

Verein Deutscher Ingenieure
Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- & Automatisierungstechnik (VDI/VDE-GMA)

IFAC International Federation of Automatic Control



GMA-Fachausschuss 2.14

Systemtheorie und Regelungstechnik

23. bis 24. September 2024

GAMM-Fachausschuss

Dynamik und Regelungstheorie

25. September 2024

GMA-Fachausschuss 2.13

Modellbildung, Identifikation und Simulation in der Automatisierungstechnik

26. bis 27. September 2024



Organisation des GMA-FA 2.14

Technische Universität Dresden

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Klaus Röbenack
Georg-Schumann-Straße 7a
01187 Dresden
Tel.: +49 351 463 33940
Fax: +49 351 463 37381
E-Mail: klaus.roebenack@tu-dresden.de



Organisation des GAMMA-FA Dynamik und Regelungstheorie

Technische Universität Dortmund

Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und
Energiewirtschaft
Prof. Dr.-Ing. Timm Faulwasser
Emil-Figge-Straße 70
44227 Dortmund
Tel.: +49 231 755 2359
Fax: +49 231 755 2694
E-Mail: timm.faulwasser@ieee.org



Technische Universität Hamburg

Institut für Mechanik und Meerestechnik
Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried
Eißendorfer Straße 42
21073 Hamburg
Tel.: +49 40 42878-3220
Fax: +49 40 427-3-14601
E-Mail: robert.seifried@tuhh.de



Technische Universität Ilmenau

Fachgebiet Optimization-based Control
Prof. Dr. Karl Worthmann
Weimarer Str. 25
98693 Ilmenau
Tel.: +49 3677 69-3624 Fax: +49 3677 69-3270
E-Mail: karl.worthmann@tu-ilmenau.de



Organisation des GMA-FA 2.13

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme

Computational Methods in Systems and Control Theory
Dr. Jens Saak
Sandtorstraße 1
39106 Magdeburg
Tel.: +49 391 6110-216
E-Mail: saak@mpi-magdeburg.mpg.de



Tagungsprogramm

Sonntag 22.09.2024 (Anreisetag)

ab 18:30 Abendessen

Montag 23.09.2024 (GMA-FA 2.14)

- | | |
|---------------|---|
| 09:00 – 09:20 | Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.14
<i>K. Röbenack (TU Dresden)</i> |
| 09:20 – 09:45 | Entwurf dynamischer Backstepping-Regler für parabolische Systeme
<i>N. Gehring (Johannes Kepler Universität Linz), J. Deutscher (Universität Ulm)</i> |
| 09:45 – 10:10 | Regelung nichtlinearer parabolischer Systeme unter Ausnutzung von flachheitsbasierten Parametrierungen
<i>A. Irscheid (Universität des Saarlandes), N. Gehring (Johannes Kepler Universität Linz), J. Deutscher (Universität Ulm), J. Rudolph (Universität des Saarlandes)</i> |
| 10:10 – 10:40 | Kaffeepause |
| 10:40 – 11:05 | Flachheitsbasierte Steuerung eines Balkens mit skalarem Randeingriff: Neue Gedanken zu einer alten Frage
<i>J. Rudolph (Universität des Saarlandes)</i> |
| 11:05 – 11:30 | Beobachtergestützte Regelung eines schweren Seils an einem Wagen
<i>L. Jose, A. Irscheid, J. Rudolph (Universität des Saarlandes)</i> |
| 11:30 – 11:55 | Flachheitsbasierte Regelung hyperbolischer Mehrgrößensysteme unter Verwendung von Normalformen
<i>S. Schmidt, N. Gehring (Johannes Kepler Universität Linz), F. Woittennek (UNIT Tirol)</i> |
| 12:00 – 14:00 | Mittagessen |
| 14:00 – 14:35 | Exakte Linearisierung durch quasistatische Rückführungen: Ein Überblick für eine Klasse Lagrangescher Systeme
<i>G. Hartl, M. Schöberl (Johannes Kepler Universität Linz)</i> |
| 14:35 – 15:10 | Partial State Feedback Model-Following Control for Nonlinear Systems
<i>N. Tietze, K. Wulff, J. Reger (TU Ilmenau)</i> |
| 15:10 – 15:40 | Über die Lie-Algebra-Rang-Bedingung für polynomiale Einbettungssysteme
<i>D. Gerbet, K. Röbenack (TU Dresden)</i> |
| 15:40 – 16:10 | Kaffeepause |
| 16:10 – 16:35 | Zeitoptimale TCP- und Roboterbasisplatzierung für Pick-and-Place-Aufgaben in hochgradig eingeschränkten Umgebungen
<i>A. Wachter, C. Hartl-Nesic, A. Kugi (TU Wien)</i> |
| 16:35 – 17:00 | Energiebalanceregung für modulare Multilevel-Stromrichter auf Basis von Vibrational Control
<i>A. Kastner, L. Gröll, V. Hagenmeyer (Karlsruher Institut für Technologie)</i> |

16:55 – 17:30	Iterative schemes for approximating periodic Carathéodory solutions to nonlinear control systems with measurable inputs <i>A. Zuyev (Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems Magdeburg)</i>
18:30	Abendessen

Dienstag 24.09.2024 (GMA-FA 2.14)

08:30 – 09:00	Anmerkungen zum Entwurf von PI-Reglern <i>P. Hippe (Erlangen)</i>
09:00 – 09:35	Datenbasierte robuste Output-Regulation für LTI-Systeme mittels Koopman-Operatoren <i>J. Deutscher (Universität Ulm)</i>
09:35 – 10:10	Non-overshooting output shaping for switched linear systems under arbitrary switching using eigenstructure assignment <i>K. Wulff, M. C. Honecker (TU Ilmenau), R. Schmid (University of Melbourne), J. Reger (TU Ilmenau)</i>
10:10 – 10:40	Kaffeepause
10:40 – 11:15	Sensitivitätsbasierte verteilte modellprädiktive Regelung <i>M. Pierer von Esch, A. Völz, K. Graichen (FAU Erlangen)</i>
11:15 – 11:40	Zur Parametrierung der modellfreien Regelung eines Gleichstrommotors <i>P.M. Scherer, A. Othmane, J. Rudolph (Universität des Saarlandes)</i>
12:00	Mittagessen / Ausflug
19:00	Abendessen

Mittwoch 25.09.2024 (GAMM-FA)

09:00 – 09:05	Begrüßung der Teilnehmer des GAMM-FA <i>K. Worthmann (TU Ilmenau)</i>
09:05 – 09:30	Neural network-enhanced integrators for systems defined by ordinary differential equations <i>A. Othmane, K. Flaßkamp (Universität des Saarlandes)</i>
09:30 – 09:55	Ein hybrider Steuerungsansatz zur Trajektorienfolge von schnell bewegten Softrobotern <i>R. Seifried, M. Grube (TU Hamburg)</i>
09:55 – 10:25	Kaffeepause
10:25 – 11:00	Spatial exponential decay of perturbations in optimal control of general evolution equations <i>B. F. Oppeneiger, M. Schaller, K. Worthmann (TU Ilmenau)</i>
11:00 – 11:35	Güteabschätzungen von Optimalschätzproblemen mittels Turnpike-Analyse <i>J. D. Schiller (Leibniz Universität Hannover), L. Grüne (Universität Bayreuth), M. A. Müller (Leibniz Universität Hannover)</i>

11:35 – 12:00	Polynomial turnpike estimates in optimal control of infinite-dimensional oscillating systems <i>A. Zuyev (Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems Magdeburg)</i>
12:00 – 14:00	Mittagessen
14:00 – 14:35	Motion primitives as the action space in reinforcement learning for motion planning <i>K. Flaßkamp (Universität des Saarlandes)</i>
14:35 – 15:00	VENI, VINDy, VICI: A variational method to build ROMs with embedded uncertainty quantification <i>J. Fehr (Universität Stuttgart), P. Conti (DICA Milano), J. Kneift (Universität Stuttgart), A. Manzoni (DICA Milano), A. Frangi (MOX Milano), S. L. Brunton, J. N. Kutz (University of Washington)</i>
15:00 – 15:30	Kaffeepause
15:30 – 16:00	Stability-informed Closed-Loop Learning for Model Predictive Control using Bayesian Optimization <i>M. Pfefferkorn, S. Hirt, P. Holzmann, R. Findeisen (TU Darmstadt)</i>
16:00 – 16:30	Stability of MPC with data-driven Koopman models <i>L. Bold (TU Ilmenau), L. Grüne (Universität Bayreuth), M. Schaller (TU Chemnitz), K. Worthmann (TU Ilmenau)</i>
16:30 – 17:05	Data-based System Representation and Synchronization for Multiagent Systems <i>V. G. Lopez, M. A. Müller (Leibniz Universität Hannover)</i>
17:05 – 17:35	Aussprache GAMM-FA
18:30	Abendessen

Donnerstag 26.09.2024 (GMA-FA 2.13)

08:30 – 08:45	Begrüßung der Teilnehmer des GMA-FA 2.13 <i>J. Saak (Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg)</i>
08:45 – 09:20	Regelungsorientierte Modellapproximationen für Stefanprobleme in der Lebensmittelindustrie <i>A. Schaum (Universität Hohenheim)</i>
09:20 – 09:45	Eindimensionale Modellierung pneumatischer Vakuum-Ejektoren <i>C. Trage, K. Hoffmann, O. Sawodny (Universität Stuttgart)</i>
09:45 – 10:10	Modellierung der Mechanik und hydraulischen Aktorik einer Feuerwehrehleiter <i>B. Müller, Oliver Sawodny (Universität Stuttgart)</i>
10:10 – 10:40	Kaffeepause
10:40 – 11:15	Regelungsorientierte Modellbildung für Sprühtrocknungsprozesse <i>A. Lepsien, A. Schaum (Universität Hohenheim)</i>
11:15 – 11:40	Modellierung der instationären Ausbauchung der Strangschale in Stranggießanlagen <i>J. Landauer (TU Wien), P. Dollhäubl, S. Fuchshumer (voestalpine Stahl GmbH Linz), A. Kugi, A. Steinboeck (TU Wien)</i>

11:40 – 12:05	Deflection Compensation in Lightweight Robotics using a Digital Twin with Extended Dynamics <i>P. Rodegast, S. Hoschek, D. Pfeifer, J. Fehr (University of Stuttgart), M. Hagedorn (PREMIUM ROBOTICS GmbH)</i>
12:05 – 13:30	Mittagessen
14:00	Ausflug
19:00	Abendessen

Freitag 27.09.2024 (GMA-FA 2.13)

08:30 – 08:55	Framework Situationsbeschreibung: Modellierung von Situationen zur taktischen Aufgabenplanung in automatisierten Fahrzeugen <i>M. Gerwien (TU Dresden)</i>
08:55 – 09:20	Modellbildung und Identifikation eines kontaktbasierten, rotatorischen Kugelaktors <i>M. Olbrich, C. Ament (Universität Augsburg)</i>
09:20 – 09:45	Exploratorische Datengenerierung zur nichtlinearen Systemidentifikation <i>A. Kopp, C. Ament (Universität Augsburg)</i>
09:45 – 10:10	Kaffeepause
10:10 – 10:35	Physics-based models with local parameterization for the jet wiping process in an industrial hot-dip galvanizing line <i>J. Venter, A. Kugi, A. Steinböck (TU Wien)</i>
10:35 – 11:00	Hybride Modellbildung mechanischer Systeme auf Basis von physik- und datengetriebenen Ansätzen <i>S. Hoschek, P. Rodegast (Universität Stuttgart), J. Scheid (PREMIUM ROBOTICS GmbH), D. Pfeifer, J. Fehr (Universität Stuttgart)</i>
11:00 – 11:25	Operatorinferenz für mechanische Systeme: datengetriebene Strukturierung und Substrukturierung <i>Ye. Filanova (Otto-von-Guericke Universität Magdeburg), I. Pontes Duff (Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg), D. Manvelyan (Siemens AG München), P. Benner (Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme Magdeburg)</i>
11:25 – 11:50	Datengetriebene Modellierung und prädiktive Regelung der Geometrie und Eigenschaften von Freiformbiegeprozesse <i>Ahmed Ismail, Boris Lohmann (School of Engineering and Design Garching)</i>
11:50 – 12:10	Aussprache GMA-FA 2.13
12:15	Mittagessen

Teilnehmerliste

Christoph Ament

Universität Augsburg
Lehrstuhl Regelungstechnik
christoph.ament@uni-a.de

Daniel Bergmann

Rolls-Royce Power Systems
daniel.bergmann@ps.rolls-royce.com

Lea Bold

Technische Universität Ilmenau
Institut für Mathematik
lea.bold@tu-ilmenau.de

Joachim Deutscher

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
joachim.deutscher@uni-ulm.de

Katrin Ellermann

TU Graz
Institut für Mechanik
ellermann@tugraz.at

Timm Faulwasser

TU Hamburg
Institute of Control Systems
timm.faulwasser@tuhh.de

Jörg Fehr

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
Joerg.Fehr@itm.uni-stuttgart.de

Yevgeniya Filanova

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
filanova@mpi-magdeburg.mpg.de

Kathrin Flaßkamp

Universität des Saarlandes
Systems Modeling and Simulation
kathrin.flasskamp@uni-saarland.de

Nicole Gehring

JKU Linz
Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
nicole.gehring@jku.at

Max Geiger

Rolls-Royce Power Systems
max.geiger@ps.rolls-royce.com

Daniel Gerbet

TU Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
daniel.gerbet1@tu-dresden.de

Maximilian Gerwien

TU Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
maximilian.gerwien@mailbox.tu-dresden.de

Knut Graichen

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
knut.graichen@fau.de

Linus Gross

TU Darmstadt
ris - Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
linus.gross@tu-darmstadt.de

Lutz Gröll

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Automation und angewandte Informatik
groell@kit.edu

Georg Hartl

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
georg.hartl@jku.at

Peter Hippe

FAU Erlangen
Regelungstechnik
peter.hippe@fau.de

Sebastian Hoschek

Universität Stuttgart
Institut für Technische und Numerische Mechanik
sebastian.hoschek@itm.uni-stuttgart.de

Abdurrahman Irscheid

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
a.irscheid@lsr.uni-saarland.de

Ahmed Ismail

Technische Universität München
Lehrstuhl für Regelungstechnik
a.ismail@tum.de

Lars Jose

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
LarsJose@proton.me

Nick Jung

Universität Ulm
Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik
nick.jung@uni-ulm.de

Adam Kastner

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Automation und angewandte Informatik
adam.kastner@kit.edu

Anna Klyushina

TU Darmstadt
Das Fachgebiet Regelungsmethoden und Intelligente Systeme
anna.klyushina@tu-darmstadt.de

Alexander Kopp

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
alexander1.kopp@uni-a.de

Julian Landauer

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
landauer@acin.tuwien.ac.at

Arthur Lepsien

Universität Hohenheim
FG Prozessanalytik
arthur.lepsien@uni-hohenheim.de

Boris Lohmann

Technische Universität München
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Lohmann@tum.de

Victor Lopez

Leibniz Universität Hannover
Institut für Regelungstechnik
lopez@irt.uni-hannover.de

Jonas Maier

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik / Professur für Modellierung und Simulation technischer Systeme
jonas.maier@uni-saarland.de

Bernd Müller

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
bernd.mueller@isys.uni-stuttgart.de

Michael Olbrich

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
michael.olbrich@uni-a.de

Benedikt Oppeneiger

Technische Universität Ilmenau
Institut für Mathematik/Fachgebiete Optimization-based control und Differentialgleichungen
benedikt-florian.oppeneiger@tu-ilmenau.de

Amine Othmane

Universität des Saarlandes
Modellierung und Simulation technischer Systeme
amine.othmane@uni-saarland.de

Maik Pfefferkorn

Technical University of Darmstadt
Control and Cyber-Physical Systems Laboratory
maik.pfefferkorn@iat.tu-darmstadt.de

Maximilian Pierer von Esch

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Regelungstechnik
maximilian.v.pierer@fau.de

Johannes Reuter

Hochschule Konstanz
Institut für Systemdynamik
jreuter@htwg-konstanz.de

Philipp Rodegast

Universität Stuttgart
Institut für technische und numerische Mechanik
philipp.rodegast@itm.uni-stuttgart.de

Joachim Rudolph

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
j.rudolph@lsr.uni-saarland.de

Klaus Röbenack

TU Dresden
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
klaus.roebenack@tu-dresden.de

Jens Saak

Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems
Computational Methods in Systems and Control Theory
saak@mpi-magdeburg.mpg.de

Alexander Schaum

Universität Hohenheim
Prozessanalytik
alexander.schaum@uni-hohenheim.de

Peter Scherer

Universität des Saarlandes
Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik
p.scherer@lsr.uni-saarland.de

Julian Schiller

Leibniz Universität Hannover
Institut für Regelungstechnik
schiller@irt.uni-hannover.de

Kurt Schlacher

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
kurt.schlacher@jku.at

Simon Schmidt

Johannes Kepler Universität Linz
Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
simon.schmidt@jku.at

Markus Schöberl

Johannes Kepler Universität
Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung
markus.schoeberl@jku.at

Robert Seifried

TU Hamburg
Institut für Mechanik und Meerestechnik
robert.seifried@tuhh.de

Niclas Tietze

TU Ilmenau
FG Regelungstechnik
niclas.tietze@tu-ilmenau.de

Caroline Trage

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
caroline.trage@isys.uni-stuttgart.de

Jaco-Louis Venter

TU Wien
Automation and Control Institute (ACIN)
venter@acin.tuwien.ac.at

Rick Voßwinkel

WHZ
Automatisiertes Fahren und Fahrerassistenzsysteme
rick.vosswinkel@fh-zwickau.de

Alexander Wachter

Technische Universität Wien
Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN)
alexander.wachter@tuwien.ac.at

Frank Woittennek

UNIT Tirol

Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik

frank.woittennek@unit-tirol.at

Karl Worthmann

TU Ilmenau

Institut für Mathematik

karl.worthmann@tu-ilmenau.de

Kai Wulff

TU Ilmenau

Fachgebiet Regelungstechnik

kai.wulff@tu-ilmenau.de

Julian Zimmer

Universität Ulm

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik

Julian.Zimmer@uni-ulm.de

Alexander Zuyev

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme

CSC

zuyev@mpi-magdeburg.mpg.de

Entwurf dynamischer Backstepping-Regler für parabolische Systeme

N. Gehring¹, J. Deutscher²

¹ Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Johannes Kepler Universität Linz, Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Tel: +43(0)732/24686320, E-Mail: nicole.gehring@jku.at

² Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 41, 89081 Ulm, Tel: +49(0)731/5027002, E-Mail: joachim.deutscher@uni-ulm.de

Es ist bekannt, dass sich für endlichdimensionale Mehrgrößensysteme, die durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben werden, mit Hilfe dynamischer Zustandsrückführungen Entwurfsziele erreichen lassen, die über eine reine Stabilisierung hinausgehen. Exemplarisch seien die Eingangs-Ausgangslinearisierung und die Entkopplungsregelung genannt (z.B. [3]). Das Potential derartiger dynamischer Zustandsrückführungen, bei denen die Stellgröße nicht nur vom Systemzustand, sondern auch vom Reglerzustand abhängt, ist für unendlichdimensionale Systeme bisher weitgehend ungenutzt, zumindest wenn man von beobachterbasierten Zustandsrückführungen absieht, die ebenfalls dynamische Regler darstellen. Vor diesem Hintergrund ist die implizite Einführung eines Reglerzustands im Rahmen eines Backstepping-Entwurfs für hyperbolische partielle Differentialgleichungen (PDEs) in [4] besonders interessant. Inspiriert dadurch wurden im Rahmen des vorletzten GMA-Fachausschusses systematisch dynamische Erweiterungen für hyperbolische PDEs eingeführt und für das derart dynamisch erweiterte System statische Zustandsrückführungen entworfen (siehe auch [2]). Wesentlich war dabei die Definition eines unendlichdimensionalen Reglerzustands so, dass die Transportzeiten zwischen den Komponenten der Systemeingänge und -ausgänge alle gleich sind.

Im Vortrag werden die Ideen aus [2] aufgegriffen und auf gekoppelte parabolische PDEs übertragen. Ähnlich wie im hyperbolischen Fall erfolgt dazu die Transformation der Ortsvariablen der einzelnen PDEs so, dass alle in einem reduzierten Ortsbereich den gleichen Diffusionskoeffizienten aufweisen. Durch die Einführung einer geeigneten unendlichdimensionalen Reglerdynamik werden dann alle Ortsbereiche auf das gleiche Intervall erweitert. So kann im letzten Schritt mit Hilfe einer Backstepping-Transformation sehr einfach eine statische Zustandsrückführung für das dynamisch erweiterte System gefunden werden, die eine dynamische Rückführung in Bezug auf den Systemzustand darstellt. Im Gegensatz zu statischen Zustandsrückführungen (z.B. [1]) ermöglicht dies nicht zuletzt auch eine allgemeinere Wahl des geschlossenen Kreises.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Deutscher und S. Kerschbaum. Backstepping control of coupled linear PIDEs with spatially varying coefficients. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 63:4218–4233, 2018.
- [2] N. Gehring, J. Deutscher und A. Irscheid. Using dynamic extensions for the backstepping control of hyperbolic systems. 2024. In Begutachtung.
- [3] A. Isidori. *Nonlinear Control Systems*. Springer London, 1995.
- [4] J. Redaud, J. Auriol und Y. Le Gorrec. In domain dissipation assignment of boundary controlled Port-Hamiltonian systems using backstepping. *Syst. Contr. Lett.*, 185: 105722, 2024.

Regelung nichtlinearer parabolischer Systeme unter Ausnutzung von flachheitsbasierten Parametrierungen

A. Irscheid[†], N. Gehring[‡], J. Deutscher^{*}, J. Rudolph[†]

[†] Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Deutschland,
E-Mail: {a.irscheid, j.rudolph}@lsr.uni-saarland.de

[‡] Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Johannes Kepler Universität
Linz, Österreich, E-Mail: nicole.gehring@jku.at

^{*} Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Deutschland, E-Mail:
joachim.deutscher@uni-ulm.de

Parabolische Systeme beschreiben typischerweise Diffusions- und Wärmeleitungsphänomene. Treten im Prozessmodell neben den (parabolischen) partiellen Differentialgleichungen (PDEs) auch gewöhnliche Differentialgleichungen (ODEs) auf, die sich als dynamische Randbedingungen der PDEs widerspiegeln, spricht man von sogenannten PDE-ODE-Systemen. Die Regelung derartiger Systeme wird dadurch erschwert, dass eine Aktuierung zumeist nur am Rand der PDEs und damit nicht über den gesamten Ortsbereich verteilt möglich ist. Ist zusätzlich die ODE am nicht-aktuierten Rand nichtlinear, kann ohne Linearisierung oder Approximation der PDE auf keine bekannten Entwurfsverfahren zurückgegriffen werden, da typische Ansätze wie der Backstepping-Entwurf in [1] (siehe auch [5] für eine Einführung) auf lineare Systeme beschränkt sind. Für genau solche nichtlinearen PDE-ODE-Systeme wurden im letztjährigen Fachausschuss erste Ideen für einen als lösungsbasiert bezeichneten Reglerentwurf vorgestellt, der die Flachheitseigenschaft des Systems nutzt (siehe [7]) und mit klassischen Backstepping-Transformationen kombiniert. Bekanntlich impliziert dabei Flachheit die Existenz einer differentiellen Parametrierung, aus der sich unmittelbar eine flachheitsbasierte Steuerung ableitet. Sowohl die Parametrierung als auch die Steuerung ergeben sich dabei als Lösung von Cauchy-Problemen (vgl. [2, 6, 7, 8]). Dieser Aspekt wurde im letzten Jahr als zentrales Element für den lösungsbasierten Reglerentwurf – ähnlich wie im hyperbolischen Fall in [3] – aufgegriffen, um ein spezielles lineares Cauchy-Problem zu formulieren, das vom Zustand des nichtlinearen Systems abhängt. Aus dessen Lösung folgte direkt die stabilisierende Zustandsrückführung.

Die Ideen vom letztjährigen Fachausschuss werden im Vortrag aufgegriffen, um lineare parabolische PDEs mit nichtlinearer Randdynamik zu regeln (siehe auch [4]). Dabei wird gezeigt, wie die Lösung des Cauchy-Problems analytisch berechnet werden kann und dass sich daraus eine nichtlineare Zustandstransformation des PDE-ODE-Systems in eine für die Regelung einfachere Form ergibt. Da diese Transformation für lineare Systeme äquivalent zur Backstepping-Transformation ist, kann der lösungsbasierte Reglerentwurf als Verallgemeinerung der Backstepping-Methode auf nichtlineare verteilt-parametrische Systeme verstanden werden. Der neue Zugang erlaubt dabei neben der Stabilisierung von Ruhelagen auch das Folgen von Referenztrajektorien und nutzt bekannte Entwurfsmethoden für nichtlineare ODEs.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Deutscher und N. Gehring. Output feedback control of coupled linear parabolic ODE-PDE-ODE systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 66(10):4668–4683, 2021.
- [2] M. Fliess, H. Mounier, P. Rouchon und J. Rudolph. A distributed parameter approach to the control of a tubular reactor: a multivariable case. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Band 1, S. 439–442, 1998.
- [3] A. Irscheid, J. Deutscher, N. Gehring und J. Rudolph. Output regulation for general heterodirectional linear hyperbolic PDEs coupled with nonlinear ODEs. *Automatica*, 148:110748, 2023.
- [4] A. Irscheid, N. Gehring, J. Deutscher und J. Rudolph. Stabilizing nonlinear ODEs with diffusive actuator dynamics. *IEEE Control Syst. Lett.*, 8:1259–1264, 2024.
- [5] M. Krstic und A. Smyshlyaev. *Boundary Control of PDEs: A Course on Backstepping Designs*. SIAM, 2008.
- [6] B. Laroche, P. Martin und P. Rouchon. Motion planning for the heat equation. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 10(8):629–643, 2000.
- [7] J. Rudolph und F. Woittennek. Motion planning and open loop control design for linear distributed parameter systems with lumped controls. *Int. J. Contr.*, 81(3): 457–474, 2008.
- [8] B. Schörkhuber, T. Meurer und A. Jüngel. Flatness of semilinear parabolic PDEs—A generalized Cauchy–Kowalevski approach. *IEEE Trans. Autom. Control*, 58(9):2277–2291, 2013.

Flachheitsbasierte Steuerung eines Balkens mit skalarem Randeingriff: Neue Gedanken zu einer alten Frage

J. Rudolph

Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes

E-Mail: j.rudolph@lsr.uni-saarland.de

Vor fast genau dreißig Jahren erfolgte in Diskussionen mit Hugues Mounier die Erweiterung der flachheitsbasierten Steuerung auf Systeme mit verteilten Parametern, zunächst für die Wellengleichung (s. bspw. [1]). Schon kurz nach der Verallgemeinerung auf parabolische Systeme im Herbst 1995 konnte eine erste praktische Anwendung realisiert werden. Sie betraf einen in einer horizontalen Ebene rotierenden elastischen Arm mit Last am freien Ende, der als Rayleigh-Bernoulli-Balken modelliert wurde [2]. In diesem Fall steht für eine partielle Differentialgleichung vierter Ordnung im Ort nur ein skalarer Stelleingriff am durch einen Motor aktuierten, der Last gegenüber liegenden Rand zur Verfügung. Für den Entwurf der Steuerung wurde mittels Methoden der Operatorenrechnung und der Modultheorie eine sog. Basisgröße gefunden, die eine Rolle analog einem flachen Ausgang in der nichtlinearen Regelungstheorie spielt. Durch den unendlich-dimensionalen (parabolischen) Charakter der Aufgabe kommen zur Parametrierung der Trajektorien unendliche Reihen und Gevrey-Funktionen ins Spiel [3]. In ganz analoger Weise konnte der etwas einfachere Fall eines Kragbalkens mit Drehmomenteingriff basierend auf einem Euler-Bernoulli-Balken-Modell für einen Piezo-Balken behandelt und technisch umgesetzt werden [4].

Anders als bspw. bei parabolischen Gleichungen zweiter Ordnung, wie der Wärmeleitungsgleichung oder einfachen Rohrreaktoren mit voll aktuiertem Rand [5] oder auch einem Kragbalken mit unabhängigen Eingriffen über die Kraft und das Drehmoment [6], blieb eine interessante Frage offen: *Wie kann die für die Bewegungsplanung und den Steuerungsentwurf so wichtige (abstrakte) Basisgröße physikalisch interpretiert werden?* (Trotz eines Angebots einer guten Flasche Rotwein wurde diese Frage bis heute nicht beantwortet.) Eine Antwort auf diese Frage dient nicht alleine der Erkenntnis, sondern sie dürfte eine Schlüsselrolle für eine Verallgemeinerung auf nichtlineare Fälle spielen, wie sie in [7] für die Gleichungen zweiter Ordnung zur Modellierung chemischer Reaktoren gelang, und ebenso für die Entwicklung von Methoden zur Regelung bspw. in Verallgemeinerung von [8].

Der wesentliche Schritt zur Einführung der (abstrakten) Basisgröße wie beim Balken-Problem ist eine geeignet gewählte sog. Erweiterung der Skalare des System-Moduls, die eine Inversion spezieller Operatoren ermöglicht (s. bspw. [9, 10]). Alternativ, und das ist der neue Gedanke zur Beantwortung der alten Frage, kann die Basisgröße aber auch für ein erweitertes System eingeführt werden, wo sie direkt eine Interpretation als Randgröße zulässt. Dies wird exemplarisch am Problem des Kragbalkens mit Drehmoment am freien Rand gezeigt.

Es ist offensichtlich, dass andere Fälle nicht vollständig über den Rand gesteuerter Systeme, die nicht unmittelbar in ein Cauchy-Problem überführbar sind, in analoger Weise behandelt werden können.

Literatur

- [1] H. Mounier, J. Rudolph, M. Petitot, and M. Fliess: A flexible rod as a linear delay system, in: Proc. European Control Conference 1995, Rome, Italy, pp. 3676–3681, 1995.
- [2] Y. Aoustin, M. Fliess, H. Mounier, P. Rouchon, and J. Rudolph: Theory and practice in the motion planning and control of a flexible robot arm using Mikusiński operators, in: Proc. 5th Symposium on Robot Control, pp. 287–293, Nantes, France, 1997.
- [3] M. Fliess, H. Mounier, P. Rouchon et J. Rudolph: Systèmes linéaires sur les opérateurs de Mikusiński et commande d’une poutre flexible, in: ESAIM: Proc., Vol. 2, pp. 183–193, 1997.
- [4] W. Haas and J. Rudolph: Steering the deflection of a piezoelectric bender, in: Proc. European Control Conference ECC 99, Karlsruhe, No. F1010-4, 1999.
- [5] M. Fliess, H. Mounier, P. Rouchon, and J. Rudolph: A distributed parameter approach to the control of a tubular reactor: a multivariable case, in: Proc. 37th IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 1, pp. 439–442, 1998.
- [6] T. Meurer, D. Thull, and A. Kugi: Flatness-based tracking control of a piezoactuated Euler–Bernoulli beam with non-collocated output feedback: theory and experiments. *Int. J. Contr.*, 81(3), 475–493, 2008.
- [7] A. F. Lynch and J. Rudolph: Flatness-based boundary control of a nonlinear parabolic equation modelling a tubular reactor, in “Nonlinear Control in the Year 2000”, A. Isidori, F. Lamnabhi-Lagarrique, W. Respondek (Eds.), pp. 45–54, Springer, 2000.
- [8] A. Irscheid, N. Gehring, J. Deutscher und J. Rudolph. Stabilizing nonlinear ODEs with diffusive actuator dynamics. *IEEE Control Syst. Lett.*, 8:1259–1264, 2024.
- [9] J. Rudolph: Beiträge zur flachheitsbasierten Folgeregelung linearer und nichtlinearer Systeme endlicher und unendlicher Dimension, Shaker, Aachen, 2003.
- [10] J. Rudolph und F. Woittennek: Motion planning and open loop control design for linear distributed parameter systems with lumped controls. *Int. J. Contr.*, 81(3): 457–474, 2008.

Beobachtergestützte Regelung eines schweren Seils an einem Wagen

L. Jose[†], A. Irscheid[‡], J. Rudolph[‡]

Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes

[†] E-Mail: s81ajose@stud.uni-saarland.de

[‡] E-Mail: {a.irscheid, j.rudolph}@lsr.uni-saarland.de

In der Literatur beschriebene Regler für eine Klasse von hyperbolischen PDE-ODE-Systemen wurden auf einem Mikrocontroller implementiert und über Experimente validiert. Dazu wurde der in Abbildung 1 dargestellte experimentelle Aufbau für ein schweres Seil an einem Wagen verwendet. Der Wagen wird mittels Motor und Zahnriemen entlang der horizontalen Achse bewegt. Ein schweres Seil ist an einer Welle so am Wagen befestigt, dass es frei schwingen kann. Am unteren Ende des Seils ist eine Last angebracht. Das Verhalten des Seils kann durch ein unendlichdimensionales Modell beschrieben werden [1].

Die zur Verfügung stehenden Messgrößen sind die Wagenposition und der durch das Seil beeinflusste Drehwinkel an der Welle. Dies erlaubt die Anwendung des Beobachters aus [2] zur Approximation des unendlichdimensionalen Zustands des Seils. So kann unter anderem die horizontale Position der Last geschätzt werden, ohne dass weitere Sensoren erforderlich sind.

Ein lösungsbasierter Regler mit Online-Prädiktion aus [3] und ein Backstepping-Ansatz wie in [1] beschrieben sind zusammen mit dem Beobachter auf einem Mikrocontroller implementiert. Zusätzlich wird der auf Passivität basierende Regler aus [4] für einen Vergleich herangezogen. Basierend auf experimentellen Ergebnissen und den Aufwänden bei der Implementierung werden die Ansätze gegenübergestellt.

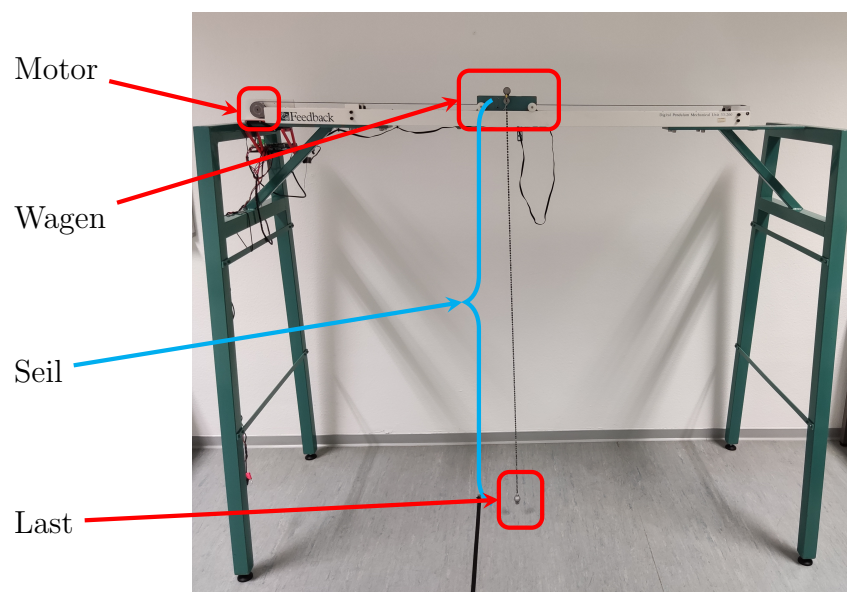


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau des schweren Seils an einem Wagen.

Literatur

- [1] Gehring, N., Irscheid, A., Deutscher, J., Woittennek, F. und Rudolph, J.: Control of distributed-parameter systems using normal forms: an introduction. at - Automatisierungstechnik, Vol. 71, No. 8, 2023, pp. 624–646.
- [2] Irscheid, A., Deutscher, J., Gehring, N. und Rudolph, J.: Output regulation for general heterodirectional linear hyperbolic PDEs coupled with nonlinear ODEs. Automatica, Vol. 148, S. 110748, 2023.
- [3] Irscheid, A., Gehring, N., Deutscher, J. und Rudolph, J.: Tracking Control for 2×2 Linear Heterodirectional Hyperbolic PDEs that Are Bidirectionally Coupled with Nonlinear ODEs. In: Auriol, J., Deutscher, J., Mazanti, G., Valmorbida, G. (eds) Advances in Distributed Parameter Systems. Advances in Delays and Dynamics, Vol. 14, 2022, Springer, Cham.
- [4] Thull, D., Wild, D. und Kugi, A.: Infinit-dimensionale Regelung eines Brückenkranes mit schweren Ketten (Infinite-dimensional Control of a Gantry Crane with Heavy Chains). at - Automatisierungstechnik, Vol. 53, No. 8, 2005, pp. 400–410.

Flachheitsbasierte Regelung hyperbolischer Mehrgrößensysteme unter Verwendung von Normalformen

S. Schmidt¹, N. Gehring¹, F. Woittennek²

¹ Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Johannes Kepler Universität Linz, Altenberger Straße 69, 4040 Linz, E-Mail: {simon.schmidt, nicole.gehring}@jku.at

² Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, UMIT Tirol, Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, 6060 Hall in Tirol, E-Mail: frank.woittennek@umit-tirol.at

Flachheit endlichdimensionaler Systeme ist eine Systemeigenschaft, die im linearen Fall äquivalent zur Steuerbarkeit ist und einen besonders einfachen Reglerentwurf ermöglicht (z.B. [2]). So kann die flachheitsbasierte Parametrierung eines Systems genutzt werden, um eine Regelungsnormalform herzuleiten. In dieser Darstellung reduziert sich das System auf mehrere Ketten von Integratoren, weshalb ein stabilisierendes Regelgesetz direkt abgelesen werden kann. Die Idee der flachheitsbasierten Regelung mithilfe derartiger Normalformen lässt sich auch auf unendlichdimensionale Systeme übertragen. Aufbauend auf den in [3] untersuchten hyperbolischen Differentialgleichungen (hPDEs) zweiter Ordnung mit einer skalaren Stellgröße werden in [4] Systeme betrachtet, die eine zusätzliche endlichdimensionale Dynamik am nicht-aktuierten Rand aufweisen. Ein Beispiel für derartige Systeme ist ein massebehaftetes (schweres) Seil mit einer Last am unteren Ende. Als Grundlage für den Reglerentwurf wird in [4] (siehe auch [1]) eine flachheitsbasierte Parametrierung aus der Lösung des PDE-Systems abgeleitet, wobei exakte Steuerbarkeit vorausgesetzt wird. Basierend darauf wird die hyperbolische Regelungsnormalform (hRNF) eingeführt, aus der sich eine stabilisierende Zustandsrückführung einfach ableiten lässt. In der hRNF ist dabei der Kette von Integratoren, die die Randdynamik abbildet, eine Transportgleichung vorgeschaltet, die den unendlichdimensionalen Charakter der hPDE widerspiegelt. Bisher existieren allerdings nur Ergebnisse für hPDEs mit skalarer Stellgröße.

Im Vortrag werden die Konzepte zur flachheitsbasierten Regelung in [4] erstmals auf Systeme mit mehreren Stellgrößen erweitert, wobei aufgrund der Komplexität zunächst auf die Berücksichtigung einer Randdynamik verzichtet wird. So lässt sich wie im Eingrößensystem aus der flachheitsbasierten Parametrierung eine hRNF angeben. Analog zum endlichdimensionalen Fall entspricht diese hRNF unter Umständen einer verallgemeinerten Zustandsdarstellung, in der die Stellgrößen auch zeitlich verschoben auftreten. Entsprechend muss beim Reglerentwurf zwischen statischen, quasi-statischen und dynamischen Zustandsrückführungen unterschieden werden (vgl. [2]). Zur Einfachheit der Darstellung beschränkt sich der Vortrag teilweise auf Systeme mit zwei Stellgrößen.

- [1] N. Gehring, A. Irscheid, J. Deutscher, F. Woittennek und J. Rudolph. Control of distributed-parameter systems using normal forms: an introduction. *at - Automatisierungstechnik*, 71(8):624–646, 2023.
- [2] J. Rudolph. *Flatness-Based Control: An Introduction*. Shaker Verlag Aachen, 2021.
- [3] D. L. Russell. Canonical forms and spectral determination for a class of hyperbolic distributed parameter control systems. *J. Math. Anal. Appl.*, 62(1):186–225, 1978.
- [4] F. Woittennek. Beobachterbasierte Zustandsrückführungen für hyperbolische verteilt-parametrische Systeme. *at - Automatisierungstechnik*, 60(8):462–474, 2012.

Exakte Linearisierung durch quasistatische Rückführungen: Ein Überblick für eine Klasse Lagrangescher Systeme

G. Hartl, M. Schöberl

Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung, Johannes Kepler Universität Linz,
Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Tel: +43(0)732/2468-6320, E-Mail: {georg.hartl,
markus.schoeberl}@jku.at

Für differentiell flache Systeme können Problemstellungen, wie der Entwurf von Vorsteuerungen oder Rückführungen, einfach und effizient gelöst werden, siehe z.B. [2]. Der Entwurf einer flachheitsbasierten Folgeregelung beruht auf der exakten Linearisierung durch endogene Rückführungen. Eine etablierte Methode ist die exakte Linearisierung durch quasistatische Rückführung von Brunovský-Zuständen, siehe z.B. [1], die jedoch auf ein Regelgesetz führt, das die Messung oder Schätzung bestimmter Zeitableitungen des flachen Ausgangs voraussetzt. Für (x, u) -flache Systeme in klassischer Zustandsdarstellung existiert eine systematische Methode für die exakte Linearisierung mittels quasistatischer Zustandsrückführung, womit statische Folgeregelgesetze entworfen werden, die nur Messungen des Zustands des Systems erfordern, siehe [3].

Dieser Vortrag widmet sich holonomen mechanischen Systemen mit p Freiheitsgraden und $p - 1$ Stellgrößen (d.h. minimal unteraktuiert), die durch die Lagrange-Gleichungen zweiter Art beschrieben werden (Lagrangesche Systeme) und deren flacher Ausgang nur von den generalisierten Koordinaten abhängt. Wir geben einen Überblick über die exakte Linearisierung durch Rückführung des Zustands Lagrangescher Systeme sowohl in klassischer als auch in verallgemeinerter Zustandsraumdarstellung, siehe [4] und [5]. Wir präsentieren alle Integratorkettenlängen, die man durch quasistatische Rückführung des Zustands des Systems erhält, wobei nur jene quasistatischen Rückführungen betrachtet werden, die Übergänge von einer Ruhelage zu einer anderen Ruhelage ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Delaleau, E.; Rudolph, J.: Control of flat systems by quasi-static feedback of generalized states, *International Journal of Control*, 71(5):745-765, 1998.
- [2] Fliess, M.; Lévine, J.; Martin, P.; Rouchon, P.: Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples, *International Journal of Control*, 61(6):1327-1361, 1995.
- [3] Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: Tracking control for (x,u) -flat systems by quasi-static feedback of classical states, *Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications (SIGMA)*, 20(71), 2024.
- [4] Hartl, G.; Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: Exact linearization of minimally underactuated configuration flat Lagrangian control systems by quasi-static feedback of classical states, *8th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control (LHMNC)*, 2024.
- [5] Hartl, G.; Gstöttner, C.; Kolar, B.; Schöberl, M.: On the exact linearization of minimally underactuated configuration flat Lagrangian systems in generalized state representation, *26th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS)*, 2024.

Partial State Feedback Model-Following Control for Nonlinear Systems

N. Tietze, K. Wulff, J. Reger

Fachgebiet Regelungstechnik, TU Ilmenau, Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau,

E-Mail: {niclas.tietze, kai.wulff, johann.reger}@tu-ilmenau.de

We consider the model-following control structure [1] for nonlinear process dynamics. Fig. 1 depicts the two-degrees-of-freedom control structure, consisting of the model control loop (MCL) and the process control loop (PCL).

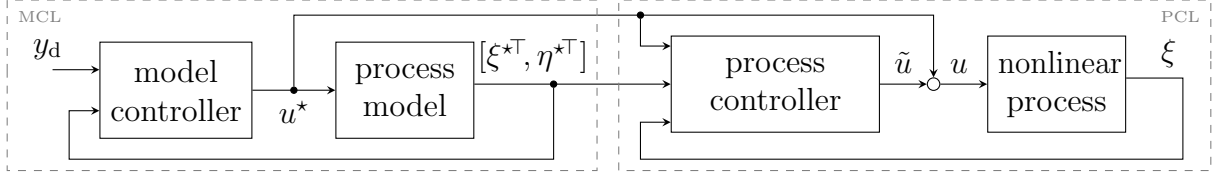


Figure 1: Model-following control block diagram with partial state feedback in the process-control loop.

The process dynamics are in Byrnes-Isidori form

$$\dot{\xi} = A\xi + B(a(\xi, \eta) + b(\xi, \eta)u + \Delta(\xi, \eta, t)), \quad \dot{\eta} = q(\xi, \eta),$$

with (A, B) in Brunovský-form, where $\xi(t) \in \mathbb{R}^{n_\xi}$ and $\eta(t) \in \mathbb{R}^{n_\eta}$, $n_\eta = n - n_\xi \geq 0$ denote the external and the internal state, respectively, and $u(t) \in \mathbb{R}$ is the input. The scalar function Δ represents an unknown perturbation. We assume that the scalar functions $a(\cdot, \cdot)$ and $b(\cdot, \cdot)$ are continuous and locally bounded, where $b(\xi, \eta) \geq b_0 > 0$, and the origin $\eta = 0$ of the zero dynamics (i.e. $\xi \equiv 0$) is exponentially stable with globally Lipschitz function $q(\cdot, \cdot)$. The MFC structure consists of two control loops with open-loop dynamics

$$\begin{aligned} \dot{\xi}^* &= A\xi^* + B(a(\xi^*, \eta^*) + b(\xi^*, \eta^*)u^*), & \dot{\eta}^* &= q(\xi^*, \eta^*), \\ \dot{\tilde{\xi}} &= A\tilde{\xi} + B(\tilde{a}(\xi, \eta, \xi^*, \eta^*, u^*) + b(\xi, \eta)\tilde{u} + \Delta(\xi, \eta, t)), & \dot{\tilde{\eta}} &= q(\xi, \eta) - q(\xi^*, \eta^*), \end{aligned}$$

where $\xi^*(t) \in \mathbb{R}^{n_\xi}$ and $\eta^*(t) \in \mathbb{R}^{n_\eta}$ denote the state of the model with input $u^*(t) \in \mathbb{R}$ for the MCL, and for the PCL we consider the error state $\tilde{\xi} = \xi - \xi^*$, and $\tilde{\eta} = \eta - \eta^*$, with input $\tilde{u} = u - u^*$, and $\tilde{a}(\xi, \eta, \xi^*, \eta^*, u^*) = a(\xi, \eta) - a(\xi^*, \eta^*) + (b(\xi, \eta) - b(\xi^*, \eta^*))u^*$. We assume the **internal state** η to be **unknown**, see [2], and apply state feedback of the external state ξ such that the output $y(t) = \xi_1(t)$ tracks a reference signal $y_d(t)$, whose time derivatives $y_d^{(k)}(t)$, $k = 1, \dots, n_\xi$ are bounded and available at run-time. For the MCL and the PCL, we apply feedback linearisation for tracking and stabilisation, respectively, i.e.

$$u^* = b^{-1}(\xi^*, \eta^*)(-a(\xi^*, \eta^*) + y_d^{(n_\xi)} + v), \quad \tilde{u} = -b^{-1}(\xi, \eta^*)\tilde{a}(\xi, \eta^*, \xi^*, \eta^*, u^*) + \tilde{v},$$

with feedback $v(\xi^* - \xi_d)$, $\xi_d^\top = [y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n_\xi-1)}]$ of the model tracking error and feedback $\tilde{v}(\tilde{\xi})$ of the state of the PCL. With unknown internal state η , the nonlinearity $\tilde{a}(\xi, \eta, \xi^*, \eta^*, u^*)$ cannot be compensated by $\tilde{u}$. We consider two designs for v and $\tilde{v}$, namely a trajectory tracking design with discontinuous control, and a stabilising high-gain design.

Lyapunov redesign trajectory tracking ([3]): For our first design, we assume that $|\Delta(\xi, \eta, t)| \leq \delta(\xi, t)$ is satisfied locally for some known function δ . We apply Lyapunov redesign control [4] to the PCL to compensate the perturbation Δ . The control law reads

$$\tilde{v} = b^{-1}(\xi, \eta^*)\tilde{v}_s(\tilde{\xi}) - \tilde{\Gamma}(\xi, t) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{\xi}} B\right),$$

where $\tilde{v}_s(\tilde{\xi})$ is chosen such that $\dot{\tilde{\xi}} = A\tilde{\xi} + B\tilde{v}_s(\tilde{\xi})$ is exponentially stable with Lyapunov function $\tilde{V}$. Calculating a bound $\Omega^* \subset \mathbb{R}^n$ for the solution (ξ^*, η^*) of the MCL, and using some Lyapunov function V_P for the dynamics of the PCL, we show that the solution $(\tilde{\xi}, \tilde{\eta})$ of the PCL remains within a level-set $\tilde{\Omega} \subset \mathbb{R}^n$ of V_P for a sufficiently large gain $\tilde{\Gamma}$. Similar to [5], the solution $(\xi, \eta) = (\xi^* + \tilde{\xi}, \eta^* + \tilde{\eta})$ of the process remains in a vicinity of (ξ^*, η^*) , and thus in the Minkowski sum $\Omega = (\Omega^* \oplus \tilde{\Omega})$. If the initial state of the MCL is sufficiently close to the initial state of the process, the set $\tilde{\Omega}$ becomes arbitrarily small, and thus $\tilde{\Gamma}$ can be chosen as $\tilde{\Gamma}(\xi, t) = \delta(\xi, t) + \gamma$ with arbitrarily small $\gamma \geq 0$.

For illustration, we consider set-point tracking ($\xi_d^\top \equiv [y_d, 0, \dots, 0]$, $y_d^{(n)} \equiv 0$) for a second order flat system (i.e. $n_\eta = 0$). Fig. 2 shows the solution ξ^* (purple line) and ξ for three different initial states ξ_0 (blue, cyan and yellow line). We have that $\xi(t) \in (\{\xi^*(t)\} \oplus \tilde{\Omega})$ for all $t \geq 0$.

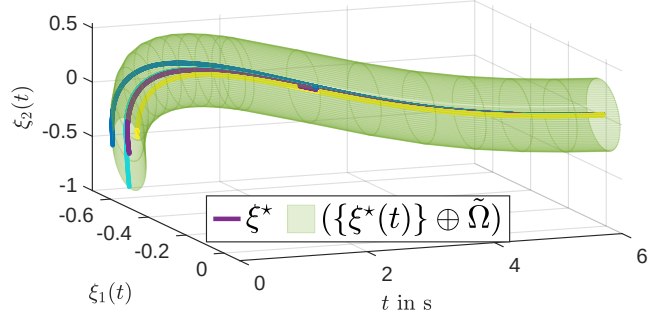


Figure 2: Solution of the closed loop.

High-Gain stabilisation ([6]): For our second design, we consider the case $n_\eta \geq 1$ with $y_d \equiv 0$, $\xi_d \equiv 0$, $b(\xi, \eta) = 1$, where $|\Delta(\xi, \eta, t)| \leq \rho + L_\Delta(\|\xi\|_2 + \|\eta\|_2)$, $\rho, L_\Delta \geq 0$ holds globally, and assume that $a(\cdot, \cdot)$ is globally Lipschitz with Lipschitz constant $L_a \geq 0$. Extending our high-gain design of [7] to partial state feedback, we apply the control law

$$v = -\alpha^\top \xi^*, \quad \tilde{v} = -\tilde{\alpha}^\top \tilde{\xi}, \quad \tilde{\alpha} = D^{-1} \alpha \varepsilon^{-1}, \quad D = \text{diag}(\varepsilon^{n_\xi-1}, \varepsilon^{n_\xi-2}, \dots, 1), \quad \varepsilon \in (0, 1],$$

where the gain $\alpha \in \mathbb{R}^n$ is chosen such that $A - B\alpha^\top$ is Hurwitz. As L_a and L_Δ increase, we require a smaller scaling ε , and thus a larger gain $\tilde{\alpha}$ to asymptotically stabilise the origin for a vanishing perturbation $\rho = 0$; and for $\rho \neq 0$ a smaller value of ε yields smaller ultimate bounds for (ξ, η) . For the MFC design, the typical peaking-phenomenon [8] can be overcome if a sufficiently accurate estimate of the initial process state is available.

Finally, we study an automotive engine-based traction control [9] using feedback linearisation of the dynamics of the drivetrain ($n_\xi = 2, n_\eta = 3$). We apply a high-gain MFC control law for tracking a desired crankshaft velocity y_d . The MFC design does not exhibit peaking even if y_d is not known in advance.

Literature

- [1] H. Erzberger, “On the use of algebraic methods in the analysis and design of model-following control systems,” National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, Tech. Rep., 1968.
- [2] N. A. Mahmoud and H. K. Khalil, “Asymptotic stabilization of minimum phase nonlinear systems using output feedback,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, San Antonio, USA, 1993, pp. 1960–1965.
- [3] N. Tietze, K. Wulff, and J. Reger, “Dynamic partial state-feedback revisited for output tracking using Lyapunov redesign and model-following control,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, Milan, Italy, 2024.
- [4] S. Gutman, “Uncertain dynamical systems – a Lyapunov min-max approach,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 24, no. 3, pp. 437–443, 1979.
- [5] N. Tietze, K. Wulff, and J. Reger, “Local stabilisation of nonlinear systems with time- and state-dependent perturbations using sliding-mode model-following control,” in *IEEE Conference on Decision and Control*, Milan, Italy, 2024.
- [6] —, “A model-following control approach to peaking attenuation in high-gain partial state feedback for nonlinear systems,” in *IFAC Conference of Modelling, Identification and Control of nonlinear systems*, Lyon, France, 2024.
- [7] J. Willkomm, K. Wulff, and J. Reger, “Set-point tracking for nonlinear systems subject to uncertainties using model-following control with a high-gain controller,” in *European Control Conference*, 2022, pp. 1617–1622.
- [8] H. J. Sussmann and P. V. Kokotović, “The peaking phenomenon and the global stabilization of nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 4, pp. 424–440, 1991.
- [9] E. J. V. Reichensdörfer, D. Odenthal, and D. Wollherr, “On the stability of nonlinear wheel-slip zero dynamics in traction control systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 489–504, 2020.

Über die Lie-Algebra-Rang-Bedingung für polynomiale Einbettungssysteme

D. Gerbet, K. Röbenack

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Georg-Schumann-Straße 7A,
Tel: ++49(0)351/463 33940, E-Mail: {daniel.gerbet1,klaus.roebenack}@tu-dresden.de

Die Steuerbarkeit eines dynamischen Systems ist eine wichtige Eigenschaft in der Regelungstheorie. Für lineare Systeme existieren viele hinreichende und notwendige Kriterien, die relativ einfach zu prüfen sind.

Im Gegensatz dazu existieren für nichtlineare Systeme bereits eine Fülle von Definitionen verschiedener Steuerbarkeitsbegriffe [1]. Diese lassen sich zunächst in lokale und globale Eigenschaften unterteilen. Während die globale Steuerbarkeit ein noch in vieler Hinsicht offenes Forschungsgebiet ist, existieren notwendige, aber auch hinreichende Kriterien für die lokale Steuerbarkeit.

Für ein eingangsaffines System

$$\dot{x} = f_0(x) + \sum_{i=1}^m u_i f_i(x) = F(x, u), \quad x \in \mathcal{M} \subseteq \mathbb{R}^n \quad (1)$$

mit der reell-analytischen Mannigfaltigkeit $\mathcal{M}$ als Zustandsraum und den darauf definierten Vektorfeldern $f_i : \mathcal{M} \rightarrow T\mathcal{M}$, $i = 0, \dots, m$ wird der Punkt $q \in \mathcal{M}$ von $p \in \mathcal{M}$ *erreichbar* genannt, wenn es für ein $T > 0$ eine Lösung von (1) mit $x(0) = p$, $x(T) = q$, und einer messbaren Eingangstrajektorie $u : [0, T] \rightarrow \mathbb{R}^m$ gibt. Erlaubt man zudem eine Zeitumkehr, wird q als *schwach erreichbar* von p bezeichnet.

Betrachtet man ein Vektorfeld f als Differentialoperator und schreibt f^k für die k -fache Anwendung auf sich selbst, wobei f^0 die Identitätsabbildung ist, lässt sich der zugehörige *Fluss* als

$$\phi_f(t, x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{t^k}{k!} f^k(x) = e^{tf}(x)$$

schreiben. Die Flüsse ϕ_f der Vektorfelder $\mathcal{F} = \{F(\cdot, u) \mid u \in \mathbb{R}^m\}$ bilden eine *Lie-Gruppe* mittels ihrer Komposition. Dies bedeutet, dass sich die Menge der schwach erreichbaren Punkte von p , oder der *Orbit* durch p , als

$$\{e^{t_s f_s} \dots e^{t_2 f_2} e^{t_1 f_1}(p) \mid f_i \in \mathcal{F}, t_i \in \mathbb{R}\}$$

schreiben lässt. Dieser Orbit ist eine reell-analytische Untermannigfaltigkeit von $\mathcal{M}$, bekannt als der Satz von Nagano-Sussmann [3, 4]. Durch die Gruppeneigenschaft existiert auch eine *Lie-Algebra* der Vektorfelder mit der *Lie-Klammer* [2]

$$[f_1, f_2] = f_1 f_2 - f_2 f_1$$

als Operation. Die von den Vektorfeldern $f \in \mathcal{F}$ aufgespannte Lie-Unteralgebra muss dem Tangentialraum der Untermannigfaltigkeit entsprechen. Ob die Untermannigfaltigkeit mit $\mathcal{M}$ identisch ist, lässt sich also anhand des Rangs der Lie-Unteralgebra überprüfen.

Dieser Test wird hier durchgeführt, indem die Mannigfaltigkeit $\mathcal{M}$ implizit durch polynomiale Gleichungen der Form $g(x) = 0$, $g \in \mathbb{R}[x]$ beschrieben wird. Dies führt auf ein reelles Ideal $G \subseteq \mathbb{R}[x]$ und den zugehörigen Quotientenring $Q = \mathbb{R}[x]/G$. Die Vektorfelder in (1) werden als Elemente des freien Moduls Q^n betrachtet, und bilden ein Untermodul

$$I = \langle f_0, \dots, f_m \rangle \subseteq Q^n.$$

Es lässt sich leicht zeigen, dass die Lie-Unteralgebra, generiert durch alle iterierten Lie-Klammern, durch einen Untermodul $\text{ad}^\infty I \subseteq Q^n$ darstellbar und in endlich vielen Schritten berechenbar ist. Zur Überprüfung des Rangs werden äußere Produkte der generierenden Vektorfelder herangezogen, die selbst wiederum einen endlich generierten Untermodul des Außenproduktraums $\bigwedge^k Q^n$ bilden. Das gemeinsame Verschwinden aller k -Vektorfelder für $k = \dim \mathcal{M}$ an einem Punkt $p \in \mathcal{M}$ zeigt somit die Verletzung der Lie-Algebra-Rang-Bedingung an. Auf diese Weise lässt sich die Menge der nicht schwach erreichbaren Punkte als reelle Varietät bestimmen.

Literatur

- [1] R. Hermann und A. J. Krener. Nonlinear controllability and observability. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 22(5):728–740, 1977.
- [2] J. M. Lee. *Introduction to Smooth Manifolds*, Band 218 der *Graduate Texts in Mathematics*. Springer, New York, 2006.
- [3] T. Nagano. Linear differential systems with singularities and an application to transitive Lie algebras. *Journal of the Mathematical Society of Japan*, 18(4):398 – 404, 1966. <https://doi.org/10.2969/jmsj/01840398>.
- [4] H. J. Sussmann. An extension of a theorem of Nagano on transitive Lie algebras. In: *Proc. of the American Mathematical Society*, Band 45, S. 349–356, 1974.

Zeitoptimale TCP- und Roboterbasisplatzierung für Pick-and-Place-Aufgaben in hochgradig eingeschränkten Umgebungen

A. Wachter*, C. Hartl-Nesic*, A. Kugi*,**

* Technische Universität Wien, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik,
Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich, Tel: +43(0)1 58801 – 37601,
E-Mail: {wachter, hartl, kugi}@acin.tuwien.ac.at

** Austrian Institute of Technology (AIT),
Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich, E-Mail: andreas.kugi@ait.ac.at

In modernen Produktionslinien sind Roboterzellen von maßgeblicher Bedeutung, da sie aufgrund ihrer Flexibilität eine Vielzahl von Aufgaben effizient bewältigen und dabei einen hohen Durchsatz erzielen können. Für den optimalen Betrieb einer solchen Zelle müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Dazu gehören die Platzierung der Roboterbasis, der Werkstücke und der Arbeitsstationen, sowie die Wahl des am Roboterflansch montierten Greifers, und die Trajektorie, die der Roboter kollisionsfrei und möglichst zeitoptimal durchlaufen sollte. Die suboptimale Wahl der Positionierung der einzelnen Komponenten der Zelle kann signifikante Auswirkungen auf den Produktionsbetrieb haben, u.a. Produktionsverzögerungen, erhöhte Produktionskosten sowie ein gesteigerter Energieverbrauch.

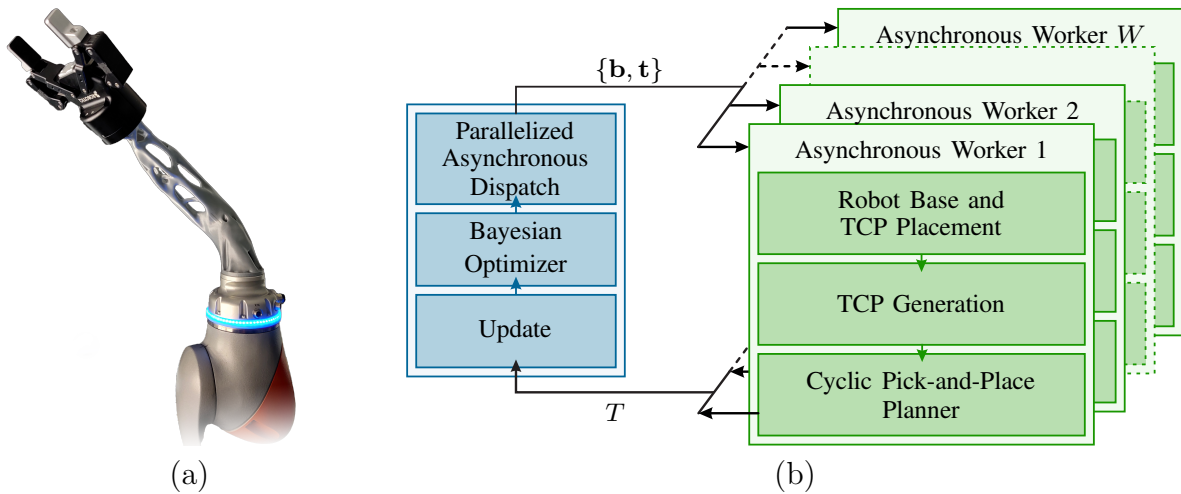


Abbildung 1: (a) Resultat für ein gewichtsoptimales Verbindungsstück zwischen Greifer und Roboterflansch, welches eine kollisionsfreie und nahe zeitoptimale Bahn ermöglicht sowie den Kräften entlang der Trajektorie standhält. (b) Schematische Darstellung des Optimierungsschemas: Ein Bayesscher Optimierer weist asynchron Platzierungen der Roboterbasis $\mathbf{b}$ und des TCPs $\mathbf{t}$ zu, die von W asynchronen Agenten parallel bewertet werden. Jeder Agent erzeugt den TCP und die Roboterbahnen mit dem zyklischen Pick-and-Place-Planer und bewertet die minimale Zykluszeit T . Die Ergebnisse werden asynchron dem Bayesschen Optimierer zurückgesandt.

In der Industrie wird die Platzierung der Komponenten der Roboterzelle derzeit von erfahrenen Experten durchgeführt. Aktuelle Publikationen verwenden hauptsächlich Leistungskennzahlen wie Erreichbarkeitsindizes [2] oder Manipulierbarkeit [1, 3]. Diese Ansätze

¹Die FFG ist die zentrale nationale Förderorganisation und stärkt Österreichs Innovationskraft. Dieses Projekt wird aus Mitteln der FFG gefördert. www.ffg.at

berücksichtigen jedoch nicht den vollständigen Prozess und die Roboterbewegungen, so dass sie nur eine Approximation darstellen. Insbesondere in komplexen Umgebungen liefern diese Methoden oft keine gültigen Platzierungen und stoßen an ihre Grenzen. Daher sind Ansätze erforderlich, die die Trajektorienplanung des Roboters und die sogenannte *Greif-Redundanz* für die manipulierten Werkstücke systematisch berücksichtigen. Die Greif-Redundanz bedeutet dabei, dass ein Werkstück mit unterschiedlichen Greif-Posen gegriffen und abgelegt werden kann.

Dieser Vortrag stellt ein Verfahren zur Optimierung der Roboterbasisplatzierung und der Platzierung des Werkzeugmittelpunkts (tool center point, TCP) für Pick-and-Place-Aufgaben in Roboterzellen vor. Das Hauptziel ist das Finden von Platzierungen für zeitoptimale, zyklische Pick-and-Place-Aufgaben in einer Montagezelle. Dabei werden die Punkt-zu-Punkt-Bewegungen des Roboters, die Greif-Redundanz und die Zyklizität systematisch berücksichtigt. Durch die Nutzung der resultierenden Trajektorien sowie des Robotermodells können die auf den TCP und den Roboterflansch wirkenden Kräfte berechnet werden. Dieses Kraftprofil kann anschließend in einem Topologieoptimierungsverfahren verwendet werden, um ein gewichtsoptimiertes Verbindungsstück zwischen Greifer und Roboterflansch zu erzeugen, wie in Abbildung 1a dargestellt.

Das Optimierungsverfahren, welches in Abbildung 1b dargestellt ist, basiert auf einer asynchronen, parallelisierten Optimierung, bei der mittels *Bayesian Optimization* verschiedene Positionen der Roboterbasis $\mathbf{b}$ und des TCP $\mathbf{t}$ im Suchraum abgetastet werden. Für jeden Abtastpunkt werden zeitoptimale, kollisionsfreie Trajektorien unter Berücksichtigung der Greifkonfiguration und der Zyklizität berechnet. Die resultierende Zykluszeit T wird als Ergebnis den Optimierungsprozess zurückgeführt. Um diesen Prozess möglichst effizient zu gestalten, wird parallel eine Datenbank aufgebaut, welche für ähnliche TCP- und Roboterbasispositionen als Initialisierung für die Trajektorienplanung dient.

Dieser Ansatz führt zu einer signifikanten Verbesserung der Zykluszeit gegenüber aktuellen Methoden und der menschlichen Expertise. Die Wirksamkeit des Verfahrens wurde durch Experimente mit einem KUKA LBR iiwa-Roboter mit sieben Freiheitsgraden validiert.

Literaturverzeichnis

- [1] Behnam Kamrani, Viktor Berbyuk, Daniel Wäppling, Uwe Stickelmann, und Xiaolong Feng. Optimal robot placement using response surface method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44:201–210, 2009.
- [2] Abhijit Makhal und Alex K Goins. Reuleaux: Robot base placement by reachability analysis. In: *International Conference on Robotic Computing*, S. 137–142, 2018.
- [3] Charalampos Valsamos, Kanstantsin Miatliuk, Adam Wolniakowski, Vassilis Mouliantis, und Nikos Aspragathos. Optimal kinematic task position determination – application and experimental verification for the UR-5 manipulator. *Applied Sciences*, 12 (18):9352, 2022.

Energiebalanceregung für modulare Multilevel-Stromrichter auf Basis von Vibrational Control

A. Kastner†, L. Gröll‡, V. Hagenmeyer*

†Tel: +49(0)721/60825736, E-Mail: adam.kastner@kit.edu

‡Tel: +49(0)721/60825740, E-Mail: lutz.groell@kit.edu

*E-Mail: veit.hagenmeyer@kit.edu

†‡* Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Modulare Multilevel-Stromrichter (MMC) werden in modernen Stromnetzen genutzt, um Elektrizität zwischen Gleichspannung und Wechselspannung zu wandeln, beispielsweise in Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen. Sie bestehen aus sechs Zweigen, die aus jeweils mehreren in Reihe geschalteten Modulen mit eigenen leistungselektronischen Schaltern und Kondensatoren aufgebaut sind.

Primär sind im MMC die Ströme auf der Wechselspannungs- und Gleichspannungsseite zu regeln, um einerseits den gewünschten Leistungsfluss zu erreichen und andererseits die innerhalb des Stromrichters gespeicherte Energie konstant zu halten. Ein sekundäres Regelungsziel stellt die Energieverteilung zwischen den einzelnen Zweigen dar, um Instabilität zu vermeiden [1].

Das aus einem vereinfachten elektrischen Modell [2] hergeleitete regelungstechnische Streckenmodell ist bilinear und *nichtquadratisch* mit sechs Stellgrößen und drei primären Regelgrößen. Für diese Klasse von Modellen werden die unterschiedlichen Redundanzbegriffe [3] eingeführt, und es werden die Methoden der *Dynamic Control Allocation* [4] vorgestellt. Bezogen auf die Anwendung werden die verbleibenden Freiheitsgrade für eine *Output Invisible Control Allocation* [4] genutzt.

Ein Problem bei der Umsetzung ist, dass für die Balancierung der sechs Zweigenenergien, einem fünfdimensionalen Regelungsproblem, nur drei redundante Stellgrößen verbleiben. Mittels der Methode der *Vibrational Control* werden neue virtuelle Stellgrößen eingeführt. Anders als bei klassischen zeitvarianten Ansätzen, bei denen das nicht erforderlich ist, da über die Zeitableitungen die Steuerbarkeit gegeben ist, kann hier im Zeitinvarianten gearbeitet werden. Die Vibrational-Control-Methode basiert auf gleitenden Mittelwerten der Energien über eine Netzperiode, deren Dynamik über *Mittelungsmethoden höherer Ordnung* [5] ermittelt wird. Das gemittelte System erhält mit Vernachlässigung kleiner Terme die Struktur von parallelen Integratorketten, für die eine Regelung entworfen wird.

Die technische Realisierung der Mittelung erfolgt mit einem Kurzzeitintegrator. Ein solcher bringt eine Totzeit in die Streckendynamik ein, die beim Stabilitätsnachweis und beim Reglerentwurf zu berücksichtigen ist. In beiden Fällen wird das charakteristische Polynom, welches in die Klasse der *Quasipolynome* fällt, zur Auswertung herangezogen. Die im Prozess auftretenden hebbaren Singularitäten werden nicht eliminiert, um die Quasipolynomstruktur zu erhalten. Der Reglerentwurf wird im Zeitdiskreten unter Berücksichtigung der bekannten Polkorrespondenzen ausgeführt.

Die Funktion der vorgestellten Reglerentwurfsstrategie wird mit numerischen Simulationen demonstriert.

Literatur

- [1] Karwatzki, D.; Mertens, A.: Generalized control approach for a class of modular multilevel converter topologies, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 33, Nr. 4, S. 2888–2900, 2018.
- [2] Bräckle, D.; Himmelmann, P.; Gröll, L.; Hagenmeyer, V.; Hiller, M.: Energy pulsation reduction in modular multilevel converters using optimized current trajectories, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, Bd. 2, S. 171–186, 2021.
- [3] Kreiss, J.; Tregouët, J.-F.: Input redundancy: Definitions, taxonomy, characterizations and application to over-actuated systems, *Systems & Control Letters*, Bd. 158, ID 105060, 2021.
- [4] Cristofaro, A.; Galeani, S.: Output invisible control allocation with steady-state input optimization for weakly redundant plants, *53rd IEEE Conference on Decision and Control*, S. 4246–4253, 2014.
- [5] Sanders, J. A.; Verhulst, F.; Murdock, J. A.: *Averaging Methods in Nonlinear Dynamical Systems*, Springer, New York, 2007.

Iterative schemes for approximating periodic Carathéodory solutions to nonlinear control systems with measurable inputs

Alexander Zuyev

Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstraße 1,
39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/6110478, E-Mail: zuyev@mpi-magdeburg.mpg.de

This presentation deals with nonlinear control-affine systems governed by ordinary differential equations with bounded measurable input functions. The problem of finding periodic trajectories for these systems is addressed in the framework of Carathéodory solutions. It is shown that, under the assumption of dominant linearization, the periodic boundary value problem has a unique solution for any admissible control input. This solution can be obtained as the limit of a simple iterative scheme or a Newton-type method. Additionally, under certain technical conditions, sufficient contraction criteria for the corresponding generating operators are analytically derived. The proposed iterative approach is applied to compute periodic solutions for a realistic chemical reaction model with discontinuous control inputs.

Anmerkungen zum Entwurf von PI-Reglern

Peter Hippe, Erlangen

Es gibt Systeme, die sich nur mit Hilfe exponentiell instabiler Regler stabilisieren lassen. Bei den meisten praktischen Systemen, die sich für den Einsatz linearer Regler eignen, ist dies jedoch mit stabilen (wenn man den I-Anteil einmal außen vorlässt) möglich. Wenn man beobachterbasierte PI-Regler so entwerfen möchte, dass sie eine gute Störunterdrückung liefern, sollte man die Pole des Regelkreises links von den Polen des Systems platzieren. Dieses Vorgehen kann jedoch zu instabilen Reglern führen, wenn das System Übertragungsnullstellen besitzt. Für SISO-Systeme lässt sich sehr einfach demonstrieren, dass eine Vorgabe der Eigenwerte des geschlossenen Regelkreises links von den Nullstellen zu instabilen Reglern führen kann. Wenn dies zu einem verbesserten Störverhalten führen würde, könnte man darüber diskutieren, ob man die Instabilität des Reglers dafür in Kauf nimmt. Nun zeigt sich aber, dass solche Regler ein teils dramatisch schlechteres Störverhalten liefern als stabile. Deshalb sollte man die Regler kompensierend auslegen. Bei MIMO-Systemen reicht eine Vorgabe der Regelkreis-Pole entsprechend den Nullstellen-Lagen nicht aus. Erst wenn man auch die Nullstellen-Richtungen berücksichtigt, ergibt sich ein gutes Störverhalten. Bei SISO-Systemen ist es ohne Einfluss auf das Regel-Ergebnis, ob man die Zustandsrückführung oder den Zustands-plus-Störbeobachter kompensierend auslegt. Bei MIMO-Strecken ist dies nicht mehr der Fall; die positive Wirkung auf die resultierende Störunterdrückung ist aber auch hier in beiden Fällen vorhanden [1]. Bei eingangsseitigen Störungen kann es sinnvoll sein, Zustandsrückführung und Beobachter kompensierend auszulegen. Dies wird auch für MIMO-Systeme möglich, wenn man den in [2] vorgestellten modifizierten Entwurf von PI-Reglern anwendet, der mit einem Einheitsbeobachter-basierten Regler ohne Durchgriff beginnt. Durch geeignete Wahl des Durchgriffs wird dann sichergestellt, dass der I-Anteil resultiert.

Literatur

[1] Hippe, P.: Design of MIMO PI-compensators without exponentially unstable poles. Automatisierungstechnik 72 (2024), S. 271-280.

[2] Hippe, P.: Simplified MIMO design of observer-based PI control in view of input saturation. Automatisierungstechnik 71 (2023), S. 179-185.

Datenbasierte robuste Output-Regulation für LTI-Systeme mittels Koopman-Operatoren

Joachim Deutscher

Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 41,
89081 Ulm, Tel: +49 731 50 27002, E-Mail: joachim.deutscher@uni-ulm.de

Gegenstand des Vortrags ist die datenbasierte Lösung des robusten Output-Regulation-Problems für endlich-dimensionale zeitkontinuierliche LTI-Systeme mittels Ausgangsregler. Dies erfordert die Bestimmung einer dynamischen Zustandsrückführung und eines Beobachters basierend auf dem Internen-Modell-Prinzip, um Führungsgrößen stationär genau und robust ein- und Störgrößen auszuregeln. Für den Entwurf stehen dabei lediglich eine endliche Anzahl zeitlich abgetasteter Messungen der Regelgröße bei Auftreten von Störungen zur Verfügung. Das datenbasierte robuste Output-Regulation-Problem wird in [11] mit Hilfe des *informativity approach* (siehe z. B. [10]) für zeitdiskrete LTI-Systeme gelöst, wobei allerdings Zustandsinformation und Kenntnis des Störmodells angenommen werden. Andere Einschränkungen, wie z. B. nicht robuste Entwürfe oder Annahme stabiler Strecken, finden sich auch bei anderen Zugängen (siehe [3] für eine Übersicht). Eine weitere Möglichkeit zur datenbasierten Regelung, welche für zeitkontinuierliche LTI-Systeme direkt anwendbar ist, besteht in der Verwendung des *Koopman-Operators* (siehe [7] für eine Übersicht). Bei diesem Ansatz werden für dynamische Systeme sog. Observablen eingeführt, welche die Systemdynamik in einem unendlich-dimensionalen Raum beschreiben. Die zeitliche Entwicklung der Observablen erhält man durch Anwendung des Koopman-Operators, der selbst eine lineare unendlich-dimensionale Abbildung im Raum der Observablen ist. Damit ist es anhand des Koopman-Operators möglich, die Analyse nichtlinearer Systeme mit etablierten Methoden der linearen unendlich-dimensionalen Systemtheorie durchzuführen (siehe z. B. [2]). Besonderes Merkmal des Koopman-Operators ist seine inhärente Eigenschaft durch Daten mittels der sog. *dynamic mode decomposition (DMD)* approximierbar zu sein (siehe [6]). Dies ermöglicht eine vollständig datengetriebene Analyse und davon ausgehend auch Synthese nichtlinearer Systeme (siehe [7]). Das Output-Regulation-Problem wurde bisher nur in [4] für nichtlineare Systeme mit Eingangsstörungen unter Verwendung des Koopman-Operators behandelt. Dazu erfolgt eine Rückführung auf ein Output-Regulation-Problem für ein bilineares System unter restriktiven Annahmen. Zudem wird kein datenbasierter Entwurf mit einem unbekannten System und nicht bekannten Störgrößen betrachtet.

Im Vortrag wird die Koopman-Theorie genutzt, um für das eingangs formulierte Problem einen datenbasierten Regler zu bestimmen. Ein besonderer Vorteil der Koopman-Theorie besteht darin, dass die Eigenwerte des Störmodells direkt anhand der Daten bestimmt werden können und somit wie die Strecke nicht vorab bekannt sein müssen. Dies führt auf eine allg. Lösung des datenbasierten robusten Output-Regulation-Problems (siehe auch [3]) und ermöglicht die anschauliche Darstellung der Koopman-Methode für einfache LTI-Systeme. Die resultierenden Ergebnisse können anschließend auf allg. Systemklassen, wie z. B. nichtlineare endliche-dimensionale Systeme und lineare unendlich-dimensionale Systeme übertragen werden. Bei der Anwendung des Koopman-Operators zur datenbasierten Output-Regulation ergeben sich mehrere Problemstellungen. Der Koopman-Operator ist zunächst nur für autonome Systeme, d. h. für Systeme ohne Eingang definiert. Um auch den Eingang beim Entwurf einbeziehen zu können, wird ein Eingangsgenerator eingeführt.

Damit ergibt sich ein autonomes erweitertes System, auf das die Koopman-Theorie unmittelbar anwendbar ist. Im Gegensatz zu den alternativen Ansätzen in [5, 8] ermöglicht dies die exakte Bestimmung der Eingangsmatrix aus den Daten. Eine wichtige Fragestellung betrifft die Erzeugung geeigneter Daten, welche die vollständige Information für den Entwurf enthalten. Dazu wird gezeigt, dass für zyklische LTI-Systeme das datengetriebene robuste Output-Regulation-Problem für fast alle Anfangsbedingungen lösbar ist, sofern die zugehörigen klassischen Lösbarkeitsbedingungen erfüllt sind. Um ausschließlich Ausgangsdaten beim Entwurf verwenden zu können, wird ein einfacher Vorschlag unter Verwendung von Delay-Koordinaten gemacht (siehe [1]). Dies führt auf eine Hankel-Matrix als Datenmatrix, welche Grundlage für eine Hankel-DMD zur Bestimmung der Modalgrößen des Koopman-Operators ist. Eine numerisch stabile Koopman-Analyse lässt sich dann mit Hilfe der SVD-enhanced-DMD unter Verwendung einer Singulärwertzerlegung der Hankel-Matrix implementieren (siehe [9]). Die Ergebnisse des Vortrags werden anhand eines Zahlenbeispiels in Simulationen verdeutlicht. Abschließend werden mögliche Erweiterungen auf lineare und nichtlineare unendlich-dimensionale Systeme diskutiert.

- [1] ARBABI, H. ; MEZIĆ, I.: Ergodic theory, dynamic mode decomposition, and computation of spectral properties of the Koopman operator. In: *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.* 16 (2017), S. 2096–2126
- [2] CURTAIN, R. ; ZWART, H.: *Introduction to Infinite-Dimensional Systems Theory*. New York : Springer-Verlag, 2020
- [3] DEUTSCHER, J.: Data-driven robust output regulation of continuous-time LTI systems using Koopman operators. In: *IEEE Trans. Autom. Control* (2024). – angenommen
- [4] KIEBOOM, B. ; BARTZIOKA, M. ; JAFARIAN, M.: Utility of the Koopman operator in output regulation of disturbed nonlinear systems. In: *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2023, S. 2616–2621
- [5] KORDA, M. ; MEZIĆ, I.: Linear predictors for nonlinear dynamical systems: Koopman operator meets model predictive control. In: *Automatica* 93 (2018), S. 149–160
- [6] KUTZ, N. ; BRUNTON, S. ; BRUNTON, B. ; PROCTOR, J.: *Dynamic Mode Decomposition*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2016
- [7] MAUROY, A. ; MEZIĆ, I. ; SUSUKI, Y.: *The Koopman Operator in Systems and Control*. Springer Cham, 2020
- [8] PROCTOR, J. ; BRUNTON, S. ; KUTZ, J.: Generalizing Koopman theory to allow for inputs and control. In: *SIAM J. Appl. Dyn. Sys.* 17 (2018), S. 909–930
- [9] SCHMID, P.: Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data. In: *J. Fluid Mechanics* 656 (2010), S. 5–28
- [10] WAARDE, H. van ; EISING, J. ; TRENTELMAN, H. ; CAMLIBEL, M.: Data informativity: A new perspective on data-driven analysis and control. In: *IEEE Trans. Autom. Control* 65 (2020), S. 4753–4768
- [11] ZHU, L. ; CHEN, Zh.: Data informativity for robust output regulation. In: *IEEE Trans. Autom. Control* (2024). – angenommen

Non-overshooting output shaping for switched linear systems under arbitrary switching using eigenstructure assignment

K. Wulff[†], M. C. Honecker[†], R. Schmid[‡], J. Reger[†]

[†] Fachgebiet Regelungstechnik, TU Ilmenau, Helmholtzplatz 5, 98693 Ilmenau, E-Mail: {kai.wulff, maria-christine.honecker, johann.reger}@tu-ilmenau.de

[‡] Dept. of Electrical and Electronic Engineering, University of Melbourne, Grattan Street, Parkville, Victoria, 3010, Australia, E-Mail: rschmid@unimelb.edu.au

Switched systems constitute a special kind of hybrid dynamical systems that consist of a family of dynamical subsystems with a switching signal that orchestrates the dynamics between them. Such systems appear in many engineering applications such as regenerative power systems, communication networks, aircraft control, electro-hydraulic systems and intelligent control systems with logic-based controllers [8, 16]. The dynamics of the overall switched system are much more complex and may exhibit very different behaviour as can be found in the constituent subsystems. Accordingly switched systems have been studied for more than two decades by now. The majority of contributions is dedicated to the stability analysis of this system class, see e.g. [2, 15, 9] and references therein. With an increasing number of stability results available the focus moved towards control design methods. Many proposed design approaches employ numerical tools like LMI methods, H_∞ or set-theory approaches [4, 3, 20].

In this contribution we consider switched linear systems that switch autonomously in an arbitrary fashion, i.e. the switching is not restricted in neither time-domain nor state-space, and study the feedback control design using eigenstructure assignment. Such design method is well-established for linear time-invariant systems [11, 13, 10] and has already seen some successful transfer to switched linear systems in terms of pole-placement designs [17, 18] and eigenstructure assignment approaches [1, 5, 19]. In [6] we introduce the notion of feedback rectifiable pairs, which states the existence of a switched feedback such that the closed-loop subsystems have the same eigenvectors. We formulate necessary and sufficient conditions for feedback rectifiability of pairs of two subsystems. Essentially the intersections of pairs of subspaces determined by the constituent systems evaluated for various eigenvalues has to span the whole state space. The subspace spanned is described by a polynomial matrix that can be calculated by the constructive procedure proposed.

This contribution aims towards shaping the outputs of switched linear MIMO systems while guaranteeing stability for arbitrary switching. In particular we devise controller such that the outputs are non-overshooting or even monotonic as shown in Figure 1. To this effect we employ the results in [14, 12], where globally monotonic and non-overshooting tracking of step references for LTI systems is investigated. Combining these results with the parametrisation of stable eigen-space assignments in [6] yields a design procedure that also guarantees monotonic outputs for step references [7]. However, strict monotonic

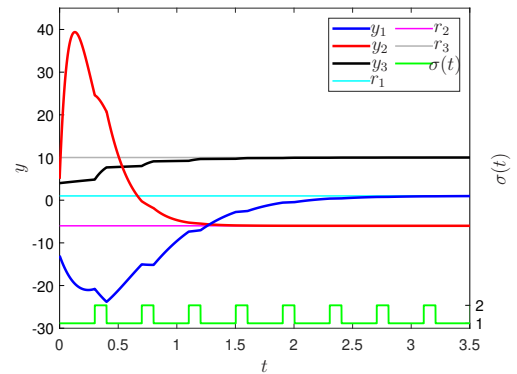


Figure 1: Closed-loop switched system with non-overshooting responses at outputs y_1, y_2 and monotonic output y_3 .

outputs may not be achievable for certain systems. Therefore we propose a partitioning that simultaneously assigns the modes of the subsystems to their mutual outputs. We present conditions to check the feasibility of such partitioning for the eigenstructure assignment problem. From these feasible partitionings we may assign non-overshooting or monotonic behaviour to each output. Further, for a given choice of partitioning we obtain specific sets of eigenvalues as well as eigenvectors to be chosen from.

Literature

- [1] N. Bajcinca und D. Flockerzi. Geometric Approaches to State Feedback Control for Continuous and Switched Linear Systems. *Asian Journal of Control*, 17(6) S. 2055–2071, 2015.
- [2] R. DeCarlo, M. Branicky, S. Pettersson, und B. Lennartson. Perspectives and results on the stability and stabilisability of hybrid systems. *Proceedings of the IEEE*, 88(7) S. 1069–1082, 2000.
- [3] M. Fiacchini und S. Tarbouriech. Control co-design for discrete-time switched linear systems. *Automatica*, 82 S. 181–186, 2017.
- [4] M. Fiacchini, A. Girard, und M. Jungers. On the Stabilizability of Discrete-Time Switched Linear Systems: Novel Conditions and Comparisons. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(5) S. 1181–1193, 2016.
- [5] H. Haimovich. Simultaneous Triangularization of Switching Linear Systems: Arbitrary Eigenvalue Assignment and Genericity. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(9) S. 2572–2578, 2016.
- [6] M. C. Honecker, H. Gernandt, K. Wulff, C. Trunk, und J. Reger. Feedback rectifiable pairs and stabilization of switched linear systems. *Systems & Control Letters*, 186 S. Article 105755, 2024.
- [7] M. C. Honecker, R. Schmid, K. Wulff, und J. Reger. Monotonic tracking of step references for switched linear systems under arbitrary switching signals. In *European Control Conference*, 2024.
- [8] D. Liberzon. *Switching in Systems and Control*. Birkhäuser, 2003.
- [9] H. Lin und P. J. Antsaklis. Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: A Survey of Recent Results. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 54(2) S. 308–322, 2009.
- [10] G. P. Liu und R. Patton. *Eigenstructure assignment for control system design*. Wiley, 1998.
- [11] B. Moore. On the flexibility offered by state feedback in multivariable systems beyond closed loop eigenvalue assignment. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 21 S. 689–692, 1976.
- [12] L. Ntogramatzidis, J.-F. Tréguët, R. Schmid, und A. Ferrante. Globally Monotonic Tracking Control of Multivariable Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(9) S. 2559–2564, 2016.
- [13] G. Roppenecker. *Zeitbereichsentwurf linearer Regelungen: Grundlegende Strukturen und eine allgemeine Methodik ihrer Parametrierung*. Oldenbourg, 1990.
- [14] R. Schmid und L. Ntogramatzidis. A Unified Method for the Design of Nonovershooting Linear Multivariable State-Feedback Tracking Controllers. *Automatica*, 46(2) S. 312–321, 2010.
- [15] R. Shorten, F. Wirth, O. Mason, K. Wulff, und C. King. Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems. *SIAM Review*, 49(4) S. 545–592, 2007.
- [16] Z. Sun und S. S. Ge. *Stability Theory of Switched Dynamical Systems*. Springer, 2011.
- [17] K. Wulff, F. Wirth, und R. Shorten. On the stabilisation of a class of SISO switched linear systems. In *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, S. 3976–3981, Seville, Spain, 2005.
- [18] K. Wulff, F. Wirth, und R. Shorten. A control design method for a class of SISO switched linear systems. *Automatica*, 45(11) S. 2592–2596, 2009.
- [19] K. Wulff, M. C. Honecker, und J. Reger. On the control design for the stabilisation of switched linear systems via eigenstructure assignment. In *European Control Conference*, S. 293–299, 2021.
- [20] D. Yang, G. Zong, und S.-F. Su. H_∞ Tracking Control of Uncertain Markovian Hybrid Switching Systems: A Fuzzy Switching Dynamic Adaptive Control Approach. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(5) S. 3111–3122, 2022.

Sensitivitätsbasierte verteilte modellprädiktive Regelung

Maximilian Pierer von Esch, Andreas Völz, Knut Graichen

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 7, 91058 Erlangen, Tel: +49(0)9131/85-27133, E-Mail: maximilian.v.pierer@fau.de

Um dem Problem der steigenden Anzahl an Freiheitsgraden bei der Regelung vernetzter und hochskalierter Multiagentensysteme zu begegnen, eignen sich insbesondere Methoden der verteilten modellprädiktiven Regelung. Diese Ansätze zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Vorteile der klassischen modellprädiktiven Regelung, wie die explizite Berücksichtigung von Beschränkungen oder die Anwendbarkeit auf nichtlineare Systeme, beibehalten und gleichzeitig die flexible, verteilte und skalierbare Struktur von Multiagentensystemen berücksichtigen [1]. Vorrangig haben sich sogenannte kooperative Ansätze als äußerst praktikabel erwiesen. Hierbei wird zunächst, analog zur klassischen modellprädiktiven Regelung, ein zentrales Optimalsteuerungsproblem formuliert und daraufhin verteilt mittels geeigneter Optimierungsalgorithmen auf Agentenebene gelöst. Somit wird die Rechenlast der numerischen Lösung auf die einzelnen Agenten verteilt und damit die Gesamtrechenzeit reduziert. Hierbei konvergieren die Teillösungen der Agenten nach ausreichend vielen Iterationen zur zentralen Lösung, wodurch im Idealfall dasselbe Regelverhalten wie im zentralen Fall erreicht wird. Der Vorteil besteht darin, dass Eigenschaften wie nominale Stabilität oder Steuerbarkeit auf den verteilten Fall übertragbar sind.

Zur Umsetzung dieser kooperativen Ansätze werden daher rechen- und kommunikations-effiziente Algorithmen benötigt, die sich auch für nichtlineare Probleme eignen. In diesem Vortrag wird daher ein neuartiger, sensitivitätsbasierter Ansatz zur Lösung hochskalierter nichtlinearer Optimalsteuerungsprobleme vorgestellt. Hierbei werden die lokalen Kostenfunktionen mittels linearer Approximationen der Kostenfunktionale der benachbarten Agenten erweitert, um die Koordination zwischen den Agenten zu gewährleisten. Der große Vorteil besteht darin, dass diese Sensitivitäten sehr effizient lokal auf Agentenebene anhand Prinzipien der Optimalsteuerungstheorie berechnet werden können und dass bei der verteilten Lösung nur ein Kommunikationsschritt zwischen benachbarten Agenten notwendig ist [2]. Des Weiteren werden die Konvergenz des Algorithmus und die Stabilität des geschlossenen Kreises im Falle inexakter Minimierung untersucht [3]. Abschließend werden sowohl simulative als auch experimentelle Ergebnisse vorgestellt.

Literatur

- [1] Christofides, P.D.; Scattolini, R.; De La Pena, D.M.; Liu, J.: Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions, *Computers & Chemical Engineering* 51, pp. 21-41, 2013
- [2] Pierer v. Esch, M.; Völz, A; Graichen, K.: Sensitivity-based distributed model predictive control: Synchronous and asynchronous execution compared to ADMM, *at-Automatisierungstechnik* 72 (2), pp. 91-106, 2024
- [3] Pierer v. Esch, M.; Völz, A; Graichen, K.: Sensitivity-based distributed model predictive control under inexact optimization, *Arxiv preprint 2406.03134*, 2024

Zur Parametrierung der modellfreien Regelung eines Gleichstrommotors

P.M. Scherer†, A. Othmane‡, J. Rudolph†

†Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes,
Campus A5 1, 66123 Saarbrücken, E-Mail: {p.scherer,j.rudolph}@lsr.uni-saarland.de

‡Modellierung und Simulation technischer Systeme, Universität des Saarlandes,
Campus A5 1, 66123 Saarbrücken, E-Mail: amine.othmane@uni-saarland.de

Etablierte modellbasierte Methoden zur Regelung technischer Systeme wie zum Beispiel flachheitsbasierte Regelung, modellprädiktive Regelung oder passivitätsbasierte Regelung erfordern ein physikalisch motiviertes mathematisches Modell des betrachteten Systems für deren Anwendung. Diese Modelle werden meist mit Hilfe von Bilanzgleichungen hergeleitet. Da die Komplexität technischer Systeme vielfach zunimmt wächst auch der Anspruch an deren Modelle. Besonders Effekte wie Reibung, magnetische Hysterese und Alterung lassen sich häufig nur unter großem Aufwand beschreiben, was dazu führt, dass ab einem gewissen Punkt der Aufwand der Modellierung deren Nutzen übersteigt.

Modellfreie Methoden wie zum Beispiel PID-Regelung, Fuzzy-Regelung oder der Einsatz neuronaler Netze erfordern kein physikalisch motiviertes, mathematisches Modell des Systems. Alternativ können signalbasierte Algorithmen in Betracht gezogen werden, wie in den Arbeiten von M. Fliess und C. Join [1, 2] vorgestellt. In diesem Rahmen wird die Systemdynamik lokal und für ein kleines Zeitintervall mit einem sogenannten ultra-lokalen Modell approximiert. Die in [1, 2] vorgestellten Methoden zeichnen sich durch ihre Einfachheit aus, wodurch sich ein breites Anwendungsspektrum eröffnet. Sie bieten ein hohes Potential aufgrund ihrer Robustheit gegenüber Störungen, allerdings kann ihre Implementierung und die damit einhergehende systematische Parametrierung mit Herausforderungen verbunden sein.

Um diesen Herausforderungen entgegenzutreten, speziell in Bezug auf die systematische Parametrierung, wird exemplarisch die modellfreie Regelung eines Gleichstrommotors (siehe Abbildung 1) analysiert. Dieses System wird ausgewählt, da es ein breites Anwendungsfeld besitzt und sich sehr einfach durch die Differentialgleichung

$$\dot{\omega}(t) = -a\omega(t) + bu(t)$$

mit positiven Parametern a, b , der Winkelgeschwindigkeit $\omega(t)$ und der Eingangsspannung $u(t)$, beschreiben lässt.

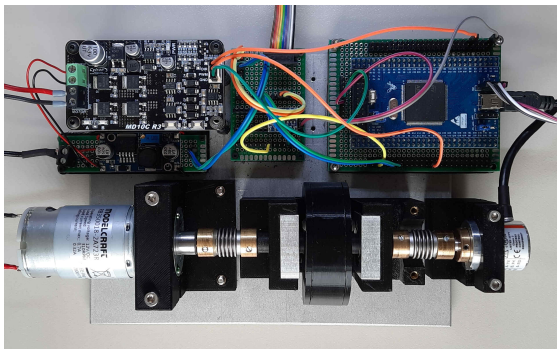


Abbildung 1: Foto des betrachteten Systems

Sogenannte ultra-lokale Modelle erster Ordnung

$$\dot{y}(t) = f(t) + \gamma u(t), \quad (1)$$

mit dem Eingang $u(t)$, der Messgröße $y(t)$, der unbekannten Störung $f(t)$ und der Verstärkung γ , können für die Approximation des Motors verwendet werden. Für (1) kann der modellfreie Regler

$$u(t) = \frac{1}{\gamma}(\dot{y}_r(t) - k_p e(t) - \hat{f}(t)),$$

mit $e(t) = y(t) - y_r(t)$ entworfen werden. Für die Approximation der Störung $f(t)$ durch

$$\hat{f}(t) = \int_{t-T-\varepsilon}^{t-\varepsilon} \dot{g}(t - \tau - \varepsilon)y(\tau) - \gamma g(t - \tau - \varepsilon)u(\tau) d\tau$$

werden algebraische Ableitungsschätzer (siehe [3] und [4] für einen Überblick) mit dem Kern g benutzt, deren Auslegung sich mit der Open-Source-Toolbox AlgDiff [5] erheblich vereinfacht (siehe auch [6] für eine umfangreiche Vorstellung der Toolbox).

Im Vortrag wird genauer auf die Parametrierung der algebraischen Ableitungsschätzer und des modellfreien Reglers eingegangen. Dabei wird gezeigt, dass die für die Stabilität des geregelten Systems verantwortliche Dynamik des Fehlers $e(t)$ durch ein Totzeitsystem beschrieben werden kann, dessen Analyse mit Hilfe des generalisierten Hermite-Biehler-Theorems (siehe beispielsweise [7]) durchgeführt werden kann. Abgerundet wird der Vortrag durch eine experimentelle Validierung der theoretischen Ergebnisse am realen Versuchsaufbau.

Literatur

- [1] M. Fliess und C. Join. Model-free control and intelligent PID controllers: Towards a possible trivialization of nonlinear control? *IFAC Proc. Volumes*, 42(10):1531–1550, 2009. DOI:10.3182/20090706-3-FR-2004.00256.
- [2] M. Fliess und C. Join. Model-free control. *Int. J. Control*, 86(12):2228–2252, 2013. DOI:10.1080/00207179.2013.810345.
- [3] M. Mboup, C. Join und Fliess M. Numerical differentiation with annihilators in noisy environment. *Numer. Algorithms*, 50(4):439–467, 2009. DOI:10.1007/s11075-008-9236-1.
- [4] A. Othmane, L. Kiltz und J. Rudolph. Survey on algebraic numerical differentiation: historical developments, parametrization, examples, and applications, *Int. J. Syst. Sci.*, 53(9):1848–1887, 2022. DOI:10.1080/00207721.2022.2025948.
- [5] A. Othmane. 2022. AlgDiff: A Python package with MATLAB coupling implementing all necessary tools for the design, analysis, and discretization of algebraic differentiators. Available at <https://github.com/aothmane-control/Algebraic-differentiators>, version 1.1.0.
- [6] A. Othmane und J. Rudolph. AlgDiff: an open source toolbox for the design, analysis and discretisation of algebraic differentiators, *at-Automatisierungstechnik*, 71(8):612–623, 2023. DOI:10.1515/auto-2023-0035
- [7] Silva, G. J., Datta, A. und Bhattacharyya, S. P. PID Controllers for Time-Delay Systems. Birkhäuser Boston, MA, 2005. DOI:10.1007/b138796

Neural network-enhanced integrators for systems defined by ordinary differential equations

A. Othmane†, K. Flaßkamp†

†Systems Modeling and Simulation, Saarland University, Tel: +49(0)681 302 3766, E-Mail: amine.othmane@uni-saarland.de

The need for accurate and efficient numerical schemes for solving differential equations remains a cornerstone of modern computational engineering. For example, the analysis of fatigue effects and lifetime prediction requires repeatedly solving differential equations under a variety of initial conditions and system parameters. This scenario epitomises the challenges faced in numerical integration: The need for high accuracy in approximating solutions while being constrained by computational resources. The traditional approach, which relies heavily on classical numerical methods such as Runge-Kutta methods (e.g. [1]) and symplectic integrators (e.g. [2]), often encounters limitations when scaling to high-dimensional systems or when long-term integration is required.

The use of neural networks for the approximation of solutions of differential equations has attracted much effort in the last years. Mesh-free approaches have been developed for special classes of partial differential equations and have shown to be faster than traditional solvers (e.g. [5, 6]). The potential of neural networks in solving ordinary differential equations in combination with the traditional forward Euler methods has been considered (e.g. [7, 3, 4]).

The current contribution deals with the delicate balance between computational effort and approximation error in numerical integration, an issue of paramount importance in the analysis of high-dimensional systems over extended time horizons. Taking advantage of the ability of NNs to approximate nonlinear functions, we propose a methodology in which NNs are trained to learn the integration errors inherent in generic numerical schemes. This learned error is then used as a correction term to improve the accuracy of the basic numerical integrator. Such a hybrid approach aims to combine the physics-based classical numerical techniques with adaptive learning capabilities of neural networks, potentially mitigating the trade-off between computational load and error size.

Our investigation includes a comparative analysis of these neural network-enhanced integrators against established numerical methods. The evaluation is anchored in computational requirements and local error metrics, providing a comprehensive view of their effectiveness.

References

- [1] J.C. Butcher. *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. Wiley, 2016.
- [2] E. Hairer, G. Wanner, and Lubich C. *Geometric Numerical Integration: Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2006.
- [3] Z. Huang, S. Liang, H. Zhang, H. Yang, and L. Lin. Accelerating numerical

- solvers for large-scale simulation of dynamical system via NeurVec. 2022. doi: 10.48550/ARXIV.2208.03680.
- [4] Z. Huang, M. Liang, and L. Lin. On robust numerical solver for ode via self-attention mechanism. 2023. doi: 10.48550/ARXIV.2302.10184.
- [5] Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, K. Bhattacharya, A. Stuart, and A. Anandkumar. Neural operator: Graph kernel network for partial differential equations, March 2020.
- [6] Z. Li, N. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, K. Bhattacharya, A. Stuart, and A. Anandkumar. Fourier neural operator for parametric partial differential equations. 2020. doi: 10.48550/ARXIV.2010.08895.
- [7] X. Shen, X. Cheng, and K. Liang. Deep Euler method: solving ODEs by approximating the local truncation error of the euler method. 2020. doi: 10.48550/ARXIV.2003.09573.

Ein hybrider Steuerungsansatz zur Trajektorienfolge von schnell bewegten Softrobotern

R. Seifried[†], M. Grube[‡]

[†]Institut für Mechanik und Meerestechnik, Technische Universität Hamburg, E-Mail: robert.seifried@tuhh.de

[‡]Institut für Mechanik und Meerestechnik, Technische Universität Hamburg, E-Mail: malte.grube@tuhh.de

Softroboter sind ein aufstrebendes und schnell wachsendes Forschungsgebiet mit potenziellen Anwendungen z.B. beim Greifen von Objekten, in der Medizintechnik oder bei Inspektionsaufgaben. Im Gegensatz zu herkömmlichen Robotern, die aus starren Materialien wie Stahl bestehen, bestehen Softroboter aus weichen Materialien wie Silikon, die eine viel geringere Steifigkeit aufweisen. Dies führt zu großen Verformungen, die neue Modellierungsmethoden sowie neue Steuerungs- und Regelungskonzepte erfordern. In der Softrobotik sind Steuerungsmethoden von besonderer Bedeutung. Dies liegt vor allem daran, dass die Integration von Sensoren, die für die Regelung erforderlich sind, oft sehr anspruchsvoll ist. Dies ist auf die weiche Struktur und die großen auftretenden Verformungen bei weichen Robotern zurückzuführen.

In der Softrobotik unterscheidet man zwischen sogenannten kinematischen und dynamischen Steuerungsverfahren. Kinematische Steuerungsverfahren vernachlässigen die Dynamik des Softroboters und betrachten ihn quasistatisch. Im Gegensatz dazu berücksichtigen dynamische Verfahren die Systemdynamik. Bisher wurden in der Softrobotik hauptsächlich kinematische Verfahren angewendet. Vor allem datenbasierte Ansätze sind weit verbreitet. Mit ihnen lassen sich Effekte aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten eliminieren und unbekannte Materialeigenschaften einfach kompensieren. Fortgeschrittene Anwendungen von Softrobotern erfordern jedoch schnellere und präzisere Bewegungen. Dabei reichen kinematische Steuerungsmethoden nicht mehr aus, da für schnelle Bewegungen die Dynamik der Softroboter nicht vernachlässigt werden kann [1].

In diesem Beitrag wird ein hybrides Steuerungsverfahren für die Trajektorienverfolgung mit Softrobotern vorgestellt und experimentell demonstriert. Der in dieser Studie verwendete Softroboter hat eine balkenartige Struktur und wird durch drei Sehnen betätigt, die von Servos angetrieben werden. Für Referenzmessungen wird ein optisches Kamera-Tracking-System auf Basis von AprilTags verwendet.

Ausgangspunkt ist die kinematische Steuerung, die auf der inversen Kinematik des Softroboters in quasi-statischer Konfiguration basiert, die von einem neuronalen Netzwerk aus experimentellen Daten gelernt wird. Aufgrund der Verwendung experimenteller Daten berücksichtigt dieser Ansatz Fertigungsungenauigkeiten und Materialunsicherheiten, ohne dass eine Parameteridentifizierung erforderlich ist. Hierauf aufbauend wird eine dynamische Steuerung vorgestellt, welche den datenbasierten inversen Kinematikteil mit der Inversion eines dynamischen Modells des Softroboters kombiniert. Dabei wird für das dynamische Modell ein stückweise konstantes Krümmungsmodell (piecewise constant curvature) verwendet. Anschließend wird die Modellinversion unter Verwendung des Konzepts der Servobindungen durchgeführt, siehe z. B. [2]. Durch die Kombination dieser beiden Teile berücksichtigt die Steuerung wiederum die Ungenauigkeiten und Unsicherheiten, aber auch die Belastungen, die sich aus der Dynamik ergeben, siehe auch [3] für weitere Erläuterungen dieses Ansatzes.

Experimente zeigen, dass bei langsamen Bewegungen sich mit der Kinematiksteuerung

bereits sehr gute Ergebnisse erzielen lassen. Für schnelle Bewegungen ist die Kinematiksteuerung jedoch ungeeignet und kann der Trajektorie nicht folgen. Dies ist dadurch zu erklären, dass hier die aus der Dynamik resultierenden Kräfte nicht mehr vernachlässigbar sind. Mit der kombinierten dynamischen Vorsteuerung lassen sich dagegen auch bei schnellen Bewegungen gute Ergebnisse erzielen.

Literatur

- [1] Grube, M.; Wieck, J.C.; Seifried, R.: Comparison of Modern Control Methods for Soft Robots. *Sensors*, Vol. 22, 9464, 2022.
- [2] Drücker, S; Seifried, R.: Trajectory-tracking Control from a Multibody System Dynamics Perspective. *Multibody System Dynamics*, Vol. 58, pp. 341–363, 2023.
- [3] Grube, M.; Drücker S.; Seifried, R.: Open loop Dynamic Trajectory Tracking Control of a Soft Robot using Learned Inverse Kinematics combined with a Dynamic Model, 2024 European Control Conference (ECC), Stockholm, Sweden, 2024, pp. 2972-2977.

Spatial exponential decay of perturbations in optimal control of general evolution equations

Benedikt F. Oppeneiger, Manuel Schaller, Karl Worthmann

Institute of Mathematics, TU Ilmenau, E-Mail: benedikt-florian.oppeneiger@tu-ilmenau.de

We consider linear-quadratic PDE-constrained optimal control problems (OCPs). Previous works have investigated the influence of perturbations stemming e.g. from time or space discretizations. Under detectability and stabilizability assumptions it was shown that the influence of perturbations decays exponentially in time for parabolic [1] and general evolution equations [2]. Recently these results were extended, to obtain a spatially exponential decay of perturbations for optimal control of elliptic and parabolic equations [3]. This justifies the use of adaptive spatial meshes in optimal control of e.g. hyperbolic equations, where certain areas of particular interest are more finely resolved than others.

In this talk, we will generalize this result to general evolution equations, including in particular transport, beam and wave equations. More specifically, we will show under a particular kind of stabilizability and detectability condition uniform in the domain size that perturbations have an exponentially localized effect [4]. The domain-uniform stabilizability and detectability will be discussed by means of a one-dimensional transport equation. Due to the finite propagation velocity of the transport equation, the control input cannot instantly influence the systems solution on the whole domain. This property will be used to derive a necessary and sufficient condition on the control domain such that the stabilizability and detectability condition is fulfilled. In future works these results could for example be used, to efficiently solve optimal control problems on networks of hyperbolic equations. Possible applications are hydraulic networks (transport equations) and adaptive buildings (Timoshenko beams).

Literatur

- [1] Grüne, L.; Schaller, M.; Schiela, A.: Sensitivity Analysis of Optimal Control for a Class of Parabolic PDEs Motivated by Model Predictive Control, SIAM Journal on Control and Optimization, Vol. 57, No. 4, pp. 2753-2774, 2019.
- [2] Grüne, L.; Schaller, M.; Schiela, A.: Exponential sensitivity and turnpike analysis for linear quadratic optimal control of general evolution equations, Journal of Differential Equations, Vol. 268, pp. 7311-7341, Elsevier, 2020.
- [3] Göttlich, S.; Schaller, M.; Worthmann, K.: Perturbations in PDE-constrained optimal control decay exponentially in space, Preprint arXiv:2403.15056, 2024.
- [4] Oppeneiger, B.; Schaller, M.; Worthmann, K.: Spatial exponential decay of perturbations in optimal control of general evolution equations, in preparation.

Güteabschätzungen von Optimalschätzproblemen mittels Turnpike-Analyse

J. D. Schiller^{*}, L. Grüne[†], M. A. Müller[‡]

^{*}Leibniz Universität Hannover, Institut für Regelungstechnik, Appelstr. 11, 30167 Hannover,

Tel: 0511/762-18902, E-Mail: schiller@irt.uni-hannover.de

[†]Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth,

Tel: 0921/55-3270, E-Mail: lars.gruene@uni-bayreuth.de

[‡]Leibniz Universität Hannover, Institut für Regelungstechnik, Appelstr. 11, 30167 Hannover,

Tel: 0511/762-4523, E-Mail: mueller@irt.uni-hannover.de

Die Rekonstruktion der internen Zustandstrajektorie eines dynamischen Systems auf Basis gemessener Eingangs-/Ausgangsdaten ist ein Problem von großer praktischer Relevanz. Dies kann z.B. durch das Lösen eines Optimierungsproblems erfolgen, um die jeweils besten Zustands- und Störungstrajektorien zu finden, die eine geeignet definierte Kostenfunktion in Abhängigkeit der verfügbaren Messdaten minimieren. Werden hierbei alle verfügbaren Daten berücksichtigt, entspricht dies dem Optimalschätzproblem mit voller Information (engl. *full information estimation*, FIE). Ist der Datensatz oder das zugrunde liegende Modell jedoch sehr groß oder steht nur eine begrenzte Zeit für die Berechnung der Lösung zur Verfügung (wie es beispielsweise bei der Online-Zustandsschätzung der Fall ist), ist die optimale Lösung des FIE-Problems in der Praxis in der Regel nicht bzw. schwer berechenbar. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, eine praktisch sinnvolle Approximation zu finden, was z.B. mittels einer Folge verkürzter Optimalschätzprobleme geschehen kann, die jeweils nur einen begrenzten zeitlichen Ausschnitt des vollständigen Datensatzes verwenden. Im Falle der Online-Zustandsschätzung entspricht dies der Schätzung mit bewegtem Horizont (engl. *moving horizon estimation*, MHE), wobei in jedem diskreten Zeitschritt ein Optimalschätzproblem mit einem Datensatz fester Größe gelöst wird.

Aktuelle Forschung im Bereich von MHE beschäftigt sich vor allem mit Stabilitäts- und Robustheitsgarantien, siehe z.B. [1, 2, 3]. Diese Studien zeigen im Wesentlichen, dass der Schätzfehler von MHE unter geeigneten Entdeckbarkeitsbedingung zu einer Umgebung des Ursprungs konvergiert, deren Größe von der tatsächlichen unbekannten Störung abhängt. Allerdings fehlen Ergebnisse zur tatsächlichen Performance von MHE, und insbesondere zur Approximationsgenauigkeit sowie Performance-Einbußen im Vergleich zur optimalen (aber unbekannten) FIE-Lösung.

Während Performance-Garantien für Beobachter bzw. Zustandsschätzer im Allgemeinen eher selten sind, spielen sie bei der optimalen Regelung oftmals eine wichtige Rolle, vor allem wenn das übergeordnete Ziel ein ökonomisches ist. Entsprechende Ergebnisse verwenden in der Regel eine *Turnpike*-Eigenschaft des zugrunde liegenden Optimalsteuerungsproblems, vgl. [4]. Diese Eigenschaft impliziert im Wesentlichen, dass optimale Trajektorien die meiste Zeit in der Nähe einer Ruhelage (oder im Allgemeinen einer optimalen zeitvariablen Referenz) bleiben. Turnpike-bezogene Argumente sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Beurteilung der Performance geschlossener Regelkreise unter Verwendung von modellprädiktiven Reglern mit allgemeinen ökonomischen Kosten und endlichem sowie unendlichem Horizont, vgl. [5, 6]. Notwendige und hinreichende Bedingungen für das Auftreten des Turnpike-Phänomens in Optimalsteuerungsproblemen werden z.B. in [7, 8]

diskutiert und beruhen in der Regel auf Dissipativität, Steuerbarkeit und geeigneten Optimalitätsbedingungen.

Im ersten Teil dieses Vortrags führen wir Turnpike-Argumente im Kontext der optimalen Zustandsschätzung ein. Insbesondere zeigen wir, dass die optimale FIE-Lösung als Turnpike für die Lösungen von verkürzten Optimalschätzproblemen dient. Wir betrachten zwei verschiedene mathematische Charakterisierungen dieses Phänomens und stellen entsprechende hinreichende Bedingungen auf, die auf strikter Dissipativität bzw. abklingender Sensitivität beruhen. Der zweite Teil dieses Vortrags behandelt neuartige Performance-Garantien für die optimale Zustandsschätzung. Hierbei konstruieren wir einen spezifischen Kandidaten zur Annäherung der FIE-Lösung durch eine Folge von verkürzten Optimalschätzproblemen. Unter der Annahme einer bestimmten Turnpike-Eigenschaft zeigen wir, dass die Performance dieses Kandidaten annähernd optimal ist, sowohl gemittelt als auch ungemittelt, mit Fehlertermen, die durch eine geeignete Wahl der Horizontlänge beliebig klein gemacht werden können. Darüber hinaus diskutieren wir interessante Schlussfolgerungen dieser Ergebnisse für MHE und zeigen einige Simulationsbeispiele.

Literaturverzeichnis

- [1] James B. Rawlings, David Q. Mayne, and Moritz M. Diehl. *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*. Nob Hill Publish., LLC, Santa Barbara, CA, USA, 2nd edition, 2020. 3rd printing.
- [2] Sven Knüfer and Matthias A. Müller. Nonlinear full information and moving horizon estimation: Robust global asymptotic stability. *Automatica*, 150:110603, 2023.
- [3] Julian D. Schiller, Simon Muntwiler, Johannes Köhler, Melanie N. Zeilinger, and Matthias A. Müller. A Lyapunov function for robust stability of moving horizon estimation. *IEEE Trans. Autom. Control*, 68(12):7466–7481, 2023.
- [4] Dean A. Carlson, Alain B. Haurie, and Arie Leizarowitz. *Infinite Horizon Optimal Control*. Springer Berlin Heidelberg, Germany, 1991.
- [5] Lars Grüne. Approximation properties of receding horizon optimal control. *Jahresber. Dtsch. Math. Ver.*, 118(1):3–37, 2016.
- [6] Timm Faulwasser and Lars Grüne. *Turnpike properties in optimal control*, volume 23, pages 367–400. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2022.
- [7] Lars Grüne and Matthias A. Müller. On the relation between strict dissipativity and turnpike properties. *Syst. Control Lett.*, 90:45–53, 2016.
- [8] Emmanuel Trélat. Linear turnpike theorem. *Math. Control Signals Syst.*, 35(3):685–739, 2023.

Polynomial turnpike estimates in optimal control of infinite-dimensional oscillating systems

Alexander Zuyev

Max Planck Institute for Dynamics of Complex Technical Systems, Sandtorstraße 1,
39106 Magdeburg, Tel: ++49(0)391/6110478, E-Mail: zuyev@mpi-magdeburg.mpg.de

In this talk, we consider an infinite system of controlled oscillators as an abstract differential equation in a Hilbert space. Both static and dynamic optimization problems, featuring quadratic costs, are considered for this type of system. The applicability of the Pontryagin maximum principle for the dynamic problem is justified. We analyze the large-time behavior of the resulting system, focusing on deviations when controlled by a Riccati-based feedback law. Pointwise polynomial turnpike estimates are discussed, utilizing the spectral theory of linear operators and the construction of a Riesz basis. This presentation is based on joint work with Emmanuel Trélat (Sorbonne Université).

Motion primitives as the action space in reinforcement learning for motion planning

K. Flaßkamp†

† Systems Modeling and Simulation, Saarland University, E-Mail: kathrin.flaskkamp@uni-saarland.de

Recently, deep reinforcement learning (RL) raised interest as an approach to motion planning of autonomous systems. In order to incorporate information from first-principle modeling, we suggest to use motion primitives for the action space of the RL agent. Motion primitives, i.e. short pieces of trajectories generated from invariance properties and control quantization, guarantee motion plans that obey modeled system dynamics and constraints. In combination with invalid action masking when training the agent, we obtain a motion planner that we exemplarily evaluate in an autonomous driving scenario.

This presentation is based on joint work with T. Schneider, M. V. A. Pedrosa and T. Gros, V. Wolf (Saarland Informatics Campus).

VENI, VINDy, VICI: A variational method to build ROMs with embedded uncertainty quantification

J. Fehr[†], P. Conti[‡], J. Kneifl[†], A. Manzoni[‡], A. Frangi^a, S. L. Brunton^b, J. N. Kutz^c

[†]Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, E-Mail: joerg.fehr@itm.uni-stuttgart.de

[‡]Politecnico di Milano, Department of Civil and Environmental Engineering, Milano, Italy

^aPolitecnico di Milano, MOX - Department of Mathematics, Milano, Italy

^bDepartment of Mechanical Engineering, University of Washington, Seattle, United States

^cDepartment of Applied Mathematics, University of Washington, Seattle, United States

Many complex phenomena in engineering and science require the solution of expensive, high-dimensional systems of partial differential equations (PDEs). Reduced order models (ROMs) have been developed to overcome this problem and to speed up the computations [3, 5]. In scenarios with experimental measurements or limited access to full-order solvers, non-intrusive reduced-order modeling techniques offer a solution. However, these methods often lack interpretability and uncertainty quantification (UQ) of the predicted solutions.

Consequently, we present a data-driven, non-intrusive, reduced-order modeling scheme that identifies the latent dynamics in an interpretable manner while inherently incorporating UQ [1]. Using a limited dataset with high-dimensional noisy data, our proposed framework employs variational autoencoders for dimensionality reduction and a variational adaptation of sparse identification of nonlinear dynamics (SINDy) [2, 4, 3] to skillfully construct ROMs.

In detail, the method consists of **Variational Encoding of Noisy Inputs** (VENI) to identify the distribution of reduced coordinates. At the same time, we introduce **Variational Identification of Nonlinear Dynamics** (VINDy) to learn the distribution of coefficients that determine the contribution of terms from a predefined set of candidate functions. After offline training, the identified model can be queried for new parameter instances and/or new initial conditions to compute the corresponding full-time solutions. The probabilistic framework inherently facilitates UQ, since online testing involves **Variational Inference**, which naturally provides **Certainty Intervals** (VICI). The performance of the proposed method is validated on a diverse set of PDE benchmarks, including structural mechanics and fluid dynamics.

Literatur

- [1] Conti, P.; Kneifl, J.; Manzoni, A.; Frangi, A.; Fehr, J.; Brunton, S. L.; Kutz, J. N.: VENI, VINDy, VICI: a variational reduced-order modeling framework with uncertainty quantification. arXiv preprint arXiv:2405.20905, 2024.
- [2] Champion, K.; Lusch, B.; Kutz, J. N.; Brunton, S. L.: Data-driven discovery of coordinates and governing equations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(45):22445–22451, Oct. 2019.

- [3] Conti, P.; Gobat, G.; Fresca, S.; Manzoni, A.; Frangi, A.: Reduced order modeling of parametrized systems through autoencoders and sindy approach: continuation of periodic solutions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 411:116072, June 2023.
- [4] Mars Gao, L.; Nathan Kutz, J.: Bayesian autoencoders for data-driven discovery of coordinates, governing equations and fundamental constants. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 4802286:20230506, 2024.
- [5] Kneifl, J.; Rosin, D.; Avci, O.; Röhrle, O.; Fehr, J.: Low-dimensional data-based surrogate model of a continuum-mechanical musculoskeletal system based on non-intrusive model order reduction. *Archive of Applied Mechanics*, 93(9):3637–3663, June 2023.

Stability-informed Closed-Loop Learning for Model Predictive Control using Bayesian Optimization

Maik Pfefferkorn[†], Sebastian Hirt[†], Philipp Holzmann[†], Rolf Findeisen[†]

[†]Control and Cyber-Physical Systems Laboratory, Technical University of Darmstadt,
Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt, Germany, Tel: ++49(0)6151/1625201, E-Mail:
{maik.pfefferkorn, sebastian.hirt, philipp.holzmann, rolf.findeisen}@iat.tu-darmstadt.de

Safety-critical constraints or performance requirements need to be robustly satisfied in many control and automation systems. For instance, robots must not collide with other objects in their environment or substance concentrations in (bio)chemical reactors should remain constant for product quality reasons, despite possible disturbances or uncertainties. Model predictive control (MPC), an advanced control scheme that is widely used nowadays, enables to deal with these challenging tasks [1]. Based on the repeated solution of a constrained finite horizon optimal control problem (OCP), the system of interest can be controlled to behave optimal w.r.t. a specified performance criterion. Rigorous guarantees on (robust) constraint satisfaction and stability, which allow to formulate safety conditions, can be achieved via specific, especially robust, problem formulations [2, 3].

The core element of a model predictive controller is a mathematical prediction model of the system. Initialized with the most recent available state information, it is used to predict the system’s future behavior given a sequence of control inputs. This prediction is the basis on which the performance criterion is optimized to find the optimal control input sequence. In practice, prediction models are traditionally derived using first principles. However, obtaining accurate models is often difficult and sometimes even impossible. Furthermore, choosing a suitable open-loop cost function and constraints to achieve the desired closed-loop performance while guaranteeing safety remains challenging.

Machine learning has emerged as a promising approach to address this issue by enabling data-driven MPC, e.g., [4], mainly focusing on learning prediction models from system data [5]. However, highly accurate prediction models do not necessarily guarantee optimal closed-loop performance [6]. Recent works tackle this challenge using a hierarchical framework, in which higher-level learning algorithms are used with great success to improve the performance of (parametric) MPC formulations exploiting closed-loop data, e.g., [6]. However, establishing robust safety and stability guarantees of the closed-loop system both during learning as well as under the resulting controller remains challenging, restricting most approaches to non-safety-critical real-world processes. We address these limitations by proposing a novel, stability-informed learning approach for improving MPC formulations, which provides Lyapunov-like or direct stability certificates in closed-loop [7, 8]. To this end, we exploit safe Bayesian optimization [9, 10], a sample-efficient black-box optimization method capable of accounting for constraints, to obtain high-probability stability guarantees.

We start by formulating the considered problem considered, highlighting the problem of closed-loop suboptimality in model predictive control. Thereafter, the use of parametric model predictive control as an important step towards recovering closed-loop optimality is motivated. We achieve long-term performance optimization of the underlying nonlinear dynamical system in closed loop through a multi-episode machine learning approach. Particularly, Bayesian optimization is employed to learn the parameters of the model

predictive controller such that the long-term closed-loop performance is improved. We illustrate the effectiveness and flexibility of the proposed approach by the example of simultaneous planning and tracking control of energy-optimal trajectories for robotic manipulators [11]. We conclude by discussing the incorporation of stability-informed and safety constraints at the Bayesian optimization layer, and illustrate the proposed approach using simulation examples.

Literatur

- [1] Schwenzer, M.; Ay, M.; Bergs, T.; Abel, D.: Review on model predictive control: an engineering perspective, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021.
- [2] Rawlings, J. B.; Mayne, D. Q.; Diehl, M. M.: *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*, Nob Hill Publishing, 2019.
- [3] Grüne, L.; Pannek, J.: *Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms*, Springer International Publishing, 2017.
- [4] Mesbah, A.; Wabersich, K. P.; Schoellig, A. P.; Zeilinger, M. N.; Lucia, S.; Bagdwell, T. A.; Paulson, J. A.: Fusion of machine learning and MPC under uncertainty: What advances are on the horizon?, *American Control Conference*, 2022.
- [5] Huang, B.; Gopaluni, B.; Tulsyan A.; Chachuat, B.; Lee, J.; Amjad, F.; Damarla, S.; Woo, J.; Lawrence, N.: Modern Machine Learning Tools for Monitoring and Control of Industrial Processes: A Survey, *IFAC World Congress*, 2020.
- [6] Kordabad, A. B.; Reinhardt, D.; Anand, A. S.; Gros, S.: Reinforcement Learning for MPC: Fundamentals and Current Challenges, *IFAC World Congress*, 2023.
- [7] Hirt, S.; Pfefferkorn, M.; Mesbah, A.; Findeisen, R.: Stability-informed Bayesian Optimization for Model Predictive Control Cost Function Learning, *Conference on Nonlinear Model Predictive Control*, 2024.
- [8] Hirt, S.; Pfefferkorn, M.; Findeisen, R.: Safe and Stable Closed-Loop Learning for Neural-Network-supported Model Predictive Control, *Conference on Decision and Control*, 2024. Accepted.
- [9] Garnett, R.: *Bayesian Optimization*, Cambridge University Press, 2023.
- [10] Berkenkamp, F.; Moriconi, R.; Schoellig, A. P.; Krause, A.: Safe learning of regions of attraction for uncertain, nonlinear systems with Gaussian processes, *Conference on Decision and Control*, 2016.
- [11] Holzmann, P.; Pfefferkorn, M.; Findeisen, R.: Learning Energy-Efficient Trajectory Planning for Robotic Manipulators using Bayesian Optimization, *European Control Conference*, 2024.

Stability of MPC with data-driven Koopman models

L. Bold^{*}, L. Grüne^{}, M. Schaller^{***}, K. Worthmann^{*}**

^{*} Optimization-based Control Group, TU Ilmenau, E-Mail: lea.bold@tu-ilmenau.de

^{**} Mathematisches Institut, Universität Bayreuth

^{***} Institut für Mathematik, TU Chemnitz

Abstract: Extended dynamic mode decomposition (EDMD [5]) is an established data-driven method to build models of nonlinear dynamical systems. It is based on the Koopman theory where the linear Koopman operator propagates functions called observables in an infinite-dimensional space. With the usage of for instance bilinear surrogate models, also control(-affine) systems can be approximated, see [3]. EDMD approximates the Koopman operator numerically such that a linear and finite-dimensional surrogate system is obtained. Finite-data error bounds for this approach were shown in [4].

In [1], the approximation quality is investigated for non-holonomic systems by experimentally raising real-world data of a differential-drive mobile robot.

In [2], EDMD-based model predictive control is discussed, where the data-based surrogate model is used in the optimization step. For this approach, practical asymptotic stability of a controlled equilibrium is proven. To this end, novel bounds on the estimation error proportional to the norm of state and control are shown.

Literatur

- [1] Bold, L.; Rosenfelder, M.; Eschmann, H.; Ebel, H.; Worthmann, K.: On Koopman-based surrogate models for non-holonomic robots, Proceedings of the 4th IFAC Conference of Modelling, Identification and Control of Nonlinear systems (MICNON 2024), to appear in IFAC-PapersOnLine (Preprint arXiv:2303.09144), 2023.
- [2] Bold, L.; Grüne, L.; Schaller, M.; Worthmann, K.: Data-driven MPC with stability guarantees using extended dynamic mode decomposition, IEEE Transactions on Automatic Control, DOI: 10.1109/TAC.2024.3431169, 2024.
- [3] Iacob, L.C.; Tóth, R.; Schoukens, M.: Koopman form of nonlinear systems with inputs, Automatica 162:111525, 2024.
- [4] Nüske, F.; Peitz, S.; Philipp, F.; Schaller, M.; Worthmann, K.: Finite-data error bounds for Koopman-based prediction and control, Journal of Nonlinear Science 33:14, 2023.
- [5] Williams, M.O.; Kevrekidis, I.G.; Rowley, C.W.: A data driven approximation of the Koopman operator: Extending dynamic mode decomposition; Journal of Nonlinear Science, 25:1307-1346, 2015.

Data-based System Representation and Synchronization for Multiagent Systems

V. G. Lopez[†], M. A. Müller[‡]

[†]Leibniz Universität Hannover, Institut für Regelungstechnik, Appelstr. 11, 30167 Hannover,
Tel: +49 511 762 5189, E-Mail: lopez@irt.uni-hannover.de

[‡]Leibniz Universität Hannover, Institut für Regelungstechnik, Appelstr. 11, 30167 Hannover,
Tel: +49 511 762 4523, E-Mail: mueller@irt.uni-hannover.de

Direct data-driven control of dynamical systems has been the subject of a lot of attention in the last several years. Central to these recent developments is Willems' fundamental lemma [1], which states that every input-output trajectory of a linear discrete-time system can be expressed in terms of a single measured persistently excited trajectory. Willems' lemma has also been extended to continuous-time systems in [2]. Diverse methods for data-driven control have been obtained using these results, mostly considering applications with a single dynamical system. However, in many engineering applications groups of dynamical systems must be considered, such that the individual agents interact with each other to complete a given task. For example, in the synchronization problem, agents that have limited sensing capabilities must use their locally-available information to drive their states (or outputs) to a common value. The agents can only access information from their closest neighbors, and this flow of information is modeled with a communication graph.

In this presentation, we describe novel solutions of the data-based synchronization problem for continuous-time multiagent systems that exploit control strategies based on Willems' lemma, as described in [3]. First, we show how to design distributed controllers that achieve synchronization in networked systems with homogeneous dynamics. This result is obtained by extending existing data-based stabilization results to the multiagent case and applying them to a data-based representation of the synchronization error dynamics. The proposed method relies on the solution of a set of linear matrix inequalities that are shown to be feasible. The obtained controllers are static in the sense that no dynamic variables are required for control. Then, we show the solution of the output synchronization problem for heterogeneous systems. In this case, dynamic controllers are used which, different from the existing literature, do not require any knowledge of the mathematical models of the agents.

Literatur

- [1] Willems, J. C.; Rapisarda, P.; Markovsky, I.; De Moor, B. L.: A note on persistency of excitation, *Systems & Control Letters*, vol. 54, no. 4, pp. 325-329, 2005.
- [2] Lopez, V. G.; Müller, M. A.: On a continuous-time version of Willems' lemma, *2022 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pp. 2759-2764, 2022.
- [3] Lopez, V. G.; Müller, M. A.: Data-based system representation and synchronization for multiagent systems, to be presented at the *2024 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, available online in arXiv:2404.13937, 2024.

Regelungsorientierte Modellapproximationen für Stefanprobleme in der Lebensmittelindustrie

A. Schaum†

†Lehrstuhl für Prozessanalytik, Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie,
Universität Hohenheim, Garbenstr. 23, 70599 Stuttgart, Tel: ++49(0)711/459 23286, E-Mail:
alexander.schaum@uni-hohenheim.de

Die moderne Lebensmittelindustrie basiert auf einer Vielzahl verfahrenstechnischer Prozesse, welche aus den entsprechenden Rohstoffen unsere Nahrungsmittel produzieren. Hierbei treten aus regelungstechnischer Sicht mehrere Problemstellungen auf. Zum Einen sind die Rohstoffe, z.B. bedingt durch klimatische Bedingungen und Herkunft großen Variationen ausgesetzt. Ebenfalls sind in realen Prozessen unterschiedliche Personen und raumklimatische Bedingungen involviert, wodurch weitere Prozessvariationen unvermeidbar sind. Dies führt zu sehr hohen Parameterschwankungen in den zu betrachtenden Modellen, welche in den technischen Prozessen berücksichtigt werden müssen. Eine weitere Herausforderung liegt in den verschiedenen physikalisch-chemischen Prozessen, insbesondere chemische Reaktionen und Phasenübergänge in Mehrphasensystemen, welche zu nichtlinearen verteiltparametrischen Systembeschreibungen mit zeitlich variierenden Parametern und örtlichen Domänen führen [1, 2, 3, 4].

In diesem Vortrag sollen einige der oben angesprochenen Aspekte beleuchtet werden, wobei der Fokus auf der verteiltparametrischen Natur der betrachteten Systeme und der Variation der Parameter und Domänen liegt. Dies führt zu einer Beschreibung mittels nichtlinearer Stefanprobleme, welche durch partieller Differentialgleichungen auf konstanter Domäne mit veränderlichen Parametern modelliert werden können. Für den Fall einer Reduktion auf eine Ortsdimension führt dies beispielsweise auf nichtlineare Diffusions-Konvektions-Reaktionssysteme der Form

$$\frac{\partial x}{\partial t} = p(x, s, t) \frac{\partial}{\partial \bar{s}} \left(q(x, \bar{s}, t) \frac{\partial x}{\partial \bar{s}} \right) + r(x, \bar{s}, t), \quad \bar{s} \in (0, 1), t > 0$$

mit zusätzlichen Anfangs- und Randbedingungen. Hierbei stellt $\bar{s}(t) = s/L(t)$ die auf die Gesamtausdehnung $L(t)$ normalisierte Ortskoordinate dar (siehe auch [5]). Die Funktionen p, q und r werden als derart angenommen, bzw. in der Anwendung so gewählt, dass Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen gesichert ist. Aufgrund der Rohstoff- und Prozessvariationen im Bereich der Lebensmitteltechnologie sind diese Funktionen außerdem mit unterschiedlich starken Unsicherheiten behaftet, bleiben jedoch jeweils beschränkt.

Die Betrachtung von Stefanproblemen an sich führt zu vielen spannenden regelungstechnischen Fragestellungen, wie z.B. auch in [5] dargestellt. So sind beispielsweise aufgrund der zeitlichen Variation von $L(t)$ verschiedene Szenarien hinsichtlich der Sensorposition von Interesse, da diese entweder örtlich fest sind in s und somit variabel in $\bar{s}$, oder örtlich fest in $\bar{s}$ und somit notwendigerweise variabel in s . Das Problem soll hinsichtlich der regelungsorientierten Modellierung und dem nachfolgenden Beobachterentwurf für Fallbeispiele aus Trocknungs- und Backprozessen auf der Basis von Simulationsstudien und experimentellen Daten diskutiert und illustriert werden. Unter anderem sollen erste Ergebnisse basierend auf einfachen Beobachter und Kalman-Filter Implementierungen mit simultaner Parameterschätzung vorgestellt werden.

Literatur

- [1] Belton, P. (ed): The Chemical Physics of Food, Blackwell Publishing, 2007.
- [2] Martinez-Vera, C.; Schaum, A.; Alvarez Calderon, J.; Vizcarra-Mendoza, M.G: An Observer Based Methodology for Estimating Concentration-Dependent Diffusion Coefficients in Drying Considering Shrinkage, Int. Journal of Food Engineering 9(1): 121-128, 2013
- [3] Purlis, E.; Salvadori, V.O.: Liu, Z.; Zheng, S.: Bread baking as a moving boundary problem. Part 1: Mathematical modelling, Journal of Food Engineering 91: 428–433, 2009.
- [4] Mezhericher, M.; Levy, A.; Borde, I.J.D.T.: Theoretical models of single droplet drying kinetics: a review, Drying technology 28: 278–293, 2010.
- [5] Koga, S.; Krstic, M.: Materials Phase Change PDE Control & Estimation, From additive manufacturing to polar ice, Birkhäuser, 2020.

Eindimensionale Modellierung pneumatischer Vakuum-Ejektoren

C. Trage†*, K. Hoffmann†, O. Sawodny†

†Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Waldburgstr. 19, 70563 Stuttgart

*Tel: +49(0)711/68569904, E-Mail: caroline.trage@isys.uni-stuttgart.de

Die Vakuumtechnik ist eine weit verbreitete Technologie in der Handhabungs- und Automatisierungstechnik. Kernkomponente der Vakuumtechnik sind die Vakuumerzeuger. Zur Vakuumerzeugung kommen dabei oftmals so genannte Ejektoren zum Einsatz. Basierend auf dem Venturieffekt erzeugen pneumatische Ejektoren Unterdrücke von 0,05 bis 0,1 bar Absolutdruck. Durch ihre robuste Bauform fallen Wartungskosten gering aus und der Installations- und Inbetriebnahmeaufwand besteht lediglich in der Bereitstellung von Druckluft als Treibmittel. Zur Minimierung des Energiebedarfs sowie der Verkürzung der Evakuierungszeit verschiedener Volumina, müssen Vakuum-Ejektoren optimal in das Gesamtsystem integriert werden [1].

Ejektoren bestehen aus zwei Hauptkomponenten: einer Treibdüse, bei der es sich um eine konvergent-divergente Düse handelt und dem Mischrohr. Zwischen Treibdüse und Mischrohr befindet sich ein Einlass zum Ansaugen eines sekundären Luftmassenstroms. Ein Treibmassenstrom Druckluft tritt in die Treibdüse des Ejektors ein und wird an der engsten Stelle auf Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Dadurch sinkt der Druck des Treibstrahls, wodurch am Ausgang der Treibdüse der Sekundärmassestrom angesaugt wird. Basierend auf diesem Ansaugeneffekt können mit dem Ejektor verbundene Volumina evakuiert werden.

In diesem Beitrag wird ein Modell zur Beschreibung des vakuumseitigen Massenstroms (auch Sekundärmassestrom) in Abhängigkeit der zugeführten Druckluft und des anliegenden Vakuums hergeleitet und vorgestellt. Zur Beschreibung des Verhaltens des Ejektors wird ein 1D-Stromfadenmodell, in Anlehnung an die Beschreibung von Ejektoren aus der Kältetechnik als Ansatz gewählt [2]. Im Gegensatz zu den Ejektoren in der Kältetechnik, bei denen das analytische Modell den Austrittsmassenstrom aus dem Mischrohr beschreibt, liegt der Fokus des hier vorgestellten Modells in der Berechnung des angesaugten Sekundärmassestroms. Weiterhin wird bei Ejektoren für die Vakuumtechnik Luft als Arbeitsmedium verwendet, während in der Kältetechnik Kältemittel zum Einsatz kommen. Für die Berechnung des Vakuummassestroms wird der Ejektor in Abschnitte unterteilt für welche Erhaltungssätze gelöst werden. Das Betriebsoptimum, der Vakuummassestrom, sowie das erreichbare Vakuum sind maßgeblich von drei charakteristischen geometrischen Größen des Ejektors abhängig. Da Vakuumejektoren im industriellen Einsatz oft außerhalb ihres Betriebsoptimums betrieben werden, kombiniert der vorgestellte Ansatz die Modellierung des subsonischen und sonischen Betriebs, wobei im sonischen Bereich eine Sättigung des vakuumseitigen Massenstroms auftritt. Um die Komplexität des Modells einzuschränken werden sämtliche Effekte wie Strömungs- und Reibungsverluste durch identifizierbare Wirkungsgrade beschrieben. Die Identifikation der Wirkungsgrade erfolgt aus physikalischen Messgrößen von Eingangsdruk und -massestrom, sowie Sekundärdruck- und massestrom. Diese Wirkungsgrade hängen im wesentlichen vom Eingangsdruck und der Baugröße der Ejektoren ab. Mit den identifizierten Wirkungsgraden besteht ein vollständiges Modell zur Beschreibung des Sekundärmassestroms bei verschiedenen Eingangsdrücken.

Literatur

- [1] Leonhard, A.; Helduser, S.: Abschlussbericht: Optimierung pneumatischer Vakuum-Ejektoren, Technische Universität Dresden, Dresden 2009.
- [2] Huang, B. J. and Chang, J. M. and Wang, C. P. and Petrenko, V. A.: A 1-D analysis of ejector performance, International Journal of Refrigeration, 1999.

Modellierung der Mechanik und hydraulischen Aktorik einer Feuerwehrdrehleiter

Bernd Müller^{1,2}, Oliver Sawodny¹

¹ Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Waldburgstraße 19, 70563 Stuttgart

² Tel: +49(0)711/685-67072, E-Mail: bernd.mueller@isys.uni-stuttgart.de

Feuerwehrdrehleitern werden weltweit in zeitkritischen Feuerwehreinsätzen eingesetzt und sind anfällig für störende mechanische Schwingungen. Mit der modellbasierten aktiven Schwingungsdämpfung aus [1] werden die Schwingungen gedämpft, sodass die Drehleiter schneller, präziser und sicherer an die Zielposition gesteuert werden kann. Dafür müssen einige Parameter wie zum Beispiel die Eigenfrequenzen des Systems identifiziert werden. Da die Modellparameter abhängig von Leiterlänge und Korbmasse sind, entsteht ein großer Messaufwand für die Identifikation. In [2] wird der Leitersatz als ein flexibles Mehrkörpersystem modelliert. Mit Hilfe dieses dynamischen Modells soll der Messaufwand minimiert werden, indem die nötigen Modellparameter der aktiven Schwingungsdämpfung simulativ bestimmt werden.

Die hier vorgestellte Arbeit verfolgt das Ziel, die gesamte Dynamik der Drehleiter inklusive der hydraulischen Aktorik zu modellieren, sodass zusätzlich die Reglerverstärkungen eingestellt und die Reglerperformance simulativ untersucht werden können. Auf Basis von [3] wird die Dynamik des gesamten Fahrzeugs inklusive Abstützung, Unterwagen und Leitersatz hergeleitet. Die ersten vier Eigenformen des Gesamtsystems sind in Abb. 1 visualisiert und zeigen die relevantesten Verformungen der Leiterdynamik. Die zugehörigen Eigenfrequenzen des Modells werden mit Messungen validiert.

Für eine simulative Parametrierung der aktiven Schwingungsdämpfung auf Basis des dynamischen Modells muss auch die Aktordynamik berücksichtigt werden, weil die hydraulischen Antriebe oft der limitierende Faktor für die Performance der Regelung sind. Problematisch sind besonders die Totzeiten, die von verschiedenen Zustandsgrößen abhängen. Deshalb ist eine detaillierte Modellierung des Hydrauliksystems der zwei relevanten Achsen *Drehen* und *Aufrichten/Neigen* wünschenswert. Die erzeugte Bewegung der Aktoren entsteht durch einen Hydromotor mit Getriebe für die Achse *Drehen* und zwei gekoppelten Hydraulikzylinder für die Achse *Aufrichten/Neigen*. Bei der Modellierung werden sowohl

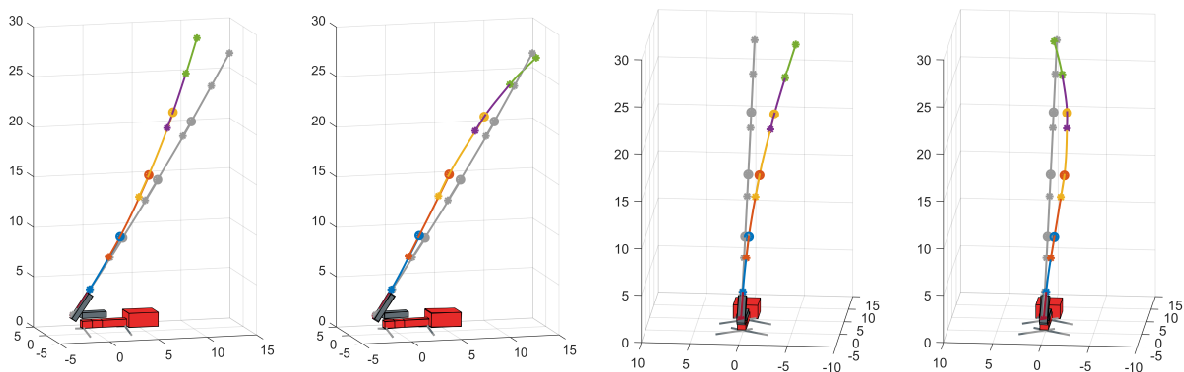


Abbildung 1: Visualisierung der ersten vier Eigenmoden des Gesamtsystems: Links die Grund- und Oberschwingung in vertikaler Richtung (Aufrichten/Neigen der Leiter). Rechts die Grund- und Oberschwingung der horizontalen Richtung (Drehen der Leiter).

die Bewegungsgleichungen des Hydromotors und der Zylinder, als auch die Druckaufbaugleichung berücksichtigt. Die Ventile werden mit der Blendengleichung modelliert, wobei die effektiven Querschnitte A in Abhängigkeit des Ansteuerwertes u aus stationären Messungen identifiziert werden. Die mechanische Load-Sensing Regelung inklusive der Axialkolbenpumpe sind vereinfacht als PI-Regler approximiert, sodass sich je nach Lastsituation der geforderte Pumpendruck p_P einstellt.

Das resultierende Übertragungsverhalten des Modells vom Ansteuerwert u auf die Position des jeweiligen Aktors wird anhand von verschiedenen Messungen untersucht. In der Achse *Drehen* erreicht das Modell eine hohe Genauigkeit, da das Verhalten in beide Richtungen symmetrisch ist. Diese Symmetrie ist in der Achse *Aufrichten/Neigen* aufgrund der sicherheitsrelevanten Lasthalteventile und Senkbremsventile nicht gegeben. Das dynamische Verhalten dieser Nichtlinearitäten bleibt weiterhin eine Herausforderung. Hierfür sind noch Erweiterungen des Modells geplant, wofür jedoch zusätzliche Messungen benötigt werden.

Literatur

- [1] Pertsch, A.: Methoden zur aktiven Schwingungsdämpfung für Feuerwehrdrehleitern mit Gelenkarm, Shaker Verlag, 2017. ISBN: 978-3-8440-5082-0
- [2] Densborn, S.; Sawodny, O.: Flexible multibody system modelling of an aerial rescue ladder using Lagrange's equations, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems 27(1):322-346, 2021. DOI: 10.1080/13873954.2021.1918175
- [3] Müller, B.; Sawodny, O.: Dynamic multibody model of a turntable ladder truck considering unloaded outriggers and sensitivity-based parameter identification, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems 30(1):567-590, 2024. DOI: 10.1080/13873954.2024.2361011

Regelungsorientierte Modellbildung für Sprühtrocknungsprozesse

Arthur Lepsien†, Alexander Schaum†

†Lehrstuhl für Prozessanalytik, Universität Hohenheim, Garbenstraße 23, 70599 Stuttgart,
Tel.: +49(0)711/45922824, E-Mail: arthur.lepsien@uni-hohenheim.de

Die grundlegenden Komponenten von Sprühtrocknern sind in Abb. 1 dargestellt. Das Ver-

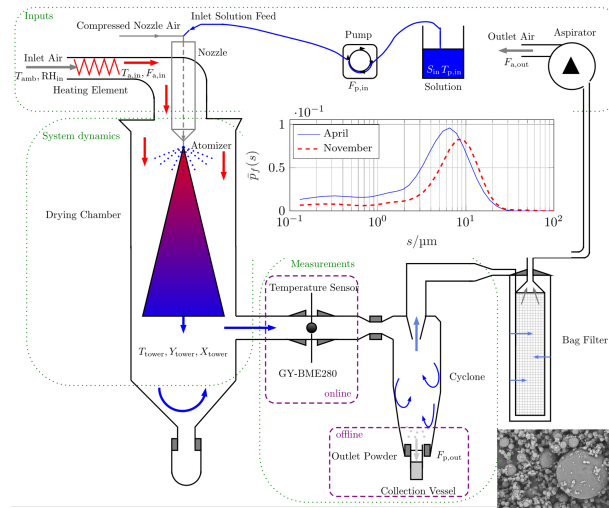


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Sprühtrocknungsprozesses.

fahren basiert auf einer sprühbaren Flüssigkeit (Lösung, Emulsion oder Suspension), die durch eine Düse oder ein rotierendes Rad zerstäubt wird. Die erzeugten Tröpfchen werden anschließend in einem Strom von Heißgas (typischerweise Luft) in der Trockenkammer getrocknet. Das Sammeln der getrockneten Partikel aus dem Gas erfolgt typischerweise durch einen Zyklon. Das Endprodukt wird in der Produktkammer gesammelt. Die Luft strömt durch einen Auslassfilter und wird von der Abgasturbine (Aspirator) abgesaugt. Während des Trocknungsprozesses wird jedes Partikel aus einem Tröpfchen gebildet. Aufgrund von leichten Unterschieden zwischen Tröpfchengröße, -form und -zusammensetzung variiert das Endprodukt in Form und Feuchtigkeit, was sich mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung modellieren lässt.

Der Schwerpunkt dieses Vortrages liegt auf Modellen, die *in Echtzeit für die Prozessüberwachung und -steuerung implementiert werden können und gleichzeitig alle relevanten Prozessinformationen berücksichtigen*, welche die Eigenschaften des produzierten Produktes bestimmen. Zu diesem Zweck werden zwei verschiedene Modellierungstechniken in Betracht gezogen. Erstens wird ein klassischer Energie- und Massenbilanzansatz (EMB) [1] verwendet, um den Prozess auf makroskopischer Ebene zu modellieren, auf der sich die Dynamik der Luft- und Partikeltemperatur und des Feuchtigkeitsgehalts entwickelt. Dieser Ansatz wird mit einem PDE-Modell für die zeitlichen Entwicklung der Partikelgrößenverteilung im laufenden Prozess gekoppelt. Aufgrund von Argumenten der singulärer Störwerttheorie kann eine Zeitskalen-Separation vorgenommen werden, und die Partikeldynamik auf der langsamen Mannigfaltigkeit analysiert werden [2]. Zweitens wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) [3] mit der Dynamic Mode Decomposition with Control (DMDc) [4] kombiniert, um ein diskretes lineares Modell niedriger Ordnung zu er-

halten, das Informationen über die Entwicklung der räumlich-zeitlichen Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilungen enthält.

Für den ersten Ansatz werden Ergebnisse für den Regelungs- und Beobachterentwurf für einen einstufigen Sprühtrocknungsturm vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf der optimierungsbasierten Planung und Folgeregung liegt. Die wichtigsten Ergebnisse sind (i) eine optimierungsbasierte Systeminversion zur Generierung von Zieltrajektorien und (ii) ein echtzeitfähiger modellprädiktiver Folgeregler in Kombination mit einem Beobachter bei Rechenzeiten unter einer Sekunde [5]. Ein Nachteil des betrachteten Modells ist hierbei das Fehlen von Informationen über Temperatur- und Feuchtigkeitsgradienten in der Trockenkammer. Der zweite Ansatz überwindet dieses Problem durch die Berücksichtigung eines detaillierten FE-Modells, das die Sprühtrocknergeometrie in Kombination mit CFD-Strömungs- und Wärmeübertragungsberechnungen sowie die Tröpfchenverteilung am Einlass umfasst. Um dem hohen Rechenaufwand entgegenzuwirken, wird mit Hilfe des DMDc-Ansatzes zur Reduzierung der Modellordnung ein lineares Modell reduzierter Ordnung identifiziert (vgl. Abb. 2), das für die Prozessüberwachung und -steuerung in Echtzeit eingesetzt werden kann. Hierfür wird ein Kalman-Filter auf Basis von Randmessungen entworfen.

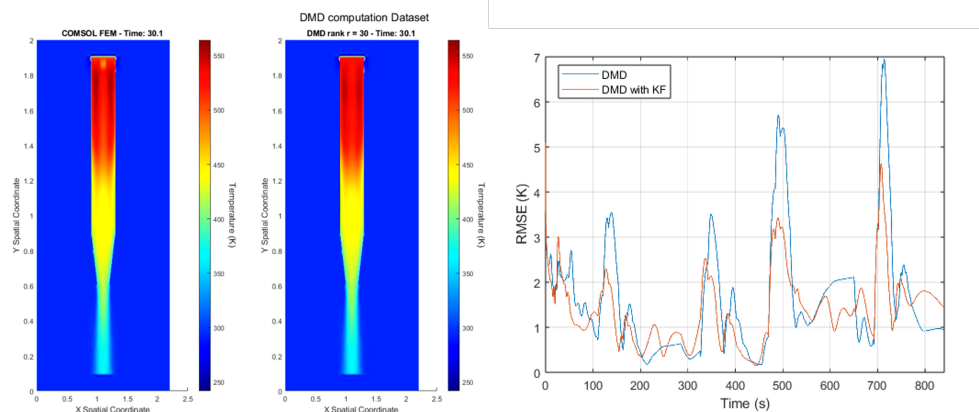


Abbildung 2: Ergebnis der DMDc für einen Sprühtrocknungsprozess mit Partikeleinfluss.

Literatur

- [1] A. Lepsien, A. Schaum. (2024). Thermodynamic model identification for a one-stage spray dryer. IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (2024), accepted.
- [2] A. Lepsien, A. Jüptner, R. Scherließ, A. Schaum. (2024). Control oriented modeling for particle size distributions in a spray drying process. IFAC Symposium on System Identification (2024), accepted.
- [3] Birchal, V. S., Huang, L., Mujumdar, A. S., & Passos, M. L. (2006). Spray dryers: modeling and simulation. *Drying Technology*, 24(3), 359-371.
- [4] Proctor, J. L., Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2016). Dynamic mode decomposition with control. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 15(1), 142-161.
- [5] A. Lepsien, A. Schaum. (2024). Trajectory planning and tracking control for a one-stage spray dryer. IFAC Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (2024), accepted.

Modellierung der instationären Ausbauchung der Strangschale in Stranggießanlagen

J. Landauer†*, P. Dollhäubl‡, S. Fuchshumer‡, A. Kugi†, A. Steinboeck†*

*Christian Doppler Labor für Intelligente Prozessregelung für hochwertige Stahlprodukte

†Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU Wien, Österreich,

E-Mail: {landauer, kugi, steinboeck}@acin.tuwien.ac.at,

‡voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich.

Beim Stranggießen wird flüssiger Stahl in endlose Profilstränge abgegossen. Der flüssige Stahl wird, wie in Abb. 1 gezeigt, über ein Gießrohr aus einem Verteiler in eine wassergekühlte Kokille gegossen und erstarrt dort von der Oberfläche des Profils ausgehend in Richtung Kern. Ein konstanter Gießspiegel y_m ist für ein gleichmäßiges Wachstum der Strangschale und in weiterer Folge für eine hohe Qualität des gegossenen Strangs essenziell. Der Gießspiegel wird daher durch Regelung des Stahlzuflusses q in die Kokille mithilfe eines Stopfenventils konstant gehalten, siehe Grundregelkreis in Abb. 2.

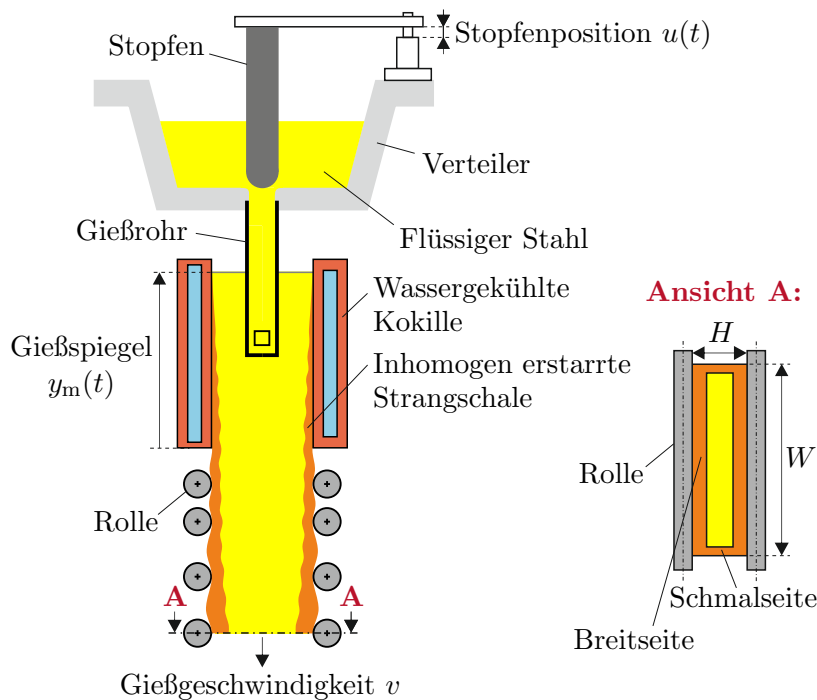


Abbildung 1: Oberer Teil einer Stranggießanlage.

Unterhalb der Kokille wird der Strang durch Rollen gestützt und mit der Gießgeschwindigkeit v abgezogen. Zufolge des ferrostatistischen Drucks im Inneren des Strangs kommt es zu einer Ausbauchung der Strangschale zwischen den Rollen, dem sogenannten Bulging. Während eine stationäre Ausbauchung den Gießspiegel nicht dynamisch beeinflusst, führt eine instationäre Ausbauchung, im Englischen auch als Unsteady Bulging bezeichnet, zu einem zeitlich veränderlichen Volumen innerhalb der Strangschale und folglich zu Schwankungen des Gießspiegels. Die instationäre Ausbauchung hängt mit einer inhomogen erstarrten Strangschale zusammen, welche wiederum durch Gießspiegelschwankungen hervorgerufen wird [1]. Dies resultiert in einer internen Rückkopplung, dem in Abb. 2 gezeigten Bulgingkreis.

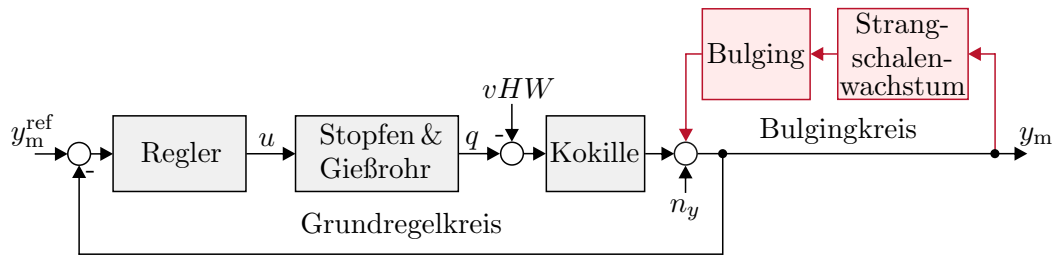


Abbildung 2: Gießspiegelregelung bestehend aus dem Grundregelkreis und dem (beim Reglerentwurf bisher üblicherweise vernachlässigten) Bulgingkreis.

In der Literatur wird beim Reglerentwurf die interne Rückkopplung üblicherweise vernachlässigt und die Schwankungen des Gießspiegels zufolge der instationären Ausbauchung der Strangschale als exogene harmonische Störung n_y betrachtet [2, 3]. Dies kann dazu führen, dass die Schwankungen durch den Regler nicht ausreichend unterdrückt werden, die Amplituden der instationären Ausbauchung während des Betriebs aufklingen und in letzter Konsequenz eine Reduktion der Gießgeschwindigkeit (führt zu lokal dickerer Strangschale) und somit des Durchsatzes der Anlage erforderlich ist.

In diesem Beitrag wird ein nichtlineares, verteiltparametrisches Bulging-Modell auf Basis der Balkentheorie präsentiert. Dieses wird um den Ruhezustand linearisiert und mithilfe von Werkzeugen der linearen Systemtheorie analysiert. Das Modell wird basierend auf Messungen von einer industriellen Stranggießanlage validiert. Diese bestätigen die hohe Genauigkeit des Modells. Es wird gezeigt, dass instationäre Ausbauchungen mit aufklingender Amplitude genau dann auftreten, wenn der in Abb. 2 gezeigte Gesamregelkreis (Kombination aus Grundregelkreis und Bulgingkreis) instabil wird. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass dies durch eine geringfügige Absenkung des Betrags der Störübertragungsfunktion des Grundregelkreises verhindert werden kann. Dies wurde durch Modifikation des Reglers bereits erfolgreich an der realen Anlage getestet.

Literatur

- [1] Lee, J.; Yim, C.: The mechanism of unsteady bulging and its analysis with the finite element method for continuously cast steel, *ISIJ International*, vol. 40, no. 8, pp. 765-770, 2000.
- [2] Jabri, K.; Godoy, E.; Dumur, D.; Bèle, B.: Cancellation of bulging effect on mould level in continuous casting: experimental validation, *Journal of Process Control*, vol. 21, no. 2, pp. 271-278, 2011.
- [3] Furtmüller, C.; Colaneri, P.; del Re, L.: Adaptive robust stabilization of continuous casting, *Automatica*, vol. 48, no. 1, pp. 252-232, 2012.

Deflection Compensation in Lightweight Robotics using a Digital Twin with Extended Dynamics

P. Rodegast[†], S. Hoschek[†], D. Pfeifer[†], J. Fehr[†], M. Hagedorn[‡]

[†]Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Tel: ++49(0)711/68566388, E-Mail: {philipp.rodegast, sebastian.hoschek, denis.pfeifer, joerg.fehr}@itm.uni-stuttgart.de

[‡]PREMIUM ROBOTICS GmbH, Maybachstraße 11, 70771 Leinfelden-Echterdingen, E-Mail: marcel.hagedorn@premium-robotics.com

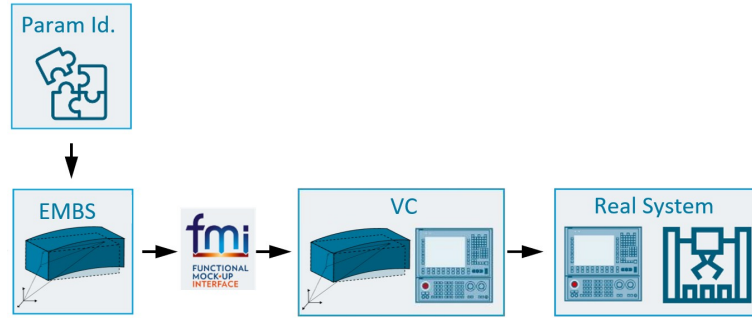


Figure 1: Schematic workflow of coupling the EMBS model to the DT. The EMBS model which undergoes a parameter identification is connected to the VC platform via FMI. The VC platform itself communicates in real-time with the controller of the robot.

The increasing demand for lightweight construction in modern manufacturing is justified by its inherent cost and resource efficiency [1]. Especially for handling tasks, lightweight robots present a viable solution to overcome the present labour scarcity in qualified personnel. However, it also leads to challenges in maintaining precision during the handling processes, particularly in Tool Center Point (TCP) positioning accuracy. Lightweight structures, while advantageous for energy efficiency and material savings, are more susceptible to deflection under operational loads, leading to deviations from the desired path.

Virtual commissioning (VC) software, originally designed to improve and speed up the systems testing and verification phase by doing hardware-in-the-loop (HIL) and software-in-the-loop (SIL) simulations using the plant’s digital twin (DT) [2]. The DT was originally modeled on a kinematic basis only and is connected to the controller via fieldbus. This simplification suffices for VC simulations but no longer holds for in-operation simulation of the intended lightweight manufacturing systems.

An elastic multibody system (EMBS) is developed, using the in-house developed Matlab toolbox Neweul-M² [3]. By attaching the EMBS to the DT, the DT can be utilized to assist in handling the physical robot e.g. using model-based control methods. The dynamics model is connected to the VC software using the Functional-Mockup-Interface (FMI) similar to [4]. The schematic process is illustrated in Fig. 1.

For this research, a lightweight commissioning robot serves as a practical hands-on example. The robot has extendable rails on which a conveyor belt transports the crates. Due to its lightweight design, the robot undergoes a significant elastic deformation, posing a challenge for precise TCP positioning. Since TCP position is not measured directly, the

DT must serve as a virtual sensor that provides the current deflection, as a function of extension length and payload mass.

In order to derive an accurate model, the robots dynamic behavior is first identified using low-cost, low-effort camera recordings parsed through a point-tracking algorithm, where the trajectory of the robot is captured during a typical load case. The models elastic parameters can then be fitted for example by solving a linear least-squares problem.

Following [5] where it states that a DTs fidelity must be fit for its purpose but also meet the computational demands, the dynamics model comprises only two elastic degrees of freedom (DOFs), approximated by spring-damper combinations to maintain real-time capability. In addition to the unknown elastic DOFs, the simplified model possesses three rigid body DOFs which serve as simulation inputs.

References

- [1] UNCTAD: Digital Economy Report. Tech. rep., UN, 2024. <https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024>
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI)., (2021). VDI-Richtlinie 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. (VDI/VDE 2206:2021-11). <http://www.vdi.de/2206>
- [3] T. Kurz, P. Eberhard, C. Henninger, and W. Schiehlen. From Neweul to Neweul-M2: Symbolical equations of motion for multibody system analysis and synthesis. *Multibody System Dynamics*, 24(1):25–41, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11044-010-9187-x>
- [4] Pfeifer, D., Scheid, J., Kneifl, J., & Fehr, J. (2023). An improved development process of production plants using digital twins with extended dynamic behavior in virtual commissioning and control – Simulation@Operations. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 23, e202300225. <https://doi.org/10.1002/pamm.202300225>
- [5] Ferrari, A., Willcox, K. Digital twins in mechanical and aerospace engineering. *Nat Comput Sci* 4, 178–183 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00613-8>

Framework Situationsbeschreibung: Modellierung von Situationen zur taktischen Aufgabenplanung in automatisierten Fahrzeugen

M. Gerwien†

†Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden, Tel: ++49(0)151/17636603,
E-Mail: maximilian.gerwien@mailbox.tu-dresden.de

Das Verstehen und die Interpretation von Situationen in dynamischen Systemen ist für physisch-kognitive Agenten, wie bspw. bei mobilen Robotern und insbesondere bei automatisierten Fahrzeugen, Voraussetzung für die Durchführung sicherer, robuster und regelkonformer Manöver. Um die komplexen Zusammenhänge einer Situation interpretieren zu können, benötigen mobile Roboter wie auch die beteiligte Infrastruktur ein möglichst vollumfängliches Situationsmodell. Dabei beinhaltet solch ein Situationsmodell abstrakt-symbolische Zustände und Vorabwissen (bspw. mit Wissen über Regeln) und zugleich hochdynamische numerische Werte (bspw. aus der Sensorik des Roboters).

Der Prozess der situationsbewussten Entscheidungsfindung [3], zur Auswahl und Ausführung geeigneter Manöver, umfasst mehrere Entscheidungsebenen (siehe dazu Abbildung 1). Zunächst muss mithilfe des Missionsziels die Route auf strategischer Ebene geplant werden. Darauf folgend wird auf taktischer Ebene die Aufgaben- und Verhaltensplanung durchgeführt. Für diese Ebene ist die Interpretation der Situation, in der sich der mobile Roboter befindet und gleichzeitig ein Bewusstsein – welche Effekte die jeweilige Handlung des Roboters auf die Umwelt hat – erforderlich. Zuletzt führt die reaktive Bewegungsplanung das Manöver mithilfe des Situationsmodells innerhalb der operativen Ebene aus.

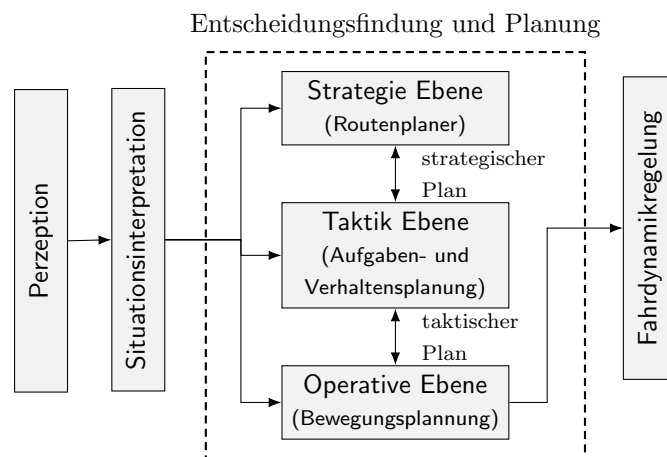


Abbildung 1: Die funktionale Architektur der Entscheidungsfindung eines mobilen Roboters umfasst mehrere Entscheidungsebenen. Dabei wird zwischen der Strategie, der Taktik, sowie der Operativen Ebene unterschieden.

Der Beitrag stellt ein Framework zur Situationsbeschreibung in der mobilen Robotik, insbesondere für die taktische Entscheidungsebene, vor. Dieser Framework dient als Grundlage für verschiedene Suchalgorithmen innerhalb der Aufgabenplanung mit diskreten Modellen zur Lösung des klassischen Planungsproblems [4]. Der Framework stellt eine Klas-

senstruktur zur Beschreibung von Situationen bereit und beinhaltet zudem eine allgemeine Aktionsbeschreibung. Objekte werden implizit semantisch beschrieben, sodass bspw. Vorbedingungen für Aktionen mit SPARQL (**S**PARQL **P**rotocol **A**nd **R**DF Query **L**anguage) Abfragen innerhalb einer Situation geprüft werden können.

Der Framework zur Situationsbeschreibung wurde durch klassische Planungssprachen wie STRIPS (**S**tanford **R**esearch **I**nstitute **P**roblem **S**olver [2]) und PDDL (**P**lanning **D**omain **D**efinition **L**anguage [1]) inspiriert. Wobei der vorgestellte Ansatz eine explizite Datenstruktur (objektorientierte Beschreibung von Situation) zur Lösung des Planungsproblems beinhaltet und somit auf das lesen, parsen und schreiben von PDDL-Dateien verzichtet. Dies macht eine effektivere Onlineanwendung erst möglich. Denn das Ziel, eine leistungsfähigere Aufgaben- und Verhaltensplanung zu erreichen, kann nur über eine dynamische Beschreibung von Situationen mit Aktionsbeschreibungen und Wissensrepräsentation erreicht werden.

Literatur

- [1] Constructions Aeronautiques, Adele Howe, Craig Knoblock, ISI Drew McDermott, Ashwin Ram, Manuela Veloso, Daniel Weld, David Wilkins Sri, Anthony Barrett, Dave Christianson, et al. Pddl—the planning domain definition language. *Technical Report, Tech. Rep.*, 1998.
- [2] Richard E Fikes and Nils J Nilsson. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3-4):189–208, 1971.
- [3] Maximilian Gerwien, Alexander Jungmann, and Rick Voßwinkel. Towards situation-aware decision-making for automated driving. In *2021 7th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pages 185–189. IEEE, 2021.
- [4] Malik Ghallab, Dana Nau, and Paolo Traverso. *Automated planning and acting*. Cambridge University Press, 2016.

Modellbildung und Identifikation eines kontaktbasierten, rotatorischen Kugelaktors

Michael Olbrich†, Christoph Ament‡

* Universität Augsburg, Lst. Regelungstechnik, Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg

†Tel: ++49(0)821/598-69296, E-Mail: michael.olbrich@uni-a.de

‡Tel: ++49(0)821/598-69290, E-Mail: christoph.ament@uni-a.de

Mikrosysteme sind ein wesentlicher Bestandteil heutiger Technik und finden aufgrund ihrer geringen Größe und Vielseitigkeit in zahlreichen Anwendungsbereichen Verwendung. Neben Mikrosensoren sind auch Mikroaktoren Gegenstand aktueller Forschung. Eine Herausforderung liegt dabei im bisher typischerweise geringen Bewegungsraum solcher Systeme, welcher sich aus der Verwendung von rückstellenden Federn ergibt. Diese Einschränkung soll durch neue Designs mit freier Bewegung reduziert werden.

Im Projekt ADOPT [1] werden derartige Aktoren für große Auslenkungen mittels freier Bewegung untersucht und sollen später geregelt betrieben werden. Einer dieser Aktoren ist in Abb. 1 a) dargestellt und soll Rotationen eines frei beweglichen Kugelsegments mit einem Durchmesser von 2-3 mm von bis zu 60° erreichen. Das Kugelsegment sitzt dabei auf den Spitzen von vier elektrostatischen Balkenaktoren, welche durch Meanderfedern gelagert sind. Diese Balken werden durch Anlegen einer Spannung nach unten gezogen und übertragen durch Hebelwirkung eine Kraft auf das Kugelsegment. Durch asymmetrische Ansteuerung dieser Balken kann schrittweise eine gezielte Rotation der Kugel durch einzelne Kick-Bewegungen erzielt werden. Die Bewegung erfolgt somit ausschließlich durch Kontakt- und Reibkräfte, welche die Modellbildung und Identifikation erschweren. Ein Modell für diesen Mikroaktor wurde unter vereinfachten Annahmen der Kontaktpunkte in [2] vorgestellt und für den optimierungsbasierten Reglerentwurf in Simulation genutzt. Zur Kontakt- und Reibmodellierung wurde dabei eine Adaption des leistungsorientierten Ansatzes nach Specker [3] verwendet, dessen Parameter heuristisch gewählt wurden. Für ein reales System müssen unbekannte Systemparameter wie Reibkoeffizienten und Federsteifigkeiten allerdings über eine Identifikation bestimmt werden.

Zur Validierung der kontaktbasierten Modellbildung und Herleitung von Identifikationsmethoden stellen wir in diesem Beitrag eine vereinfachte, makroskopische Variante des rotatorischen Aktors vor, siehe Abb. 1 b). Dabei werden die elektrostatischen Balken durch Servomotoren mit flexiblen Hebelarmen hoher Steifigkeit ersetzt und ein Kugelsegment mit einem Durchmesser von 1 cm rotiert. Mit Ausnahme der Servomotoren, deren Bewegung als unabhängig vom Einfluss der verbleibenden Systemzustände angenommen werden kann, wird das Aktorsystem als Starrkörpermodell anhand des Lagrange-Formalismus modelliert. Die flexiblen Balken werden aufgrund der hohen Steifigkeit und kleinen Auslenkungen als Feder-Masse-Dämpfer Systeme mit einem rotatorischen Freiheitsgrad modelliert. Für das Kugelsegment müssen alle 6 Freiheitsgrade betrachtet werden.

Zur Modellierung der Kontakt- und Reibkräfte zwischen dem Kugelsegment und den Balken wird ebenfalls auf die Lagrange-konforme Beschreibung in [3] zurückgegriffen. Diese Methode lässt sich als viskoelastische Approximation starrer Kontakte auf Mehrfachkontakte zwischen konvexen Körpern oder Halbebenen anwenden. Dabei wird für jeden Kontakt zweier Körper eine Distanzfunktion $s_{\perp}(\mathbf{q})$ abhängig von den generalisierten Koordinaten $\mathbf{q}$ definiert, welche die theoretische Überschneidung beider Körper darstellt. Die

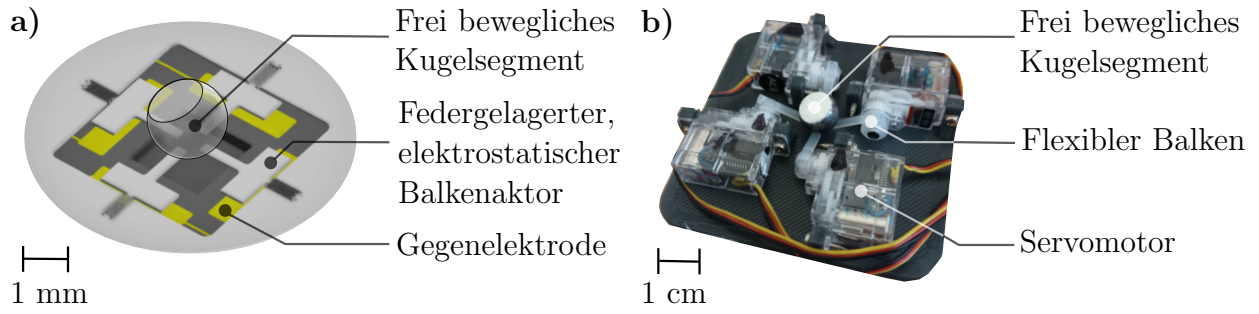


Abbildung 1: **a)** Design des Mikroaktors basierend auf elektrostatischen Balkenaktoren mit jeweils translatorischem und rotatorischem Freiheitsgrad. **b)** Makroskopischer Demonstrator mit Servomotor-basierten, flexiblen Balken zur Kontaktmodellvalidierung.

Kontaktkraft ergibt sich anschließend anhand einer Aktivierungsfunktion $\mathcal{R}_a(s_\perp)$ und der partiellen Ableitung einer Leistungsfunktion $\mathcal{R}_p(\dot{s}_\perp)$ über $\dot{\mathbf{q}}$. Ähnlich ergeben sich Reibkräfte anhand der partiellen Ableitung einer von der tangentialen Geschwindigkeit abhängigen Verlustleistungsfunktion, welche Stribeck-, Coulomb- und viskose Reibterme beinhaltet. Um beliebige Kontakte zwischen dem Kugelsegment und dem Balken auf diese Weise modellieren zu können, unterteilen wir den Balken in diskrete Kontaktpunkte. Für diese kann anschließend jeweils eine einfache Distanzfunktion verwendet werden.

Um das Modell für realistische Simulationen und den Reglerentwurf nutzen zu können, muss das Modell validiert werden. Neben Reib- und Steifigkeitsparametern haben bauliche Imperfektionen des Aufbaus einen großen Einfluss auf die Dynamik und müssen identifiziert werden. Hierfür werden die gemessene und simulierte Kugelbewegung verglichen und deren Fehler minimiert. Die Messung erfolgt kamerabasiert und wertet, wie in [4] vorgestellt, die x/y-Auslenkung des Schnittflächenmittelpunkts des Kugelsegments von der Draufsicht aus. Der Vergleich zwischen der gemessenen und simulierten Bewegung eines einzelnen Rotationsschritts ist in Abb. 2 dargestellt und zeigt gute Übereinstimmung.

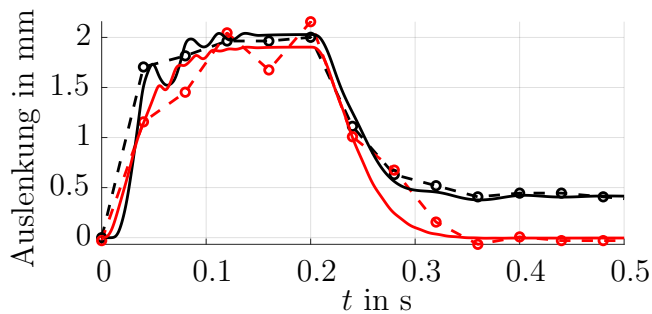


Abbildung 2: Vergleich zwischen gemessenen Auslenkungen (gestrichelt, mit Kreisen markierte Abtastzeitpunkte) und der Simulation (durchgezogen) für einen vordefinierten Kick aus der Nulllage. Die x-Auslenkung ist in schwarz, die y-Auslenkung in rot dargestellt.

Literatur

- [1] Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): ADOPT - Adaptive Optik für THz. URL: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/424616052>. [Stand 29. August 2024].
- [2] Olbrich, M.; Farny, M.; Hoffmann, M.; Ament, C.: Modeling and Control Design of a Contact-Based Electrostatically Actuated Rotating Sphere, Actuators, 2024.
- [3] Specker, T.: Leistungsbasierte Modellierung dynamischer Reib- und Kontaktprozesse in mechanischen Systemen, Dissertation, Universität Ulm, 2016.
- [4] Farny, M.; Olbrich, M.; Schütz, A.; Ament, C.; Bechtold, T.; Hoffmann, M.: Magnetische Streufeld-basierte 2D-Rotationsbestimmung für einen Mikroaktor mit großer Auslenkung, Mikrosystemtechnik Kongress, Dresden 2023.

Exploratorische Datengenerierung zur nichtlinearen Systemidentifikation

A. Kopp[†], C. Ament[‡]

Universität Augsburg, Fakultät für Angewandte Informatik, Lehrstuhl Regelungstechnik, Am Technologiezentrum 8, 86159 Augsburg

[†]Tel: +49(0)821/59869295, E-Mail: alexander1.kopp@uni-a.de

[‡]Tel: +49(0)821/59869290, E-Mail: christoph.ament@uni-a.de

Die Anwendung regelungstechnischer Methoden erfordert in den meisten Fällen ein Modell der untersuchten Strecke. Ist ein analytischer Modellierungsprozess nicht möglich oder sind Modellparameter unbekannt, kann eine Systemidentifikation durchgeführt werden, um ein Systemmodell auf Basis von Prozessdaten zu erstellen. Die Qualität dieser Datenbasis ist dabei entscheidend für die durch die Systemidentifikation erreichbare Modellgüte, da diese die einzigen Informationen über das System beinhaltet, die zur Modellierung verwendet werden. Insbesondere für nichtlineare Systeme ist die Bereitstellung einer geeigneten Datenbasis zur Systemidentifikation nicht trivial, und es wurden bereits verschiedene Verfahren zur Datengenerierung für derartige Systeme vorgeschlagen. Für bekannte Systemgleichungen im Fall der reinen Parameteridentifikation wurde beispielsweise in [1] eine Methode zur näherungsweisen Optimierung der Fisher-Information oder in [2] ein Verfahren zur Optimierung der Konditionszahl der Regressormatrix vorgestellt. Für den Fall, dass die Systemgleichungen unbekannt sind, wurden in [3] und [4] sogenannte „raumfüllende“ Verfahren vorgestellt, die durch iteratives Vorgehen eine gleichmäßige Verteilung der Datenpunkte im Ein-/Ausgangsraum anstreben.

Das vorgestellte Verfahren verfolgt ein ähnliches Ziel wie die in [3] und [4]. Der Ein-/Ausgangsraum wird hier auf einen „Messraum“ erweitert, der durch den Systemeingang sowie den Systemausgang und dessen zeitliche Ableitungen aufgespannt wird. Dies kann sich insbesondere positiv auf die Identifikation eines differentiell flachen Systems auswirken, da der Messraum in diesem Fall den Zustandsraum des Modells beinhaltet und damit durch das vorgestellte Verfahren auch die Abdeckung des Zustandsraums verbessert wird. Da die zeitlichen Ableitungen des Systemausgangs in den meisten Fällen nicht messtechnisch erfasst werden, wird auf algebraische Differentiatoren aus [5] zurückgegriffen, um diese zu bestimmen.

Da der vollständige Messraum aufgrund seiner kontinuierlichen Natur nie vollständig abgetastet werden kann, wird dieser in allen Dimensionen beschränkt. Um die Abdeckung des Messraums durch die Datenbasis zu bewerten, wird dieser in Kategorien unterteilt. Jede Kategorie stellt dabei einen Unterraum des Messraums mit engeren Unter- und Obergrenzen dar. Angestrebt wird eine möglichst kleine Anzahl an Kategorien ohne zugeordnete Datenpunkte, um den Messraum möglichst vollständig abzudecken. In jeder Iteration wird daher die stückweise konstante Stelltrajektorie erweitert und durch Aufzeichnung und Auswertung der resultierenden Ausgangstrajektorien bewertet, ob die zuletzt erfolgte Erweiterung zu einer verbesserten Abdeckung des Messraumes führt. Neben der Suche aus der Ruheposition des Systems ist die Adaption bereits vorliegender Messtrajektorien Teil des Verfahrens, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, schwer erreichbare Bereiche des Messraums abzudecken.

Anhand eines simulativen Beispiels wird das vorgestellte Verfahren illustriert und mit einer Datenbasis basierend auf pseudozufälligen Stelltrajektorien verglichen.

- [1] A. D. Wilson, J. A. Schultz und T. D. Murphey, “Trajectory Synthesis for Fisher Information Maximization,” *IEEE transactions on robotics : a publication of the IEEE Robotics and Automation Society*, Jg. 30, Nr. 6, S. 1358–1370, 2014, ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2014.2345918.
- [2] K. Ayusawa, A. Rioux, E. Yoshida, G. Venture und M. Gautier, “Generating persistently exciting trajectory based on condition number optimization,” in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2017, S. 6518–6524, ISBN: 978-1-5090-4633-1. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989770.
- [3] T. O. Heinz und O. Nelles, “Iterative Excitation Signal Design for Nonlinear Dynamic Black-Box Models,” *Procedia Computer Science*, Jg. 112, S. 1054–1061, 2017, ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.112.
- [4] V. Smits und O. Nelles, “Space-filling optimized excitation signals for nonlinear system identification of dynamic processes of a diesel engine,” *Control Engineering Practice*, Jg. 144, S. 105 821, 2024, ISSN: 09670661. DOI: 10.1016/j.conengprac.2023.105821.
- [5] A. Othmane, *Contributions to numerical differentiation using orthogonal polynomials and its application to fault detection and parameter identification*, 2022. DOI: 10.22028/D291-38806.

Physics-based models with local parameterization for the jet wiping process in an industrial hot-dip galvanizing line

J. Venter†*, A. Kugi†, A. Steinböck†*

*CD-Laboratory for Intelligent Process Control for High-Quality Steel Products

†Automation and Control Institute, TU Wien, Österreich,

E-Mail: {venter,kugi,steinboeck}@acin.tuwien.ac.at

In hot-dip galvanizing lines, pressurized gas expelled from gas-wiping dies is used to control the zinc coating weight m on both sides of a steel strip by wiping off excess zinc carried upward by the strip as it leaves a pot of molten zinc. The process is outlined in Figure 1. The coating weight is only measured 70 m to 100 m downstream of the dies using radiometric gauges. Due to the resulting large transport delay, the most common control strategy is a two-degree-of-freedom controller with feedforward compensation for process variables determined by other plant sections and some time-delay compensation in the feedback loop [1]. Pulse-and-wait control is most commonly employed as the time-delay compensator, but Smith predictors have also been used [1].

The performance of feedforward controllers and Smith predictors relies heavily on model accuracy. This explains why many published controllers include an online adaptation of the model [1, 2, 3] to compensate for model-plant mismatch resulting from unknown disturbances or changes in the operating conditions. However, many plants operate under a wide range of operating conditions (strip velocities, zinc temperatures, ...) with multiple product types, coating weights, and coating materials. Because a large transport delay slows down the model adaptation, frequent set-point or product changes imply that long strip sections are processed before the model has adapted to the new conditions. Thus, improving the modeling of the jet-wiping process is crucial to achieving more accurate coating weight control and, ultimately, reduced zinc consumption.

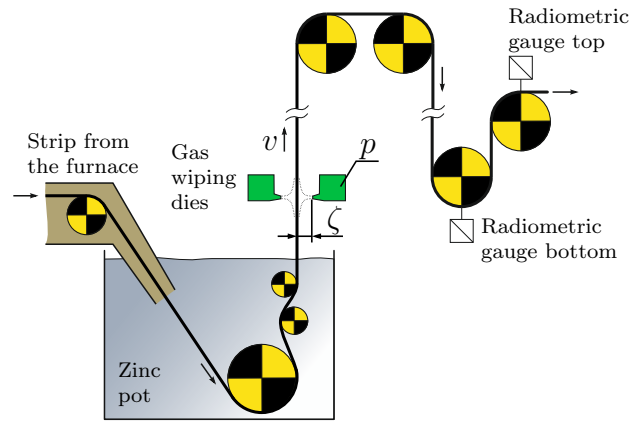


Figure 1: Jet wiping in the hot-dip galvanizing line.

The coating weight is most commonly modeled using the power law

$$m = kv^\alpha \zeta^\beta p^\gamma, \quad (1)$$

with the strip velocity v , the distance between the gas-wiping dies and the strip ζ , and the pressure p in the gas-wiping die as inputs [1]. The parameters k , α , β , and γ are

fitted to plant data. This work shows how (1) is derived from a physics-based model [4]. Moreover, it demonstrates that, when fitted to plant data, the power law model (1) has a similar prediction accuracy as the more complex physics-based model. Analyzing the prediction error of the power law model reveals that it is hard to find parameter values valid in the whole input space. Hence, a more flexible model structure is needed.

The hierarchical local model tree (HILOMOT) [5] is suggested as a suitable model structure for this purpose. This approach systematically partitions the input space into regions, each with a locally trained linear model. Sigmoidal activation functions ensure smooth switching between neighboring models when evaluating the model tree. The current work suggests and investigates incorporating the power law model (1) into the HILOMOT structure using a logarithmic transformation. This way, the strengths of physics-based and data-driven modeling can be combined. The different modeling approaches are benchmarked in simulation and based on industrial data. The data-driven models show improved accuracy over the power law. The conditions under which the suggested combination of the HILOMOT model structure and the power law model outperforms the standard HILOMOT are also discussed. Specifically, the effects of unknown disturbances in the case of closed-loop identification are investigated.

References

- [1] Guelton, N.; Lerouge, A.: Coating weight control on ArcelorMittal’s galvanizing line at Florange Works, *Control Engineering Practice*, vol. 18, pp. 1220–1229, 2010.
- [2] Shin, K.T.; Chung, W.K.: A new model and control of coating process at galvanizing line, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 9138–9143, 2008.
- [3] Pan, Z.S.; Zhou, X.H.; Chen, P.: Development and application of a neural network based coating weight control system for a hot-dip galvanizing line, *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 834–846, 2018.
- [4] Gosset, A.; Buchlin, J.M.: Jet wiping in hot-dip galvanization, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 129, no. 4, pp. 466–475, 2007.
- [5] Nelles, O.: *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes*, 2nd ed., Springer, Cham, 2020.

Hybride Modellbildung mechanischer Systeme auf Basis von physik- und datengetriebenen Ansätzen

S. Hoschek[†], P. Rodegast[†], J. Scheid[‡], D. Pfeifer[†], J. Fehr[†]

[†]Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, E-Mail: {sebastian.hoschek, philipp.rodegast, denis.pfeifer, joerg.fehr}@itm.uni-stuttgart.de

[‡]PREMIUM ROBOTICS GmbH, Maybachstraße 11, 70771 Leinfelden-Echterdingen, E-Mail: jonas.scheid@premium-robotics.com

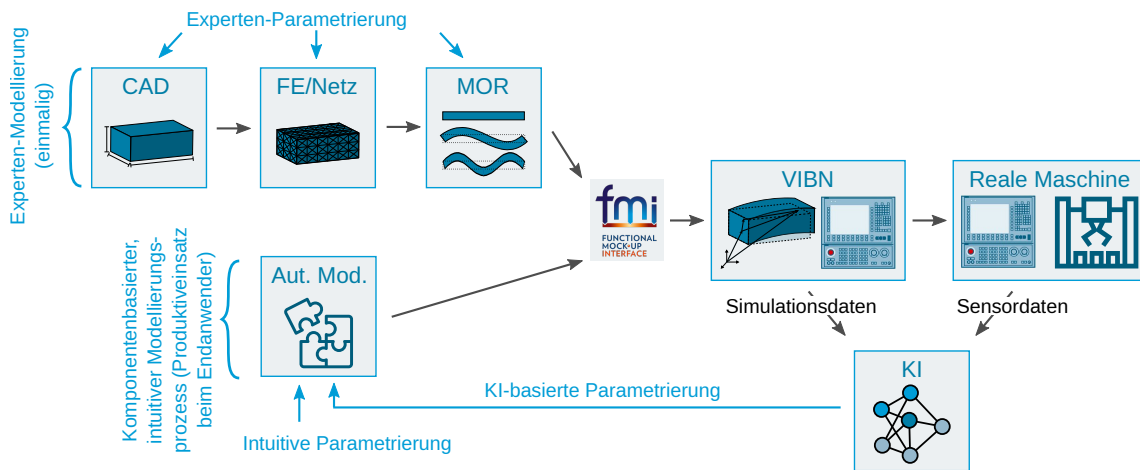


Abbildung 1: Workflow

Die Demokratisierung der Simulation von Produktionsanlagen ist ein zukunftsweisender Trend [1]. Auch kleine Startups und weniger spezialisierte Ingenieure werden Hybride Modelle sinnvoll im Betrieb von Fertigungseinrichtungen einsetzen. Roboter in der Produktion werden maßgeschneidert für ihren spezifischen Einsatzzweck entwickelt. Für minimalen Material - und Energieverbrauch gewinnen Leichtbauroboter an Bedeutung, verbunden mit Nachgiebigkeit und Schwingungen als Herausforderungen. Mithilfe modellbasierter Regelung können dennoch schnelle Trajektorien präzise ausgeführt werden. Die individuelle Modellierung aller relevanter Effekte für maßgeschneiderte Roboter stellt kleine Unternehmen mit begrenzten Ressourcen vor große Herausforderungen. Das Forschungsvorhaben basiert auf einer Kooperation mit Premium Robotics, einem kleinen Startup, welches Roboter für die Kommissionierung in der Logistik entwickelt. Das gemeinsame Ziel ist die Entwicklung eines effizienten und agilen Modellierungsworkflows am Beispiel eines neuen maßgeschneiderten Leichtbauroboters.

Um den Modellierungsaufwand möglichst gering zu halten und um alle wesentlichen Effekte abzubilden, ist eine Hybride Modellbildung mit physik- und datenbasierten Ansätzen sinnvoll. Wird die Modellierung lediglich mit physikalischen Grundgleichungen durchgeführt, so lassen sich bestimmte Effekte wie Dämpfungen nur sehr aufwendig modellieren. Auch ein Modell, welches nur auf Daten basiert ist nicht zielführend. In diesem Fall müsste das System erst gebaut werden, bevor es simuliert werden kann.

Bei der Physikalischen Modellbildung dient das CAD-Modell als Startpunkt. Zielgruppe des Workflows sind CAD-Ingenieure, die kein Expertenwissen über die Theorie der Simulationwissenschaften benötigen. Aus dem CAD-Modell wird im ersten Schritt ein

FE-Modell erstellt. Aus dem FE-Solver erhält man die Matrizen, welche das lineare elastische Verhalten beschreiben. Standard-CAD-Programme mit einfachen FE-Tools stellen diese Daten nicht direkt zur Verfügung. Aus diesem Grund wird ein neuer Workflow entwickelt und vorgestellt. Um alle wichtigen elastischen Effekte realistisch abzubilden sind sehr große Matrizen erforderlich, weshalb im nächsten Schritt eine Modellordnungsreduktion durchgeführt wird. Hier wird die Matlab Toolbox Morembs [2] verwendet. Für die gegebene Problemstellung eignet sich die Modellbildung als Flexibles Mehrkörpersystem besonders gut, wobei nichtlineare Starrkörperbewegungen und lineare Elastizitäten kombiniert werden. Mithilfe der Matlab Toolbox Neweul-M² [3] werden die Bewegungsgleichungen symbolisch hergeleitet und numerisch simuliert.

Zur Minimierung der Abweichung zwischen Simulation und Realität werden datenbasierte Verfahren herangezogen. Es ist erstrebenswert möglichst einfache Gleichungen zu erhalten anstatt eines Black-Box Modells. Das zu untersuchende System hat ungefähr 50 Freiheitsgrade. Ein geeignetes Lernverfahren ist zum Beispiel SINDy [4]. Hierbei ist es sinnvoll das Lernen im reduzierten Raum durchzuführen [5]. Der Workflow wird so ausgerichtet, dass das Modell im Betrieb laufend aktualisiert wird.

Eine offene Forschungsfrage ist die optimale Modellzusammensetzung aus physik- und datengetriebenen Ansätzen. Das zu modellierende System setzt sich auf mehreren Subsystemen zusammen, die ideale Modellzusammensetzung ist bei jedem Teilsystem unterschiedlich. Anhand des neuen Leichtbauroboters von Premium Robotics können verschiedene Ansätze praxisnah verglichen werden.

Literatur

- [1] Bornoff, R.; Hartmann, D.: On the Ongoing Evolution of Industrial Simulation. <https://blogs.sw.siemens.com/art-of-the-possible/2024/05/29/on-the-ongoing-evolution-of-industrial-simulation/>, 2024. Zugriff: 11. Juni 2024.
- [2] Fehr, J.; Grunert, D.; Holzwarth, P.; Fröhlich, B.; Walker, N.; Eberhard, P.: Morembs—A Model Order Reduction Package for Elastic Multibody Systems and Beyond. In Keiper, W.; Milde, A.; Volkwein, S. (Eds.): Reduced-Order Modeling (ROM) for Simulation and Optimization: Powerful Algorithms as Key Enablers for Scientific Computing, pp. 141–166. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-75319-5_7
- [3] Kurz, T.; Eberhard, P.; Henninger, C.; Schiehlen, W.: From Neweul to Neweul-M²: Symbolical Equations of Motion for Multibody System Analysis and Synthesis. Multibody System Dynamics, Vol. 24, No. 1, pp. 25–41, 2010. doi: 10.1007/s11044-010-9187-x
- [4] Brunton, S.L.; Proctor, J.L.; Kutz, J.N.: Discovering Governing Equations from Data by Sparse Identification of Nonlinear Dynamical Systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 113, No. 15, pp. 3932–3937, 2016. doi: 10.1073/pnas.1517384113
- [5] Kneifl, J.; Rosin, D.; Avci, O.; Röhrle, O.; Fehr, J.: Low-dimensional Data-based Surrogate Model of a Continuum-mechanical Musculoskeletal System Based on Non-intrusive Model Order Reduction, 2023. Archive of Applied Mechanics. doi: 10.1007/s00419-023-02458-5

Operatorinferenz für mechanische Systeme: datengetriebene Strukturerhaltung und Substrukturierung

Ye. Filanova[†], I. Pontes Duff[‡], D. Manvelyan^{††}, P. Benner^{‡‡}

[†]Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2 39106 Magdeburg, E-Mail: filanova@mpi-magdeburg.mpg.de

[‡]Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Sandtorstr. 1 39106 Magdeburg, E-Mail: pontes@mpi-magdeburg.mpg.de

^{‡‡}Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Sandtorstr. 1 39106 Magdeburg, E-Mail: benner@mpi-magdeburg.mpg.de

^{††}Siemens AG, Munich, diana.manvelyan@siemens.com

Modellreduktion beschäftigt sich mit der Konstruktion von niedrig-dimensionalen Ersatzmodellen, die die Simulation, Optimierung und Regelung physikalisch-technischer Prozesse signifikant beschleunigen. Sehr oft sind Methoden der Modellreduktion "intrusiv", d.h. ein direkter Zugang zum Originalmodell ist erforderlich. Dies kann aber in vielen Situationen schwierig oder sogar unmöglich sein. Deswegen werden zunehmend "nicht-intrusive" Verfahren untersucht, um aus experimentellen oder Simulationsdaten reduzierte Modelle aufbauen zu können.

In diesem Vortrag fokussieren wir uns auf eine der neuen datengetriebenen Methoden, die Operatorinferenz [1]. Dabei werden die reduzierten Operatoren mithilfe eines Regressionsproblems aus den numerischen Ergebnissen gewonnen. Wir präsentieren eine Erweiterung der Operatorinferenz-Methode für mechanische Systeme [2], die nicht nur die Erhaltung der Struktur zweiter Ordnung im reduzierten Modell ermöglicht, sondern auch die Definitheit und Symmetrie (bzw. Antisymmetrie) der reduzierten Matrizen garantiert. Somit werden die wichtigen physikalischen Eigenschaften der mechanischen Systemen erhalten. Dafür benutzen wir entweder spezielle Nebenbedingungen oder Zerlegungen der unbekannten Matrizen. Die Flexibilität der Operatorinferenz-Methode ermöglicht außerdem eine erfolgreiche Reduktion der einfachen Modellen der Kontaktmechanik [3]. Dafür wird eine Kombination mit den bekannten Substrukturierungsmethoden, wie Craig-Bampton, benutzt. Die Erweiterungen der Operatorinferenz-Methode werden anhand von numerischen Beispielen illustriert.

Literatur

- [1] Kramer, B.; Peherstorfer, B.; Willcox, K.E.: Learning nonlinear reduced models from data with operator inference, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 56(Volume 56, 2024):521–548, 2024.
- [2] Filanova, Ye.; Duff, I.P.; Goyal, P.; Benner, P.: An operator inference oriented approach for mechanical systems, *MSSP*, 200:110620, 2023.
- [3] Manvelyan, D.; Simeon, B.; Wever, U.: An efficient model order reduction scheme for dynamic contact in linear elasticity. *Journal Comput. Mech.*, 2021.

Datengetriebene Modellierung und prädiktive Regelung der Geometrie und Eigenschaften von Freiformbiegeprozesse

Ahmed Ismail†, Boris Lohmann‡

†Lehrstuhl für Regelungstechnik, School of Engineering and Design, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Tel: +49 (89) 289 - 15664, E-Mail: a.ismail@tum.de

‡Lehrstuhl für Regelungstechnik, School of Engineering and Design, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching

Freiformbiegen ist eine Technik, mit der verschiedene Rohrprofile zu komplexen Strukturen gebogen werden können. Im Zeitalter der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens wird es immer wichtiger, dass Maschinen eine Art Bewusstsein für die auszuführende Aufgabe entwickeln. Auf diese Weise kann die Qualität der Produkte verbessert und der Energieverbrauch sowie die Materialverschwendung reduziert werden.

In früheren Arbeiten [1], [2], [3], [4], [5] und [6] wurden Soft-Sensoren sowie verschiedene Einflussfaktoren auf Geometrie und Eigenspannungen identifiziert und in einer vorläufigen Regelungsstruktur verwendet. In [7] wurde diese Regelungsstruktur durch eine Regelungsstrategie ersetzt, die auf Basis vorheriger Geometrieabweichungen proaktiv reagieren kann, um deren Auswirkungen zu reduzieren. In dieser Arbeit soll der zuvor entwickelte Reststrategiealgorithmus erweitert werden, um sowohl die Geometrie als auch die Eigenspannungen des zu biegenden Rohres zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag wird die Modellierung sowohl der Geometrie (Krümmung) als auch der Eigenspannungen mit einem neu vorgeschlagenen Reststrategiealgorithmus diskutiert. Der Algorithmus wird anhand von Simulationsergebnissen validiert.

Literatur

- [1] Maier, Daniel and Stebner, Sophie and Ismail, Ahmed and Doelz, Michael and Lohmann, Boris and Muenstermann, Sebastian and Volk, Wolfram: The influence of free-form bending process parameters on residual stresses for steel tubes, *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, doi:10.1016/j.aime.2021.100047, 2021
- [2] Maier, Daniel and Kerpen, Christoph and Werner, Matthias and Scandola, Lorenzo and Lechner, Philipp and Stebner, Sophie and Ismail, Ahmed and Lohmann, Boris and Muenstermann, Sebastian and Volk, Wolfram: Development of a partial heating system for freeform bending with movable die, 2022-05-30 - 2022-06-02, Barcelona, Spain, Page/Article-Nr: 767-774
- [3] Stebner, Sophie and Maier, Daniel and Ismail, Ahmed and Balyan, Shubham and Doelz, Michael and Lohmann, Boris and Volk, Wolfram and Muenstermann, Sebastian: A System Identification and Implementation of a Soft Sensor for Freeform Bending, *Materials MDPI*, doi:10.3390/ma14164549, 2021, Page: 4549
- [4] Stebner, Sophie and Maier, Daniel and Ismail, Ahmed and Doelz, Michael and Lohman, Boris and Volk, Wolfram and Muenstermann, Sebastian: Extension of a Simu-

lation Model of the Freeform Bending Process as Part of a Soft Sensor for a Property Control, Key Engineering Materials, doi: 10.4028/p-d17700, 2022-07, Pages: 2137–2145

- [5] Ismail, Ahmed and Maier, Daniel and Stebner, Sophie and Volk, Wolfram and Muenstermann, Sebastian and Lohmann, Boris: A Structure for the Control of Geometry and Properties of a Freeform Bending Process, IFAC-PapersOnLine, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.060, Pages: 115–120
- [6] Ismail, Ahmed and Maier, Daniel and Stebner, Sophie and Volk, Wolfram and Muenstermann, Sebastian and Lohmann, Boris: Control System Design for a Semi-Finished Product Considering Over- and Underbending, Engineering Proceedings, doi: 10.3390/engproc2022026016
- [7] Ismail, Ahmed and Maier, Daniel and Stebner, Sophie and Muenstermann, Sebastian and Volk, Wolfram and Lohmann, Boris: Free-form Bending Control using Optimal Residual Strategies, IFAC-PapersOnLine, doi: 10.1016/j.ifacol.2023.10.1358, Pages: 2671–2676