

22. – 24. Februar 2023

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

<https://www.iosb.fraunhofer.de/de/veranstaltungen/regelungstechnisches-kolloquium-boppard.html>

Mittwoch, 22. Februar 2023

nachmittags **Anreise**

18:00 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

Donnerstag, 23. Februar 2023

08:15 – 08:30 **Eröffnung und Begrüßung** (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG)

Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich (Otto von Guericke Universität Magdeburg)

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Wasserfahrzeugregelung Sitzungsleitung: Prof. Dirk Abel	Trajektorienplanung Sitzungsleitung: Prof. Frank Woittennek
08:30 – 09:00	Modellprädiktive Regelung und Kollisionsvermeidung von Schiffen in beengten Seegebieten <i>Simon Helling, AG Digital Process Engineering, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr.-Ing. Thomas Meurer (Gruppe 30)</i>	Trajektorienplanung für Konvektions-Reaktions-Systeme mit Speichereffekten <i>Jens Wurm, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, UMIT TIROL, Prof. Dr.-Ing. Frank Woittennek (Gruppe 5)</i>
09:00 – 09:30	Selbsteinstellung für das automatische Manövrieren von Wasserfahrzeugen <i>Tobias Hahn, Institut für Automatisierungstechnik, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Torsten Jeinsch (Gruppe 24)</i>	Reaktive globale Trajektorienplanung mittels virtueller Magnetfelder und prädiktiver Multi-Agenten <i>Marvin Becker, Institut für Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. Matthias A. Müller (Gruppe 14)</i>
09:30 – 10:00	Auf dem Weg zur automatisierten Rheinfähre <i>Martin Kosch, Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery / Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel (Gruppe 1)</i>	Optimale Pfadplanung für industrielle Fertigungsprozesse mit komplexen kontinuierlichen Pfaden <i>Thomas Weingartshofer, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN), Technische Universität Wien, Prof. Dr.-Ing. Andreas Kugi (Gruppe 29)</i>
10:00 – 10:30	Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle	

22. – 24. Februar 2023

10:30 – 12:00 Regelung von Fahrzeugen (1)		Beobachtbarkeit
Sitzungsleitung: Prof. Stefan Kowalewski		Sitzungsleitung: Prof. Steven X. Ding
10:30 – 11:00	Networked Model Predictive Control for Multi-Vehicle Decision-Making <i>Patrick Scheffe, Bassam Alrifaae</i> Lehrstuhl Informatik 11, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski, (Gruppe 1)	Alternatives datenbasiertes FDI-Framework basierend auf SPD Matrizen <i>Caroline C. Zhu, Automatisierungstechnik und komplexe Systeme, Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr.-Ing. Steven X. Ding (Gruppe 11)</i>
11:00 – 11:30	Fehlertolerante Bewegungsregelung in der Fahrzeugautomatisierung: Ein Ansatz zur Einsetzbarkeitsbewertung in der Konzeptphase <i>Torben Stolte, Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer (Gruppe 4)</i>	Ein algebraischer Zugang zur Beobachtbarkeit polynomialer dynamischer Systeme <i>Daniel Gerbet, Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden, Prof. Dr.-Ing. Klaus Röbenack (Gruppe 9)</i>
11:30 – 12:00	Bewegungsplanung für Fahrzeuggespanne in teilweise strukturierten Umgebungen <i>Julian Dahlmann, Lehrstuhl für Regelungstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen (Gruppe 12)</i>	Kaskadierte Inkrementelle Nichtlineare Dynamische Inversion für ein Tiltrotor-VTOL <i>Mark Henkenjohann, Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik, Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler (Gruppe 23)</i>

12:00 – 14:30 Mittagessen im Bellevue Rheinhotel / Pause

14:30 – 16:00 Regelung von Fahrzeugen (2)		Verschlüsselte Regelung / Predictive Control
Sitzungsleitung: Prof. Ulrich Jumar		Sitzungsleitung: Prof. Moritz Schulze Darup
14:30 – 15:00	Selbstlernende KI-basierte Spurregelung von Flurförderzeugen <i>Timm Sauer, Labor für Simulation, Steuerung und Regelung, TH Aschaffenburg/ifak Institut für Automation und Kommunikation e.V. an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Jumar (Gruppe 20)</i>	Verschlüsselte Regelungstechnik 2.0 <i>Nils Schlüter, Lehrstuhl für Regelungstechnik und cyberphysische Systeme (RCS), TU Dortmund, Prof. Dr.-Ing. Moritz Schulze Darup (Gruppe 26)</i>
15:00 – 15:30	Hybride lokale Trajektorienplanung für autonome Rennfahrzeuge in Mehrfahrzeugszenarien <i>Levent Ögretmen, Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann (Gruppe 22)</i>	Resiliente Verschlüsselung der vernetzten Regelungssysteme <i>Moritz Fauser, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, RPTU Kaiserslautern-Landau, Prof. Dr.-Ing. Ping Zhang (Gruppe 16)</i>
15:30 – 16:00	Entscheidungsfindung für automatische Fahrzeuge an nicht-signalisierten innerstädtischen Kreuzungen mit einem ereignisdiskreten System <i>Hannes Weinreuter, Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann (Gruppe 30)</i>	Predictive Control and Machine Learning with Guarantees for Systems exhibiting Multi-Modes <i>Johanna Bethge, Control and Cyber-Physical Systems, TU Darmstadt, Prof. Findeisen (Gruppe 7)</i>
16:00 – 16:30 Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle		

22. – 24. Februar 2023

16:30 – 17:30	Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG
	The Devil is in the Detail: Challenges of Automation and Digitalization in Production
	<i>Dr.-Ing. Christine Maul</i> (Head of Advanced Process Control, Covestro Deutschland AG)

17:30 – 17:45	Vorstellung der neuen Professuren im Haupttagungsraum EG
17:45 – 18:00	Vergabe der at-Preise im Haupttagungsraum EG
	Auszeichnung herausragender Beiträge der Zeitschrift at-Automatisierungstechnik durch den Herausgeber

18:30 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

Freitag, 24. Februar 2023

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Reglerentwurf Sitzungsleitung: Prof. Matthias Althoff	Diskrete Systeme Sitzungsleitung: Prof. Frank Allgöwer
08:30 – 09:00	Skalierbare Berechnung invarianter Mengen für nichtlineare Regelungssysteme <i>Lukas Schäfer, Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und Echtzeitsysteme, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Matthias Althoff (Gruppe 21)</i>	Zeit- und ereignisbasierte Regelung: Wie lassen sich ihre Vorteile vereinbaren? <i>Stefan Wildhagen, Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer (Gruppe 27)</i>
09:00 – 09:30	Region-based selection and adaptation of weighting parameters with significant variations in plant parameters <i>Xujiang Huang, Fachgebiet Prozessoptimierung, Technische Universität Ilmenau, Prof.-Dr.-Ing. Pu Li (Gruppe 15)</i>	Manufacturing systems with time-window constraints: the max-plus perspective <i>Davide Zorzenon, Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. Jörg Raisch (Gruppe 2)</i>
09:30 – 10:00	On Bayesian Optimization for Controller Tuning <i>Alexander von Rohr, Institute for Data Science in Mechanical Engineering, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Sebastian Trimpe (Gruppe 8)</i>	Direkte Multivariablenregelung von Modularen Multilevel Umrichtern <i>Daniel Dinkel, Automatisierungs- und Regelungstechnik, Universität der Bundeswehr München, Prof. Dr.-Ing. Claus Hillermeier (Gruppe 22)</i>

10:00 – 10:30 **Kaffee-/Teepause** im Foyer der Stadthalle

22. – 24. Februar 2023

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
10:30 – 12:00	Diagnose und Zustandsschätzung Sitzungsleitung: Prof. Cristina Tarín	Synthese und Identifikation Sitzungsleitung: Prof. Herbert Werner
10:30 – 11:00	Fehlerdiagnose in adaptiven Tragwerken <i>Jonas Stiefelmaier, Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Cristina Tarín (Gruppe 28)</i>	Skalierbare Reglersynthese für Multi-Agenten-Systeme mit stochastischen Paketverlusten <i>Christian Hesse, Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Hamburg, Prof. Dr.-Ing. Herbert Werner (Gruppe 13)</i>
11:00 – 11:30	Numerisches Differenzieren mittels orthogonaler Polynome und seine Anwendung für die Diagnose von Stößen <i>Dr.-Ing. Amine Othmane, Modellierung und Simulation technischer Systeme, Universität des Saarlandes, Prof. Dr. Kathrin Flaßkamp (Gruppe 25)</i>	Effekt von Bifurkationsgrenzen auf die gradientenbasierte Parameteroptimierung von Modellen mit interner Dynamik <i>A. Rehmer, FG Mess- und Regelungstechnik, FB Maschinenbau, Universität Kassel, Prof. Dr.-Ing. Andreas Kroll (Gruppe 19)</i>
11:30 – 12:00	Zustandsschätzung von Strömungsfeldern in hydraulischen Maschinen mit reduzierten Modellen <i>Kamil David Sommer, Lucas Reineking Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Martin Mönnigmann (Gruppe 3)</i>	Characterization of nonplanar surfaces by retroreflex ellipsometry <i>Chia-Wei Chen, Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie KIT/Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer (Gruppe 18)</i>

12:00 – 12:45 Abschluss im Haupttagungsraum EG

Prämierung des besten Vortrags

durch Dr.-Ing. Hellmar Rockel, Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Aufruf für Boppard 2024

12:45 – 13:45 Mittagessen im Bellevue Rheinhotel

13:45 Ende des Kolloquiums

Modellprädiktive Regelung und Kollisionsvermeidung von Schiffen in beengten Seegebieten

Simon Helling

AG Digital Process Engineering
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und
Mechanik
Karlsruher Institut für Technologie
sh@tf.uni-kiel.de

Thomas Meurer

AG Digital Process Engineering
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und
Mechanik
Karlsruher Institut für Technologie
tm@tf.uni-kiel.de

Schlüsselwörter: Kollisionsvermeidung, prädiktive Regelung, Optimalsteuerung, autonome Schifffahrt

Im Bereich der maritimen Systeme hat sich in den letzten Jahren ein zunehmendes Interesse an (teil-)autonomen Lösungen manifestiert. Dies ist vor allem dadurch motiviert, dass entsprechende Verfahren wesentlich dazu beitragen, das Unfallrisiko bedingt durch menschliches Versagen zu minimieren, dem Personalmangel Rechnung zu tragen und zudem die Energieeffizienz zu verbessern. Dabei spielt vor allem in küstennahen Anwendungsgebieten wie z.B. bei Personenfähren die zuverlässige Kollisionsvermeidung zwischen dem (teil-)autonomen Schiff und allen anderen auf dem Wasser befindlichen Verkehrsteilnehmern eine entscheidende Rolle.

Zu diesem Zweck wird ein modellprädiktiver Ansatz vorgestellt, der auf Basis des dynamischen Modells des Eigenschiffes eine Pfadfolgeregelung auf einem bewegten zeitlichen Horizont realisiert. Dadurch können stets neue Informationen der näheren Umgebung berücksichtigt werden. Darunter fallen insbesondere die Position, Ausmaße und Ausrichtung anderer Verkehrsteilnehmer, die als Hindernisse durch geeignete Beschränkungen in das zugrundeliegende Optimierungsproblem mit aufgenommen werden. Auf diese Weise kann prinzipiell die Kollisionsvermeidung sichergestellt werden.

Die echtzeitfähige Lösbarkeit des zugrundeliegenden Optimierungsproblems leidet mit zunehmender Anzahl an Hindernissen, die in der Umgebung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der modellprädiktive Ansatz um ein sogenanntes Culling-Verfahren erweitert, das in Anlehnung an ähnliche Methoden aus der Computergrafik die Anzahl an zu berücksichtigenden Hindernissen auf ein Minimum reduziert und so die Effizienz des vorgestellten Algorithmus sichert [1]-[3].

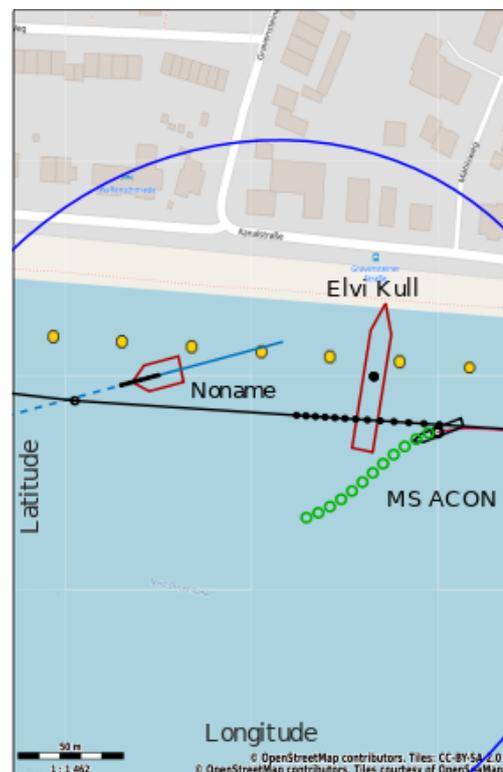


Abbildung 1: Eigenschiff (rechts) beim Ausweichmanöver im Nord-Ostsee-Kanal [1].

Beispielhaft wird dieser Ansatz mit einer Simulation auf Basis von AIS Daten aus dem Nord-Ostsee-Kanal, der meist befahrenen Wasserstraße der Welt, veranschaulicht.

Literatur

- [1] S. Helling, T. Meurer „Dual Collision Detection in Model Predictive Control including Culling Techniques“. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology (TCST)*. Zur Veröffentlichung angenommen, 2022.
- [2] S. Helling, T. Meurer „A Culling Procedure for Collision Avoidance Model Predictive Control with Application to Ship Autopilot Models“. In: *Conference on Control Applications Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS)*, IFAC-PapersOnLine, Volume 54, Issue 16, pp. 43-50, DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.10.071, 2021.
- [3] S. Helling et al. „On the Dual Implementation of Collision-Avoidance Constraints in Path-Following MPC for Underactuated Surface Vessels“. In: *American Control Conference (ACC)*, pp. 3366-3371, DOI: 10.23919/ACC50511.2021.9482890, 2021.

Selbsteinstellung für das automatische Manövrieren von Wasserfahrzeugen

Tobias Hahn

Institut für Automatisierungstechnik
Universität Rostock
tobias.hahn@uni-rostock.de

Torsten Jeinsch

Institut für Automatisierungstechnik
Universität Rostock
torsten.jeinsch@uni-rostock.de

Schlüsselwörter: maritime Regelungstechnik, Selbsteinstellung, modellbasierte Regelung

Der zunehmende Bedarf an Transportkapazität hat neue Entwicklungen im Seeverkehr eingeleitet. Neben dem Trend zu immer größeren Schiffen beobachtet man eine Veränderung der Beweglichkeit. Beide Entwicklungen gefährden prinzipiell die Sicherheit im Seeverkehr, so dass diese mit geeigneten Maßnahmen wieder erhöht werden muss. Eine solche Möglichkeit bilden Assistenzsysteme, die den Nautiker bei seinen Entscheidungen unterstützen oder fortgeschrittene Steuerungen und Regelungen, die es erlauben, die Bewegungsmöglichkeiten des Wasserfahrzeugs besser zu nutzen. Hierbei ist die Manövrierbarkeit nicht nur im freien Wasser, sondern besonders in begrenzten Fahrwassern und Hafengebieten zu bewerten, wobei erhöhte Sicherheitsstandards, Emissionsvorschriften und der wirtschaftliche Betrieb zu berücksichtigen sind. Durch den vermehrten Einsatz von Assistenzsystemen können von Menschen verursachte Manövrierfehler verringert oder gar vermieden werden, was der Sicherheit und damit auch der Wirtschaftlichkeit des Schiffsbetriebs bei gleichzeitiger Schonung der Umwelt zugutekommt.

Der Beitrag behandelt Methoden des automatisierten Entwurfs von Assistenzsystemen zum Manövrieren in begrenzten Fahrwassern und Hafengebieten. Untersuchungsgegenstand sind in Längs-, Quer- und Drehrichtung manövrierbare Wasserfahrzeuge. Die relevanten Nebenbedingungen, mit denen im praktischen Einsatz zu rechnen ist, werden berücksichtigt.

Aus der Fülle von Assistenzfunktionen steht in diesem Beitrag die Entwicklung innovativer Identifikationsmethoden im Fokus. Die experimentelle Validierung des regelungsgestützten Manövrierens erfolgt im Modell- und im Großausführungsmaßstab. Es werden Methoden präsentiert, welche die Arbeitsschritte Prozessidentifikation und Reglerentwurf während des regulären Betriebs selbsteinstellend realisieren. Auf spezielle Erprobungsmanöver wird verzichtet. Mit den vorgeschlagenen Verfahren zur experimentellen Parameteridentifikation kann die Dämpfung und Trägheit des Wasserfahrzeugs identifiziert werden. Hierzu erfolgt arbeitspunktabhängig die Schätzung der vollständig besetzten Dämpfungs- und Massenmatrizen. Mit der entwickelten Methode werden die Parameter zur analytischen Beschreibung der dynamischen Schiffsbewegung experimentell ermittelt. Das identifizierte Modell zur Abbildung des verkoppelten Bewegungsverhaltens des Wasserfahrzeugs ist eine Voraussetzung für die Durchführung des automatisierten, modellbasierten Reglerentwurfs.

Die Verifikation der Entwurfsverfahren erfolgte unter Laborbedingungen im Modellmaßstab sowie auf einem Schlepper im freien Fahrwasser bei Wind und Strömung.

Zur Validierung wurden verschiedene Assistenzfunktionen zum Manövrieren automatisch entworfen und schließlich die Funktion des Regelsystems im Einsatz bei Wind und Strömung demonstriert.

Literatur

- [1] R. Damerius et al. „ Consumption-reduced manual and automatic manoeuvring with conventional vessels “. In: *Journal of Marine Engineering & Technology*. pp. 1-12, 2022.
- [2] T. Hahn et al. „ An Identification Scheme to determine All Off-Diagonal Elements of Added-Mass Matrix for Marine Vessels “. In: *IFAC-PapersOnLine. 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles CAMS 2021* 54.16 (Jan. 2021), S. 175–180, 2021.

Auf dem Weg zur automatisierten Rheinfähre

Martin Kosch

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
m.kosch@irt.rwth-aachen.de

Heike Vallery / Dirk Abel

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
heike@vallery.org
d.abel@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Schiffsautomatisierung, überaktuierte Flussfähre, Trajektorienplanung, Trajektorienfolgeregung, dynamische Schuballokation

Gemeinsam mit einer Zunahme des Verkehrsaufkommens in der Seeschifffahrt gewinnt auch die Schifffahrt auf deutschen Binnenwasserstraßen als Zu- und Ablaufstrecken zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig sieht sich die deutsche Binnenschifffahrt in den nächsten Jahren mit unterschiedlichen Herausforderungen konfrontiert, wie beispielsweise strengeren Umweltschutz- und Sicherheitsauflagen, klimatischen Veränderungen mit Auswirkungen auf die Pegelstände sowie einer Reduktion des Angebots an ausgebildeten Schiffsführerinnen und Schiffsführern. Durch eine weitere Digitalisierung und Automatisierung lassen sich für viele dieser Herausforderungen neue Lösungen finden, um die Binnenschifffahrt als besonders umweltschonendes und sicheres Verkehrsmittel zukunftsfest zu machen.



Abbildung 1: Die Versuchsfähre „Horst“ kurz vor ihrer Anlegestelle in Ingelheim

Neben der sogenannten Längsschifffahrt ist nicht zuletzt auch die Fährschifffahrt von diesem Wandel und dem resultierenden Handlungsbedarf betroffen. Im Rahmen des BMWK-Verbundprojekts AKOON wird daher die vollständige Automatisierung einer Flussfähre erforscht und mit einem eigens dafür umgerüsteten Demonstratorschiff im Praxiseinsatz erprobt. Ziel des Projekts ist es, eine sichere und effiziente Überfahrt – einschließlich dem An- und Ablegen der Fähre – ohne menschliches Zutun zu ermöglichen. Versuchsträger im Forschungsprojekt ist die Fähre „Horst“, die in der Nähe von Mainz zwischen den Ortschaften Oestrich-Winkel und Ingelheim verkehrt. Aufgrund enger Passagen, Sandbänken und starker Strömung gilt das untersuchte Fährgebiet als besonders anspruchsvoll, wodurch menschliche Fährführer besonders in Zeiten niedriger Pegelstände schnell an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit stoßen. Mit der Automatisierung in AKOON soll die Grundlage für eine langfristig sichere, zuverlässige und wirtschaftliche Nutzung der Fährstrecke gelegt werden.

Im vorliegenden Vortrag wird zunächst das Forschungsprojekt, das Versuchsschiff und das Testgebiet sowie das Gesamtkonzept der Schiffsautomatisierung aus [1] vorgestellt. Anschlie-

ßend werden die folgenden regelungstechnischen Teilaspekte des Projekts im Detail beleuchtet: Die Regelung der Fähre mittels eines modellprädiktiven Regelungsansatzes sowie ein graphbasierter Ansatz zur Planung sicherer und effizienter Trajektorien.

- Die präsentierte **Schiffsregelung** kombiniert den modellprädiktiven Regelungsansatz aus [2] mit einer dynamischen Schuballokation aus [3], welche speziell für überaktuierte Schiffe mit Voith-Schneider-Antrieben entwickelt wurde. Der hier vorgestellte Regelungsansatz nutzt eine sukzessiv linearisierte Formulierung der Schiffsdynamik, des Kraftstoffverbrauchs und der Schubbegrenzungen für eine optimale Wahl der insgesamt 12 Propellerstellgrößen. Anhand realer Messreihen wird gezeigt, dass während dynamischer Fahrt Positionsabweichungen von weniger als 5 m realisierbar sind. Zudem werden Positionshaltegenauigkeiten von weniger als 1 m in störbehafteten Umgebungen und weniger als 10 cm unter ruhigen Bedingungen erreicht.
- Die vorgestellte **Trajektorienplanung** auf Basis von [4] nutzt einen graphbasierten Ansatz in Kombination mit einem Path-Velocity-Decomposition-Ansatz (PVD). Dabei wird der zeitliche Verlauf der Abspielgeschwindigkeit von vorgegebenen Referenztrajektorien hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und der Überfahrtszeit optimiert. Dynamische Hindernisse und die dynamischen Limitierungen der Fähre werden als Randbedingungen explizit berücksichtigt. Anhand simulativer Ergebnisse wird gezeigt, dass mit diesem Ansatz ein sicherer und effizienter Betrieb der automatisierten Fähre auch in hoher Verkehrsdichte ermöglicht wird.

Im Rahmen des Vortrags werden die wichtigsten experimentellen und simulativen Ergebnisse der Schiffsautomatisierung unter anderem anhand von Videos der experimentellen Erprobung und Animationen präsentiert. Abschließend wird ein Ausblick zu weiterführenden Forschungsthemen im Bereich der Fährautomatisierung gegeben.

Literatur

- [1] P. Koschorrek, M. Kosch, M. Nitsch, D. Abel und D. Jürgens. „Towards semi-autonomous operation of an over-actuated river ferry“. In: *Automatisierungstechnik*. 2022.
- [2] M. Kosch, A. Elkhshap, P. Koschorrek, R. Zweigel und D. Abel. „Hardware-in-the-Loop Trajectory Tracking and Collision Avoidance of Automated Inland Vessels Using Model Predictive Control“. In: *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*. 2021.
- [3] P. Koschorrek und M. Kosch. „An Approach to QP-based Thrust Allocation considering Inflow“. In: *Proceedings of the 13th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS)*. 2021.
- [4] M. Kosch, P. Koschorrek, und D. Abel. „A Reference Trajectory-Based Approach to Safe and Efficient Trajectory Planning for an Overactuated River Ferry“. In: *Proceedings of the 14th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, Robotics, and Vehicles (CAMS)*. 2022.

Trajektorienplanung für Konvektions-Reaktions-Systeme mit Speichereffekten

Jens Wurm

Institut für Automatisierungs- und
Regelungstechnik
UMIT TIROL
jens.wurm@umit-tirol.at

Frank Woittennek

Institut für Automatisierungs- und
Regelungstechnik
UMIT TIROL
frank.woittennek@umit-tirol.at

Schlüsselwörter: verteilt-parametrisches System, Konvektions-Reaktions-System, Trajektorienplanung, Totzeitgleichung

Es werden verteilt-parametrische Systeme untersucht, die aus mehreren Konvektions-Reaktionsgleichungen mit identischer Transportgeschwindigkeit bestehen und örtlich verteilt mit einer Speicherdynamik gekoppelt sind. Derartige Modelle können unter anderem zur Beschreibung katalytischer und thermischer Speicherprozesse verwendet werden. Häufig ist dabei die Speichergröße nicht direkt messtechnisch erfassbar, wodurch sich zusätzliche regelungstechnische Herausforderungen ergeben.

Für das Gesamtsystem wird zunächst eine alternative Modellbeschreibung unter Zuhilfenahme der Methode der Charakteristiken gewonnen, wie sie bereits in [1] für ein Modell einer thermischen Rohrströmung mit einer Konvektions-Reaktionsgleichung vorgestellt wurde. Als Resultat ergibt sich eine partielle Differentialgleichung, die bezüglich der Zeit erster Ordnung ist und deren Ordnung bezüglich des Ortes der Anzahl der Konvektions-Reaktions-Prozesse entspricht. In dieser Gleichung, die als partielle Filterdifferentialgleichung bezeichnet wird, tritt lediglich noch eine im Rahmen der Modellumformung neu eingeführte Hilfsgröße auf. Eine weitere Besonderheit dieser Differentialgleichung besteht in der Tatsache, dass die höchste Ableitung gemischt auftritt.

Die vorgeschlagene Reformulierung des Modells ermöglicht nicht nur die numerisch effiziente Simulation des Systems, sondern auch einen einfachen Steuerungsentwurf durch Modellinversion. Damit erweitert der Beitrag die Ergebnisse aus [2] auf Systeme mit mehreren Transportprozessen. Als spezieller Aspekt des Entwurfsverfahrens wird der Einfluss der direkten Verkopplung der Transportprozesse auf die Dimension des Ausgangssystems bzw. der internen Dynamik diskutiert. Dazu werden sowohl für das Systemmodell als auch für die inverse Dynamik Stabilitätseigenschaften mit Hilfe der Theorie linearer Operatoren analysiert. Für die numerische Implementierung werden Ansätze zur Diskretisierung vorgestellt, die als Basis für die im Vortrag präsentierten Simulationsergebnisse dienen.

Literatur

- [1] J. Wurm et al. „On delay partial differential and delay differential thermal models for variable pipe flow“. In: *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020.
- [2] S. Bachler et al. „Open-loop temperature control for a distributed parameter model of a pipe“. In: *IFAC-PapersOnLine* 53, 2. 2020.

Reaktive globale Trajektorienplanung mittels virtueller Magnetfelder und prädiktiver Multi-Agenten

Marvin Becker
Institut für Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
becker@irt.uni-hannover.de

Matthias A. Müller
Institut für Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
mueller@irt.uni-hannover.de

Schlüsselwörter: Reaktive Hindernisvermeidung, Bewegungsplanung für Roboter, Autonome Roboter, Robotische Manipulatoren, Garantierte Kollisionsvermeidung

Reaktive Bewegungsplanung für autonome Roboter wird immer wichtiger, da Roboter immer häufiger nicht nur in der industriellen Automatisierung, sondern auch im Alltag ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen wie Lichtschranken oder Sicherheitszäune eingesetzt werden. Unter solchen Voraussetzungen müssen Roboter oft in unübersichtlichen, unbekannt und dynamischen Umgebungen arbeiten, wobei schnelle und präzise Reaktionen auf Veränderungen im Arbeitsraum von entscheidender Bedeutung sind. Dies hat zu einer wachsenden Nachfrage nach sicheren und effizienten Trajektorienplanungsmethoden geführt, die sich in Echtzeit an die sich ändernden Bedingungen anpassen können. Traditionelle Bewegungsplanungsansätze mit einem Sense-Plan-Act Paradigma erreichen hierbei ihre Grenzen, während reaktive Algorithmen aufgrund ihrer schnellen Berechnungszeit und der damit verbundenen sofortigen Anpassung an unvorhergesehene Ereignisse großes Potenzial bieten [1].

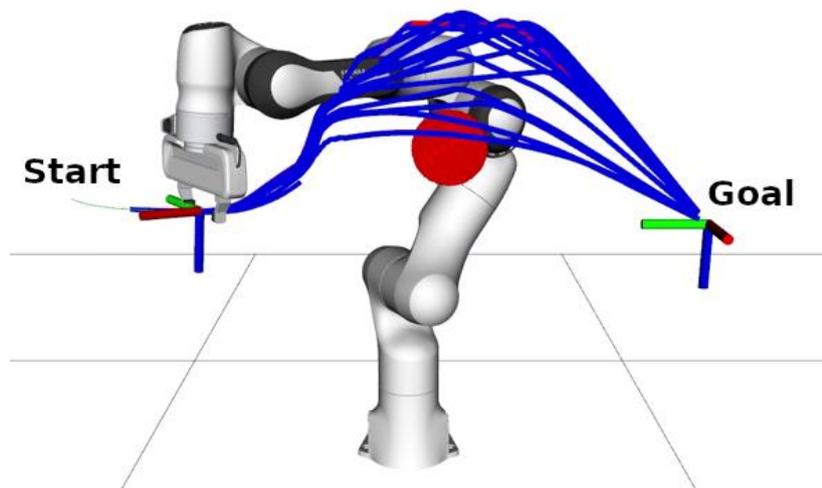


Abbildung 1: CFP Bewegungsplanung für einen Franka Emika Roboter. Die prädizierten Trajektorien sind in blau abgebildet.

Ein Ansatz, um diese Herausforderungen anzugehen, ist die Circular Field Predictions (CFP)-Methode [2], die wir in diesem Vortrag diskutieren. CFP vereint reaktive Kollisionsvermeidung und globale Trajektorienplanung und generiert glatte, schnelle und kollisionsfreie Trajektorien für die Bewegungsplanung von Robotern. Der Ansatz basiert auf virtuellen elektromagnetischen Feldern und ist frei von lokalen Minima, wodurch er besonders gut für den Einsatz in komplexen und dynamischen Umgebungen geeignet ist. Darüber hinaus er-

möglicht CFP durch die Verwendung von prädiktiven Multi-Agenten, welche die Roboterbewegung unter verschiedenen Parametereinstellungen simulieren, eine effiziente Erkundung der Umgebung.

Wir diskutieren formale Garantien für die Kollisionsvermeidung und die Zielerreichung in zweidimensionalen Umgebungen auch bei mehreren Hindernissen [3].

Darüber hinaus zeigen wir, wie der CFP Ansatz erweitert werden kann, um die Kollisionsvermeidung der gesamten Struktur eines robotischen Manipulators sicherzustellen [4]. Hierbei werden Informationen über mögliche Ausweichrichtungen aus einem globalen Bewegungsplaner genutzt, um die Ergebnisse des Multi-Agenten Ansatzes weiter zu verbessern und undurchführbare Trajektorien bereits vorab ausschließen zu können.

Wir illustrieren die vorgeschlagene CFP Methode simulativ in mehreren virtuellen Umgebungen mit komplexen und dynamischen Hindernissen sowohl für Punktmassenroboter als auch mit Manipulatoren in 3D (siehe Abbildung 1) sowie experimentell für die Bewegungsplanung des Endeffektors eines 7-Freiheitsgrad Franka Emika Roboters und auf mobilen Soccer-Robotern.

Literatur

- [1] D. Kappler, F. Meier, J. Issac, J. Mainprice, C. G. Cifuentes, M. Wüthrich, V. Berenz, S. Schaal, N. Ratliff, and J. Bohg. „Real-time perception meets reactive motion generation.” In: *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(3), 1864–1871, 2018.
- [2] M. Becker, T. Lilge, M. A. Müller, and S. Haddadin. „Circular fields and predictive multi-agents for online global trajectory planning.” In: *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 2618–2625, 2021.
- [3] M. Becker, J. Köhler, S. Haddadin, and M. A. Müller. „Motion Planning using Reactive Circular Fields: A 2D Analysis of Collision Avoidance and Goal Convergence.” Submitted to: *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022. Available online: [arXiv:2210.16106](https://arxiv.org/abs/2210.16106).
- [4] M. Becker, P. Caspers, T. Hattendorf, T. Lilge, S. Haddadin, and M. A. Müller. „Informed Circular Fields for Global Reactive Obstacle Avoidance of Robotic Manipulators.” Submitted to: *IFAC World Congress*, 2023. Available online: [arXiv:2212.05815](https://arxiv.org/abs/2212.05815).

Optimale Pfadplanung für industrielle Fertigungsprozesse mit komplexen kontinuierlichen Pfaden

Thomas Weingartshofer

Institut für Automatisierungs- und
Regelungstechnik (ACIN)
Technische Universität Wien
weingartshofer@acin.tuwien.ac.at

Andreas Kugi

Institut für Automatisierungs- und
Regelungstechnik (ACIN)
Technische Universität Wien
kugi@acin.tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: Industrieroboter, Pfadplanung, Fertigungsprozess, Prozesseigenschaften

In den letzten Jahren nimmt die Anzahl der eingesetzten Industrieroboter stetig zu [1]. Durch den Trend der stärkeren Individualisierung von Produkten bei kleinen Losgrößen müssen Industrieroboter immer flexibler werden und schnell neue Arbeitsabläufe ausführen können. Für jeden neuen Arbeitsablauf eines Industrieroboters ist jedoch ein neues Roboterprogramm notwendig, welches die gewünschten Bewegungen entweder im Arbeitsraum, d.h. im kartesischen Raum, oder im Konfigurationsraum, d.h. im Achsraum, vorgibt. Dabei wird zwischen zwei Programmierarten unterschieden, der Online- und der Offline-Programmierung. Bei der Online-Programmierung werden Pfadpunkte punktweise händisch mit dem Roboter eingelernt [2]. Bei der Offline-Programmierung wird stattdessen die Roboterbewegung anhand des mathematischen Robotermodells entworfen, was Standzeiten verringert und eine flexiblere Programmierung ermöglicht. Durch diese Vorteile ist die Offline-Programmierung mittlerweile Stand der Technik für industrielle Prozesse. Bei Fertigungsprozessen, wie z.B. dem Schweißen, Schneiden, Lackieren oder Kleben, werden häufig Pfade im Raum vorgegeben, denen der Roboter in einer kontinuierlichen, durchgängigen Bewegung folgen muss. Dies ist bei langen und komplexen Pfaden jedoch mitunter schwierig oder schlicht nicht möglich. Häufig begrenzen dabei die mechanischen Bewegungsbereiche oder die Maximalgeschwindigkeiten der Achsen des Roboters die kontinuierliche Bewegung. Dies hat zur Folge, dass die Pfade händisch am Computer geändert oder aber die Position des Roboters bzw. die Bauform des Werkzeugs am Roboter verändert werden muss, um eine kontinuierliche Roboterbewegung durchführen zu können [3]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Eigenschaften des Fertigungsprozesses systematisch in die Planung miteinzubeziehen, um eine kontinuierliche Roboterbewegung berechnen zu können. Heutige Pfadplaner berücksichtigen, wenn überhaupt, meist nur eingeschränkte spezifische Eigenschaften von ganz speziellen Prozessen.

In dieser Arbeit wird ein optimierungsbasierter Pfadplanungsalgorithmus für die Berechnung der Bewegung des Roboters vorgestellt, der die Prozessfenster und Eigenschaften eines industriellen Prozesses systematisch berücksichtigt. Dabei können einzelne Freiheitsgrade im Arbeitsraum des Roboters, die zur Durchführung des Prozesses notwendig sind [4], freigegeben oder gesperrt werden. Zusätzlich können für den Prozess zugelassene Abweichungen des Werkzeugs in der Position oder Orientierung systematisch in der Planung miteinbezogen werden. Mit diesem Ansatz können Lösungen für komplexe Aufgabenstellungen bei der Pfadplanung gefunden werden, die nur durch gezielte Nutzung von Informationen des Prozesses selbst erzielt werden können.

Der vorgestellte Pfadplaner ist als allgemeines Framework formuliert, in dem die Eigenschaften des betrachteten Prozesses in einem Optimierungsproblem durch unterschiedliche Kostenfunktionen sowie Gleichungs- und Ungleichungsbeschränkungen repräsentiert werden. Zusätzlich beinhaltet der Pfadplaner eine Kollisionsvermeidungsstrategie und bietet die Möglichkeit, durch kinematisch singuläre Punkte hindurch zu planen, wodurch der Lösungsraum nochmals vergrößert wird [5].

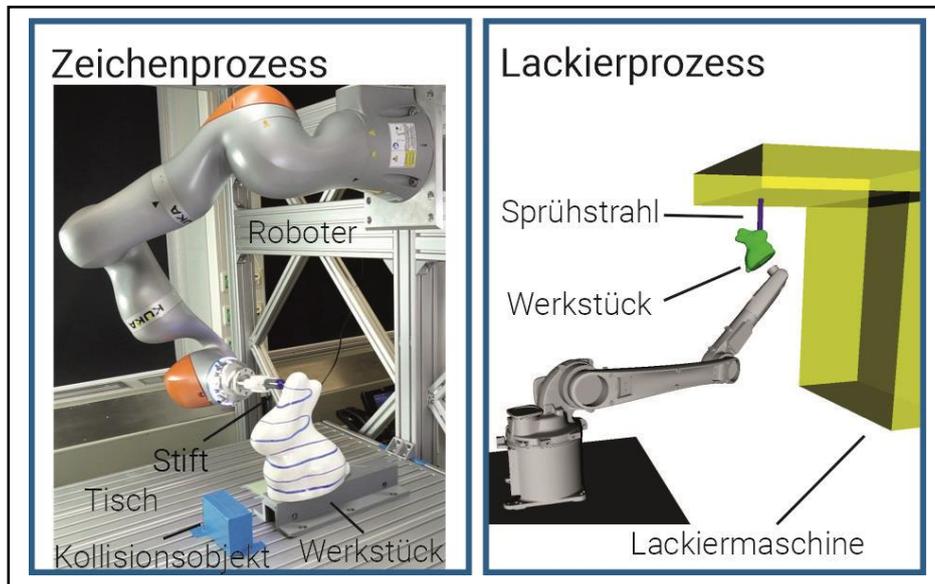


Abbildung 1: Pfadplanung für zwei Fertigungsprozesse

Die Fähigkeiten des Pfadplaners werden anhand eines experimentellen Zeichenprozesses mit dem kollaborativen 7-Achs-Roboter KUKA LBR iiwa und eines simulierten Lackierprozesses mit dem industriellen 6-Achs-Roboter KUKA CyberTech demonstriert, siehe Abbildung 1. Dabei wird gezeigt, dass nur durch die Verwendung der spezifischen Prozesseigenschaften die notwendigen Roboterbewegungen berechnet und die Bearbeitungsprozesse in der gewünschten Form durchgeführt werden können.

Literatur

- [1] International Federation of Robotics, 2020. „World Robotics 2020 Report“, URL: <http://reparti.free.fr/robotics2000.pdf>, Zugriff am 15 Dezember 2022.
- [2] G. Ye, R. Alterovitz, 2017. „Robotics Research: Demonstration-Guided Motion Planning“, Series: Springer Tracts in Advanced Robotics. Cham: Springer, vol. 100, p. 291–307.
- [3] T. Weingartshofer, C. Hartl-Nesic, A. Kugi, 2021. „Optimal TCP and Robot Base Placement for a Set of Complex Continuous Paths“, International Conference on Robotics and Automation, IEEE, Xi’an. p. 9659–9665.
- [4] R. K. Malhan, A. V. Shembekar, A. M. Kabir, P. M. Bhatt, B. Shah, S. Zanio, S. Nutt, S. K. Gupta, 2021. „Automated planning for robotic layup of composite prepreg“, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, vol. 67, p. 102020.
- [5] T. Weingartshofer, B. Bischof, M. Meiringer, C. Hartl-Nesic, A. Kugi, 2023. „Optimization-based Path Planning Framework for Industrial Manufacturing Processes with Complex Continuous Paths“, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, im Druck.

Networked Model Predictive Control for Multi-Vehicle Decision-Making

Patrick Scheffe

Lehrstuhl Informatik 11
RWTH Aachen University
scheffe@embedded.rwth-aachen.de

Bassam Alrifaae

Lehrstuhl Informatik 11
RWTH Aachen University
alrifaae@embedded.rwth-aachen.de

Stefan Kowalewski

Lehrstuhl Informatik 11
RWTH Aachen University
kowalewski@embedded.rwth-aachen.de

Key words: Networked Control Systems, Distributed Model Predictive Control, Multi-Vehicle Decision-Making

A centralized formulation of nonconvex, nonlinear optimization problems considers all agents of a Networked Control System (NCS) at once. While a centralized algorithm can find an optimal solution, it suffers from high computation times in large-scale NCS. Distributed algorithms scale better, since they reduce the optimization problem size. However, they might not find an optimal or even a feasible solution. Precautions must be taken to guarantee that a feasible solution to an agent's optimization problem is also feasible in the NCS [1, 2].

This talk discusses two groups of Distributed Model Predictive Control (DMPC): cooperative DMPC and prioritized DMPC. We present a prioritized DMPC strategy which reduces the computation time of the entire system in comparison with existing strategies while ensuring agents' solutions to be feasible in the NCS [3]. Through analysis of the coupling graph and the prioritization, this strategy parallelizes computations in an otherwise sequential approach. Figure 1 illustrates the parallelization process for four agents.

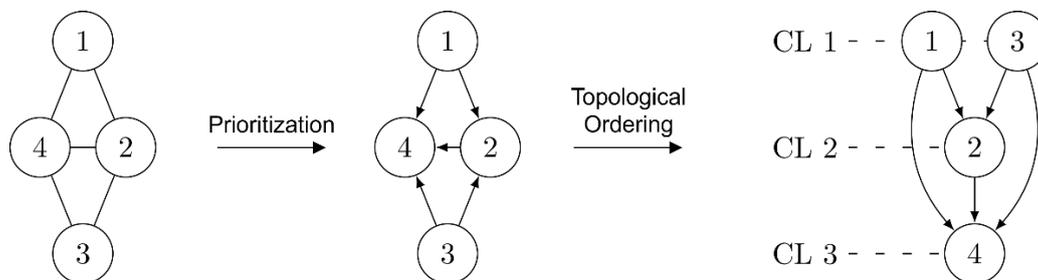


Figure 1: Topological ordering of four coupled agents to three levels, enabling parallel computations of agents without potential loss of feasibility [3].

The application of our prioritized DMPC strategy to the problem of multi-vehicle decision-making demonstrates its effectiveness. We present an algorithm to control multiple vehicles while avoid collisions [4]. It is characterized by a time-variant coupling, a time-variant prioritization, and topological ordering of computations. We apply the strategy to various road scenarios and conduct experiments in our Cyber-Physical Mobility Lab (CPM Lab). Figure 2 shows the road network of the CPM Lab, an open-source, remotely accessible platform for networked and autonomous vehicles.

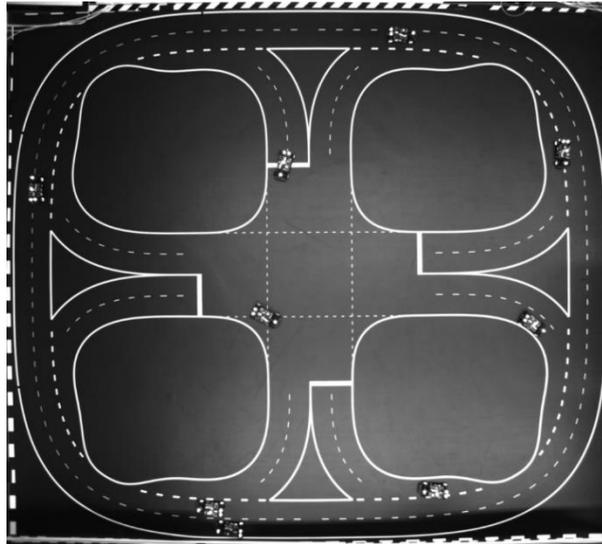


Figure 2 Model-scale road network in the CPM Lab with an intersection, a highway, highway on-ramps, and highway off-ramps.

References

- [1] J. Lunze. "Networked control of multi-agent systems". 2019.
- [2] Y. Zheng, S. E. Li, K. Li, F. Borrelli, and J. K. Hedrick, "Distributed Model Predictive Control for Heterogeneous Vehicle Platoons Under Unidirectional Topologies." In: IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017.
- [3] B. Alrifaae. "Networked model predictive control for vehicle collision avoidance". PhD thesis, RWTH Aachen University, 2017.
- [4] P. Scheffe, G. Dorndorf, and B. Alrifaae, "Increasing Feasibility with Dynamic Priority Assignment in Distributed Trajectory Planning for Road Vehicles". In: IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2022.

Fehlertolerante Bewegungsregelung in der Fahrzeugautomatisierung: Ein Ansatz zur Einsetzbarkeitsbewertung in der Konzeptphase

Torben Stolte

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Braunschweig
stolte@ifr.ing.tu-bs.de

Markus Maurer

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Braunschweig
maurer@ifr.ing.tu-bs.de

Schlüsselwörter: Fehlertolerante Bewegungsregelung, Sicherheit, Automatisiertes Fahren

Fehlertolerante Bewegungsregelung nutzt die Überaktuierung moderner Fahrzeuge, um die Auswirkungen degradierter oder ausgefallener Aktoren durch die verbleibenden „gesunden“ Aktoren zu kompensieren. Besonders interessant ist sie für die Fahrzeugautomatisierung, die spätestens ab SAE Level 4 [1] hohe Fehlertoleranzeigenschaften an das Fahrzeugautomatisierungssystem stellt, weil alle Fehlerreaktionen, die sonst durch den Menschen erfolgen, durch das System realisiert werden müssen. Fehlertolerante Bewegungsregelung kann in diesem Zusammenhang entweder Anforderungen auf Ebene der Aktoriksysteme reduzieren (Fail-safe- oder Fail-degraded- anstelle von Fail-operational-Konzepten [2]) oder als zusätzliche Rückfallebene dienen.

In dem Vortrag wird ein Ansatz zur Untersuchung der Einsetzbarkeit fehlertoleranter Bewegungsregelungsansätze als Sicherheitsstrategie gegen Auswirkungen von Fehlern in der Fahrzeugaktorik vorgestellt. Sicherheitsstrategien werden während der Entwicklung bereits in der Konzeptphase festgelegt, vgl. Teil 3 der ISO 26262 [3]. Die in der Konzeptphase zu definierenden Sicherheitsstrategien prägen das Systemdesign von Fahrzeugautomatisierungssystemen über die weitere Entwicklung stark und können später nur noch unter hohen Kosten geändert werden. Deshalb erfordert die Konzeptphase eine belastbare Indikation zur Einsetzbarkeit fehlertoleranter Bewegungsregelung.

Der Ansatz ist der erste uns bekannte Beitrag, die Einsetzbarkeit fehlertoleranter Bewegungsregelung systematisch in der Konzeptphase eines Entwicklungsprozesses zu untersuchen. Während fehlertolerante Bewegungsregelung ein in der Literatur aus regelungstechnischer Sicht gut untersuchtes Feld ist [4], bleibt trotz der Vielzahl an Publikationen offen, ob fehlertolerante Bewegungsregelung für eine konkrete Anwendung eingesetzt werden kann. In der Literatur ist es üblich, fehlertolerante Regelungsansätze anhand einer oder weniger Solltrajektorien zu evaluieren. Zwar kann damit die grundsätzliche Funktionsfähigkeit eines Regelungsansatzes gezeigt werden. Eine belastbare Indikation zur Einsetzbarkeit eines Regelungsansatzes ist dabei jedoch nicht möglich. Aussagen zur Einsetzbarkeit eines Regelungsansatzes auf Basis einer oder weniger Solltrajektorien können recht einfach durch die geschickte Wahl einer weiteren Solltrajektorie falsifiziert werden.

Im Kern des Ansatzes wird eine Menge an Solltrajektorien generiert, die repräsentativ für die Ausprägung des Fahrzeugautomatisierungssystems in dessen Operational Design Domain (ODD) ist [5]. Dabei baut die Generierung auf in der Konzeptphase bereits zumindest grob festzulegenden Systemeigenschaften auf und setzt darüber hinaus nur wenig Weiteres

voraus. Die generierten Solltrajektorien werden zur Untersuchung eines Regelungsansatzes in der Simulation genutzt. Grundlegend für den Ansatz zur Untersuchung der Eignung fehler-toleranter Bewegungsregelung ist die aus der Literatur und eigenen Auswertungen begrün-dete Annahme, dass im Betrieb in der Regel Dynamiken auftreten, die die physikalischen Grenzen des Kraftschlusses bei Weitem nicht ausnutzen.

Der Einsatz des Ansatzes in der Konzeptphase der Entwicklung eines Fahrzeugautomatisie-rungssystems erfordert eine konservative Indikation. In der frühen Phase der Entwicklung existieren in der Regel weder umfängliche Szenariendatenbanken noch vollständig integrierte Fahrzeugautomatisierungssysteme. Genauso wenig sind Systemparameterbereiche vollstän-dig bekannt. Deshalb werden in dem Ansatz Solltrajektorien generiert, die eine fehlertolerante Bewegungsregelung im Rahmen des Normalbetriebs mit einer möglichst kleinen Sicherheits-reserve fordern (z. B. überschreiten Beschleunigungen im Normalbetrieb 3 m/s^2 sehr selten). Die Generierung der Solltrajektorien erfolgt ausgehend von aus digitalen Karten der ODD be-kannten Fahrstreifenmitenverläufen durch das Lösen eines Optimierungsproblems. In das Optimierungsproblem, das in der Ortsdomäne gelöst wird, gehen die funktionalen Grenzen des Fahrzeugautomatisierungssystems als Randbedingungen ein. Zusammen mit Worst-Case-Parameterabweichungen in der Simulation wird die gewünschte konservative Indikation erreicht.

Die Evaluation des Ansatzes erfolgt am Beispiel einer automatisierten Umfahrt des Braun-schweiger Stadtrings für ein überaktuiertes Fahrzeug mit Einzelradaktorik. Für die Beispielan-wendung wird das Zusammenspiel eines modellprädiktiven fehlertoleranten Bewegungsrege-lungsansatz [6] (Weiterentwicklung von [7]) mit ausgewählten Fail-degraded- und Fail-safe-Aktoriksicherheitsstrategien untersucht. Die Ergebnisse deuten für die Beispielanwendung auf eine Einsetzbarkeit fehlertoleranter Bewegungsregelung im Zusammenspiel mit einigen der untersuchten Aktorik-Sicherheitsstrategien hin.

Literatur

- [1] SAE, „J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems“, Standard, Juni 2018.
- [2] T. Stolte u. a., „A taxonomy to unify fault tolerance regimes for automotive systems: defining fail-operational, fail-degraded, and fail-safe“, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Bd. 7, Nr. 2, S. 251–262, Juli 2022, doi: 10.1109/TIV.2021.3129933.
- [3] ISO, „26262: Road Vehicles — Functional Safety“, ISO, Standard, 2018.
- [4] T. Stolte, „Actuator fault-tolerant vehicle motion control: a survey“, *arXiv:2103.13671*, März 2021, Zugriffen: 30. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/2103.13671>
- [5] T. Stolte, L. Qiu, und M. Maurer, „Reference trajectories for investigating fault-tolerant trajectory tracking control algorithms for automated vehicles“, in *9th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control (AAC)*, Orléans, France, 2019, Bd. 52, Nr. 5, S. 40–47. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.09.007.
- [6] T. Stolte, M. Loba, M. Nee, L. Wu, und M. Maurer, „Towards Fault-Tolerant Vehicle Motion Control for Over-Actuated Automated Vehicles: A Non-Linear Model Predictive Approach“, *IEEE Access*, 2023, eingereicht.
- [7] T. Stolte, T. Liao, M. Nee, M. Nolte, und M. Maurer, „Investigating functional redundancies in the context of vehicle automation – A trajectory tracking perspective“, in *IEEE 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, Nov. 2018, S. 2398–2405. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569243.

Bewegungsplanung für Fahrzeuggespanne in teilweise strukturierten Umgebungen

Julian Dahlmann

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
julian.dahlmann@fau.de

Knut Graichen

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

Schlüsselwörter: Globale Bewegungsplanung, lokale Trajektorienoptimierung, autonome Systeme, mobile Robotik

Das Rangieren von Fahrzeuggespannen erfordert die Planung von fahrbaren Bahnen, welche komplexe Manöver kollisionsfrei lösen. Diese Aufgabe stellt für steuernde Personen oft eine Stresssituation dar und birgt zudem Sicherheitsrisiken. Für die Umsetzung autonomer Rangiersysteme werden typischerweise globale Bahnplanungsalgorithmen eingesetzt, welche das Suchproblem in Einzelschritte unterteilen [1, 2]. Aufgrund des hohen Rechenaufwands zur Lösung der resultierenden Zweipunkt-Randwertprobleme für generische Fahrzeuggespanne bietet sich die Vorablösung dieser Einzelschritte an [3]. Dadurch kann die globale Bahnplanung durch eine A*-Graphsuche [4] abstrahiert werden, für die der Zustandsraum gitterartig diskretisiert wird. Während des Suchvorgangs werden die vorab geplanten Primitivbewegungen (bspw. Kurven, Spurwechsel) kombiniert, um die Umgebung zu erkunden und eine Lösung zum Ziel zu finden.

Die Schnittpunkte des zulässigen Zustandsgitters bilden die Knoten des Graphs und die verbindenden Einzelschritte repräsentieren die Kanten. Nach dem aktuellen Stand der Forschung

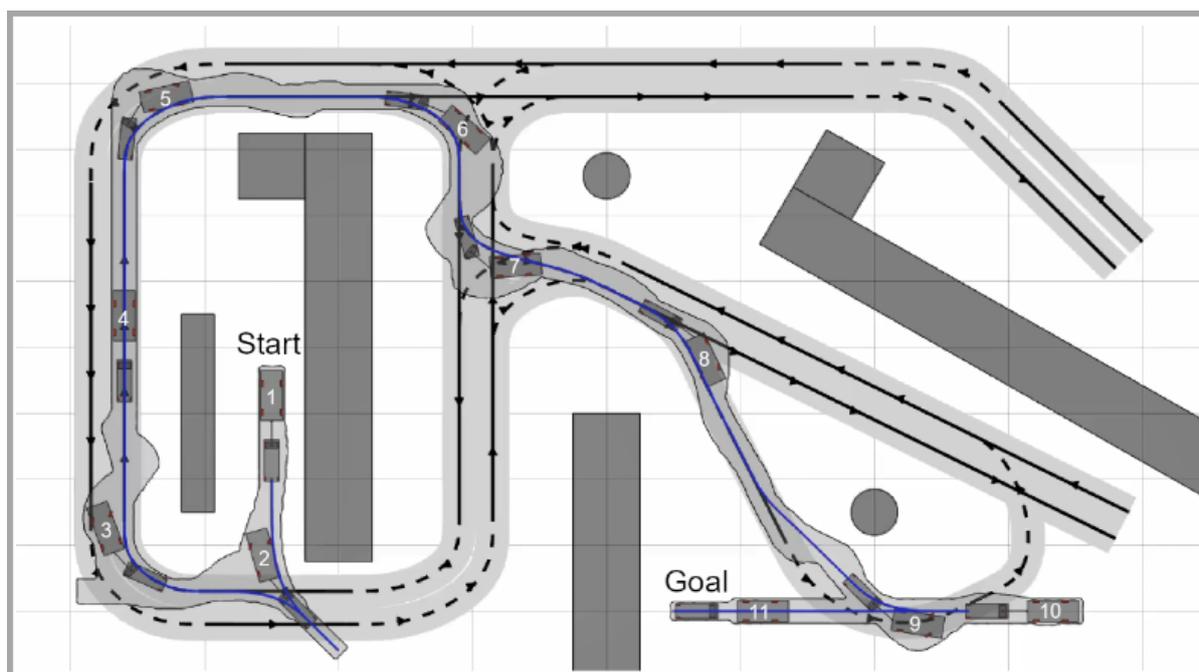


Abbildung 1: Lösung eines hybriden Rangierproblems

basieren die Kanten und somit die Expansion lediglich auf der Anwendung von Primitivbewegungen. Im Rahmen des Vortrags werden zwei zusätzliche Expansionsarten vorgestellt. Die erste Erweiterung ist die geradlinige Expansion, welche ohne vorab geplante Primitivbewegungen durchgeführt wird. Die zweite Erweiterung ist die Expansion mittels vorab definiertem Straßennetz. Knüpft die Graphsuche an das Straßennetz an, können alle erreichbaren Netzknoten instantan in die offenen Knoten der Graphsuche integriert werden. Die Erkundung komplizierter oder sogar labyrinthartiger Umgebungen wird somit durch Vorwissen erleichtert. Zudem wird die subjektiv wahrgenommene Qualität der Trajektorien maßgeblich erhöht, da die vorhandenen Straßen sinnvoll genutzt werden. Ein Beispiel für die geplante Fahrzeugbewegung ist in Abbildung 1 in mehreren Zeitschritten dargestellt.

Die Lösung der globalen Suche wird im Anschluss als Initialisierung für eine modellprädiktive Trajektorienoptimierung verwendet, welche die Umsetzung weiterer Entwurfsziele ermöglicht. Beispielsweise können damit redundante Richtungswechsel eliminiert und Hindernisabstände angepasst werden sowie eine Reduktion der Beschleunigungen, Lenkraten und Ausführungsdauer unter Berücksichtigung der Systembeschränkungen erzielt werden.

Literatur

- [1] O. Ljungqvist et al. „Lattice-based motion planning for a general 2-trailer system“. *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2017.
- [2] A. J. Rimmer, D. Cebon. „Planning collision-free trajectories for reversing multiply-articulated vehicles“. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17. 2016.
- [3] J. Dahlmann, A. Völz, T. Szabo und K. Graichen. „A numerical approach for solving the inversion problem for n-trailer systems“. *Proc. of American Control Conference (ACC)*. 2022.
- [4] P. E. Hart, N. J. Nilsson, B. Raphael. „A formal basis of the heuristic determination of minimum cost path“. *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics (SSC-4)*. 1968.
- [5] J. Dahlmann, A. Völz, T. Szabo und K. Graichen. „Trajectory optimization for truck-trailer systems based on predictive path-following control“, (Outstanding Student Paper Award). *Proc. of Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*. 2022.
- [6] J. Dahlmann, A. Völz, M. Lukassek und K. Graichen. „Local predictive optimization of globally planned motions for truck-trailer systems“. Eingereicht bei: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2023.

Alternatives datenbasiertes FDI-Framework basierend auf SPD Matrizen

Caroline C. Zhu

Automatisierungstechnik
und komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
caroline.zhu@uni-due.de

Steven X. Ding

Automatisierungstechnik
und komplexe Systeme
Universität Duisburg-Essen
steven.ding@uni-due.de

Schlüsselwörter: datenbasierte Fehlerdiagnose, Riemann'sche Geometrie, SPD Matrizen, industrielles Process Monitoring

Der dringende Bedarf des sicheren sowie ökonomischen und ökologischen Betriebs immer komplexer werdender industrieller Anlagen über den gesamten Anlagenlebenszyklus hinweg macht eine zuverlässige Prozessüberwachung unabdingbar. Hierbei kommt der datenbasierten Fehlerdiagnose (FDI) eine wesentliche Bedeutung zu. Neben der datenbasierten Identifikation von Systemen, wurden u. a. Lösungen auf Basis der multivariaten Analyse formuliert. Neben den Arbeiten aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (ML) wurden zuletzt neue Ansätze entwickelt, die Merkmale von linearen, zeitinvarianten Systemen und ML-Methoden zwecks Diagnose kombinieren [1] und die Umgebungssensoren in der Fehlerdiagnose integrieren [2].

In diesem Vortrag wird ein neuartiges, datenbasiertes Fehlerdiagnose-Framework vorgestellt. Es stützt sich auf symmetrischen, positiv-definiten (SPD) Matrizen und derer Eigenschaften im Kontext der Riemann'schen Geometrie [3-5]. Das Framework zeichnet sich durch (i) die Fähigkeit zur Detektion und Diagnose von Performanzdegradation in dynamischen Systemen, (ii) seine simple Detektionsprozedur ohne Annahme der Verteilungen der Daten, (iii) seine Anwendbarkeit auf dynamische Prozesse unter Einfluss von stochastischen sowie deterministischen Störungen als Alternative zu bisherigen Methoden aus. Erste Arbeiten wurden in [6] und [7] beschrieben. Diese Ergebnisse werden nun systematisch in einem einheitlichen Framework zusammengeführt und vertieft.

In der Regelungstheorie treten SPD Matrizen auf natürliche Weise in verschiedenen Bereichen auf. Beispielsweise ist bekannt, dass die Lösung einer Lyapunov Gleichung in Form einer SPD Matrix beschrieben wird. Sie beinhaltet je nach Konfiguration der Lyapunov Gleichung essentielle Eigenschaften des dynamischen Systems: Die Stabilität, Steuerbarkeit oder Beobachtbarkeit. In datenbasierten FDI-Verfahren, wie beispielsweise der Hauptkomponenten-Analyse (engl. PCA) zwecks Diagnose, sind SPD Matrizen in Form von Kovarianz-Matrizen Teil des FDI-Schemas. Je nach Interpretation sind SPD Matrizen demnach ein wichtiges Merkmal, um ein dynamisches System zu beschreiben.

Die Fehlerdiagnose ist eine typische Klassifikationsaufgabe bei der Merkmale extrahiert und den richtigen Klassen zugeordnet werden sollen. Im neuartigen FDI-Framework kommen SPD Matrizen als Merkmale zum Einsatz. Um diese dem fehlerfreien oder fehlerhaften Zustand eines Prozesses zuordnen zu können, wird in dieser Arbeit die Riemann'sche Geometrie und,

basierend darauf, die Riemann'sche Metrik als geeignetes Werkzeug zur Abstandsberechnung gewählt. Die Grundidee des alternativen FDI-Frameworks inklusive verschiedener Evaluierungsfunktionen und Optionen zur Schwellenwertsetzung werden vorgestellt. Das Framework ist Grundlage für verschiedene weitere Anwendungen: Als eine mögliche Umsetzung des Frameworks wird das Riemann'sche Mittelwertbasierte Modell (RM-Modell) diskutiert. Abbildung 1 zeigt eine grafische Interpretation des RM-Modells, welches auf Basis von fehlerfreien SPD Matrizen $P_i \in \mathbb{R}^{m \times m}, i = 1, \dots, n$, trainiert wird. Diese sind als Punkte auf der sogenannten Riemann'schen Mannigfaltigkeit $\mathcal{P}(m)$ zur Visualisierung dargestellt. Der Riemann'sche Mittelwert P_g repräsentiert hierbei den fehlerfreien Zustand des zu überwachenden Systems. Mittels einer geeigneten Evaluierungsfunktion $d(\cdot)$ und eines Schwellenwerts J_{th} kann eine neue SPD Matrix P_{new} als fehlerfrei oder fehlerhaft klassifiziert werden. Am Beispiel des Drei-Tank-Systems wird das RM-Modell gezeigt.

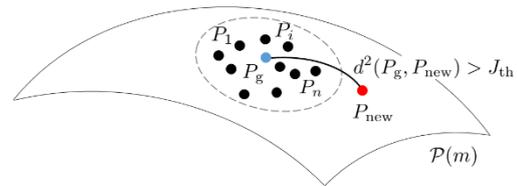


Abbildung 1: Grafische Interpretation des RM-Modells.

Literatur

- [1] C. Zhu et al. „Multiplicative Fault Detection and Isolation in Dynamic Systems Using Data-Driven K-Gap Metric based kNN Algorithm“. In: *IFAC-PapersOnLine*. SAFEPROCESS 2022.
- [2] K. Kasten et al. „An Integral Monitoring Concept for Data-Driven Detection and Localization of Incipient Leakages by Fusion of Process and Environment Data“. In: *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. 2022.
- [3] W. Boothby. „An Introduction to Differentiable Manifolds and Riemannian Geometry (2nd Ed.)“. London: *Avademic Press*. 1986.
- [4] S. Amari. „Information Geometry and its Applications“. Japan: *Springer*. 2016.
- [5] M. Moakher. „A differential geometric approach to the geometric mean of symmetric positive-definite matrices“. In: *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, 2005
- [6] S. X. Ding. „Advanced methods for fault diagnosis and fault-tolerant control“. Springer Berlin Heidelberg. 2020.
- [7] H. Yu et al. „A data-driven fault detection scheme for complex industrial systems using Riemannian metric and randomized algorithms“. In: *IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics*. 2020.

Ein algebraischer Zugang zur Beobachtbarkeit polynomialer dynamischer Systeme

Daniel Gerbet

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

Klaus Röbenack

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

Schlüsselwörter: nichtlineare Beobachtbarkeit, polynomiale Systeme, algebraische Geometrie

Der Vortrag befasst sich mit einem algebraischen Beobachtbarkeitskriterium für endlichdimensionale polynomiale dynamische Systeme. Dieses Kriterium ist sowohl notwendig als auch hinreichend und erlaubt daher eine Entscheidung der globalen, wie auch der lokalen Beobachtbarkeit des Systems [1]. Hierzu ist es notwendig, dass sich das System in polynomialer Form, also als Zustandsraummodell mit polynomialem Vektorfeld, schreiben lässt. Dies kann auch durch eine Einbettung in einen höherdimensionalen Raum geschehen, in dem die zur Beschreibung herangezogenen Zustandsvariablen algebraischen Zwangsbedingungen unterliegen, die dann aber ebenfalls polynomialer Gestalt sein müssen.

Zur Definition der Beobachtbarkeit nichtlinearer Systeme wird die Ununterscheidbarkeit von Systemzuständen anhand der von ihnen generierten Ausgangstrajektorien herangezogen [2]. Zwei solcher Zustände werden ununterscheidbar auf einem Zeitintervall genannt, wenn die zugehörigen Ausgangstrajektorien mit dem jeweiligem Anfangszustand auf dem Intervall identisch sind [3]. Für ein analytisches Vektorfeld, insbesondere ein polynomiales, sind die Ausgangstrajektorien lokal analytisch. Daher können die Ausgangstrajektorien ebenso anhand der Koeffizienten ihrer Taylorreihen verglichen werden. Bei der Abbildung des Anfangszustands auf diese (unendlich vielen) Koeffizienten spricht man von der Beobachtbarkeitsabbildung. Das System wird dann global (lokal an einem Punkt) beobachtbar genannt, wenn die Beobachtbarkeitsabbildung (in einer Umgebung des Punktes) eineindeutig ist.

Im Falle eines linearen Systems ist die Beobachtbarkeitsabbildung ebenfalls linear, nämlich das Matrix-Vektor-Produkt der Beobachtbarkeitsmatrix mit dem Anfangszustand. Diese Abbildung ist genau dann eineindeutig, wenn die Beobachtbarkeitsmatrix vollen Rang hat. Dank des Satzes von Cayley-Hamilton reicht es daher aus, nur so viele Zeilen wie Spalten der Beobachtbarkeitsmatrix heranzuziehen. Im Gegensatz dazu kann es für nichtlineare Systeme nötig sein, eine höhere Anzahl von Ausgangsableitungen in Betracht zu ziehen, um die Beobachtbarkeit zu zeigen. Eine solche Anzahl lässt sich zunächst nicht anhand der Zustandsdimension abschätzen. Dennoch kann für die besondere Systemklasse der polynomialen Systeme ein algebraisches Kriterium abgeleitet werden. Aus diesem ergibt sich dann für das untersuchte System neben der Beobachtbarkeitseigenschaft im beobachtbaren Falle die nötige Anzahl der Ausgangsableitungen.

Literatur

- [1] D. Gerbet und K. Röbenack. „On global and local observability of nonlinear polynomial systems: A decidable criterion“. In: *at-Automatisierungstechnik*, 68(6), S. 395-409, 2018.
- [2] R. Hermann und A. J. Krener. „Nonlinear Controllability and Observability“. In: *IEEE Trans. on Automatic Control*, 22(5), S. 728-740, 1977.
- [3] E. D. Sontag. „Mathematical Control Theory“. *Springer-Verlag*, 1998.

Kaskadierte Inkrementelle Nichtlineare Dynamische Inversion für ein Tiltrotor-VTOL

Mark Henkenjohann

Scientific Automation
Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM
mark.henkenjohann@iem.fraunhofer.de

Ansgar Trächtler

Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
ansgar.traechtler@hni.upb.de

Schlüsselwörter: Fluglageregelung, INDI, Tiltrotor-VTOL, UAV

11Im der Urban Air Mobility sind Fluggeräte wie Tiltrotor-VTOLs von zentraler Bedeutung. Sie verbinden wie in Abbildung 1 dargestellt die Eigenschaften von Multikoptern und Flugzeugen. Sie bestehen einerseits aus Propellern, damit sie senkrecht starten und landen können (**Vertical Take-Off and Landing**). Zudem verfügen Tiltrotor-VTOLs über Tragflächen sowie ein Leitwerk und Steuerklappen, um wie ein Flugzeug fliegen zu können. Die Propeller sind dabei um den Winkel δ_i schwenkbar. Durch den Schwenkprozess wird das Fluggerät beschleunigt, bis die Auftriebskräfte der Tragflächen die Gewichtskraft kompensieren. Dieser Vorgang wird als Transition bezeichnet.

Die nichtlineare Systemdynamik eines Tiltrotor-VTOLs stellt eine Herausforderung für die Fluglageregelung dar. Um einen sicheren Flug zu gewährleisten, ist es daher erforderlich nichtlineare Regelungsansätze zu nutzen. Hier wird häufig der Ansatz der Inkrementellen Nichtlinearen Dynamischen Inversion (INDI) verwendet. Dabei handelt es sich um eine inkrementelle Formulierung der exakten Ein-/Ausgangslinearisierung. D.h. die Linearisierung der Ausgangsgrößen bzgl. neuer Pseudostellgrößen erfolgt inkrementell. Dazu wird die zu kompensierende Nichtlinearität in jedem Zeitschritt durch eine Taylorentwicklung 1. Ordnung approximiert.

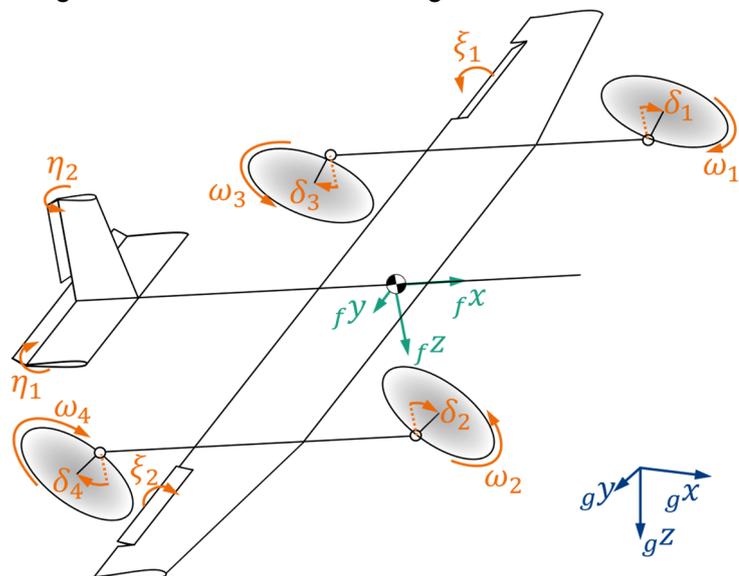


Abbildung 1: Darstellung eines Tiltrotor-VTOLs

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Anwendung der INDI auf hybride Fluggeräte. Bei allen gehören die rotatorischen und translatorischen Beschleunigungen zu den Pseudostellgrößen. Die Unterschiede liegen darin, dass einige Ansätze wie in [1] die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade separat und andere wie in [2] diese zusammen linearisieren. Bei ersterer Variante sind die INDIs kaskadiert angeordnet. Dies hat den Nachteil, dass bestimmte Stellgrößen jeweils einer Linearisierung zugeordnet werden müssen. Der Schwenkwinkel der Propeller kann dann bspw. entweder nur zur Erzeugung einer translatorischen oder rotatorischen Beschleunigung genutzt werden. Dies ist ungünstig, da durch die Schwenkmechanis-

Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Anwendung der INDI auf hybride Fluggeräte. Bei allen gehören die rotatorischen und translatorischen Beschleunigungen zu den Pseudostellgrößen. Die Unterschiede liegen darin, dass einige Ansätze wie in [1] die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade separat und andere wie in [2] diese zusammen linearisieren. Bei ersterer Variante sind die INDIs kaskadiert angeordnet. Dies hat den Nachteil, dass bestimmte Stellgrößen jeweils einer Linearisierung zugeordnet werden müssen. Der Schwenkwinkel der Propeller kann dann bspw. entweder nur zur Erzeugung einer translatorischen oder rotatorischen Beschleunigung genutzt werden. Dies ist ungünstig, da durch die Schwenkmechanis-

men translatorische und rotatorische Beschleunigungen erzeugt werden können. Bei den anderen Ansätzen existiert dieses Problem nicht, da sie translatorische und rotatorische Freiheitsgrade zusammen durch eine INDI linearisieren. Nachteilig ist, dass die Dynamiken der Freiheitsgrade unterschiedlich schnell sind. Da im Rahmen der INDI die Eigendynamik vernachlässigt wird, zeigen sich häufig Stabilitätsprobleme.

Der folgende Ansatz linearisiert translatorische und rotatorische Freiheitsgrade separat und bietet die Möglichkeit, Schwenkmechanismen und Propeller zur Erzeugung translatorischer sowie rotatorischer Beschleunigungen zu nutzen. Die kaskadierte Regelungsstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei linearisiert die äußere INDI die Dynamik bzgl. der translatorischen Beschleunigungen. Die innere INDI linearisiert bzgl. der rotatorischen Beschleunigungen und bzgl. der Größen t und δ . Dabei ist t der Betrag des Gesamtschubvektors und δ , der Winkel, den der Gesamtschubvektor mit der f_x -Achse einschließt. Gleichzeitig sind diese Größen virtuelle Stellgrößen der translatorischen INDI, da dies die einzigen beiden Eigenschaften der Propeller und Schwenkme-

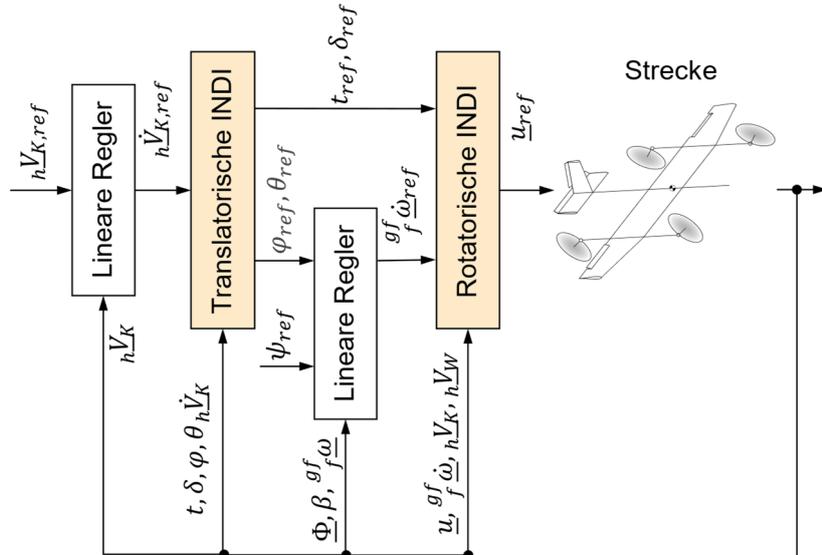


Abbildung 2: Kaskadierte INDI für ein Tiltrotor-VTOL

chanismen sind, die für die Erzeugung translatorischer Beschleunigungen relevant sind. D.h. die translatorische INDI erzeugt Sollwerte für t und δ und die rotatorische INDI setzt diese durch die erforderlichen Schwenkwinkel δ_i sowie Propellerdrehzahlen ω_i um. Die innere INDI erhält damit Randbedingungen für Betrag und Richtung des Gesamtschubs. Gleichzeitig können die Schwenkwinkel und Propeller zur Erzeugung rotatorischer Beschleunigungen eingesetzt werden. Damit wird ermöglicht, dass sowohl translatorische als auch rotatorische Beschleunigungen von den Propellern und den Schwenkmechanismen erzeugt werden und rotatorische und translatorische Freiheitsgrade separat linearisiert werden.

Im Rahmen des Vortrags werden die Regelungsstruktur und die modellbasierte Parametrisierung dieses Ansatzes detailliert vorgestellt und erläutert. Zudem werden Ergebnisse aus Simulationsexperimenten diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick gegeben.

Literatur

- [1] F. Binz, "Robust, fault-tolerant control of aircraft with hovering capability," RWTH Aachen University, 2020.
- [2] S. A. Raab, J. Zhang, P. Bhardwaj und F. Holzzapfel, „Proposal of a Unified Control Strategy for Vertical Take-off and Landing Transition Aircraft Configurations,“ in *2018 Applied Aerodynamics Conference*, 2018.

Selbstlernende KI-basierte Spurregelung von Flurförderzeugen

Timm Sauer

Labor für Simulation, Steuerung und Regelung
TH Aschaffenburg

Timmanton.sauer@th-ab.de

Ulrich Jumar

ifak Institut für Automation und Kommunikation
e.V. an der Otto-von-Guericke-Universität Mag-
deburg

Ulrich.Jumar@ifak.eu

Schlüsselwörter: Künstliche Intelligenz, Lernende Verfahren, Automatische Spurführung

Die Automatisierung logistischer Prozesse hat für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen einen hohen Stellenwert. Die innerbetrieblichen Logistikflotten setzen sich häufig aus vielen unterschiedlichen Flurförderzeugen zusammen, was bei der automatischen Spurführung der Flottenmitglieder unter Verwendung klassischer Regelungskonzepte eine Herausforderung darstellt.

Vorgestellt wird deshalb eine selbstlernende querdynamische Fahrzeugführung, die sich selbstständig an die Variante des Flurförderzeugs anpasst und heterogenen Logistikflotten gezielt Rechnung trägt. Zum Einsatz kommt ein Reinforcement Learning Verfahren, bei dem Künstliche Neuronale Netze (KNN) eingesetzt werden, um direkt die Aufgabe des Reglers zu übernehmen. Um Erfahrungen zur Spurführung der Flurförderzeuge aufbauen zu können, interagiert der Regler mit der Regelstrecke und adaptiert seine Strategie auf Basis eines Bewertungskriteriums dahingehend, dass die erhaltenen Belohnungen maximiert werden (Abbildung 1). Bei der vorgestellten Methode handelt es sich um einen Actor-Critic-Ansatz, bei dem die Regelstrategie und die Approximation des Regelstreckenverhaltens in Form separater KNN dargestellt werden. Das Critic-KNN schätzt auf Basis des aktuellen Observation-Vektors (Systemzustand) und des Stellsignals die zu erwartende Belohnung. Mit dem Ziel diese zu maximieren, wird das Actor-KNN eingesetzt, um das ideale Stellsignal in Abhängigkeit des Systemzustands zu berechnen.

Im Gegensatz zu den aus der Literatur bekannten Reinforcement Learning Ansätzen [1], [2] kann a priori Wissen der Regelstrecke bei dem vorgestellten Regelungskonzept gezielt berücksichtigt werden. Der grundlegende Erfahrungsaufbau des Reglers erfolgt in der Simulation anhand eines im Fahrversuch validierten analytischen Regelstreckenmodells unter Verwendung der Modellparameter einer mittleren Fahrzeugvariante. Zum Einsatz kommt ein lineares Regelstreckenmodell, welches das Verhalten des lagegeregelten Lenkaktors, die Dynamik des Flurförderzeugs mit Hinterachslenkung und die Relativbewegung zwischen dem Fahrzeug und einer zuvor definierten Sollbahn beschreibt. Auf Basis des vortrainierten Reglers erfolgt die Anpassung an das tatsächlich zu führende Fahrzeug in der darauffolgenden Trainingsphase. Da das grundsätzliche dynamische Verhalten der unterschiedlichen Varianten vergleichbar ist, muss nicht der gesamte Erfahrungsaufbau neu durchgeführt werden. Stattdessen erfolgt lediglich eine Feinanpassung der Reglerparameter des bereits vortrainierten Reglers, wodurch eine sichere Fahrzeugführung gewährleistet und die Effizienz des Trainingsprozesses deutlich erhöht werden kann [3].

Durch die geeignete Wahl der Reward-Funktion als Bewertungskriterium und des Observation-Vektors kann der selbstlernende Regelungsansatz analog zu klassischen Regelungskonzepten eingesetzt werden. Wird die Reward-Funktion beispielsweise in Analogie zu der Gütefunktion eines klassischen Riccati-Reglers und der Observation-Vektor identisch zum Zustandsvektor der Regelstrecke gewählt, kann eine vergleichbare Dynamik des geschlossenen Regelkreises erreicht werden [3], [4].

Um im Vorfeld bekannte Störgrößen berücksichtigen zu können, wie dies bei klassischen Regelungskonzepten mit Vorsteuerung der Fall ist, wird der Observation-Vektor des selbstlernenden Ansatzes um die Störgröße erweitert. Da diese Information sowohl zur Approximation des Regelstreckenverhaltens als auch zur Berechnung des Stellsignals innerhalb des Reglers zur Verfügung steht, kann der Einfluss der Störgröße kompensiert werden [5].

Die unterschiedlichen Regelungskonzepte und die Adaptionfähigkeit des selbstlernenden Ansatzes werden anhand einer Erprobung in der Simulation unter Verwendung des beschriebenen Regelstreckenmodells und der Fahrzeugparameter von drei unterschiedlichen Varianten der Flurförderzeuge demonstriert und verglichen.

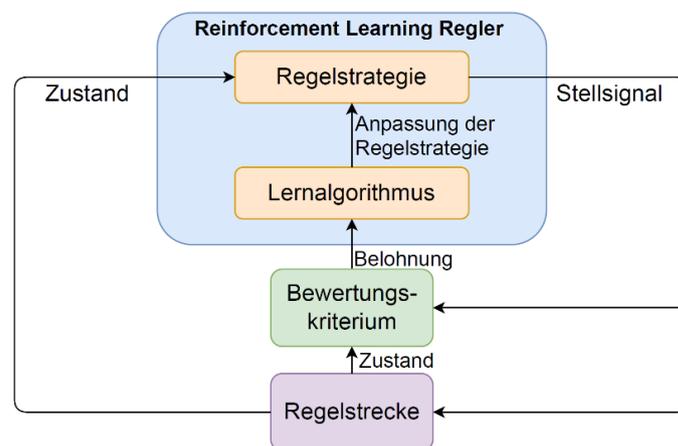


Abbildung 1: Prinzip Reinforcement Learning

Literatur

- [1] A. Sallab et al. „End-to-End Deep Reinforcement Learning for Lane Keeping Assist“. In: *30th Conference on Neural Information Processing Systems*. 2016.
- [2] S. Gu et al. „Continuous Deep Q-Learning with Model-based Acceleration“. In: *33th International Conference on Machine Learning*. 2016.
- [3] T. Sauer et al. „Automatic track guidance of industrial trucks using self-learning controllers considering a priori plant knowledge“. In: *5th International Conference on Control Automation and Diagnosis*. 2021.
- [4] Y. Ichikawa und T. Sawa. „Neural Network Application for Direct Feedback Controllers“. In: *IEEE Transactions on neural networks*. 1992.
- [5] T. Sauer et al. „Automatic track guidance of industrial trucks using AI-based controllers with disturbance compensation“. In: *61th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*. 2022.

Hybride lokale Trajektorienplanung für autonome Rennfahrzeuge in Mehrfahrzeugszenarien

Levent Ögretmen

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
levent.oegretmen@tum.de

Boris Lohmann

Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
lohmann@tum.de

Schlüsselwörter: Lokale Trajektorienplanung, Autonomes Fahren, Rennfahrzeuge

Die Indy Autonomous Challenge (IAC) [1] ist eine autonome Rennserie, die seit 2021 auf verschiedenen Ovalkursen stattfindet. In den bisher drei abgehaltenen Rennen traten Teams von verschiedenen Universitäten mit ihrer entwickelten Software und den sonst baugleichen Fahrzeugen an. Die Rennen beinhalteten Wettbewerbe um die schnellste Runde, Ausweichmanöver statischer Hindernisse und Überholmanöver zwischen zwei Fahrzeugen. Das Team der Technischen Universität München (TUM) nahm als einziges Team aus Deutschland an der IAC teil und belegte in den ersten beiden Rennen den ersten bzw. zweiten Platz.



Abbildung 1: Fahrzeuge der TUM (vorne) und des TII-EuroRacing Teams (hinten)

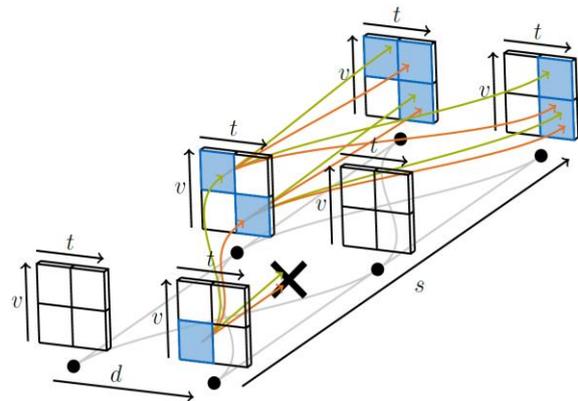


Abbildung 2: Räumlich-zeitlicher Graph

In diesem Vortrag wird der in [2, 3] beschriebene lokale Trajektorienplanungsansatz des Teams der TUM vorgestellt. Es werden die Einordnung der Trajektorienplanung innerhalb der Gesamt-Software aus [4] beschrieben und Herausforderungen der Trajektorienplanung speziell für das Rennszenario aufgezeigt. Nach der Beschreibung des Grundkonzeptes werden Ergebnisse aus Simulationen und realen Testfahrten auf dem Indianapolis Motor Speedway und dem Las Vegas Motor Speedway mit Überholmanövern bei Ego-Geschwindigkeiten von bis zu 74 ms^{-1} gezeigt.

Der vorgestellte hybride Planungsansatz basiert auf einer groben, das Langzeitverhalten bestimmenden Graphensuche und einem vorangehenden sampling-basierten Schritt in bahnbegleitenden Frenet-Koordinaten zur Verbindung des Fahrzeugzustandes mit dem offline berechneten Graphen. Während die auf konstanten Beschleunigungsprofilen basierenden

Kanten innerhalb der Graphensuche den notwendigen Planungshorizont gewährleisten, erzeugt der feiner diskretisierte sampling-basierte Schritt ruck-optimale Kanten. Diese Kanten reduzieren hochfrequente Anregungen des Reglers und ermöglichen so ein Fahren näher an die fahrdynamischen Grenzen des Fahrzeuges. Die verwendeten ruck-optimale Kanten in Frenet-Koordinaten [5] werden innerhalb der verwendeten Graphenstruktur integriert und an das Rennszenario angepasst. Der für die Planung verwendete und in Abbildung 2 schematisch dargestellte zeitlich-räumliche Graph basiert auf dem in [6] beschriebenen Konzept für das Verkehrsszenario. Die verwendete Graphensuche nutzt abweichend von [6] eine Variante des Dijkstra-Algorithmus, um die Anzahl der zu erzeugenden Kanten zu reduzieren, ohne die Optimalität zu verlieren.

Literatur

- [1] Indy Autonomous Challenge. <https://www.indyautonomouschallenge.com/>. [Zuletzt aufgerufen: 15.12.2022].
- [2] L. Ögretmen et al. „Smooth Trajectory Planning at the Handling Limits for Oval Racing“. In: *Actuators*. 2022.
- [3] M. Rowold et al. „Efficient Spatiotemporal Graph Search for Local Trajectory Planning on Oval Race Tracks“. In: *Actuators*. 2022.
- [4] J. Betz et al. „TUM Autonomous Motorsport: An Autonomous Racing Software for the Indy Autonomous Challenge“. In: *arXiv*. 2022. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/abs/2205.15979>
- [5] M. Werling et al. „Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenét Frame“. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2010.
- [6] M. McNaughton et al. „Motion Planning for Autonomous Driving with a Conformal Spatiotemporal Lattice“. In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2011.

Entscheidungsfindung für automatische Fahrzeuge an nicht-signalisierten innerstädtischen Kreuzungen mit einem ereignisdiskreten System

Hannes Weinreuter

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
hannes.weinreuter@kit.edu

Michael Heizmann

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
michael.heizmann@kit.edu

Schlüsselwörter: Entscheidungsfindung, automatisches Fahren, ereignisdiskretes System

Dieser Vortrag befasst sich mit der Entscheidungsfindung für automatische Fahrzeuge an nicht signalisierten innerstädtischen T-Kreuzungen. Zu diesem Zweck wurde ein Entscheidungsalgorithmus entworfen, der lediglich beobachtbare Größen der übrigen Verkehrsteilnehmer als Grundlage für die Entscheidungen benötigt. Dies ist vorteilhaft, da davon auszugehen ist, dass es nach der Einführung automatischer Fahrzeuge noch für lange Zeit einen Mischverkehr aus konventionellen und automatischen Fahrzeugen auf den Straßen geben wird. Der Algorithmus hat ein ereignisdiskretes Modell zur Grundlage, dadurch werden für die Entscheidungsfindung nur elementare Rechenoperationen benötigt, außerdem lassen sich die Gründe für die Verhaltensentscheidungen des Systems gut nachvollziehen.

Das Modell betrachtet nicht alle Fahrzeuge an der Kreuzung, sondern lediglich diejenigen, die im aktuellen Zeitschritt relevant für die Entscheidung sind. Damit lässt sich verhindern, dass die Interaktionen mit vielen Fahrzeugen, auch wenn sie für die Entscheidung nicht von Bedeutung sind, modelliert werden müssen. Die relevanten

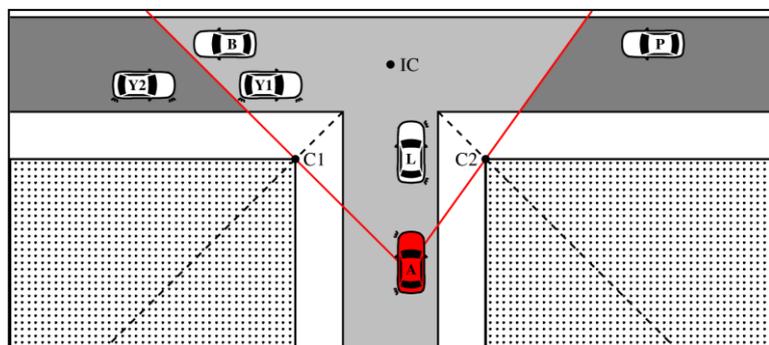


Abbildung 1: Beispielhafte Situation an einer Kreuzung mit eingeschränkter Sichtbarkeit und mehreren Kooperationspartnern.

Fahrzeuge sind das Fahrzeug, das aktuell Vorfahrt vor dem automatischen Fahrzeug hat, sowie das Fahrzeug, welches Vorfahrt gewähren muss. Des Weiteren muss das unmittelbar vor dem automatischen Fahrzeug fahrende Auto berücksichtigt werden und schließlich noch das hinterste Fahrzeug, das die Kreuzung auf derselben Straße verlässt, die auch das automatische Auto nutzen wird. Dieses Fahrzeug kann das automatische Fahrzeug am Verlassen der Kreuzung hindern. Jedes dieser Fahrzeuge wird separat betrachtet und nur, wenn gegenüber allen das Fahren sicher möglich ist, wird das automatische Fahrzeug durch die Kreuzung fahren. Je nach Typ der Kooperationspartner verhält sich das automatische Fahrzeug unterschiedlich, so fährt es gegenüber dem wartepflichtigen Fahrzeug offensiv, solange dies gefahrlos möglich ist, während es gegenüber dem Auto, das Vorfahrt hat, defensives Verhalten zeigt und möglichst frühzeitig signalisiert, dass es die Vorfahrt respektieren wird. An Kreuzungen kann es bei entsprechenden Abbiegebeziehungen der Fahrzeuge vorkommen, dass keines der Fahrzeuge Vorfahrt vor allen anderen hat, ein so genannter Verklemmungszustand.

In diesem Fall wird eine andere Lösungsstrategie genutzt: Das automatische Fahrzeug versucht in diesem Fall, die Kreuzung als Erstes zu durchfahren, um so die Situation zu lösen.

Der vorgestellte Algorithmus wird schließlich anhand einer umfassenden Simulation validiert. Dabei muss der Algorithmus mit anderen Fahrzeugen interagieren, die ein vereinfachtes Entscheidungsmodell nutzen. In der Simulation wird die Einsehbarkeit in die Kreuzung für den Hauptalgorithmus eingeschränkt, dies führt dazu, dass dieser nur die Daten derjenigen Fahrzeuge erhält, die aktuell von dessen Position aus sichtbar sind. Daneben werden in der Simulation auch Karten von realen Kreuzungen aus der Karlsruher Innenstadt genutzt. Schließlich wird einigen Kooperationsfahrzeugen zufällig ein Sonderverhalten zugewiesen, um das Verhalten des Algorithmus bei unerwartetem Verhalten zu testen. Dazu fahren einige der Fahrzeuge als Erstes, obwohl sie keine Vorfahrt haben, oder sie warten, obwohl sie Vorfahrt haben.

Insgesamt wurden 14400 Simulationsdurchläufe durchgeführt, in keinem dieser Fälle kam es zu einer Kollision des autonomen Fahrzeugs mit einem der Kooperationsfahrzeuge und die Situation konnte in jedem Fall geklärt werden. Zusätzlich werden im Rahmen der Analyse auch die Durchfahrtszeiten durch die Kreuzung betrachtet. Dabei ist zunächst zu erkennen, dass die Sichtbarkeitsdistanz keinen Einfluss darauf hat. Wertet man die Zeiten nach den an der Situation beteiligten Fahrzeugen aus, so zeigt sich, dass die mittlere Durchfahrtszeit mit der Anzahl der Kooperationsfahrzeuge zunimmt, dies ist besonders ausgeprägt im Falle von Fahrzeugen, denen das autonome Fahrzeug Vorfahrt gewähren muss. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das beobachtete Verhalten den Erwartungen entspricht.

Literatur

- [1] H. Weinreuter, B. Szigeti, N.-R. Strelau, B. Deml und M. Heizmann. „Decision making at unsignalized inner city intersections using discrete events systems“ In: tm -Technisches Messen. 2022.

Verschlüsselte Regelungstechnik 2.0

Nils Schlüter und Moritz Schulze Darup

Lehrstuhl für Regelungstechnik und cyberphysische Systeme (RCS)
TU Dortmund
Leonhard-Euler-Straße 2, 44227 Dortmund
Telefon: +49 231 755-8196 / +49 231 755-5611
E-Mail: nils.schlueter@tu-dortmund.de / moritz.schulzedarup@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: Verschlüsselte Regelung, cloudbasierte Regelung, homomorphe Verschlüsselung, sichere Multi-Party Computation

Kurzfassung: Die verschlüsselte Regelungstechnik (VRT, siehe [1] für eine Übersicht) verkörpert ein junges Forschungsfeld, das erst Ende 2015 durch die Pionierarbeit [2] begründet wurde. Sie zielt auf die sichere Implementierung von vernetzten oder cloudbasierten Regelungen sowie regelungstechnischen Serviceleistungen beispielsweise im Kontext der Industrie 4.0 ab (siehe Abbildung 1). Im Fokus steht dabei die Vertraulichkeit von sensiblen Prozessdaten (wie Systemzuständen, Reglerparametern und Reglereingriffen), die von der Sensorik über die Datenübertragung und Reglerauswertung bis hin zur Aktorik durchgängig (im Sinne von Ende-zu-Ende-Verschlüsselung) gewährleistet werden soll. Um dies zu erreichen, kombiniert die VRT spezielle kryptographische Verfahren mit passgenauer Regelungstechnik. Schlüsseltechnologien sind dabei homomorphe Verschlüsselungen [3] und sichere Multi-Party Computation [4], die elementare Rechenoperationen auf verschlüsselten Daten ermöglichen.

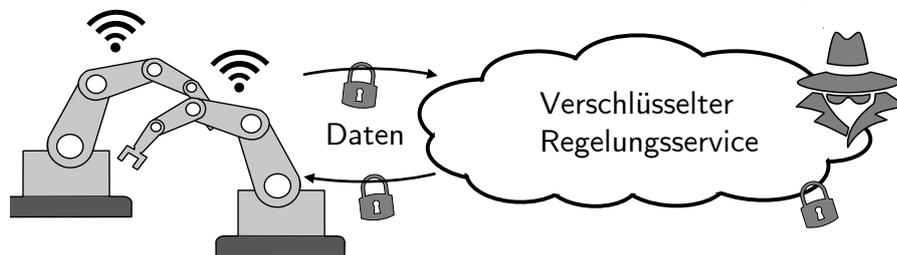


Abbildung 1: *Regelungsservice für vernetztes System auf Basis durchgängig verschlüsselter Daten.*

Der Vortrag fasst wegberreitende Arbeiten der VRT kurz zusammen und zeigt dann auf, dass jüngere Resultate die nächste Entwicklungsstufe markieren. Tatsächlich weisen frühe Ansätze wie [2,5-7] drei, mit Limitationen einhergehende, Charakteristika auf: (i) Zum Einsatz kommen lediglich partiell homomorphe Kryptosysteme, (ii) die Verschlüsselung beschränkt sich im Wesentlichen auf affine Operationen und (iii) auch die Sensoren und Aktoren müssen vergleichsweise aufwendige Rechnungen durchführen. Im Gegensatz dazu nutzen neuartige Entwicklungen wie [8-11] leistungsfähige, voll homomorphe Kryptosysteme oder Verfahren der Multi-Party Computation, die es erlauben moderne Regelungssysteme vollständig und sicher in die Cloud auszulagern. Diese signifikante Leistungssteigerung läutet auch den Übergang von konzeptionellen Implementierungen hin zu prototypischen Realisierungen und praktischen Anwendungen der VRT ein.

Neben der Veranschaulichung der skizzierten Entwicklung, unterstreicht der Vortrag auch, dass die VRT nicht nur durch geschickte Regler(um)formulierungen besticht, sondern auch neue und herausfordernde Problemstellungen für die Regelungstechnik mit sich bringt. Diese resultieren

insbesondere aus dem interdisziplinären Zusammenspiel von Anforderungen der Kryptosysteme (wie etwa ganzzahlige Nachrichten aus endlichen Mengen) und dem dynamischen Verhalten von Regelungssystemen.

Literatur

- [1] M. Schulze Darup, A. Alexandru, D. Quevedo und G. Pappas Encrypted control for networked systems: An illustrative introduction and current challenges. *IEEE Control Systems Magazine*, 41(3):58–78, 2021.
- [2] K. Kogiso und T. Fujita. Cyber-security enhancement of networked control systems using homomorphic encryption. *54th Conf. on Decision and Control*, 6836-6843, 2015.
- [3] P. Martins, L. Sousa und A. Mariano. A survey on fully homomorphic encryption: An engineering perspective. *ACM Computing Surveys*, 50(6):1-33, 2017.
- [4] R. Cramer, I. Damgard und J. B. Nielsen. Secure multiparty computation. *Cambridge University Press*, 2015.
- [5] F. Farokhi, I. Shames, P. Binfet und N. Batterham. Secure and private control using semi-homomorphic encryption. *Control Engineering Practice*, 13-20, 2017.
- [6] M. Schulze Darup, A. Redder, I. Shames, F. Farokhi und D. Quevedo. Towards encrypted MPC for linear constrained systems. *IEEE Control Systems Letters*, 195-200, 2017.
- [7] N. Schlüter und M. Schulze Darup. Encrypted explicit MPC based on two-party computation and convex controller decomposition. *59th IEEE Conference on Decision and Control*, 5469-5476, 2020.
- [8] K. Tjell, N. Schlüter, P. Binfet und M. Schulze Darup. Secure learning-based MPC via garbled circuit. *60th IEEE Conference on Decision and Control*, 4907-4914, 2021.
- [9] N. Schlüter, M. Neuhaus und M. Schulze Darup. Encrypted dynamic control with unlimited operating time via FIR filters. *19th European Control Conf.*, 952-957, 2021.
- [10] A. Alexandru, K. Gatsis, Y. Shoukry, S. Seshia, P. Tabuada und G. Pappas Cloud-based quadratic optimization with partially homomorphic encryption. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 66(5):2357-2364, 2021.
- [11] J. Kim, C. Lee, H. Shim, J. Cheon, A. Kim, M. Kim und Y. Song. Encrypting controller using fully homomorphic encryption for security of cyber-physical systems. *IFAC-PapersOnLine*, 49(22): 175-180, 2016.

Resiliente Verschlüsselung der vernetzten Regelungssysteme

Moritz Fauser

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
RPTU Kaiserslautern-Landau
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern
Tel. 0631 2054310
Fax 0631 2054462
fauser@eit.uni-kl.de

Ping Zhang

Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
RPTU Kaiserslautern-Landau
Erwin-Schrödinger Str. 12, 67663 Kaiserslautern
Tel. 0631 2055543
Fax 0631 2054462
pzhang@eit.uni-kl.de

Schlüsselwörter: Cybersicherheit, Cyberangriffe, Resilienz, resiliente homomorphe Verschlüsselung, Angriffserkennung, vernetzte Regelungssysteme

Im Zuge der Industrie 4.0 findet die Kommunikation zwischen der Regelstrecke und dem Regler zunehmend über eine vernetzte Struktur statt. Dadurch können Anlagen flexibler und kostengünstiger realisiert werden. Um stets eine ausreichende Speicherkapazität und Rechenleistung für die steigenden Datenmengen bereitzuhalten, werden Regelungskonzepte verstärkt in Clouds betrieben. Jedoch sind solche vernetzten Regelungssysteme anfällig für Cyberangriffe, denn diese können die digitale Kommunikation ausnutzen um Informationen zu erhalten oder den physischen Prozess zu manipulieren. Um Cyberangriffe auf industrielle Regelungssysteme vorzubeugen gilt es zukunftsweisende Verfahren zu entwickeln. In diesem Vortrag wird ein neues Verfahren zur resilienten Verschlüsselung von vernetzten Regelungssystemen vorgestellt, das die Vertraulichkeit der Sensor-, Aktorsignale und Regelparameter schützt und den Effekt von Cyberangriffen neutralisieren kann. Zudem wird ein Zwei-Schicht-Überwachungssystem präsentiert, das Manipulationen der Chiffretext durch Cyberangriffe erkennt und die Verfügbarkeit des physischen Prozesses erhöht.

Cyberangriffe manipulieren mit steigender Tendenz nicht nur die Kommunikationskanäle der vernetzten Regelungssysteme, sondern auch die Regelung. Die komplexeren Cyberangriffe, wie z.B. der Covert-Angriff und der Nulldynamik-Angriff, nutzen gezielt die Kenntnisse des Prozesses aus und können von konventionellen Methoden der Anomalieerkennung nicht erkannt werden. Zur Prävention solcher Cyberangriffe dient das eigens entwickelte Resiliente Homomorphe Verschlüsselungsverfahren (RHV). Die Resilienz des RHV leitet sich von der Fähigkeit ab, den Effekt von Cyberangriffen zu neutralisieren, sodass der physische Prozess die wahren, unverfälschten Stellgrößen übermittelt bekommt. Folglich kann der Betrieb der Anlage aufrechterhalten werden, obwohl ein Cyberangriff stattfindet. Zusätzlich schützt das RHV die Vertraulichkeit der sensiblen Daten, wie Sensorsignale, Stellgrößen und Regelparameter und führt die Berechnungen des Reglers mit Chiffretexten durch. Infolgedessen können die wahren Sensor- und Aktorsignale, als auch die Regelparameter nicht von unautorisierten Personen interpretiert werden. Den Cyberangriffen wird die Möglichkeit zur Systemidentifikation entzogen, sodass Covert-Angriffe und Nulldynamik-Angriffe nicht ausführbar sind.

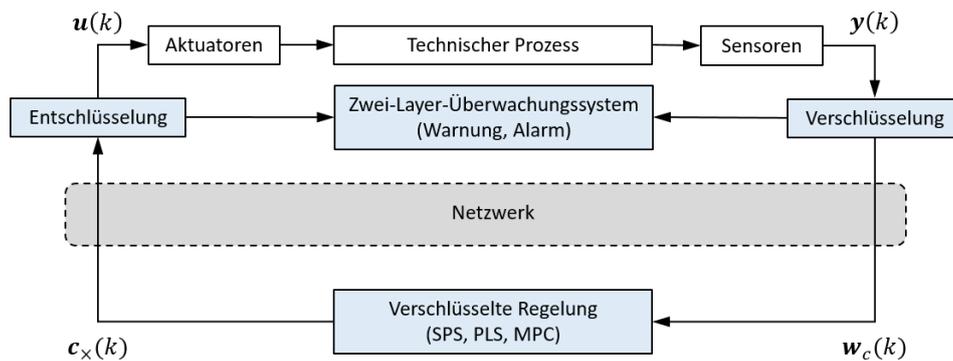


Abbildung 1: Das mittels RHV verschlüsselte Regelungssystem und das Zwei-Schicht-Überwachungssystem

Zur Sicherstellung der Anlagenverfügbarkeit wurde ein neues Zwei-Schicht-Überwachungssystem gegen Cyberangriffen entwickelt. Das mittels RHV verschlüsselte Regelungssystem und das Zwei-Schicht-Überwachungssystem sind in Abbildung 1 dargestellt. Das Zwei-Schicht-Überwachungssystem gibt zwei Arten von Signalen aus, das Warnungssignal und das Alarmsignal. Das Warnungssignal signalisiert einen unautorisierten Zugriff auf die Chiffretexte, dessen Eingriff keinen Einfluss auf die wahren Stellgrößen hat, da der Angriffseffekt durch das RHV neutralisiert wird. Das Alarmsignal wird ausgegeben, sobald eine Manipulation an den Chiffrexteten eine kritische Auswirkung auf die wahren Stellgrößen hat.

Zusammenfassend bietet das RHV und das Zwei-Schicht-Überwachungssystem einen umfassenden Schutz für vernetzte Regelungssysteme vor Cyberangriffen. Eine Manipulation der Chiffretexte kann durch das RHV korrigiert werden, sodass die unverfälschten Stellgrößen den physischen Prozess erreichen. Die resiliente homomorphe Verschlüsselung gewährleistet die Vertraulichkeit sowohl der Kommunikationskanäle als auch der Regelung. Das Zwei-Schicht-Überwachungssystem erkennt Cyberangriffe die einen kritischen Einfluss auf die Anlage haben, wodurch rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.

Literatur

- [1] M. Fauser and P. Zhang. „Resilience of Cyber-Physical Systems to Covert Attacks by Exploiting an Improved Encryption Scheme“. In: Proceedings of the 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 5489-5494, 2020
- [2] M. Fauser and P. Zhang. „Resilient Homomorphic Encryption Scheme for Cyber-Physical Systems“. In: Proceedings of the 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), pp. 5489-5494, 2021
- [3] M. Fauser and P. Zhang. „Detection of Cyber Attacks in Encrypted Control Systems“. In: IEEE Control Systems Letters, vol. 6, pp. 2365-2370, 2022

Predictive Control and Machine Learning with Guarantees for Systems exhibiting Multi-Modes

Johanna Bethge

Control and Cyber-Physical systems
TU Darmstadt
johanna.bethge@ovgu.de

Rolf Findeisen

Control and Cyber-Physical systems
TU Darmstadt
rolf.findeisen@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Model predictive control, Multi-mode systems, Machine Learning, Gaussian processes, robust control

Control guarantees such as stability, repeated feasibility and (robust) constraint satisfaction are demanded for many safety-critical systems as, e.g., autonomous vehicles. At the same time, those guarantees are difficult to establish, especially for systems that are subject to disturbances and uncertainties ω . In addition, many systems exhibit multiple options of behaviour $m \in M$, which may realize in different dynamical system behaviour $x^+ = f_m(x, u) + \omega$. Such systems are referred to as systems subject to hybrid dynamics, or multi-mode systems.

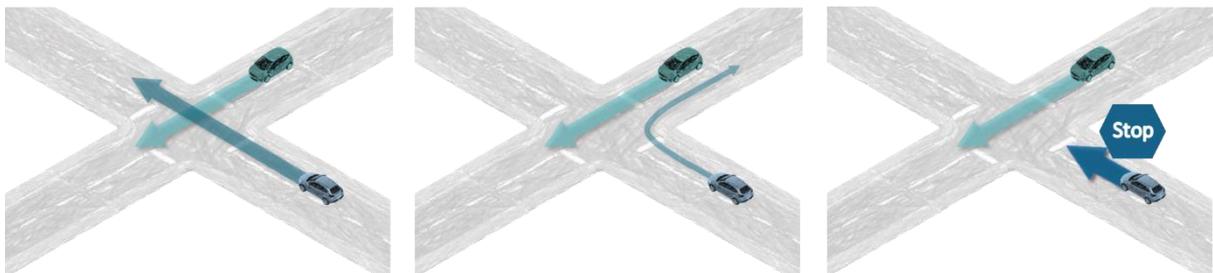


Figure 1: Multi-mode systems can exhibit multiple possibilities of (dynamical) behavior. For example, an autonomous vehicle needs to take into account the different possible behaviors of other traffic participants, i.e., a manual driven car might move straight (left), turn right (middle) or break (right), with different probabilities, depicted by the different line widths. For safety-critical systems guarantees despite such uncertainty are required, e.g., ensuring collision avoidance despite the different likely modes.

For example, an autonomous vehicle at an intersection needs to consider (all) other traffic participants (target vehicles) and their possible behaviours, c.f. [2],[4]. As shown in Figure 1, a human-driven/target vehicle can exhibit different behaviours, e.g., going straight, turning right, or breaking. Depending on the situation, the dynamical behaviour, as e.g., the speed or acceleration profile, is different. Those different dynamics are here called 'mode' and we represent each mode by its own dynamical system model f_m . This leads to the problem of control and decision making for a multi-mode system. Further examples are robotic force control, subject to different, yet unknown surface stiffness, or the operation of excavators subject to changing tools or contact forces due to different material properties.

To give probabilistic guarantees for uncertain multi-mode systems, e.g., robust constraint satisfaction for all modes, we propose to combine model predictive control (MPC) with approaches from machine learning. Specifically, we decouple safety from performance, while being able to provide probabilistic guarantees (for all modes) and optimizing performance for the most likely mode. To do so we exploit the advantage of MPC to directly consider constraints during optimization and modify existing guarantees (e.g. [3]) on (robust) constraint satisfaction

to all modes and on repeated feasibility of the optimal control problem to apply them to the proposed approach. The probabilistic guarantees for multi-mode systems on robust constraint satisfaction and repeated feasibility are given in [4]. Denoting learned variables with $(\tilde{\cdot})$ the resulting optimization problem is:

$$\begin{aligned} \min_{\tilde{u}} \quad & \sum_{j=k}^{k+T-1} \sum_{m=1}^M (\alpha_m \cdot |\tilde{x}_m(j)|_Q + |\tilde{u}(j)|_R) + \sum_{m=1}^M \alpha_m(T) \cdot E(\tilde{x}_m(T)) \\ \text{s. t.} \quad & x_m^+(j+1) = f_m(x_m(j), u(j)), \quad x_m(k) = x(k) \\ & \tilde{x}_m^+(j+1) = \tilde{f}_m(\tilde{x}_m(j), u(j)), \quad \tilde{x}_m(k) = x(k) \\ & x_m(j) \in X, \quad \forall m \in M, \forall j \in [k, k+T] \\ & u \in U \end{aligned}$$

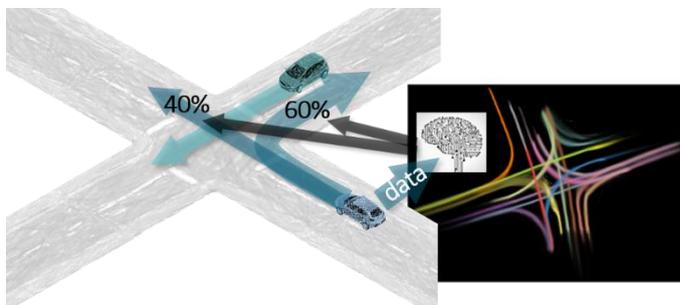


Figure 2: Learning support from online data enables model improvement and mode probability detection. Safety is guaranteed by decoupling the learning-support from constraint satisfaction of the model predictive controller.

The learning algorithm enables performance improvement through online learning of the cost or the dynamical system \tilde{f}_m from data, as shown in Figure 2. Moreover, learning or classification approaches can be used to detect the currently active mode. The latter one is most critical to achieve probabilistic guarantees. As shown in Figure 2, the mode detection might result in more likely and less likely modes, where α_m denotes the probability of mode m . While the performance optimization in the cost of the optimization problem is uncritical as all mode constraints are considered during optimization, dropping of an unlikely mode in the constraints results only in probabilistic guarantees with respect to the corresponding mode-dropping threshold. In [1], we proposed to drop modes only if they are impossible and not based on their probability. We relaxed the required assumptions and introduced probabilistic guarantees in [4]. The achieved results are underlined considering various example problems.

zation in the cost of the optimization problem is uncritical as all mode constraints are considered during optimization, dropping of an unlikely mode in the constraints results only in probabilistic guarantees with respect to the corresponding mode-dropping threshold. In [1], we proposed to drop modes only if they are impossible and not based on their probability. We relaxed the required assumptions and introduced probabilistic guarantees in [4]. The achieved results are underlined considering various example problems.

Literatur

- [1] J. Bethge et al. „Multi-mode learning supported model predictive control with guarantees “. In: *IFAC-PapersOnLine* 51.20 (2018): 517-522.
- [2] J. Bethge et al. „Modelling human driving behaviour for constrained model predictive control in mixed traffic at intersections “. In: *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 14356-14362.
- [3] J. Bethge et al. „Model predictive control with guarantees for discrete linear stochastic systems subject to additive disturbances with chance constraints “. In: *American Control Conference*, pp. 1943-1948. IEEE. 2020.
- [4] J. Bethge et al. „Model predictive control with Gaussian-Process-supported dynamical constraints for autonomous vehicles“. In: *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Submitted.

Skalierbare Berechnung invarianter Mengen für nichtlineare Regelungssysteme

Lukas Schäfer

Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und
Echtzeitsysteme
Technische Universität München
lukas.schaefer@tum.de

Matthias Althoff

Lehrstuhl für Robotik, Künstliche Intelligenz und
Echtzeitsysteme
Technische Universität München
althoff@tum.de

Schlüsselwörter: Invariante Mengen, Robuste Regelung, Reglerentwurf mit Sicherheitsgarantien

Mit dem Aufkommen autonomer Systeme, wie bspw. Fahrzeuge, Roboter oder Drohnen, gewinnt die Frage nach Sicherheitsgarantien für diese Systeme an Bedeutung. Eine Möglichkeit hierzu stellt die Berechnung invarianter Mengen für gestörte Regelungssysteme dar: Sobald das System die invariante Menge erreicht hat, kann der zugehörige Regler das Verlassen der Menge verhindern, wodurch die Einhaltung von Beschränkungen garantiert werden kann. Neben der Verwendung als vorgeschriebenes Endgebiet in der modellprädiktiven Regelung [1] können invariante Mengen auch zur Verifikation von Bewegungsplanungsalgorithmen [2] oder als Teil einer Sicherheitsebene für lernende Regelungsalgorithmen [3] eingesetzt werden.

In diesem Vortrag wird ein Ansatz zur effizienten Berechnung invarianter Mengen für gestörte nichtlineare Regelungssysteme [4] vorgestellt. Zwar existiert bereits eine Vielzahl von passenden Ansätzen in der Literatur, allerdings liefern diese entweder sehr konservative Ergebnisse (bspw. [5]) und/oder die Rechenkomplexität skaliert nur schlecht mit der Dimension des Zustandsraumes (bspw. [6]). Im Gegensatz zu vergleichbaren Ansätzen aus der Literatur skaliert die Rechenkomplexität des vorgestellten Ansatzes moderat mit der Dimension des Zustandsraumes und ermöglicht die Berechnung einer invarianten Menge für ein 20-dimensionales System innerhalb weniger Minuten.

Um die gewünschte Skalierbarkeit zu erreichen, werden Ansätze aus der numerischen (konvexen) Optimierung mit Algorithmen für die Erreichbarkeitsanalyse nichtlinearer Systeme [7] kombiniert: Zielfunktion des Maximierungsproblems ist das Volumen der invarianten Menge und Nebenbedingungen wie die Invarianz werden mittels der erreichbaren Menge des Regelungssystems formuliert. Zur effizienten Berechnung wird dieses Optimierungsproblem durch eine Folge glatter (konvexer) Optimierungsprobleme approximiert, wobei das Volumen der Lösungen monoton wächst. Die vielseitige Anwendbarkeit und der geringe Rechenaufwand werden anhand numerischer Beispielen demonstriert.

Literatur

- [1] D.Q. Mayne. "Robust and Stochastic MPC: Are We Going In The Right Direction?". In: *IFAC-PapersOnLine*. 2015
- [2] C. Pek, S. Manzinger, M. Koschi und M. Althoff. "Using online verification to prevent autonomous vehicles from causing accidents". In: *Nature Machine Intelligence*. 2020

- [3] K. P. Wabersich und M. N. Zeilinger. "Linear Model Predictive Safety Certification for Learning-Based Control". In: *IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2018
- [4] L. Schäfer, F. Gruber und M. Althoff. "Scalable Computation of Robust Control Invariant Sets of Nonlinear Systems". In: *submitted to IEEE Transactions on Automatic Control*. 2022
- [5] W.-H. Chen, J. O'Reilly und D. Balance. "On the terminal region of model predictive control for non-linear systems with input/state constraints". In: *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2003
- [6] M. Fiacchini, T. Alamo und E. Camacho. "On the computation of convex robust control invariant sets for nonlinear systems". In: *Automatica*. 2010
- [7] M. Althoff, O. Stursberg und M. Buss. "Reachability analysis of nonlinear systems with uncertain parameters using conservative linearization". In: *IEEE Conference on Decision and Control*. 2008.

Region-based selection and adaptation of weighting parameters with significant variations in plant parameters

Xujiang Huang

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Fachgebiet Prozessoptimierung
Technische Universität Ilmenau
xujiang.huang@tu-ilmenau.de

Pu Li

Fachgebietsleiter
Fachgebiet Prozessoptimierung
Technische Universität Ilmenau
pu.li@tu-ilmenau.de

Keywords: plant parameter variation, adaptation of weighting parameters, optimal control

Consider a general optimal control problem (OCP)

$$\min_u J = \omega(x(t_f), t_f, q) + \int_{t_0}^{t_f} \xi(x(t), u(t), t, q) dt$$

subject to

(1)

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p), x(t_0) = x_0$$

$$h(x(t), u(t), p) \geq 0$$

where p in the model equations and path constraints is a vector of plant parameters (PPs), q in the objective function J is a vector of weighting parameters (WPs) which characterize the preference of the designer on the control objective. In many cases, PPs may vary significantly during the system operation, causing a deteriorated control performance. Therefore, it is necessary to update the WPs based on the variation of the PPs.

Let G describe the input-output relationship of the system with optimal solution to (1). We address the selection of WPs to make G satisfying a vector of system specifications, denoted as $\gamma \in \mathcal{C}^{n_\gamma}$. In many studies, the specifications are defined as a figure of merits [1], closed-loop poles [2], and eigen-structures [3]. Assume the nominal PPs, denoted as p^0 , are known a priori, the nominal WPs, denoted as q^0 , are selected so that the nominal specifications, denoted as γ^0 , will be achieved. When there is a change Δp in PPs, the WPs have to be updated with a change of Δq so that γ^0 can be restored. In [4], we proposed an auto-tuning approach for updating WPs in LQR based on correlation analysis between PPs and WPs, provided that the perturbation of PPs occurs in the neighbour of their nominal values.

In practical applications, it is unnatural to restore the system to a specification when a significant change of Δp appears in PPs. For example, if the load changes heavily, the WPs have to be increased significantly so that the nominal value can be restored. In such a case, a large control action is needed, which will lead to poor robustness. In addition, the system performance may be degraded when the plant is highly nonlinear. In this presentation, we will introduce a region-based approach to selecting and updating WPs to address significant changes in PPs. The proposed approach is a two-stage (i.e. a macro- and a micro-stage) method.

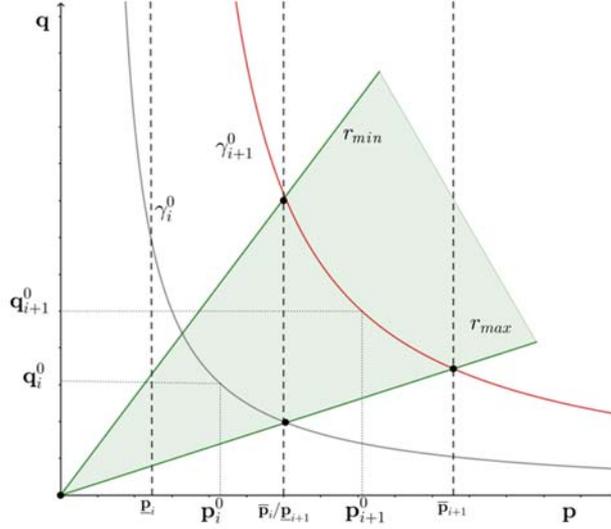


Fig.1: Region separation for controller design. Hyperbolas describe the tuning of WPs w.r.t. γ^0 . Dashed lines indicate the boundaries for each sub-region.

In the macro-stage, we assume that a nominal specification γ_i^0 is defined on p_i^0 and q_i^0 in a region s_i bounded by $[p_i, \bar{p}_i]$, as shown in Fig. 1. The hyperbola (grey) describes the tuning of WPs to the perturbation of PPs with respect to the nominal specification γ_i^0 . To avoid decreasing robustness or degraded performance, a region bounded by $[r_{min}, r_{max}]$ is defined to split the bounded PPs into a sequence of sub-regions. If the change of PPs $\tilde{p} = p_i^0 + \Delta p$ crosses the lower or upper bound of a sub-region, the next sub-region s_{i+1} bounded by $[p_{i+1}, \bar{p}_{i+1}]$ is considered with nominal values p_{i+1}^0, q_{i+1}^0 and then a new nominal specification γ_{i+1}^0 (red hyperbola) is determined. As a result, a set of specifications in the form $\Gamma = \{\gamma_i^0 \in \mathbf{R}^{n_\gamma \times M} | 1, \dots, M\}$ will be designed.

In the micro-stage, we first find the sub-region $s_i, i = 1, \dots, M$, where perturbed PPs \tilde{p} locate. Given the corresponding nominal values p_i^0, q_i^0 and γ_i^0 , we restore the desired specification by exploring the implicit relationship between the PPs and WPs in the neighbour of their nominal values inside the sub-region.

Literature

- [1] C. H. Houpis and C. T. Constantinides, "Correlation between conventional control figures of merit and the q matrix of the quadratic cost function: Third-order plant," *International Journal of Control*, vol. 16, no.4, pp. 695-704, 1972.
- [2] A. Emarah and M. Choudhry, "Eigenvalue assignment using optimal control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 32, no. 11, pp. 1189-1191, 1985.
- [3] W. L. Eastman and J. A. Bossi, "Design of linear quadratic regulators with assigned eigenstructure," *International Journal of Control*, vol.39, no. 4, pp. 731-742, 1984.
- [4] X. Huang and P. Li, "An auto-tuning LQR based on correlation analysis," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 7148-7153, 2020.

On Bayesian Optimization for Controller Tuning

Alexander von Rohr

Institute for
Data Science in Mechanical Engineering
RWTH Aachen University
vonrohr@dsme.rwth-aachen.de

Sebastian Trimpe

Institute for
Data Science in Mechanical Engineering
RWTH Aachen University
trimpe@dsme.rwth-aachen.de

Keywords: controller tuning, Bayesian optimization

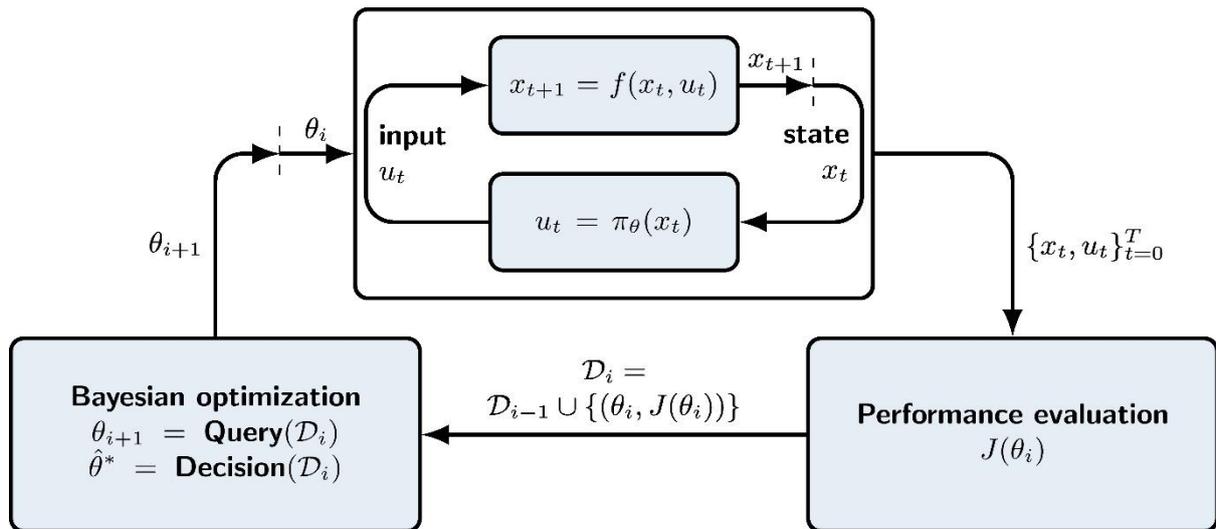


Figure 1: **Bayesian optimization for controller tuning:** The control law π , parameterized by θ , is evaluated in closed loop with the stochastic system f . A Bayesian optimization search algorithm sequentially tests different control law parameterizations in order to find suitable parameters.

Controller tuning is a critical task in designing and operating autonomous and complex dynamical systems, as finely-tuned feedback loops are required for these systems to function effectively. However, designing and tuning these controllers often requires significant engineering effort to model the underlying dynamics, design appropriate feedback laws, and find their parameters through extensive manual testing. This talk will focus on a data-driven approach to controller tuning for complex dynamical systems. Specifically, we will use Bayesian optimization (BO), an emerging optimization method suitable for controller tuning. To utilize BO, we pose the tuning problem as a static optimization problem over a parameterized control law, as depicted in Fig. 1.

The critical feature of BO that enables practical data-driven controller tuning is its data-efficiency. The cost of data on control performance makes data-efficient methods desirable for controller tuning; indeed, collecting this data often involves conducting experiments or running high-fidelity simulations. The data-efficiency is achieved by guiding the optimization process with a probabilistic model that considers prior knowledge about the system and data generated from the plant. This enables BO to make informed decisions about the next experiment, hereby maximizing each sample's utility and resulting in efficient use of data. An additional advantage of this approach is that sufficient prior knowledge ensures that the closed-loop behavior satisfies input and output constraints during the tuning process. Overall, BO has been successfully

applied to a variety of control problems, e.g., LQR control for a cart-pole system [1], active disturbance rejection control for a throttle valve [2], and feed-forward control for a micro robotic system [3].

These examples show the promises BO carries for data-efficient controller tuning. Still, it can be challenging to apply global optimization to high-dimensional problems where there are many variables to be tuned. We address this challenge in the second half of the talk where by presenting GIBO [4], a novel algorithm that merges BO and gradient methods to perform local search. GIBO can be used to improve a given control law data-efficiently. It does not require access to gradients and can efficiently search for good controllers in high-dimensional parameter spaces. It uses a probabilistic model of both the objective function and its gradient to guide the search. We will demonstrate the effectiveness of this method on a controller tuning example involving a robotic arm performing a complex balancing task.

References

- [1] A. Marco, P. Hennig, J. Bohg, S. Schaal, and S. Trimpe. "Automatic LQR tuning based on Gaussian process global optimization." In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016.
- [2] M. Neumann-Brosig, A. Marco, D. Schwarzmann, and S. Trimpe. "Data-efficient autotuning with Bayesian optimization: An industrial control study." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* vol. 28.3, 2019.
- [3] A. von Rohr, S. Trimpe, A. Marco, P. Fischer, and S. Palagi. "Gait learning for soft microrobots controlled by light fields." In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018.
- [4] S. Müller, A. von Rohr, and S. Trimpe. "Local policy search with Bayesian optimization." *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 34, 2021.

Zeit- und ereignisbasierte Regelung: Wie lassen sich ihre Vorteile vereinbaren?

Stefan Wildhagen

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
stefan.wildhagen@ist.uni-stuttgart.de

Frank Allgöwer

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
frank.allgower@ist.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: vernetzte Regelungssysteme, ereignisbasierte Regelung, Kommunikationsnetzwerke, modellprädiktive Regelung

In der Regelungstechnik werden die Übertragungskanäle für die Kommunikation zwischen Sensor, Regler und Aktor häufig als ideal angesehen. In der Praxis werden für diese Kanäle jedoch oft digitale, drahtlose und/oder von mehreren Nutzern verwendete Kommunikationsnetzwerke verwendet, wie zum Beispiel das CAN-Bus System, das insbesondere in Fahrzeugen zum Einsatz kommt, oder Drahtlosnetzwerke nach dem WLAN-Standard. Die Verwendung eines solchen Kommunikationsnetzwerks in einem Regelkreis führt zu sogenannten vernetzten Regelungssystemen (engl. *networked control systems*, NCSs), welche weitreichende Herausforderungen für die Regelungstechnik mit sich bringen: Sensorwerte und Stellsignale müssen quantisiert werden, Datenpakete können verzögert ankommen oder gar verloren gehen, und eine begrenzte Übertragungsbandbreite erfordert eine Beschränkung der kommunizierten Information.

Insbesondere wenn das Netzwerk überlastet ist, also wenn die Nutzer eine höhere Bandbreite anfordern als das Netzwerk bereitstellen kann, steigen Übertragungsverzögerungen und die Wahrscheinlichkeit von Paketverlusten stark an [1]. Um dieses Problem zu beheben, kann ein Netzwerkmanager den Nutzern des Netzwerks sogenannte Verkehrsspezifikationen (engl. *traffic specifications*, TSs) zuweisen. Diese erlegen dem erlaubten Kommunikationsverkehr bestimmte Einschränkungen auf, beispielsweise eine Schranke an die durchschnittliche oder maximale Datenrate. Ein Beispiel für eine TS ist die sogenannte fensterbasierte TS [2], worin Zeitfenster definiert werden, in denen der Nutzer maximal eine bestimmte, feste Anzahl an Übertragungen auslösen darf. Als flexiblere Alternative dazu kann der sogenannte Token-Bucket-Algorithmus [3] (s. Abbildung 1) verwendet werden, welcher auf einer Analogie zu einem Eimer (*bucket*) basiert, der Wertmarken (*tokens*) enthält. Dabei entscheidet der aktuelle Füllstand des bucket darüber, ob eine Übertragung, welche den Füllstand um eine gewisse Anzahl an tokens reduzieren würde, erlaubt ist oder nicht.

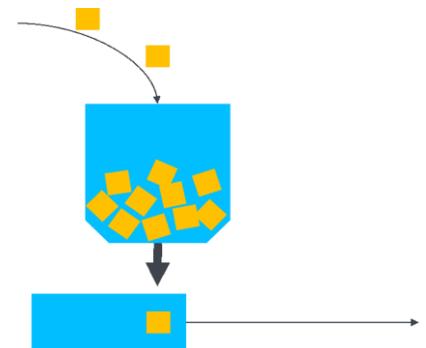


Abbildung 1: Veranschaulichung des Token-Bucket-Algorithmus

Aus Sicht der Regelungstechnik sind dann also zwei Aufgaben zu adressieren: es muss nicht nur ein Regelgesetz entworfen werden, sondern es müssen auch die Übertragungen von aktualisierten Sensorwerten oder Stellsignalen so terminiert werden, dass die TS erfüllt und eine möglichst hohe Regelgüte für das NCS realisiert wird. Eine klassischer Lösungsansatz für die

letztere Aufgabe ist dabei die zeitbasierte periodische Übertragung (engl. *time-triggered control*, TTC) mit der von der TS erlaubten durchschnittlichen Datenrate. Da die verfügbare Bandbreite mit solch einer Vorschrift aus Sicht der Regelgüte jedoch nur suboptimal eingesetzt wird, wurden in den letzten Jahren auch effizientere Übertragungsstrategien entwickelt, wie zum Beispiel die ereignisbasierte Regelung (engl. *event-triggered control*, ETC). Dabei werden neue Sensorwerte oder Stellsignale nur dann übertragen, wenn dies zur Laufzeit erforderlich ist, zum Beispiel wenn der aktuelle Systemzustand zu sehr von dem zuletzt an den Regler gemeldeten abweicht. Bei gleicher durchschnittlicher Übertragungsrate realisiert ETC typischerweise eine deutlich höhere Regelgüte als TTC [4]. Allerdings stellt es sich im Gegensatz zu TTC als äußerst schwierig heraus, das entstehende Übertragungsverkehrsmuster vorherzusagen und damit garantieren zu können, dass eine bestimmte TS eingehalten wird [5].

In diesem Vortrag gehen wir der Frage nach, ob und wie sich die Vorteile der beiden oben genannten Übertragungsstrategien TTC und ETC vereinbaren lassen, also die garantierte Erfüllung einer TS bei gleichzeitiger Verbesserung der Regelgüte möglich ist. Zu diesem Zweck schlagen wir eine alternative Übertragungsstrategie vor: das sogenannte *rollout ETC*, das seinen Namen aus ideenverwandten Konzepten in der dynamischen Programmierung und modellprädiktiven Regelung erhält. Dabei wird zu periodischen Abtastzeitpunkten ein Optimierungsproblem gelöst, welches darin besteht, die nächsten Übertragungen so zu terminieren, dass die Regelgüte über einen endlichen Prädiktionshorizont maximiert wird und die entsprechende TS eingehalten wird. Danach wird der erste Teil der Prädiktion tatsächlich angewandt, das heißt wenn für den aktuellen Abtastzeitpunkt eine Übertragung von Sensor- oder Stellsignalen vorgesehen ist, so wird diese auch zur Laufzeit am realen NCS ausgelöst. Nachdem dies geschehen ist, wird der Vorgang zum nächsten Abtastzeitpunkt wiederholt. Wir weisen nach, dass rollout ETC die Einhaltung der TS auch zur Laufzeit garantiert und unter einer geringfügigen Modifikation die Stabilität des geregelten Systems gewährleistet. Wir beweisen außerdem, dass rollout ETC mindestens die Regelgüte von TTC erreicht, und demonstrieren anhand unterschiedlicher Simulationen, dass diese in vielen Fällen sogar signifikant verbessert wird. Schließlich führen wir eine weitere Modifikation ein, die es erlaubt, die Flexibilität des Token-Bucket-Algorithmus voll auszuschöpfen und die Regelgüte weiter zu erhöhen.

Literatur

- [1] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak. "Network-induced constraints in networked control systems - a survey". In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1):403–416, 2012.
- [2] D. Antunes and W. P. M. H. Heemels. "Rollout event-triggered control: beyond periodic control performance". In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(12):3296–3311, 2014.
- [3] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall. "Computer Networks". *Pearson*, 5th edition, 2011.
- [4] K. J. Åström and B. M. Bernhardsson. "Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems." In: *Proceedings of the 2002 IEEE Conference on Decision and Control*, 2:2011–2016, 2002.
- [5] R. Postoyan, R. G. Sanfelice and W. P. M. H. Heemels. "Explaining the 'mystery' of periodicity in inter-transmission times in two-dimensional event-triggered controlled systems." In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022.

Manufacturing systems with time-window constraints: the max-plus perspective

Davide Zorzenon

Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
zorzenon@control.tu-berlin.de

Jörg Raisch

Fachgebiet Regelungssysteme
Technische Universität Berlin
raisch@control.tu-berlin.de

Keywords: scheduling, max-plus algebra, discrete event systems

Time-window constraints show up in several industrial settings. Two – rather different – examples are the baking and electroplating industries, where both insufficient and excessive durations of some processes (e.g., yeast fermentation in the former case, metal deposition in the latter) can irreparably damage the final product [1,2]. The presence of temporal upper-bound constraints makes the scheduling task in these systems particularly challenging as, counterintuitively, machines may be required to work at reduced pace to avoid constraint violations.

The max-plus algebra is the mathematical framework where standard addition and multiplication are replaced, respectively, by standard maximization and addition. In the last three decades, it has been successfully used for the analysis, optimization, and control of manufacturing systems where only delay and synchronization phenomena occur [3,4]; another application example is the synthesis of optimal feedback control for cyclically operated high-throughput screening systems [5].

In this presentation, we discuss the application of max-plus algebraic methods to the case of manufacturing systems with time-window constraints. We focus on two important indices in scheduling theory: makespan and throughput. Traditionally, these quantities are computed by solving linear programming problems; we show that, instead, they admit a closed form solution in the max-plus algebra.

The proposed max-plus approach offers two main advantages: computational efficiency and interpretability. Indeed, the provided formulas can reveal sparsity patterns otherwise obscured by the black-box nature of optimization problems. We show that their application for makespan minimization in an industrial bakery shop and for throughput optimization in an electroplating line leads to a faster solution compared to standard techniques [6,7].

References

- [1] F. T. Hecker, M. Stanke, T. Becker, and B. Hitzmann. “Application of a modified GA, ACO and a random search procedure to solve the production scheduling of a case study bakery”. In: *Expert systems with applications*. 2014.
- [2] M. A. Manier and C. Bloch. “A classification for hoist scheduling problems”. In: *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. 2003.
- [3] F. Baccelli, G. Cohen, G. J. Olsder, and J. P. Quadrat. “Synchronization and linearity: an algebra for discrete event systems”. 1992.

- [4] L. Hardouin, B. Cottenceau, Y. Shang, and J. Raisch. "Control and state estimation for max-plus linear systems". In: *Foundations and Trends® in Systems and Control*. 2018.
- [5] T. Brunsch, J. Raisch, and L. Hardouin. "Modeling and control of high-throughput screening systems". In: *Control Engineering Practice*. 2012.
- [6] D. Zorzenon, N. Zaiets, and J. Raisch. "Switched max-plus linear-dual inequalities for makespan minimization: the case study of an industrial bakery shop". Submitted, available at <https://arxiv.org/abs/2211.07601>. 2022.
- [7] D. Zorzenon, J. Komenda, and J. Raisch. "Switched Max-Plus Linear-Dual Inequalities: Application in Scheduling of Multi-Product Processing Networks". In: *16th IFAC Workshop on Discrete Event Systems*. 2022.

Direkte Multivariablenregelung von Modularen Multilevel Umrichtern

Daniel Dinkel

Automatisierungs- und Regelungstechnik
 Universität der Bundeswehr München
 daniel.dinkel@unibw.de

Claus Hillermeier

Automatisierungs- und Regelungstechnik
 Universität der Bundeswehr München
 claus.hillermeier@unibw.de

Schlüsselwörter: Modulare Multilevel Umrichter, MMC, DC-Netze, Fehlerbeherrschung

Modulare Multilevel Umrichter (MMC) haben sich im Stand der Technik als favorisierte Topologie für Hochspannungs- und Hochleistungsanwendungen etabliert. Die vorteilhaften Eigenschaften eines MMC, wie die Redundanz und Ausfallsicherheit, der hohe Wirkungsgrad, die industrielle Skalierbarkeit sowie die Fähigkeit zur elektronischen Beherrschung von Fehlern sind insbesondere für den Einsatz in der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) geeignet. Für eine ganzheitliche Nutzung dieser Vorteile, sowie zur Erfüllung des hohen Anforderungsprofils in modernen Anwendungen, sind neben Verbesserungen der Hardware (z.B. Submodultopologien) auch angepasste Regelungskonzepte notwendig.

Im Vortrag wird das Konzept der direkten Multivariablenregelung (MVC) vorgestellt, welche eine entkoppelte und hochdynamische Regelung aller sechs Freiheitsgrade ermöglicht. Neben den in Abbildung 1 dargestellten Kreisströmen, AC-Strömen und dem DC-Strom, wird auch die Gleichtaktspannung geregelt.

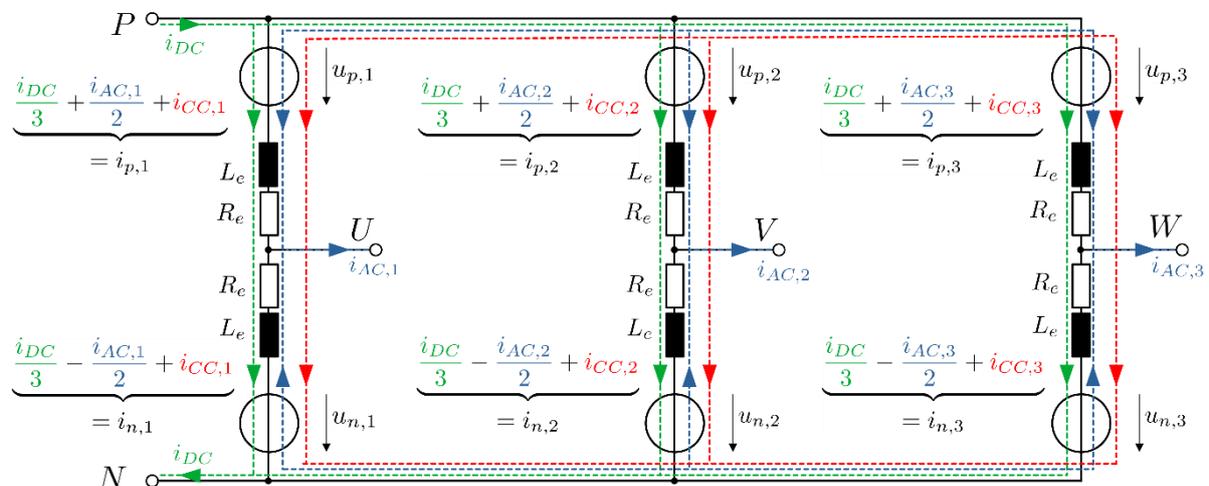


Abbildung 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines MMC mit farblich gekennzeichneten Stromkomponenten. Kreisströme (rot); Wechselströme (blau); Gleichstrom (grün).

Für jede dieser Variablen werden individuelle Toleranzbänder gemäß Abbildung 2 eingeführt, welche die Abweichungen von Istwerten zu den Sollwerten strikt begrenzen und auch in Fehlerszenarien eingehalten werden. Dies gelingt durch die im Konzept vorgesehene direkte Stromregelung, wodurch minimale Totzeiten erzielt werden und eine Robustheit gegenüber den veränderlichen Parametern der externen Netze (DC und AC) erreicht wird. Der grundsätzliche Signallaufplan ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die Leistungsfähigkeit der MVC wird im Vortrag durch experimentelle Ergebnisse eines Hardwareaufbaus mit 96 Vollbrücken-Submodulen für den stationären und dynamischen Betrieb (u.a. Fehlerszenarien) nachgewiesen.

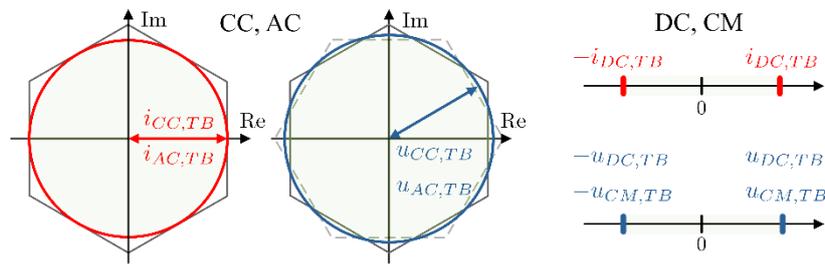


Abbildung 2: Definition der Toleranzbänder für Strom- und Spannungsfehler der Kontrollvariablen. Bei den Kreis- und AC-Strömen (CC und AC) handelt es sich um dreiphasige Variablen, weshalb eine Raumzeigerdarstellung verwendet wird.

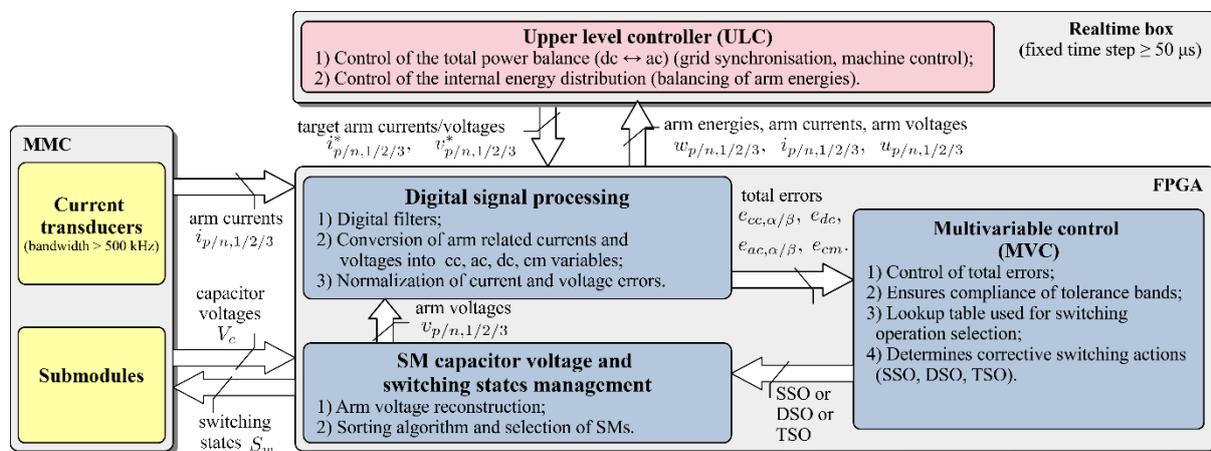


Abbildung 3: Blockschaltbild des Gesamtsystems. Die überlagerte Energieregung (ULC) gibt Sollwerte vor, die durch die schnellere, unterlagerte MVC eingestellt werden. Durch die Implementierung des gesamten Konzepts - inklusive digitaler Signalverarbeitung und Submodulsortierung - in einem FPGA, wird eine hohe Reglerbandbreite erreicht.

Literatur

- [1] D. Dinkel, C. Hillermeier and R. Marquardt, "Direct Multivariable Control for Modular Multilevel Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 7819-7833, July 2022.
- [2] D. Dinkel, C. Hillermeier and R. Marquardt, "Direct Multivariable Control for MMC: Digital Signal Processing and Experimental Results," *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, 2020, pp. 1-9
- [3] D. Dinkel, C. Hillermeier and R. Marquardt, "Direct Multivariable Control of Modular Multilevel Converters," *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, 2018, pp. P.1-P.10.

Fehlerdiagnose in adaptiven Tragwerken

Jonas Stiefelmaier

Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
jonas.stiefelmaier@isys.uni-stuttgart.de

Cristina Tarín

Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
cristina.tarin-sauer@isys.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Fehlerdetektion und -isolation, Adaptive Tragwerke, Paritätsraum, PCA

Durch die Integration geeigneter Aktoren in ein Tragwerk können dessen Schwingungen insbesondere in kritischen Lastszenarien gedämpft werden, was eine schwächere Auslegung erlaubt und damit ein signifikantes Potential zur Einsparung von Ressourcen und damit verbundenen Treibhausgasemissionen birgt [1]. Sowohl die für die Regelung benötigten Zustandsschätzung als auch die Überwachung des Gesundheitszustands eines solchen adaptiven Gebäudes erfordert dabei eine Vielzahl von Sensoren. Um also die Zuverlässigkeit eines adaptiven Gebäudes über dessen gesamte Lebensdauer hinweg zu gewährleisten, muss die korrekte Funktionsweise der Sensorik und Aktorik kontinuierlich überwacht bzw. Fehler in diesen Komponenten erkannt und lokalisiert werden.

Auf dem Campus der Universität Stuttgart wurde zur Validierung dieser Konzepte das 12-stöckige Demonstratorhochhaus D1244 errichtet, wie in Abbildung 1 zu sehen. Das D1244 wird mithilfe von 24 über das Gebäude verteilten Hydraulikzylindern aktuiert und ist mit Dehnmessstreifen, Wegmessgebern und Drucksensoren an den Aktoren sowie einem optischen Messsystem ausgestattet [2].

Anhand eines Satzes von Messdaten des D1244, bestehend aus Daten des nominalen Systemverhaltens sowie beispielhafter Fehlerszenarien, wird in diesem Beitrag die Performance kombinierter modell- und datenbasierter Ansätze zur Diagnose von Sensorfehlern untersucht. Der Datensatz steht über das data repository der Universität Stuttgart (DaRUS, <https://darus.uni-stuttgart.de/>) öffentlich zur Verfügung und soll damit auch anderen Forschungsgruppen zur Validierung von Methoden zur Fehlerdiagnose dienen.

In einem rein modellbasierten Ansatz werden zunächst mithilfe des Paritätsraums Residuen generiert. Anschließend werden durch den cumulative sum control chart (CUSUM) und den sequential probability ratio test (SPRT) Fehler in den Residuen detektiert bzw. isoliert [3]. Aufgrund unbekannter Störeinflüsse beispielsweise durch Wind, hauptsächlich jedoch aufgrund von parametrischen Modellfehlern und vernachlässigter Dynamik, werden mit diesem initialen Ansatz keine zufriedenstellenden Ergebnisse auf dem experimentellen Datensatz erzielt. Im Folgenden werden daher Möglichkeiten zur datenbasierten Performancesteigerung der modellbasierten Fehlerdiagnose betrachtet und deren Vor- und Nachteile beleuchtet. Eine Projektion der Residuen basierend auf der principal component



Abbildung 1: Das adaptive Demonstratorhochhaus D1244.

analysis (PCA) erlaubt wegen ihrer Linearität eine unkomplizierte Anpassung der modellbasierten Residuenevaluierung [3]. Nichtlineare Methoden zur Dimensionalitätsreduktion wie beispielsweise Autoencoder können den Effekt von Modellfehlern in den Residuen potentiell effektiver entfernen, erschweren allerdings die nachgelagerte Fehlerisolation. Beide Ansätze verbessern die Performance der Fehlerdiagnose auf dem experimentellen Datensatz und erlauben damit potentiell die zuverlässige Diagnose in weiteren Gebäuden unter vertretbarem Modellierungsaufwand und einer begrenzten Datenmenge.

Literatur

- [1] A. Ostertag et al. „Reliable design of adaptive load-bearing structures with focus on sustainability.” In: *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment*. 2020.
- [2] L. Blandini et al. „D1244: Design and construction of the first adaptive high-rise experimental building.” In: *Frontiers in built environment*. 2022.
- [3] A. Gienger et al. „Robust fault diagnosis for adaptive structures with unknown stochastic disturbances.” In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2021.

Numerisches Differenzieren mittels orthogonaler Polynome und seine Anwendung für die Diagnose von Stößen

Amine Othmane

Professur für Modellierung und Simulation
technischer Systeme (Prof. Dr. K. Flaßkamp)
Universität des Saarlandes
a.othmane@lsr.uni-saarland.de

Joachim Rudolph

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

Schlüsselwörter: Numerisches Differenzieren, orthogonale Polynome, lineare Filterung, modellbasierte Diagnose

Die Rekonstruktion nicht direkt gemessener Größen, beispielsweise bei der Zustandsschätzung oder der Fehlerdiagnose, kann auf die Kenntnis von Zeitableitungen bekannter Signale zurückgeführt werden (z.B. [1,2]). Algebraische Verfahren zur Schätzung von Zeitableitungen verrauschter Signale, erstmals in [3] vorgestellt und beispielsweise in [4,5,6,7] weiterentwickelt und untersucht, wurden bereits bei unterschiedlichen Echtzeitanwendungen erfolgreich eingesetzt. Diese Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie implizit ein Optimierungsproblem im Sinne der Methode der kleinsten Fehlerquadrate lösen. Eine ausführliche Diskussion dieser Verfahren, deren systematische Parametrierung und eine Liste praktischer Anwendungen sind in [8,9] zusammengefasst.

Dieser Beitrag bietet eine Einführung in die Synthese, Analyse und Auslegung von auf klassischen orthogonalen Polynomen basierenden Ableitungsschätzern. Basierend auf approximationstheoretischen Grundlagen werden Ansätze zur systematischen Parametrierung vorgestellt, damit gewünschte Filtereigenschaften im Zeit- und Frequenzbereich erzielt werden können. Insbesondere wird auf die Toolbox [10] eingegangen, die im Rahmen der Arbeit [8] veröffentlicht wurde. Dieses Softwarepaket enthält Werkzeuge zur Parametrierung, Untersuchung und Diskretisierung von auf Jacobi-Polynomen basierenden Ableitungsschätzern sowie eine grafische Benutzeroberfläche zur Vereinfachung deren Auslegung. Des Weiteren wird ein Parametrierungsansatz vorgestellt, der auf einem Optimierungsproblem basiert und nur das gemessene Signal benötigt.

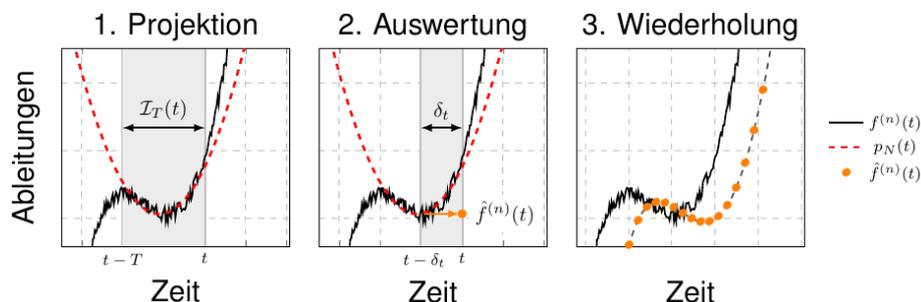


Abb. 1 Approximationstheoretische Interpretation eines auf Jacobi-Polynomen basierenden Ableitungsschätzers.



Abb. 2 Magnetisch gelagerte Platte mit Tischtennisball (Foto: Oliver Dietze)

Die Anwendung dieser Ableitungsschätzer wird in einer experimentellen Fallstudie zur modellbasierten Detektion von Sprüngen in zeitlichen Ableitungen an einer magnetisch gelagerten Platte demonstriert, die schon in [4,5] betrachtet wurde. Ein Ansatz mit Laguerre-Polynomen kann die benötigten Rechen- und Speicherressourcen im Vergleich zu den Ansätzen in [4,5] deutlich reduzieren und zudem eine genauere Detektion ermöglichen [9]. Insbesondere die beiden erstgenannten Eigenschaften sind für Echtzeitanwendungen entscheidend.

Literatur

- [1] S. Diop und M. Fliess. Nonlinear observability, identifiability, and persistent trajectories. In: *Proc. of the 30th IEEE Conf. on Decision and Control*, Band 1, S. 714–719 vol.1, Brighton, 1991. doi: [10.1109/CDC.1991.261405](https://doi.org/10.1109/CDC.1991.261405).
- [2] M. Fliess, C. Join, und H. Sira-Ramírez. Non-linear estimation is easy. In: *Int. J. Model. Identif. Control.*, 4(1):12, 2008. doi: [10.1504/IJMIC.2008.020996](https://doi.org/10.1504/IJMIC.2008.020996).
- [3] M. Fliess und H. Sira-Ramírez. State reconstructors: A possible alternative to asymptotic observers and Kalman filters. In: *Prod. CESA 2003*, Lille, 2003.
- [4] L. Kiltz. Algebraische Ableitungsschätzer in Theorie und Anwendung. Doktorarbeit, Universität des Saarlandes, 2017. doi: [10.22028/D291-27034](https://doi.org/10.22028/D291-27034).
- [5] L. Kiltz und J. Rudolph. Parametrization of algebraic numerical differentiators to achieve desired filter characteristics. In: *Proc. of the 52nd IEEE Conf. on Decision and Control*, S. 7010–7015, Florenz, 2013. doi: [10.1109/CDC.2013.6761000](https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6761000).
- [6] D. Y. Liu, O. Gíbaru, und W. Perruquetti. Differentiation by integration with Jacobi polynomials. In: *J. Comput. Appl. Math.*, 235(9):3015–3032, 2011. doi: [10.1016/j.cam.2010.12.023](https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.12.023).
- [7] M. Mboup, C. Join, und M. Fliess. Numerical differentiation with annihilators in noisy environment. In: *Numer. Algorithms*, 50(4):439–467, 2009. doi: [10.1007/s11075-008-9236-1](https://doi.org/10.1007/s11075-008-9236-1).
- [8] A. Othmane, L. Kiltz, und J. Rudolph. Survey on algebraic numerical differentiation: Historical developments, parametrization, examples, and applications. In: *Int. J. Syst. Sci.*, 53(9):1848–1887, 2022. doi: [10.1080/00207721.2022.2025948](https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2025948) (free access).
- [9] A. Othmane. Contributions to numerical differentiation using orthogonal polynomials and its application to fault detection and parameter identification. Doktorarbeit, Université Paris-Saclay, Universität des Saarlandes, 2022 (Erscheint online in der saarländischen Universitäts- und Landesbibliothek).
- [10] A. Othmane. AlgDiff: A Python package with MATLAB coupling implementing all necessary tools for the design, analysis, and discretization of algebraic differentiators. 2022, verfügbar unter <https://github.com/aothmane-control/Algebraic-differentiators>, Version 1.1.0

Zustandsschätzung von Strömungsfeldern in hydraulischen Maschinen mit reduzierten Modellen

Kamil David Sommer	Lucas Reineking	Martin Mönningmann
Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie	Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie	Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie
Ruhr-Universität Bochum	Ruhr-Universität Bochum	Ruhr-Universität Bochum
kamil.sommer@rub.de	lucas.reineking@rub.de	martin.moennigmann@rub.de

Schlüsselwörter: Modellreduktion, Petrov-Galerkin-Projektion, erweitertes Kalman-Filter, hydraulische Maschinen, Kreiselpumpe

Strömungsmaschinen können mit den Navier-Stokes-Gleichungen und mit Hilfe von CFD (Computational Fluid Dynamics) räumlich und zeitlich hochaufgelöst simuliert werden. Methoden dieser Art haben inzwischen eine so große Reife erreicht, dass sie in der Industrie regelmäßig im Rahmen von Entwurfsprozessen eingesetzt werden. Angesichts ihres hohen Rechenaufwandes kommen CFD-Methoden aber nicht für einen Einsatz in Echtzeit in Frage. Zudem sind Rand- und Anfangsbedingungen für geometrisch komplexe, reale Maschinen oft schwer analytisch zu beschreiben. Rand- und Anfangsbedingungen werden stattdessen oft auf Gittern definiert, sodass eine direkte regelungstechnische Behandlung als unendlich-dimensionales Problem erschwert wird.

Methoden der Modellreduktion erlauben eine Reduktion von unendlich- zu endlich-dimensionalen Modellen, die den Einsatz regelungstechnischer Methoden erleichtern. Zudem können die resultierenden reduzierten Modelle mit so geringem Rechenaufwand gelöst werden, dass sie für Echtzeitanwendungen geeignet sind.

Wir benutzen etablierte Reduktionsmethoden, die eine Hauptkomponentenanalyse und Galerkin-Projektionen zur Erzeugung von endlich-dimensionalen Modellen in Form gewöhnlicher Differentialgleichungen kombinieren [1]. Die resultierenden reduzierten Modelle ermöglichen u.a. eine Beobachtbarkeitsanalyse, mit deren Hilfe Sensoren platziert werden können. Erweiterte Kalman-Filter, die mit Hilfe der reduzierten Modelle abgeleitet werden, sind schlank genug für einen Einsatz auf eingebetteten Systemen, die prinzipiell die Rekonstruktion des Strömungs- und Druckfeldes in Echtzeit als Teil eines Pumpensystems ermöglichen [2].

Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten wurde die Machbarkeit einer Beobachtung der Felder in einer Kreiselpumpe mit Hilfe eines kostengünstigen Mikrocontrollers demonstriert. Simulierte Messsignale wurden dabei mit einem Echtzeitsimulationssystem erzeugt, in dem die CFD-Simulationsergebnisse für die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen zum Einsatz kommen. Bei der Umsetzung erwies sich die mangelnde Langzeitstabilität des reduzierten Modells als problematisch. Mit Hilfe einer Petrov-Galerkin-Projektion, bei der die für die Rekonstruktion optimale Basis aus der Hauptkomponentenanalyse durch eine unabhängige optimale Basis für die Projektion ergänzt wird, konnten langzeitstabile Modelle erzielt werden [3]. Im Ausblick des Vortrages wird erläutert, dass die Kenntnis der Strömungs- und Druckfelder in hydraulischen Maschinen eine hochaufgelöste Regelung komplexer Größen wie Scherkräfte oder der Kavitationsneigung ermöglicht.

Literatur

- [1] L. Sirovich. „Turbulence and the dynamics of coherent structures. Part I: Coherent structures“. In: *Quarterly of applied Mathematics*. Vol. 45(3), S. 561-571, 1987.
- [2] K. D. Sommer, L. Reineking, Y. P. Ravichandran, R. Skoda and M. Mönningmann. „Estimating flow fields with Reduced Order Models“. Eingereicht bei: *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2023.
- [3] L. Reineking, K. D. Sommer, Y. P. Ravichandran, R. Skoda, M. Mönningmann. „Long-term stable reduced models for hydraulic systems governed by Reynolds averaged Navier-Stokes equations“. In: *13th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems DYCOPS*, S. 254-259, 2022.

Skalierbare Reglersynthese für Multi-Agenten-Systeme mit stochastischen Paketverlusten

Christian Hespe

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg
christian.hespe@tuhh.de

Herbert Werner

Institut für Regelungstechnik
Technische Universität Hamburg
h.werner@tuhh.de

Schlüsselwörter: Multi-Agenten Systeme, Paketverluste, Reglersynthese, LMIs

Das Regeln und Steuern von großen Netzwerken dynamischer Systeme ist ein herausforderndes Problem, das in den letzten Dekaden viel Interesse auf sich gezogen hat. Durch die Größe und Komplexität der Systeme ist für eine systematische, zentralisierte Systemanalyse und Reglersynthese jedoch ein hoher Rechenaufwand notwendig, bis hin zur Unlösbarkeit in vertretbaren Zeiträumen. Aus diesem Grund sind verteilte Ansätze die Methode der Wahl für diese Art von Systemen geworden.

Eine Klasse solcher Netzwerke dynamischer Systeme sind Multi-Agenten Systeme (MAS), in denen Gruppen einfacher Systeme – den sogenannten Agenten – im Kollektiv Aufgaben lösen, indem auf Agenten-Ebene definierte Regeln befolgt werden. In vielen Fällen ist dazu der Einsatz eines Kommunikationsnetzwerks notwendig, um Informationen zwischen benachbarten Agenten auszutauschen. Obwohl solche Netzwerke in der Praxis grundsätzlich stochastischer Natur sind, das heißt der Informationsfluss unvorhersehbar unterbrochen und wiederhergestellt wird, wird der Informationsaustausch meist idealisiert modelliert und die Paketverluste vernachlässigt. Dieser Vortrag zeigt Methoden auf, mit deren Hilfe stochastische Paketverluste während der Systemanalyse und Reglersynthese auf skalierbare Art und Weise berücksichtigt werden können.

Die Grundlage des Ansatzes bildet die Idee der *Decomposable Systems*, die von Massioni und Verhaegen in [1] vorgeschlagen wurde. Sie beruht auf der Idee, dass homogene MAS in sogenannte modale Subsysteme entkoppelt werden können, die getrennt analysiert werden und jeweils nur die Größe eines einzelnen Agenten haben. Die ursprünglich für lineare, zeitinvariante Systeme entwickelten Ideen, wurden in [2] auf *Markov Jump Linear Systems* übertragen, deren Dynamik stochastische Wechsel zwischen verschiedenen System-Modi umfasst und die damit das Modellieren von stochastischen Paketverlusten erlaubt. Unter der Annahme, dass die Übertragung in der Zeit und auf verschiedenen Kanälen unabhängig sind und dieselben Verlustwahrscheinlichkeiten aufweisen, können auf diese Weise Optimierungsprobleme in Form linearer Matrixungleichungen formuliert werden, die linear mit der Anzahl der Agenten skalieren und damit auf sehr große MAS anwendbar sind.

Ausgehend von den Analysebedingungen aus [2], wurden in [3] skalierbare Optimierungsprobleme zur Synthese von – in Hinsicht auf die H_2 - oder H_∞ -Norm suboptimalen – verteilten Ausgangs- und Zustandsrückführungsreglern mit der in Abbildung 1 gezeigten Regelstruktur entworfen. Bei Kenntnis der Verlustwahrscheinlichkeit des Kommunikationsnetzwerkes erlau-

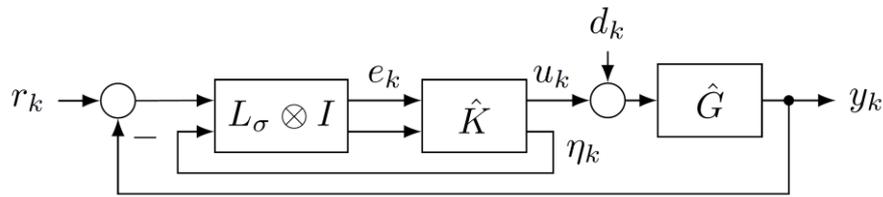


Abbildung 1 - Verteilte Regelstruktur

ben diese Regler, einen Anteil der durch die Paketverluste gegenüber dem idealisiert angenommenen Netzwerk verlorenen Regelgüte zurückzugewinnen. Weiterhin konnte in [4] gezeigt werden, dass auch für unsichere und zeitveränderliche Kommunikationsgraphen obere Schranken für die Regelgüte aus einer robusten Betrachtung des Analyseproblems gewonnen werden können.

Im Kontext des vorgestellten Problemfelds lassen sich eine Vielzahl an Erweiterungen der bisherigen Fragestellungen untersuchen. In Hinsicht auf die Modellannahmen wird aktuell betrachtet, ob und wie sich der Ansatz auf Netzwerke mit heterogenen Verlustwahrscheinlichkeiten oder von Markov-Ketten beschriebenen Kanälen erweitern lässt. Weiterhin wird untersucht, inwiefern adaptive Regelgesetze den Anteil der zurückgewonnenen Regelgüte vergrößern können, und wie mithilfe des vorgestellten Ansatzes Konvergenzbeweise für verteilte Optimierungsprobleme möglich sind.

Literatur

- [1] P. Massioni & M. Verhaegen „Distributed Control for Identical Dynamically Coupled Systems: A Decomposition Approach“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2009
- [2] C. Hespe et al. „A Decomposition Approach to Multi-Agent Systems with Bernoulli Packet Loss“. Submitted to *IEEE Transaction on Control of Network Systems*. arxiv.2209.03024.
- [3] C. Hespe et al. „Distributed H2 Controller Synthesis for Multi-Agent Systems with Stochastic Packet Loss“. Submitted to *American Control Conference 2023*.
- [4] C. Hespe & H. Werner „Robust Performance Analysis for Time-Varying Multi-Agent Systems with Stochastic Packet Loss“. Submitted to *2023 IFAC World Congress*.

Effekt von Bifurkationsgrenzen auf die gradientenbasierte Parameteroptimierung von Modellen mit interner Dynamik

A. Rehmer¹

A. Kroll*

Schlüsselwörter: Nichtlineare Dynamik, Kodimension-1 Bifurkationen, Rekurrente Neuronale Netze
In der Systemidentifikation können Modellstrukturen unter anderem dahingehend unterschieden werden, wie

dynamisches Verhalten realisiert wird [1]. Externe Dynamikansätze nutzen eine externe Filterbank für das Eingangssignal \mathbf{u} und Ausgangssignal \mathbf{y} und eine statische Funktion $\mathbf{f}(\cdot)$, um den Wert des Ausgangssignals \mathbf{y} im nächsten Zeitschritt zu präzisieren. Bei der Filterbank handelt es sich üblicherweise um einfache Zeitverzögerungen, sodass sich der externe Dynamikansatz formal beschreiben lässt als:

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{y}_k, \dots, \mathbf{y}_{k-n_y}, \mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_{k-n_u}) \quad (1)$$

Hierbei sind n_y und n_u jeweils die Zeitverzögerungen für das Ein- und Ausgangssignal.

Der interne Dynamikansatz hingegen realisiert ein Zustandsraummodell ohne Kenntnis der wahren Systemzustände:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{k+1} &= \mathbf{g}(\mathbf{c}_k, \mathbf{u}_k) \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{h}(\mathbf{c}_k) \end{aligned} \quad (2)$$

Die internen Modellzustände \mathbf{c} besitzen in der Regel keinerlei physikalische Interpretation und auch die Dimension des Zustandes muss gewöhnlich wesentlich höher gewählt werden als die Systemordnung, um ein Modell mit zufriedenstellender Güte zu erhalten.

Modellstrukturen mit interner Dynamik sind sehr sensitiv gegenüber der Wahl der initialen Modellparameter und -zustände und neigen zu langsamer Konvergenz sowie zu Konvergenz in schlechten lokalen Minima. In den vergangenen Jahren wurde die Hypothese der verschwindenden/explodierenden Gradienten als Erklärung für diese Phänomene herangezogen. Die Hypothese basiert auf der Beobachtung, dass der Beitrag der Modellparameter θ_k zu einem Zeitpunkt k zu der Änderung des internen Modellzustands zu einem späteren Zeitpunkt $k+T$ exponentiell von den Jacobi-Matrizen $\mathbf{J}_{k+1} = \frac{\partial \mathbf{x}_{k+1}}{\partial \mathbf{x}_k}$ der dazwischenliegenden Zeitschritte abhängt:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k+T}}{\partial \theta_k} = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k+T}}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k+T-1}} \dots \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k+1}}{\partial \hat{\mathbf{x}}_k} \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}_k}{\partial \theta_k}$$

Gemäß der Hypothese explodiert der Gradient, falls $\rho(\mathbf{J}_n) > 1 \forall n \in \{k+1, \dots, k+T\}$, oder er verschwindet, falls $\rho(\mathbf{J}_n) < 1 \forall n \in \{k+1, \dots, k+T\}$. Hierbei sei $\rho(\mathbf{J}_n)$ der Spektralradius der Matrix \mathbf{J}_n . Basierend auf dieser Hypothese wurden Modellstrukturen entworfen, welche das in klassischen Elman Rekurrenten Netzen auftretende Problem der verschwindenden Gradienten lösen sollten und mit großem Erfolg in der Schrift-, Sprach- und Videoverarbeitung eingesetzt wurden [2]. Zu nennen sind hier insbesondere das Long Short-Term Memory (LSTM) Netz [3, 4] und die sogenannte *Gated Recurrent Unit* (GRU) [5].

Empirische [6] und analytische Untersuchungen [7, 8, 9] weisen darauf hin, dass nicht verschwindende, sondern sehr große lokale Gradienten ursächlich für die bei der Optimierung von rekurrenten Modellstrukturen auftretenden Probleme sind. Diese Gradienten treten an Punkten im Parameterraum auf, an denen sich die Stabilität von Fixpunkten des Modells schlagartig ändern, d.h. an Bifurkationspunkten. Abbildung 1 zeigt durch Farbcodierung die drei Konfigurationen an Fixpunkten und deren Stabilitätszustände, die ein Elman-RNN mit einem internen Zustand in Abhängigkeit der Modellparameter $\theta = [w_c, b_c]^T$ einnehmen kann. Abbildung 2 zeigt einerseits, dass hohe Gradienten ausschließlich an Bifurkationsgrenzen auftreten,

*FG Mess- und Regelungstechnik, FB Maschinenbau, Universität Kassel alexander.rehmer; andreas.kroll@mrt.uni-kassel.de

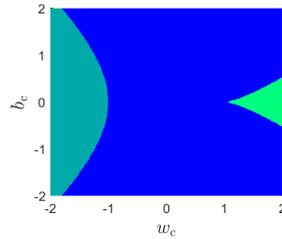


Abbildung 1: ■ RNN hat einen global asymptotisch stabilen Gleichgewichtszustand, ■ RNN hat drei Gleichgewichtszustände, ■ Gleichgewichtszustand ist ein Grenzyklus.

vergleiche Abbildung 1. Andererseits treten nicht an allen Bifurkationsgrenzen hohe Gradienten auf. Laufende Untersuchungen weisen darauf hin, dass die Wahl des initialen Modellzustandes \mathbf{c}_0 ausschlaggebend dafür ist, an welchen Bifurkationsgrenzen der Gradient *explodiert*. Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zum

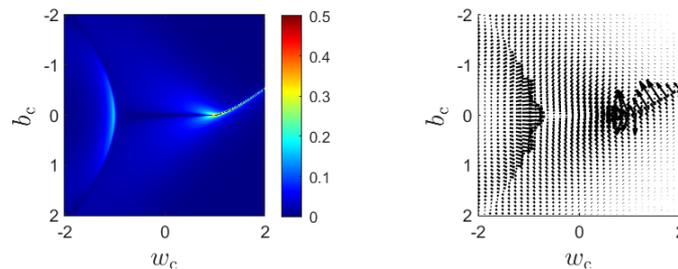


Abbildung 2: Betrag des Gradienten und $|\frac{\partial \mathbf{x}(\boldsymbol{\theta}_i)}{\partial [w_c, b_c]}|$ (links) und Gradient $\frac{\partial \mathbf{x}(\boldsymbol{\theta}_i)}{\partial [w_c, b_c]}$ (rechts) eines Elman-RNN bezüglich der Modellparameter.

Verständnis des Zusammenhangs zwischen Kodimension-1 Bifurkationen und dem Gradienten bezüglich der Modellparameter einerseits, und der Initialisierung der Modellparameter und des Modellzustandes andererseits, geleistet werden. Erkenntnisse bezüglich dessen, was die Optimierung von rekurrenten Modellen zu einem schwierigen Problem macht, sind wertvoll für die Entwicklung neuer Modellstrukturen und Initialisierungsstrategien.

Literatur

- [1] O. Nelles. *Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks, fuzzy models, and gaussian processes*. 2. Aufl. Springer Nature, 2020.
- [2] I. D. Jordan, P. A. Sokol und I. M. Park. “Gated recurrent units viewed through the lens of continuous time dynamical systems”. In: *arXiv preprint arXiv:1906.01005* (2019).
- [3] S. Hochreiter und J. Schmidhuber. “Long Short-Term Memory”. In: *Neural Computation* 9.8 (1997), S. 1735–1780.
- [4] F. A. Gers, J. Schmidhuber und F. Cummins. “Learning to forget: Continual prediction with LSTM”. In: *Neural computation* 12.10 (2000), S. 2451–2471.
- [5] K. Cho u. a. “On the properties of neural machine translation: Encoder-decoder approaches”. In: *arXiv preprint arXiv:1409.1259* (2014).
- [6] J. v. d. Westhuizen und J. Lasenby. “The unreasonable effectiveness of the forget gate”. In: *CoRR* abs/1804.04849 (2018).
- [7] K. Doya. “Bifurcations of Recurrent Neural Networks in Gradient Descent Learning”. In: *IEEE Transactions on Neural Networks* 1 (1993), S. 75–80.
- [8] R. Pascanu, T. Mikolov und Y. Bengio. “On the difficulty of training recurrent neural networks”. In: *International conference on machine learning*. 2013, S. 1310–1318.

- [9] Alexander Rehmer und Andreas Kroll. “The effect of the forget gate on bifurcation boundaries and dynamics in Recurrent Neural Networks and its implications for gradient-based optimization”. In: *2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2022, S. 01–08. DOI: 10.1109/IJCNN55064.2022.9892458.

Characterization of nonplanar surfaces by retroreflex ellipsometry

Chia-Wei Chen¹

¹Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme IES
Karlsruher Institut für Technologie KIT
chia-wei.chen@kit.edu

Jürgen Beyerer^{1,2}

²Fraunhofer Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

Schlüsselwörter: Ellipsometry, curved and tilted surfaces, thin-film metrology

Objects with tightly controlled physical properties (e.g., coating and functional films) are becoming more and more important in industrial production processes. They are widely found in different fields, e.g., the automobile industry, photonics, metal coatings and glass production. Ellipsometry is a well-established and very sensitive method for characterizing materials and thin films. With this technique, the surface of the test object is illuminated with polarized light. The polarization changes after polarized light is reflected from the object at an oblique angle of incidence. The change of polarization states is dependent on the optical properties of the material under investigation. However, it is very rarely found in industrial applications because of the geometrical limitations of conventional ellipsometry. The geometric shape of samples is usually limited to flat or nearly flat samples for conventional ellipsometers because the operation must fulfill the condition of the law of reflection. Even slight misalignments from the ideal reflection setting might lead to significant experimental errors. For larger misalignments, it is mostly impossible to get any evaluable signals (see Figure 1).

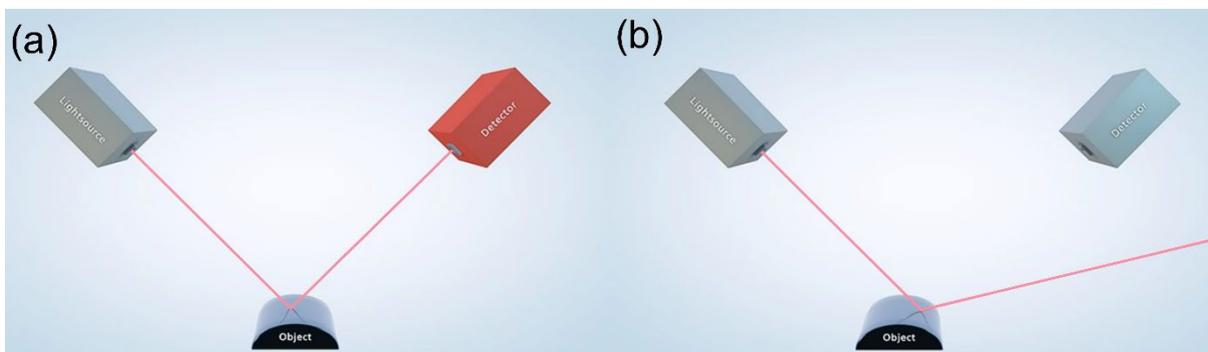


Figure 1: Beam path of a conventional ellipsometer when the reflection condition is fulfilled (a) or not fulfilled (b).

To overcome the need for these restrictions, we proposed the concept of retroreflex ellipsometry [1] based on return-path ellipsometry [2]. The return-path ellipsometer includes a polarization state analyzer (PSA), polarization state generator (PSG) and nonpolarizing beam-splitter (NPBS). Instead of a mirror, a retroreflector is used to return the light beam back to the sample along the same beam path. The polarization effect of the retroreflector is the same as an ideal mirror. Based on this concept, a prototype shown in Figure 2 was built and tested [1]. A polarization model for nonplanar surfaces was established by polarization ray tracing. Two methods for refractive index measurements of substrates and film thickness measurements of three-phase systems were proposed and verified [1,3,4]. In contrast to conventional ellipsometers, the retroreflex ellipsometer has several advantages:

1. The PSG and the PSA can be integrated into a single unit which can be easily applied to reflection or transmission measurements.
2. The sensitivity of the measurements is higher because the light beam reflects on the sample twice.
3. The alignment between the sample and the retroreflector is simple because of the high acceptable angular range of the retroreflector.

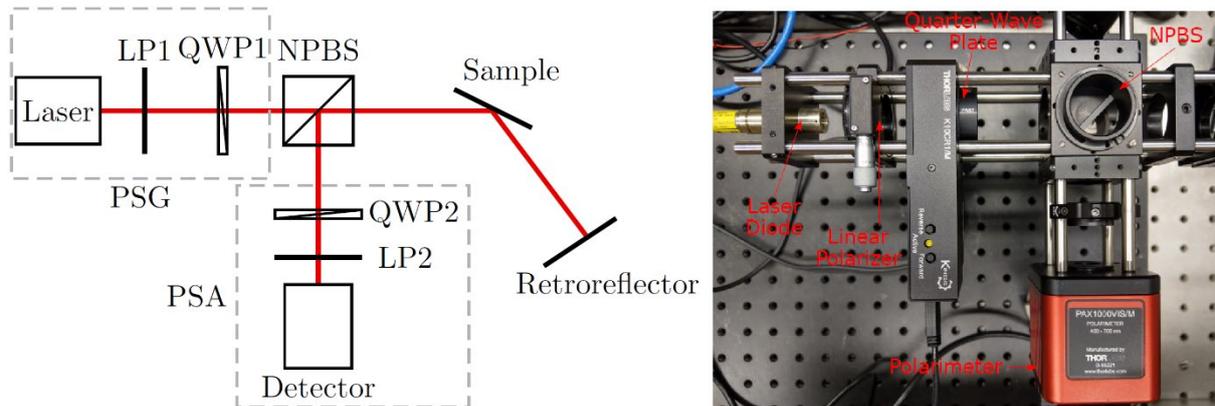


Figure 2: Schematic of a retroreflex ellipsometer comprising of PSA, PSG, and NPBS, where LP and QWP are linear polarizer and quarter-wave plate.

The retroreflex ellipsometry can overcome the geometric restrictions of conventional ellipsometry. Therefore, ellipsometric measurements can be used comprehensively for many industrial production processes, e.g., the characterization of optical properties of freeform optics and defect inspection for samples with almost arbitrary shapes. It has great potential for use in inline and in situ quality control systems because the acceptable angular range for the reflection or refraction of beams at the sample is up to 30° .

Literatur

- [1] C.-W. Chen et al. „Retroreflex ellipsometry for isotropic substrates with nonplanar surfaces “. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2019.
- [2] R. M. A. Azzam. „ Return-path Ellipsometry and a Novel Normal-incidence Null Ellipsometer (NINE)“. In: *Optica Acta: International Journal of Optics*. 1977.
- [3] M. Hartrumpf et al. „Ellipsometric inline inspection of dielectric substrates with nonplanar surfaces“. In: *tm - Technisches Messen*. 2020.
- [4] C.-W. Chen et al. „Analytical determination of the complex refractive index and the incident angle of an optically isotropic substrate by ellipsometric parameters and reflectance“. In: *Applied optics*. 2021.