

Trajektorienplanung als dynamisches Optimalsteuerungsproblem und Interpretation des Lösungsraums für Fahrkomfort im automatisierten Fahren

Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik
Masterarbeit von Markus Amann
Tag der Einreichung: 4. Juli 2022

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Betreuer: Wi Mi M.Sc. Alexander Steinke
Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

REGELUNGSTECHNIK
UND MECHATRONIK

rtm

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik

Trajektorienplanung als dynamisches Optimalsteuerungsproblem und Interpretation des Lösungsraums
für Fahrkomfort im automatisierten Fahren
Studiengang Elektrotechnik und Informationstechnik

Masterarbeit von Markus Amann

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski
Betreuer: Wi Mi M.Sc. Alexander Steinke

Tag der Einreichung: 4. Juli 2022

Darmstadt

Technische Universität Darmstadt
Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik
Fachgebiet Regelungstechnik und Mechatronik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Konigorski

Aufgabenstellung

Die allgemeine Struktur eines Optimalsteuerungsproblems lautet

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(\cdot)} \quad & J(\mathbf{u}) = V(\mathbf{x}(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} l(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) dt \\ \text{u.B.v.} \quad & \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}(t_f), t_f) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \leq \mathbf{0}. \end{aligned}$$

Häufig werden dynamische Optimierungsprobleme (OP) mithilfe direkter Verfahren numerisch gelöst. In diesem Fall wird das dynamische in ein statisches OP überführt und der endliche Lösungsvektor $\mathbf{u}_{\text{opt}} \in \mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^m$ berechnet. Direkte Verfahren haben den Vorteil, dass Zustandsbeschränkungen leichter berücksichtigt werden können und der Konvergenzbereich größer ist. Indirekte Verfahren hingegen liefern eine Einsicht in die Struktur der optimalen Lösung.


In der dynamischen Optimierung hingegen werden Funktionen $\mathbf{u}(t)$ einer unabhängigen Variable t gesucht. Mithilfe der Variationsrechnung können Optimalitätsbedingungen hergeleitet werden, die ein Randwertproblem formulieren. Die Lösung dieses Randwertproblems liefert in der Folge die optimale Steuertrajektorie $\mathbf{u}_{\text{opt}}(t)$. Jedoch ist das Lösen des Randwertproblems für nichtlineare Systeme häufig schwierig, weswegen auf numerische Verfahren zurückgegriffen werden muss.

Um im automatisierten Fahren (AD) gezielt Fahrprofile mittels einer optimalen Trajektorienplanung erstellen zu können, ist ein tieferes Verständnis der optimalen Lösung erforderlich. Mit einem direkten Verfahren ist die Interpretation der Lösung schwierig, da die Lösung aus reinen Zahlenwerten besteht. Zwar könnte ein gewünschtes Fahrverhalten in definierten Fahraufgaben durch zusätzliche Terme im Gütemaß und Anpassung der Gewichte erzielt werden, jedoch ist eine Übertragung auf andere Fahraufgaben fraglich. Eine parametrisierte Steuertrajektorie $\mathbf{u}_{\text{opt}}(t)$ würde die Interpretation erheblich vereinfachen.

Ziele dieser Arbeit sind folgende Punkte:

1. Übersicht für Lösungsverfahren dynamischer OPs und Einordnung des AD-Planungsproblems
2. Erstellen von dynamischen OPs, die durch Variationsrechnung lösbar sind und Lösen dieser
 - a) Geeignete Fahrscenarien (z.B. Geradeausfahrt, Kurve, Geraden-Kurven-Kombination, Spurwechsel)
 - b) Geeignete Komfortmerkmale (z.B. Beschleunigung, Ruck, Fahrdauer)
 - c) Berücksichtigung von Begrenzungen
3. Interpretation der Lösungenstrajektorien hinsichtlich des dargestellten Funktionenraums
4. Einordnung im Kontext Fahrkomfort

Die Ergebnisse sind geeignet zu visualisieren und zu dokumentieren. Die aktuelle Fassung der Richtlinien zur Anfertigung von Abschlussarbeiten ist zu beachten.



Beginn: —
Ende: —
Seminar: —

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß §22 Abs. 7 und §23 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Markus Amann, die vorliegende Masterarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Fall eines Plagiats (§38 Abs. 2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

Bei der abgegebenen Thesis stimmen die schriftliche und die zur Archivierung eingereichte elektronische Fassung gemäß §23 Abs. 7 APB überein.

Bei einer Thesis des Fachbereichs Architektur entspricht die eingereichte elektronische Fassung dem vorgestellten Modell und den vorgelegten Plänen.

Darmstadt, 4. Juli 2022

Markus Amann

Kurzfassung

Zusammenfassung entsprechend der Dokumentensprache. In diesem Fall Deutsch.

Abstract

Additional abstract in English.

Inhaltsverzeichnis

1	Konventionen und Beispiele	1
1.1	Gleichungen	1
1.2	Bilder und Tabellen	1
1.3	Blockschaltbilder	2
1.4	Plots	2

1 Konventionen und Beispiele

Es folgen ein paar nützliche Beispiele und Konventionen.

1.1 Gleichungen

Bei umfangreichen Dokumenten sollte eine Gleichung, wie

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

nur eine Nummer bekommen, wenn sie, wie Gleichung (1.1), im Text referenziert wird. Die Nummerierung von Umgebungen kann über den * gesteuert werden.

Gleichungen sind Teil des Satzes und bekommen deshalb auch Satzzeichen, wie beispielsweise die wahllosen Werte

$$\begin{aligned} \beta &= 5^\circ, \\ c &= 42 \end{aligned} \quad (1.2)$$

und

$$\dot{x} = 7 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Wie an Gleichung (1.2) zu sehen, können mehrere Gleichungen im Block ausgerichtet und einzeln nummeriert und referenziert werden.

1.2 Bilder und Tabellen

Außer bei Fotos sollte auf Pixelgrafiken verzichtet werden. Vektorgrafiken können beispielsweise als PDF eingebunden werden, wie Abbildung 1.1, oder direkt mit TikZ erstellt werden.

Wie in Tabelle 1.1 zu sehen, bekommen Tabellen eine Überschrift.

REGELUNGSTECHNIK *rtm*
UND MECHATRONIK

Abbildung 1.1: Regelungstechnik und Mechatronik

Tabelle 1.1: Tabellenüberschrift

	A	B
C	1	2
D	3	4

1.3 Blockschaltbilder

Blockschaltbilder können mit der im Hauptdokument eingebundenen TikZ-Bibliothek erstellt werden.

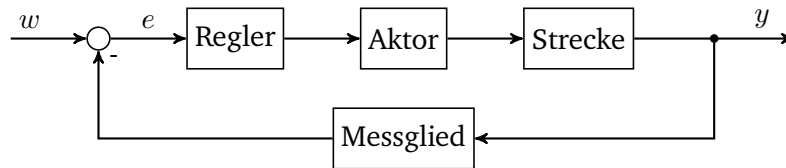


Abbildung 1.2: TikZ Blockschaltbild in Figure-Umgebung

Variablen, wie w aus Abbildung 1.2, kommen auch im Fließtext immer in eine Mathe-Umgebung.

1.4 Plots

Plots können direkt in \LaTeX mit dem Paket `pgfplots` sogar mit der TU-Farbpalette gesetzt werden. In Abbildung 1.3 wird z.B. die rtm-Farbe `TUDa-2c` genutzt.

Aus Matlab heraus können Plots z.B. mit dem Tool `matlab2tikz` für \LaTeX exportiert werden. Der mitgelieferte `cleanfigure()`-Befehl räumt Plots vor dem Export auf und sorgt für eine kleine Dateigröße. Mit `pgfplots` kann aber auch direkt in \LaTeX analytische Funktionen plotten: $\sin(x)$.

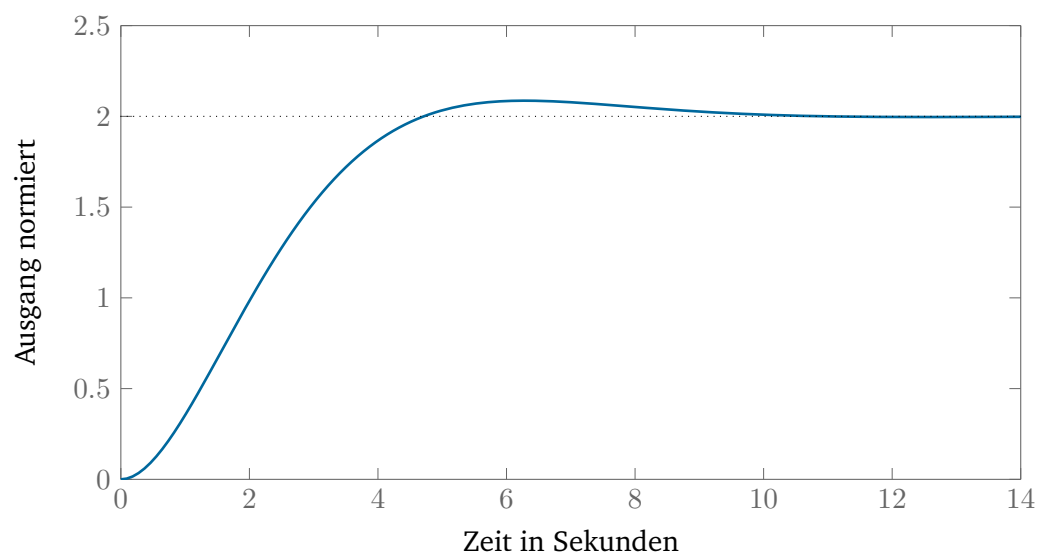


Abbildung 1.3: Sprungantwort PT₂

