamiksteuergeräten. Neben dem virtuellen Prototypenbau und konzeptionellen Studien am PC werden Fahrdynamikprogramme für Echtzeitanwendungen in Hardware- und Software-in-the-Loop Umgebungen eingesetzt. Zur realistischen Simulation bedarf es dabei nicht nur eines umfassenden Fahrzeugmodells und einer detaillierten Darstellung der Straßenverhältnisse. Für die Untersuchung des geschlossenen Regelkreises von Fahrzeug, Fahrer und Umgebung wird auch ein Fahrermodell benötigt, mit dem sich Fahrmanöver vom normalen Fahrbetrieb bis hin zum Grenzbereich implementieren lassen. Im Hinblick auf die Realisierung breiter Bereiche des in der Praxis relevanten fahrdynamischen Spektrums ist hierfür ein synthetisches Fahrermodell zweckmäßig.

Wir untersuchen in dieser Arbeit ein optimaltheoretisches Zwei-Ebenen-Modell für den Fahrer, das sich aus einer Bahnplanungsebene zur Bestimmung von Sollgrößen für die Fahrzeugführung und einer Stabilisierungsebene zur Einstellung der Stellgrößen für die Fahrzeugregelung zusammensetzt. Zur Berechnung von Sollvorgaben für die Fahrzeugbahn und die Fahrgeschwindigkeit formulieren wir die Fahraufgabe als parameterabhängiges Optimalsteuerungsproblem, in dem geeignet gewichtete Optimalitätskriterien dazu dienen sollen, Eigenschaften von Fahrzeugführern mit verschiedener Erfahrung und fahrerischer Qualität abzubilden.

Um umgekehrt aus Fahrdaten auf die Fahrer motivation schließen zu können, werden numerische Verfahren zur Parameterschätzung in Optimalsteuerungsaufgaben und eine dazu benötigte Sensitivitätsanalyse für optimale Steuerprozesse entwickelt und implementiert. Die Funktionsweise

der Verfahren wird an Hand von Identifizierungsrechnungen mit Referenzdaten aus Simulation und Messung nachgewiesen. Zur Verifikation des Fahrermodells wird untersucht, inwieweit sich die in Versuchsfahrten beobachtete Bandbreite menschlichen Fahrverhaltens durch systematische Variation der Gewichtungsfaktoren für die Teilkriterien der optimalen Steuerung abdecken läßt.

Die Arbeit gliedert sich im einzelnen wie folgt:

In Kapitel 2 beschreiben wir das Zwei-Ebenen-Konzept für die Fahrzeugführung und ein optimaltheoretisches Modell auf der Bahnplanungsebene des Fahrermodells. Ferner wird die vorliegende Arbeit in den Stand der Forschung und Entwicklung der dazu benötigten Disziplinen eingeordnet.

Kapitel 3 enthält eine Übersicht der in Literatur und Praxis verbreiteten Regler-Mensch Modelle zur Fahrzeugregelung auf der Stabilisierungsebene des Fahrermodells.

In Kapitel 4 skizzieren wir zwei Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Abbildungsgüte zur Berechnung der Fahrdynamik. Ein nichtlineares Einspurmodell wird zur Bestimmung von optimalen Führungsgrößen auf der Bahnplanungsebene verwendet. Als Referenz für realistisches Fahrzeugverhalten im Rechner dient das Vollfahrzeugmodell aus einem kommerziellen Fahrdynamikprogramm. Zudem wird der darin implementierte nichtlineare Positionsregler für die Fahrer-Stabilisierungsebene vorgestellt.

Kapitel 5 behandelt die Grundlagen zur Lösung von parameterabhängigen Optimalsteuerungsaufgaben. Wir formulieren ein Standardproblem der optimalen Steuerung und fassen die notwendigen Bedingungen an eine Lösung zusammen.

In Kapitel 6 untersuchen wir die Sensitivitätsanalyse von optimalen Steuerprozessen. Es werden Voraussetzungen für die Existenz von Ableitungen der optimalen Lösung nach Parametern des Ausgangsproblems skizziert und zu ihrer Berechnung eine linear-quadratische Optimalsteuerungsaufgabe hergeleitet.

Kapitel 7 gibt einen Überblick über die Optimierungsaufgaben, die sich durch Diskretisierung von Optimalsteuerungs- und Sensitivitätsproblem sowie aus der Parameterschätzung ergeben. Wir entwickeln einen Algorithmus zur Identifizierung von Parametern in optimalen Steuerprozessen und beschreiben die Grundlagen der zur Lösung der Teilprobleme eingesetzten numerischen Verfahren.

Die Diskretisierung und Besonderheiten der Implementierung für die Lösung der grundlegenden Optimalsteuerungsaufgabe und die Berechnung der Sensitivitätsableitungen bilden den Inhalt von Kapitel 8.

Verschiedene Zielfunktionale für die optimale Fahrzeugsteuerung beim doppelten Spurwechsel werden in Kapitel 9 betrachtet. Wir untersuchen ihre Brauchbarkeit zur Bestimmung von Führungsgrößen für die Vollfahrzeugsimulation und zur Charakterisierung unterschiedlichen Fahrerverhaltens. Als Optimalitätskriterium für die Fahrermotivation wird ein parametrisches Gütefunktional aus geeignet gewichteten Teilkriterien gewählt.

In Kapitel 10 kommt das entwickelte Verfahren zur Parameterschätzung in Optimalsteuerungs-

aufgaben zum Einsatz. Nach der Erprobung mit synthetischen Daten aus der Simulation mit Einspur- und Vollfahrzeugmodell wird versucht, aus Fahrversuchsdaten passende Gewichtungsfaktoren für das der Bahnplanung zugrundeliegende Optimalitätskriterium zu identifizieren.

Gegenstand von Kapitel 11 ist eine systematische Variation der Gewichtsparameter für die Teilkriterien im Zielfunktional des Fahrermodells. Wir untersuchen, inwieweit das vorgestellte Modellierungskonzept in der Lage ist, den bei Testfahrten realisierten fahrdynamischen Bereich abzudecken.