

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

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

Mittwoch, 21. Februar 2024

- nachmittags **Anreise**
- 18:00 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

Donnerstag, 22. Februar 2024

08:15 – 08:30	Eröffnung und Begrüßung (Stadthalle, Haupttagungsraum im EG) <i>Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Meurer (Karlsruher Institut für Technologie)</i>
----------------------	---

	Haupttagungsraum im EG	Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Robotik Sitzungsleitung: Prof. Oliver Sawodny	Identifikation Sitzungsleitung: Prof. Hendrik Lens
08:30 – 09:00	Modellprädikative Gesamtregelung für orbitale Robotersysteme <i>Peter Kötting</i> <i>Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, DLR Oberpfaffenhofen, Prof. Dr.-Ing. Martin Otter, Gr. 12</i>	Unsicherheitsbewertete Methoden für die Online-Identifikation von Batteriesystemen <i>Marit Lahme</i> <i>Abt. Verteilte Regelung in Vernetzten Systemen, Department für Informatik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Prof. Dr.-Ing. Andreas Rauh, Gr. 13</i>
09:00 – 09:30	Automatisierte Vor-Ort-Montage von Holzbauteilen mittels zweier hydraulischer Großraummanipulatoren <i>Anja P.R. Lauer</i> <i>Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny, Gr. 27</i>	Closed-loop Identification of a Grate Incinerator using Bayesian Optimization for Selecting Model Inputs and Structure <i>Johannes Lips</i> <i>Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme, IFK, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, Gr. 16</i>
09:30 – 10:00	Konzeptionelle Erweiterung bestehender Informationsmodelle für PCC Modelle in Soft Robotics <i>Linus Witucki</i> <i>Vernetzte Sichere Automatisierungstechnik, Institut für Regelungs- & Steuerungssysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr.-Ing. Mike Barth, Gr. 30</i>	Improving the Size and Accuracy of Soft Sensors <i>Xinrui Gao</i> <i>Automation Engineering, Technische Universität Ilmenau, Prof. Dr.-Ing. Yuri A.W. Shardt, Gr. 15</i>

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

10:30 – 12:00	Modellprädiktive Regelung Sitzungsleitung: Prof. Sergio Lucia	Verteilt-parametrische Systeme Sitzungsleitung: Prof. Joachim Deutscher
10:30 – 11:00	Verteilte prädiktive Regelung nichtlinearer Systeme in Echtzeit <i>Gösta Stomberg, Alexander Engelmann</i> <i>Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft, Technische Universität Dortmund, Prof. Dr.-Ing. Timm Faulwasser, Gr. 11</i>	Regelung verteiltparametrischer Systeme für den Lastentransport mit Multikoptern <i>Abdurrahman Irscheid</i> <i>Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Prof. Dr.-Ing. Joachim Rudolph, Gr. 25</i>
11:00 – 11:30	Dateneffiziente, approximative MPC basierend auf neuronalen Netzen mittels parametrischer NLP-Sensitivitäten <i>Lukas Lüken</i> <i>Process Automation Systems, Technische Universität Dortmund, Prof. Dr. Sergio Lucia, Gr. 8</i>	Containment Control linearer Multi-Agenten-Systeme mittels Kontinuumsmodellen <i>Nick Jung</i> <i>Institut für Mess-, Regel und Mikrotechnik, Universität Ulm, Prof. Dr.-Ing. Joachim Deutscher, Gr. 28</i>
11:30 – 12:00	Datengetriebene Oberflächenregelung einer Kaltwalzanlage <i>Christopher Schulte</i> <i>Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery, Gr. 1</i>	Zeitdiskrete dynamische Modellierung geometrisch exakter Balken in absoluten und relativen Variablen <i>Maximilian Herrmann, Paul Kotyczka</i> <i>Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann, Gr. 22</i>

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

14:30 – 16:00	Automatisierungstechnik Sitzungsleitung: Prof. Tobias Kleinert	Regelungstheorie und -technik Sitzungsleitung: Prof. Veit Hagenmeyer
14:30 – 15:00	Design concept for metadata of production data and data processing functions for automated data preparation <i>Wan Li</i> <i>Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Tobias Kleinert, Gr. 1</i>	Stability of Momentum Stochastic Approximation Methods with Applications to Stochastic Control <i>Adrian Redder</i> <i>Department of Electrical Engineering and Information Technology, Automatic Control Group, Universität Paderborn, Prof. Dr. Erdal Kayacan, Gr. 23</i>
15:00 – 15:30	Verifikation von GRAFCET mittels abstrakter Interpretation <i>Aron Schnakenbeck</i> <i>Institut für Automatisierungstechnik, Universität der Bundeswehr Hamburg, Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, Gr. 13</i>	Methodik zur Stabilitätsanalyse in totzeitbehafteten Systemen <i>Tessina H. Scholl, Lutz Gröll</i> <i>Institut für Automation und angewandte Informatik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr. Veit Hagenmeyer, Gr. 17</i>
15:30 – 16:00	Konzept für die Umsetzung von auftragsgesteuerter Produktion <i>Alexander Belyaev</i> <i>Lehrstuhl Integrierte Automation Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich, Gr. 20</i>	Polynomiale Approximationen für datenbasierte Regelung von nichtlinearen Systemen <i>Tim Martin</i> <i>Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer, Gr. 27</i>

16:00 - 16:30 Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle

16:30 – 17:30 Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG

A tutorial introduction to quantum feedback

*Prof. Dr. Pierre Rouchon
(Mines Paris PSL, Frankreich)*

17:30 – 17:45 Vorstellung der neuen Professuren

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, 23. Februar 2024

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Optimale Steuerung & Regelung Sitzungsleitung: Prof. Matthias A. Müller	Beobachter und Schätzer Sitzungsleitung: Prof. Klaus Röbenack
08:30 – 09:00	Time-Freezing für Optimalsteuerungsprobleme mit Zustandssprüngen <i>Armin Nurkanović</i> <i>Lehrstuhl für Systemtheorie, Regelungstechnik und Optimierung, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Prof. Dr. Moritz Diehl, Gr. 10</i>	Ein Entwurfsverfahren zur robusten verteilten Parameterschätzung <i>Nicolai Lorenz-Meyer</i> <i>Fachgebiet Regelungssysteme und Netzleittechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Prof. Dr.-Ing. Johannes Schiffer, Gr. 2</i>
09:00 – 09:30	Konvexe online Optimierung zur Regelung dynamischer Systeme <i>Marko Nonhoff</i> <i>Institut für Regelungstechnik, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. Matthias A. Müller, Gr. 14</i>	Beobachterentwurf für lineare zeitinvariante Mehrgrößensysteme mit unbekanntem Eingangsgroßen <i>Helmut Niederwieser, Markus Reichhartinger</i> <i>Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, Technische Universität Graz, Prof. Dr. techn. Martin Horn, Gr. 7</i>
09:30 – 10:00	Semidefinite Programmierung zur Manipulation akustischer Fallen in Echtzeit <i>Sebastian Zehnter</i> <i>Lehrstuhl für Regelungstechnik in der Ingenieurinformatik, Universität Augsburg, Prof. Dr.-Ing. Christoph Ament, Gr. 19</i>	Algebraische Flachheitsanalyse und nichtlinearer Beobachterentwurf <i>Klemens Fritzsche</i> <i>Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, Technische Universität Dresden, Prof. Dr.-Ing. Klaus Röbenack, Gr. 9</i>

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

10:30 – 12:00 Anwendungen Sitzungsleitung: Prof. Philipp Rostalski		Computer Vision Sitzungsleitung: Prof. Andreas Kugi
10:30 – 11:00	Nichtlineare Regelung von Kompressionskältemaschinen <i>Ricus Husmann</i> <i>Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Rostock, Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann, Gr. 24</i>	Domänenadaptation für feingranulare Fahrzeugklassifikation mittels Domain-Adversarial-Learning <i>Stefan Wolf</i> <i>Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie & Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer, Gr. 18</i>
11:00 – 11:30	Physiologische Regelung der künstlichen Beatmung Frühgeborener <i>Valerie Pfannschmidt, André Stollenwerk</i> <i>Lehrstuhl Informatik 11, RWTH Aachen University, Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski, Gr. 1</i>	Enhancing Visual Inspection Planning through Robotic Vision Synergy <i>Vanessa Staderini, Tobias Glück</i> <i>Automation and Control Institute, Technische Universität Wien & Austrian Institute of Technology, Prof. Dr.techn. Andreas Kugi, Gr. 29</i>
11:30 – 12:00	Werkzeuge und Methoden für die Freigabe von hochautomatisierten Funktionen in der Medizintechnik <i>Carlotta Hennigs</i> <i>Institut für Medizinische Elektrotechnik, Universität zu Lübeck, Prof. Dr.-Ing. Philipp Rostalski, Gr. 23</i>	

12:00 – 12:45	Abschluss im Haupttagungsraum EG Prämierung des besten Vortrags durch Dr.-Ing. Simon Olma, IAV GmbH, Gifhorn Aufruf für Boppard 2025
----------------------	--

12:45 – 13:45 Mittagessen im Bellevue Rheinhotel

13:45 **Ende des Kolloquiums**

Modellprädikative Gesamtregelung für orbitale Robotersysteme

Peter Kötting

Institut für Systemdynamik und
Regelungstechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Peter.Koetting@dlr.de

Schlüsselwörter: Modellprädikative Regelung, Überaktuierte Robotik, Orbitale Robotik, Autonome Systeme

On-Orbit-Servicing (OOS) ist eine Schlüsseltechnologie für die weitere Erforschung und Nutzung des Weltraums. Der Einsatz robotischer Systeme im OOS ermöglicht zusätzliche Missionaufgaben wie die Inspektion, das Auftanken, die Aufrüstung, oder die Reparatur von Satelliten. Weitere Einsatzszenarien sind in die Entsorgung von Weltraumschrott sowie die Wartung und der Bau großer orbitaler Strukturen. Ein Space Manipulator System (SMS) besteht hierbei, wie in Abbildung 1 dargestellt, typischerweise aus einem Raumfahrzeug, das mit einem robotischen Manipulator ausgestattet ist. Dementsprechend sind SMS überaktuierte Systeme, die zusätzlich zu den Gelenkmotoren translatorische und rotatorische Bewegungen durch die Aktuatoren des Raumfahrzeugs, u.a. durch Triebwerke und Schwungräder, erzeugen können.

Gesamtregelungsansätze (Englisch: Combined Control) für SMSs kommandieren alle verfügbaren SMS-Aktoren. Aktuelle Ansätze regeln sowohl die Basis als auch den Manipulator explizit [1]-[4], sodass eine Trajektorienplanung für alle Systemfreiheitsgrade benötigt wird. Dies führt zu offenen Problemen: (i) Zustandsbeschränkungen werden ausschließlich für die Referenzwerte erfüllt; (ii) Eingangsbeschränkungen werden nicht

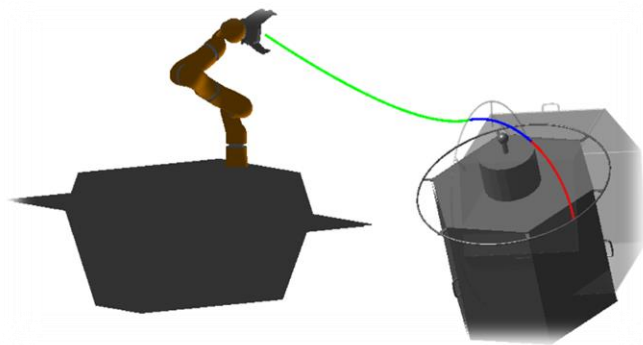


Abbildung 1: On-Orbit Servicing Szenario mit einem Space Manipulator System (links) und einem Target-Satelliten (rechts)

explizit berücksichtigt; (iii) eine Trajektorienplanung, die die Dynamik des Robotersystems mit System- und Sicherheitsbedingungen über die gesamten Missionsphasen berechnet, ergibt ein nichtlineares Optimierungsproblem mit sehr hohem Rechenaufwand, das teilweise offline gelöst werden muss und nur eine begrenzte Menge von Geometrien und Zuständen des spinrenden/taumelnden Target-Satelliten abbildet [5].

In dieser Arbeit wird das Regelungsproblem aus einer anderen Perspektive formuliert, indem nur eine Endeffektor-Trajektorie angenommen wird. Dementsprechend wird die Komplexität der Optimierung von der Trajektorienplanung auf das Regelungssystem verlagert. Durch die Verwendung einer Modellprädikativen Regelung (Englisch: Model Predictive Control, MPC)

wird für einen beschränkten Prädiktionshorizont optimiert, was eine Echtzeitlösung ohne Vorausberechnung der gesamten Missionsphasen ermöglicht. Diese Arbeit formuliert einen Ansatz mit einer nichtlinearen *Output Tracking MPC*, welcher eine Abwandlung des MPC Konzeptes [6] darstellt. Entsprechend wird der Referenzpose des Endeffektors als Output gefolgt. Die Allokierung der Referenzzustände wird mittels *Artificial Reference* vorgenommen, um so eine optimale Nutzung der Überaktuierung zu erreichen. System- und Sicherheitsbeschränkungen, wie Kollisionsvermeidung, Sichtbereich von Sensoren und Gelenkwinkelbegrenzungen, werden explizit durch Zustandseinschränkungen berücksichtigt. Aktuatorbeschränkungen, wie Minimal- und Maximalschub der Triebwerke und die Maximalbeschleunigung der Gelenkmotoren werden explizit als Eingangsbeschränkungen formuliert.

Es wird eine neuartige Zeitskalentrennung der SMS-Dynamik vorgenommen, indem die schnelle Gelenkdynamik von der Gesamtsystembeschreibung entkoppelt wird. Basierend darauf wird die MPC basierte Gesamtregelung als oberste Regelungsschicht mit einer untergeordneten Gelenkraumregelung entworfen. Der Vorteil dieser Kaskadierung besteht darin, dass die Regler in zwei verschiedenen Taktraten ausgewertet werden können, um den Anforderungen der Hardware von Satelliten (z.B. 10 Hz Taktrate) und Manipulatoren (z.B. 1000 Hz Taktrate) gerecht zu werden. Außerdem wird die Zuweisung von ausreichend Rechenzeit für das Optimierungsproblem der MPC ermöglicht. Die Leistung, Flexibilität und Zuverlässigkeit des Verfahrens werden in den sicherheitskritischsten Phasen mittels Simulation aufgezeigt. Zu diesen sicherheitskritischen Phasen gehören das Annähern des SMS an ein nicht-kooperatives, taumelndes Raumfahrzeug, das Stabilisieren desselben sowie das sichere Entfernen des SMS beim Auftreten sicherheitskritischer Ereignisse. Als nächster Schritt ist eine Hardware-in-the-Loop Simulation auf robotischen Testanlagen des DLR geplant.

Literatur

- [1] F. Aghili, "Coordination control of a free-flying manipulator and its base attitude to capture and detumble a noncooperative satellite," *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, 2009, pp. 2365-2372.
- [2] M. J. Reiner, "Combined control for active debris removal using a satellite equipped with a robot arm", *Proceedings for the GNC 2017, 10th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems*, Salzburg, Austria, 2017.
- [3] E. Papadopoulos and S. Dubowsky, "Coordinated manipulator/spacecraft motion control for space robotic systems," *Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, USA, 1991, pp. 1696-1701 vol.2.
- [4] A. M. Giordano, C. Ott and A. Albu-Schäffer, "Coordinated Control of Spacecraft's Attitude and End-Effector for Space Robots," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 2108-2115, 2019.
- [5] R. Lampariello and G. Hirzinger, "Generating feasible trajectories for autonomous on-orbit grasping of spinning debris in a useful time," *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 2013, pp. 5652-5659.
- [6] R. Soloperto, J. Köhler and F. Allgöwer, "A Nonlinear MPC Scheme for Output Tracking Without Terminal Ingredients," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 68, no. 4, pp. 2368-2375, 2023.

Automatisierte Vor-Ort-Montage von Holzbauteilen mittels zweier hydraulischer Großraummanipulatoren

Anja P. R. Lauer

Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart
anja.lauer@isys.uni-stuttgart.de

Oliver Sawodny

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

Schlüsselwörter: Baurobotik, automatisierte Montage, kraftgeregelte Montage

Die Produktivität des Bausektors stagniert seit Jahren bei gleichzeitig wachsender Nachfrage nach neuem Wohnraum. Die Automatisierung der Vor-Ort-Montage kann die Produktivität steigern. Die Montage möglichst großer Bauteile durch Bauroboter bietet eine besondere Chance zur Effizienzsteigerung. Solche Bauteile können beispielsweise aus Holz gefertigt sein, welches ein hohes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht hat, sodass Holzbauteile im Verhältnis zur Nutzlast der Bauroboter relativ groß sein können. Holz ist zudem ein nachhaltiger Baustoff. Aus diesen Gründen wird als Anwendungsbeispiel ein Bausystem mit Holzbauteilen mittlerer Nutzlast betrachtet.

Um das Ziel der Entwicklung eines automatisierten Vor-Ort-Montage-Prozesses zu erreichen, kommen zwei hydraulische Großraummanipulatoren zum Einsatz. Ein Manipulator greift und platziert Holzbauteile mit einem Vakuumgreifer, während der andere einen neuartigen Verspann- und Schraubeffektor positioniert, welcher die Bauteile per Kreuzverschraubung verbindet. Es werden alle Schritte kurz dargestellt, von der Automatisierung zweier Großraummanipulatoren mit Endeffektoren, über das Sensorkonzept, die Modellierung, Zustandsschätzung, Pfadplanung anhand der Building Information Modeling (BIM) Daten, Trajektoriengenerierung, Positions- und Orientierungsregelung der Werkzeugspitze in Aufgabenraumkoordinaten bis hin zu einem kraftgeregelten Montagekonzept.



Abbildung 1: Baustelle der *livMatS Biomimetic Shell* in Freiburg mit robotischem Totalstationsnetzwerk, Aufnahmetisch, und zwei Vor-Ort-Montagemanipulatoren.

Zur Positions- und Orientierungsregelung werden die vom Zustandsschätzer geschätzte Orientierung [1] sowie genaue Positionsmessungen von einem robotischen Totalstationsnetzwerk verwendet. Die inverse differentielle Kinematik des Manipulators wird in Echtzeit mithilfe eines beschränkten quadratischen Optimierungsproblems gelöst [2]. Experimente zeigen, dass die Positioniergenauigkeit im Millimeterbereich liegt [2]. Die positions- und orientierungsgeregelte Vor-Ort-Montage von Holzbauteilen wird am Gebäudedemonstrator *livMatS Biomimetic Shell* in Freiburg praktisch demonstriert [3]. Die Ergebnisse zeigen das Potential in Bezug auf Produktivität und Qualität auf [3].

Um Positionierungsfehler auszugleichen, welche auf die Abweichung zwischen der realen Situation auf der Baustelle und dem BIM-Modell, mit dem die Pfade geplant werden, sowie auf die unsichere Bestimmung der Manipulatorpose in Referenz zur Baustelle zurückzuführen sind, wird ein kraftgeregelter Montageprozess entwickelt [4]. Dazu wird das Bausystem angepasst, indem mechanische Anschläge in allen Montagerichtungen vorgesehen werden. Mit der entwickelten Anfahrstrategie und einer direkten Kraftregelung wird das vollautomatisierte Einsetzen von Holzbauteilen erfolgreich in praktischen Versuchen demonstriert.

Literatur

- [1] A. P. R. Lauer, O. Lerke, A. Gienger, V. Schwieger und O. Sawodny, „State Estimation with Static Displacement Compensation for Large-Scale Manipulators“. In: *Proceedings of the 2023 IEEE/SICE International Symposium on System Integrations (SII)*, Atlanta, GA, USA, 2023.
- [2] A. P. R. Lauer, O. Lerke, B. Blagojevic, V. Schwieger and O. Sawodny, „Tool center point control of a large-scale manipulator using absolute position feedback“. In: *Control Engineering Practice*, vol. 131, pp. 105388, 2023.
- [3] A. P. R. Lauer, E. Benner, T. Stark, S. Klassen, S. Abolhasani, L. Schroth, A. Gienger, H. J. Wagner, V. Schwieger, A. Menges and O. Sawodny, „Automated on-site assembly of timber buildings on the example of a biomimetic shell“. In: *Automation in Construction*, vol. 156, pp. 105118, 2023.
- [4] A. P. R. Lauer, T. Schürmann, A. Gienger, O. Sawodny, „Force-Controlled On-Site Assembly using Pose-Dependent Stiffness of Large-Scale Manipulators“. In: *Proceedings of the 2023 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Auckland, New Zealand.

Konzeptionelle Erweiterung bestehender Informationsmodelle für PCC Modelle in Soft Robotics

Linus Witucki

Vernetzte Sichere Automatisierungstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
linus.witucki@kit.edu

Prof. Mike Barth

Vernetzte Sichere Automatisierungstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
mike.barth@kit.edu

Schlüsselwörter: Robotik, Soft-Robotik, Informationsmodelle, URDF

Im Kontext einer modularen, flexiblen und wandlungsfähigen Produktion liegt ein wesentlicher Forschungsfokus auf dem Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Hierbei führen Mensch und Roboter parallel und physisch gekoppelt den gleichen Prozessschritt aus. Es werden die Vorteile des Roboters, Bewegungen schnell, präzise und wiederholt auszuführen, mit der Flexibilität und Kreativität des Menschen verbunden. Um den steigenden Sicherheits-Anforderungen der MRK zukünftig noch besser begegnen zu können, wird aktuell ein neuer Robotertyp, ein sogenannter Soft Robot, erforscht. Dieser wird aus weichen Materialien, wie z.B. Stoff oder Silikon gefertigt und pneumatisch angesteuert. Dadurch sind sie „by Design“ inhärent sicher für die physische Kopplung von Mensch und Roboter (siehe *Abbildung 1*: Soft Robotik Nachgiebigkeit). [1]

Um das Engineering von Soft Robots im Kontext von Automatisierung, Digitalen Zwillingen und Cyber-Physischen Systemen zu ermöglichen werden Informationsmodelle benötigt, die eine nahtlose Integration der neuartigen Roboter ermöglichen. Ein Informationsmodell kann beispielsweise verwendet werden um Simulationen für Erreichbarkeitsanalysen oder Trainingsszenarien zu automatisieren. Aktuelle Informationsmodelle, wie das Unified Robot Description Format (URDF), das Simulation Description Format (SDF) und die Universal Scene Description (USD) [8], sind jedoch nicht geeignet die kontinuierliche Krümmung von kontinuierlichen Robotern der Soft Robotik zu integrieren. URDF basiert auf starren Verbindungen (sogenannten Links) und punktförmigen Gelenken (sogenannten Joints) mit unendlicher Krümmung, um den Roboterarm zu beschreiben [2]. Da Soft Robots ein unendlich-dimensionales System darstellen [3], stößt die Beschreibung eines Soft Robots mit herkömmlichen Methoden schnell an Grenzen. Die Approximation des Verhaltens von Soft Robots durch Links und Joint mittels URDF ist lediglich in Form der sogenannten Pseudo-Rigid-Bodys Modellierung möglich. Bei dieser Art der Modellierung wird die Systemdimension reduziert, indem der kontinuierliche Roboter stückweise durch starre Links und Joints ersetzt wird [4]. Eine weitere Methode zur Dimensionsreduktion ist die Annahme konstanter Randbedingungen, wie beispielsweise einer segmentweisen konstanten Krümmung. Diese sogenannte Piecewise Constant Curvature (PCC) Modellierung vereinfacht die Berechnung der Form des Roboters erheblich [5] und wird bereits für die Steuerung von Soft Robots verwendet [6]. Im vorliegenden Beitrag werden die notwendigen Anforderungen und Grundlagen für die Entwicklung eines Informationsmodells auf Basis von URDF abgeleitet mithilfe dessen Soft Robots in das modellbasierte Engineering integriert werden können. Ein erster Ansatz für die Entwicklung eines Soft Robot Informationsmodells liegt in der Piece Wise Constant Curvature (PCC) Modellierung [7]. Wie in *Abbildung 2* dargestellt weist ein Segment eines Kontinuummanipulators eine reale Länge l und durch die PCC Modellierung eine konstante Krümmung κ auf. Durch den konstruktiven Aufbau des Soft Robots sind die Segmente wie oben beschrieben nachgiebig und können durch ein Masse-Feder-Dämpfer System approximiert werden.

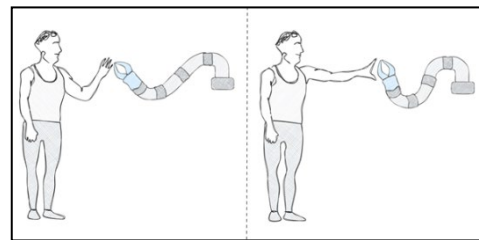


Abbildung 1: Soft Robot Nachgiebigkeit

Dementsprechend lassen sich näherungsweise konstante Parameter der Steifigkeit k und Dämpfung b des Segmentes ermitteln [10].

$$l_{PCC} = l, \kappa_{PCC} = \kappa(t), k_{PCC} = k, b_{PCC} = b$$

Für die Links und Joints eines herkömmlichen Roboters lassen sich ebenfalls die Randbedingungen für ein Länge l und Krümmung κ definieren.

$$l_{Joint} = 0, \kappa_{Joint} \rightarrow \infty, \quad l_{Link} = l, \kappa_{Link} = 0$$

Es lassen sich somit Link und Joint nicht wie im URDF explizit, sondern lediglich implizit unterscheiden. Für die Steifigkeit und Dämpfung von Joint und Link ergeben sich folgende Parameter.

$$k_{Joint} \rightarrow \infty, b_{Joint} = 0, \quad k_{Link} \rightarrow \infty, b_{Link} = 0$$

Über diese und weitere konstruktiven Parameter lassen sich PCC modellierte Soft Robots abbilden, ohne herkömmliche Knickarmroboter auszuschließen. In einer weiteren Betrachtung kann die Beschränkung der konstanten Krümmung durch eine polynomiale Beschreibung erweitert werden. Im Beitrag werden die notwendigen Entwicklungsstufen und Modellierungselemente systematisch erläutert und bereits erste Varianten der Integration in ein neues Unified SOFT-Robot Description Format (US-RDF) Informationsmodell vorgestellt.

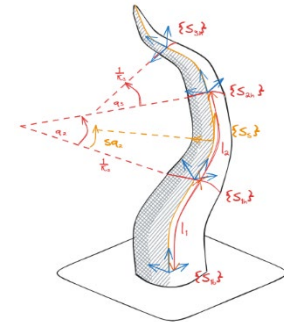


Abbildung 2: PCC Modellierung Soft Robot Kontinuumsmanipulator

Literatur

- [1] A. Das & M. Nabi. „A review on Soft Robotics: Modeling, Control and Applications in Human-Robot interaction“. In: *2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, S. 306-311, 2019.
- [2] A. Martinez., E. Fernandez, A. Mahtani., and L. S. Crespo., „Learning ROS for Robotics Programming“. *Packet Publishing Ltd.*, 2015.
- [3] V. Venkiteswaran, J. Sikorski, and S. Misra, „Shape and contact force estimation of continuum manipulators using pseudo rigid body models“. in: *Mech. Mach. Theory*, vol. 139, S. 34-45, 2019.
- [4] S. M. H. Sadati, S. E. Naghibi, L. da Cruz and C. Bergeles. „Reduced order modeling and model order reduction for continuum manipulators: an overview“. in: *Frontiers in Robotics and AI*, S. 10, 2023.
- [5] H. Cheng, H. Liu, X. Wang and B. Liang. „Approximate piecewise constant curvature equivalent model and their application to continuum robot configuration estimation“. In: *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, S. 1929-1936, 2020.
- [6] R. J. Webster, & B. A. Jones. „Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review“. In: *The International Journal of Robotics Research*, 29(13), S. 1661-1683, 2010.
- [7] Webster, Robert J., und Bryan A. Jones. „Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review“. In: *The International Journal of Robotics Research*, Bd. 29, Nr. 13, S. 1661-83, 2010.
- [8] D. Tola and P. Corke. „Understanding URDF: A survey based on user experience“, 2023.
- [9] V. Falkenhahn, T. Mahl, A. Hildebrandt, R. Neumann, & O. Sawodny. „Dynamic Modeling of Bellows-Actuated Continuum Robots Using the Euler–Lagrange Formalism“. In: *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6), S. 1483-1496, 2015.
- [10] Della Santina, Cosimo, u. a. „Model-Based Control of Soft Robots: A Survey of the State of the Art and Open Challenges“. In: *IEEE Control Systems Magazine*, Bd. 43, Nr. 3, S. 30–65, 2023.

Unsicherheitsbewertete Methoden für die Online-Identifikation von Batteriesystemen

Marit Lahme

Abteilung Verteilte Regelung in Vernetzten Systemen, Department für Informatik
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
marit.lahme@uni-oldenburg.de

Andreas Rauh

Abteilung Verteilte Regelung in Vernetzten Systemen, Department für Informatik
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
andreas.rauh@uni-oldenburg.de

Schlüsselwörter: Echtzeitidentifikation, intervallbasierte Zustandsschätzung, stochastische Zustandsschätzung, Unsicherheitsmodellierung, Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien werden heutzutage in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Neben der Verwendung in der Unterhaltungselektronik werden sie in den letzten Jahren zunehmend im Mobilitätssektor als Energiespeicher in elektrischen und hybriden Antriebssystemen sowie im Energiesektor in groß angelegten Energiespeicherlösungen verwendet, um erneuerbare Energien als Primärregelleistung in Stromnetzen verfügbar zu machen. Für den sicheren und effizienten Betrieb dieser Batteriesysteme ist es notwendig, das dynamische Lade- und Entladeverhalten einzelner Batteriezellen zu berücksichtigen, um Überladung und Tiefenentladung zu vermeiden. Beides kann zu einer irreversiblen Schädigung der Batteriezellen führen. Des Weiteren können mit Hilfe des Wissens über das dynamische Verhalten Alterungseffekte identifiziert werden. Diese Degradations- und Alterungseffekte können zu einem Ausfall einzelner Batteriezellen und zu einem so genannten „thermal runaway“ führen.

Das dynamische Lade- und Entladeverhalten von Lithium-Ionen-Batterien kann mit Hilfe von elektrischen Ersatzschaltbildern beschrieben werden. Diese Modelle bestehen aus einer endlichen Anzahl von RC-Gliedern sowie Serienwiderständen und einer ladungszustandsabhängigen Spannungsquelle, die die Leerlaufspannung darstellt. In klassischen Ansätzen zur Zustandsschätzung werden die Systemparameter experimentell ermittelt. Sie unterliegen jedoch alterungs- und temperaturbedingten Schwankungen. Die Alterung von Batteriezellen führt zu einem Verlust der Gesamtkapazität, einer Erhöhung des Ohm'schen Innenwiderstands und zu Änderungen der Lade-/Entladeeffizienz sowie zu Änderungen der Zeitkonstanten. Auch die Zelltemperatur beeinflusst das Lade- und Entladeverhalten der Batteriezelle. Ersteres kann mit Hilfe eines erweiterten Zustandsvektors geschätzt werden. Nichtlineare Abhängigkeiten der Schaltungselemente vom Ladezustand oder anderen Einflussfaktoren können mit diesem Ansatz jedoch nicht direkt identifiziert werden. Im Gegensatz zu klassischen Ansätzen zur Ermittlung der Leerlaufspannungskennlinie entfallen bei der Echtzeitidentifikation die Relaxationszeiten. Die Zeitspanne des Identifikationsprozesses kann daher drastisch reduziert werden.

Im Rahmen des Vortrags werden ein zweistufiger intervallbasierter Identifikationsansatz [1] und ein zweistufiger stochastischer Identifikationsansatz [2] zur Schätzung der nichtlinearen Abhängigkeit der Leerlaufspannung vom Ladezustand vorgestellt. Abbildung 1 zeigt schematisch den intervallbasierten Ansatz. Dieser basiert auf der Verwendung eines Intervallbeobachters zur Schätzung von Ober- und Unterschranken für die Zustandsvariablen und der Anwendung eines Contractor-Ansatzes zur Identifikation der Leerlaufspannungskennlinie. Im

stochastischen Fall wird das elektrische Ersatzschaltbild um eine Spannungsquelle erweitert, die die Abweichungen zwischen dem realen Systemverhalten und dem Systemmodell darstellt. Die Zustandsvariablen sowie die Modellabweichungen werden mit Hilfe eines Unscented Kalman Filters (UKF) geschätzt. Die geschätzten Modellabweichungen werden anschließend genutzt, um das a priori Wissen über die Leerlaufspannungskennlinie zu verbessern. Sowohl der intervallbasierte Ansatz als auch der stochastische Ansatz ermöglichen die Bewertung der Schätzgüte über die Intervallbreiten beziehungsweise die ermittelten Kovarianzmatrizen.

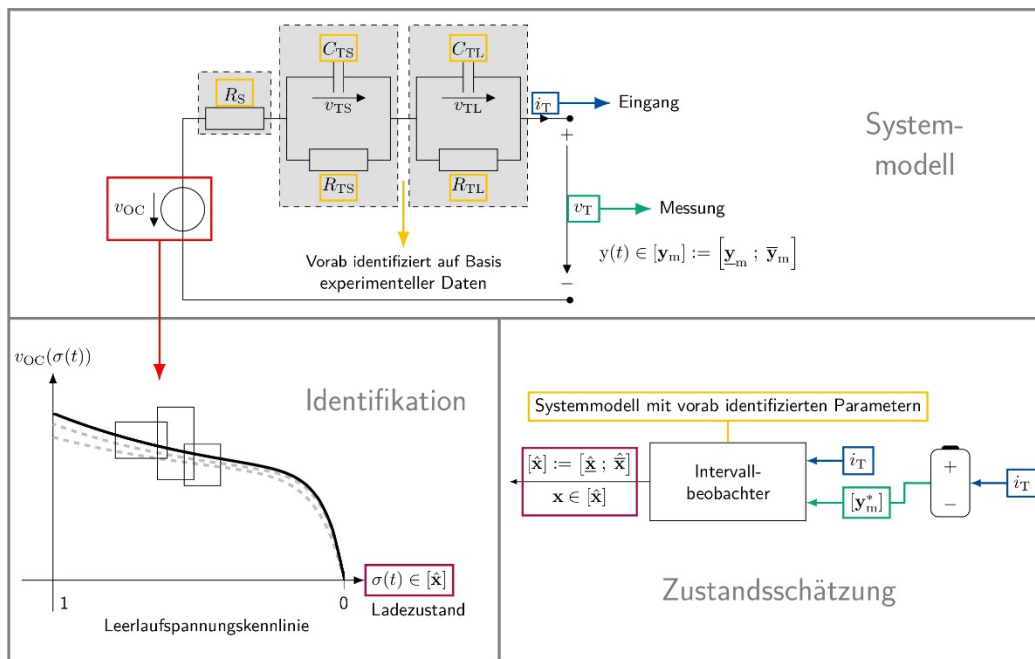


Abbildung 1: Intervallbasierte Identifikation der Leerlaufspannungskennlinie einer Batteriezelle.

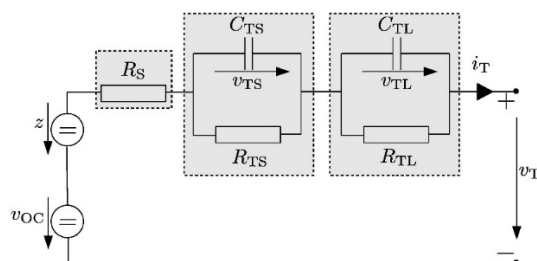


Abbildung 2: Elektrisches Ersatzschaltbild, erweitert um eine Störspannungsquelle. [2]

Literatur

- [1] M. Lahme und A. Rauh. „Set-Valued Approach for the Online Identification of the Open-Circuit Voltage of Lithium-Ion Batteries“. In: *Special Issue of the 13th Summer Workshop on Interval Methods (SWIM)*. Acta Cybernetica. Zur Veröffentlichung angenommen. 2024.
- [2] M. Lahme und A. Rauh. „Combination of Stochastic State Estimation with Online Identification of the Open-Circuit Voltage of Lithium-Ion Batteries“. In: *Proc. of the 1st IFAC Workshop on Control of Complex Systems (COSY)*. IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 40, pp. 97–102. 2022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2023.01.055.

Closed-loop Identification of a Grate Incinerator using Bayesian Optimization for Selecting Model Inputs and Structure

Johannes Lips

IFK, Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme
Universität Stuttgart
johannes.lips@ifk.uni-stuttgart.de

Hendrik Lens

IFK, Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme
Universität Stuttgart
hendrik.lens@ifk.uni-stuttgart.de

Keywords: System identification, Bayesian optimization, Grate incineration

The creation of low-order dynamic models for complex industrial systems is complicated by disturbances and limited sensor accuracy. In this presentation, a system identification procedure that uses machine learning methods and process knowledge to robustly identify low-order closed-loop models is presented. Using Bayesian optimization, the algorithm ranks and selects inputs from the available sensor data and chooses the model structure. This results in accurate models with low complexity while avoiding overfitting. The method is schematically presented in Figure 1.

The method is applied and validated using real measurement data of an industrial municipal solid waste incineration plant. These types of plants are known for their strong disturbances coming from fuel composition fluctuations. The obtained models give excellent predictions and confidence intervals for the main process parameters. The presented method shows great potential for the identification of over-actuated systems or disturbed systems with many sensors.

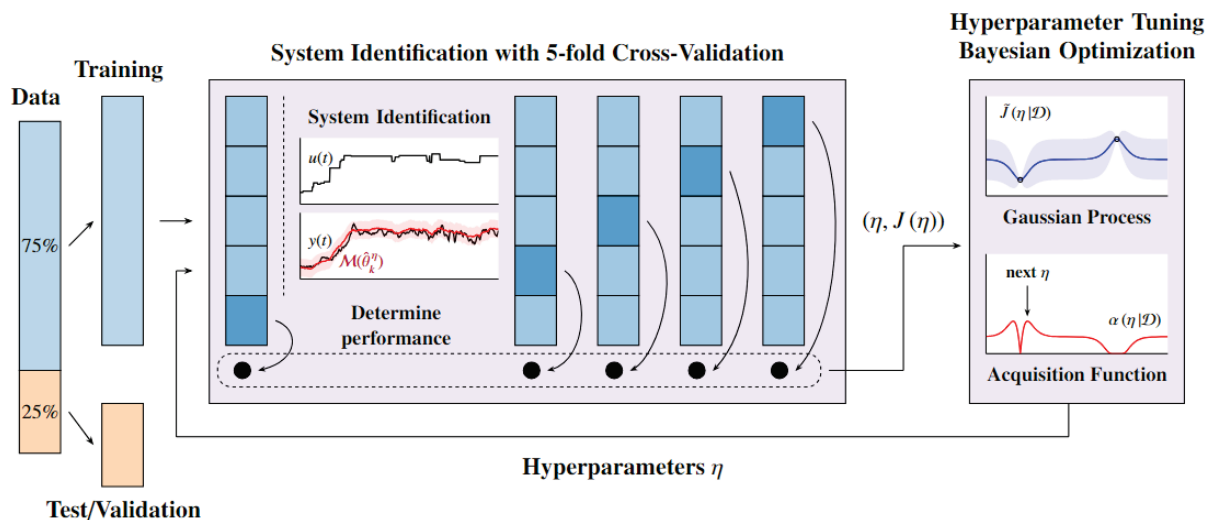


Figure 1: Overview of the system identification procedure with cross-validation and Bayesian optimization for hyper parameter tuning.

References

- [1] J. Lips, S. DeYoung, M. Schönsteiner, H. Lens. „Closed-loop Identification of a MSW Grate Incinerator using Bayesian Optimization for Selecting Model Inputs and Structure”. Submitted to: *Control Engineering Practice*.

Verbesserung der Größe und Genauigkeit der Virtuellen Sensoren

Improving the Size and Accuracy of Soft Sensors

Xinrui Gao

Automation Engineering
TU Ilmenau
xinrui.gao@tu-ilmenau.de

Yuri A.W. Shardt

Automation Engineering
TU Ilmenau
yuri.shardt@tu-ilmenau.de

Keywords: soft sensors, information bottleneck, modelling

In modern industrial processes, some critical variables, e.g., indicators of product quality and pollutant emission, are desired to be monitored and controlled in real time. However, these critical variables are often found in situations, where the disturbance is unknown, and themselves are hard to measure due to the limitation of measuring technology and the hostile environment [1]. In these cases, the effect of disturbance cannot be compensated by feedforward control, nor suppressed by feedback control, and thus, the critical variables cannot be controlled. A typical solution to this conundrum is to take offline sample analyses in the laboratory and use them for process adjustment. This method, however, relies heavily on experience and knowledge, and the control policy may become inefficient or even invalid due to significant delays that can occur between sampling and laboratory analysis [2].

A more effective solution to this problem is to build inferential models (*a.k.a.*, soft sensors) to infer unmeasurable critical variables from easy-to-measure secondary variables [3]. Soft sensors can be categorised into two types: model-based and data-driven. Model-based soft sensors are built using the first principles of the process [4]. Data-driven methods are suitable for complex processes whose analytic models are impossible to obtain, and thus more popular [5]. However, one critical issue of data-driven soft sensors is that introducing as much information as possible while modelling, which is an irrepressible tendency in the big-data era, without a careful investigation will deteriorate the inferential performance. In this work, a parsimonious and compact soft sensor is developed based on information bottleneck (IB), which is a trade-off between compression of easy-to-measure secondary variables and inferential accuracy of critical variables, and is formulated as [6]

$$\min_{p(z|x)} \mathcal{L} = I(X; Z) - \beta I(Z; Y) \quad (1)$$

where $p(z|x)$ is the mapping that needs to be found, X is the secondary variables that are going to be compressed, Z is the resulting representations, Y is critical variables, $I(\cdot; \cdot)$ is the mutual information (MI) between the corresponding variables, and β is the trade-off coefficient for the two factors. An in-depth investigation indicates that Equation (1) forces the soft sensor to have a smaller size and better accuracy, which is a desired feature for soft sensors. Furthermore, it is very interesting that theoretical justification shows that decreasing the size of the model by culling irrelevant information improves the inferential accuracy. Hence, the two trade-off factors in Equation (1) are mutually reinforcing rather than weakening in terms of improving soft sensing performance.

The proposed soft sensor is used to infer the sulphur-dioxide (SO₂) concentration in the tail gas of a sulphur recovery unit (SRU), of which the details can be found in [7]. The data set contains 10,080 samples.¹ It is split into a training set, a validation set, and a test set that consist of respectively 60%, 20%, and 20% of the total data. Two soft sensors are built. One

¹ It can be downloaded from <https://extras.springer.com/?query=978-1-84628-479-3>

based on the proposed method is called the variational-information-bottleneck (VIB) soft sensor. The other one is used as the baseline model for comparison, which, for fairness, has the same structure and hyperparameters as the VIB soft sensor except for the lack of an IB module. It is shown in Table 1 that adding the IB module improves the coefficient of determination (R^2) from 55.6% to 80.9% and decreases the mean squared error (MSE) from 0.039 to 0.026. This large improvement can also be seen in Figure 1. On the left, the curves show that the proposed soft sensor tracks the real values more accurately than the baseline, especially in regions where the quality variable has abrupt variations. The same conclusion can be drawn from parity plots shown in the right subfigure, where the VIB is closer to the ideal behaviour.

Table 1. Performance of soft sensors on the test dataset

Metrics	Baseline soft sensor	VIB soft sensor
R^2	55.6%	80.9%
MSE	0.039	0.026

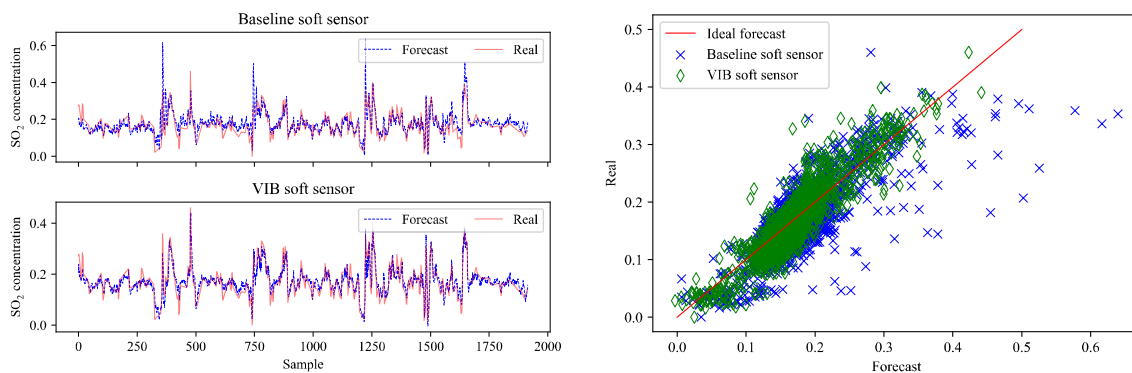


Figure 1. Soft sensor of SO₂ concentration: (left) curves of real value versus forecast; (right) parity plots

References

- [1] Warne, K., Prasad, G., Rezvani, S., & Maguire, L. (2004). Statistical and computational intelligence techniques for inferential model development: a comparative evaluation and a novel proposition for fusion. *Engineering applications of artificial intelligence*, 17(8), 871-885.
- [2] Joseph, B. (1999, June). A tutorial on inferential control and its applications. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)* (Vol. 5, pp. 3106-3118). IEEE.
- [3] Joseph, B., & Brosilow, C. B. (1978). Inferential control of processes: Part I. steady state analysis and design. *AIChE Journal*, 24(3), 485-492.
- [4] Chéruiy, A. (1997). Software sensors in bioprocess engineering. *Journal of biotechnology*, 52(3), 193-199.
- [5] Souza, F. A., Araújo, R., & Mendes, J. (2016). Review of soft sensor methods for regression applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 152, 69-79.
- [6] Tishby, N., Pereira, F. C., & Bialek, W. (1999, September). The information bottleneck method. In *The 37th annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, pp. 368-377.
- [7] Fortuna, L., Rizzo, A., Sinatra, M., & Xibilia, M. G. (2003). Soft analyzers for a sulfur recovery unit. *Control Engineering Practice*, 11(12), 1491-1500.

Verteilte prädiktive Regelung nichtlinearer Systeme in Echtzeit

Gösta Stomberg

Alexander Engelmann

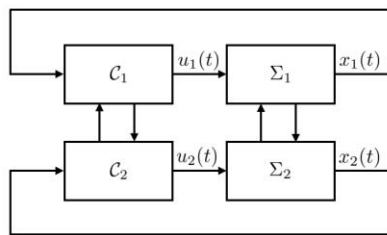
Timm Faulwasser

{goesta.stomberg,alexander.engelmann,timm.faulwasser}@tu-dortmund.de
Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft
Technische Universität Dortmund

Schlüsselwörter: Verteilte nichtlineare modellprädiktive Regelung, dezentrale Optimierung

Verteilte Algorithmen und Multi-Agenten-Ansätze sind für kooperierende Regelungen cyber-physischer Systeme unerlässlich. Mögliche Anwendungsbereiche sind beispielsweise Energiesysteme oder vernetzte autonome Fahrzeuge [1-3]. Mithilfe moderner Kommunikationstechnologien stimmen die Regler der einzelnen Subsysteme die Stellgrößen kooperativ aufeinander ab und ermöglichen dadurch einen effizienten Betrieb des Gesamtsystems. Von besonderem Interesse für cyber-physische Systeme sind neben verteilten Zustandsreglern [4] modellprädiktive Ansätze (engl. Model Predictive Control – MPC), welche als zentralisierte Verfahren für lineare und nichtlineare Mehrgrößensysteme mit Beschränkungen in der Industrie etabliert sind. Der Entwurf verteilter MPC Schemata kann mit oder ohne zentrale Koordination erfolgen und je nach Verfahren kommunizieren die Subsysteme einmalig oder mehrfach in jedem Abtastintervall miteinander [5].

Abbildung 1 illustriert einen weit verbreiteten Ansatz, um die prädiktive Kooperation zwischen Subsystemen zu ermöglichen. Dabei wird im Entwurf ein zentralisiertes Optimalsteuerungsproblem für das Gesamtsystem formuliert, welches zur Laufzeit des Reglers in jedem Abtastschritt iterativ mittels dezentraler Optimierungsalgorithmen gelöst wird. Ein entscheidender Vorteil solch kooperativer verteilter Regler besteht darin, dass die hohe Performanz zentralisierter MPC Schemata realisierbar ist, wenn das zentralisierte Problem hinreichend genau und in Echtzeit gelöst werden kann. Für konvex-quadratische Probleme erzielt die Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) in Simulationen und Versuchen häufig eine hohe Regelgüte [6,7]. Für lineare Systeme ohne Beschränkungen kann die Stabilität verteilter MPC-Regler mit Hilfe passgenauer Optimierungsverfahren garantiert werden, welche stets zulässige Stellgrößen erzeugen [8]. Für ADMM hingegen erschwert die etwaige Unzulässigkeit der Iterate die Stabilitätsanalyse [9] und wird üblicherweise über eine zusätzliche Einschränkung der Restriktionen berücksichtigt [10]. Für nicht-konvexe Probleme, die quasi zwangsläufig bei der prädiktiven Regelung nichtlinearer Systeme auftreten, gibt es jedoch keine system-theoretisch sinnvollen Konvergenzgarantien für ADMM. Daher können für nichtlineare Systeme Garantien über das Verhalten des geschlossenen Regelkreises bislang nur mit Hilfe von vergleichsweise starken Konvergenzannahmen an ADMM gegeben werden [11].



Kooperativer MPC-Regler

Implementierung



Optimierungsproblem für Regler C_1

$$\begin{aligned} \min_{x_1, u_1, \tilde{x}_2} J_1(x_1, u_1, \tilde{x}_2) \\ \text{u.d.N. } x_1^{k+1} = f_1(x_1^k, u_1^k, \tilde{x}_2^k) \quad \forall k \in \mathbb{I}_{[0, N-1]} \\ x_1^0 = x_1(t) \\ (x_1^k, \tilde{x}_2^k) \in \mathbb{X}_{12}, u_1^k \in \mathbb{U}_1 \quad \forall k \in \mathbb{I}_{[0, N]} \end{aligned}$$

$$\updownarrow x_1 - \tilde{x}_1 = 0, x_2 - \tilde{x}_2 = 0$$

Optimierungsproblem für Regler C_2

$$\begin{aligned} \min_{x_2, u_2, \tilde{x}_1} J_2(x_2, u_2, \tilde{x}_1) \\ \text{u.d.N. } x_2^{k+1} = f_2(x_2^k, u_2^k, \tilde{x}_1^k) \quad \forall k \in \mathbb{I}_{[0, N-1]} \\ x_2^0 = x_2(t) \\ (x_2^k, \tilde{x}_1^k) \in \mathbb{X}_{21}, u_2^k \in \mathbb{U}_2 \quad \forall k \in \mathbb{I}_{[0, N]} \end{aligned}$$

Dezentrale Optimierung

Abbildung 1: Implementierung kooperativer prädiktiver Regelungen mithilfe dezentraler Optimierungsverfahren. In jedem Abtastintervall lösen die Regler iterativ das zentralisierte Problem und tauschen Iterate der numerischen Optimierungsverfahren mit benachbarten Reglern aus.

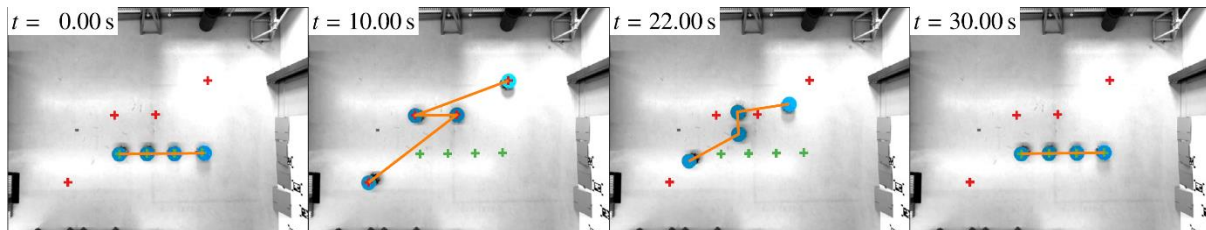


Abbildung 2: Formationsregelung mobiler Roboter. Das dezentrale SQP-Verfahren löst nicht-konvexe Optimalsteuerungsprobleme in Echtzeit (Bild: Henrik Ebel) [15].

Dieser Beitrag präsentiert einen echtzeitfähigen kooperativen verteilten MPC Regler mit Stabilitätsgarantien für nichtlineare Systeme. Dazu stellen wir zunächst ein neuartiges Verfahren der dezentralen sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP) vor, welches die lokalen Konvergenzgarantien von inexakten Newton-Verfahren mit der hohen Performanz von ADMM kombiniert [12]. Diese Konvergenzgarantien für nicht-konvexe Probleme ermöglichen es, die für nichtlineare MPC-Regler etablierten Ansätze für Echtzeititerationen [13] auf verteilte MPC Regler zu übertragen. Die Stabilität des geschlossenen Regelkreises kann dabei trotz etwaig verletzter Restriktionen für hinreichend schnelle Abtastzeiten garantiert werden [14]. Experimente zur Formationsregelung mobiler Roboter veranschaulichen die Echtzeitfähigkeit des vorgeschlagenen Regelungsverfahrens unter Berücksichtigung von Kommunikationsverzögerungen, die zwischen benachbarten Robotern entstehen [15]. Abbildung 2 zeigt skizzenhaft ein anspruchsvolles Fahrmanöver, bei dem die Roboter einander ausweichen müssen und welches durch nicht-konvexe Restriktionen zur Kollisionsvermeidung realisiert wird.

Literatur

- [1] J. Zimmermann, T. Tatarenko, V. Willert und J. Adamy. „Optimales Energie-Management über verteilte, beschränkte Gradientenverfahren“. In: *at – Automatisierungstechnik*. 2019.
- [2] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch und T. Sezi. „Voltage stability and reactive power sharing in inverter-based microgrids with consensus-based distributed voltage control“. In: *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016.
- [3] M. Kneissl, A. Molin, H. Esen und S. Hirche. „Any-time feasible coordination for multivehicle systems“. In: *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2022.

- [4] J. Lunze. „Networked Control of Multi-Agent Systems“: Edition MoRa. 2022
- [5] M. A. Müller und F. Allgöwer. „Economic and distributed model predictive control: Recent developments in optimization-based control“. In: *SICE J. Control Meas. Syst. Integr.* 2018.
- [6] M. Kögel und R. Findeisen. „Cooperative distributed MPC using the alternating direction multiplier method“. In: *IFAC Proceedings Volume*. 2012.
- [7] D. Burk, A. Völz und K. Graichen. „Experimental validation of the open-source DMPC framework GRAMPC-D applied to the remotely accessible robotarium“. In: *IEEE Conf. Mech. Auto.* 2021.
- [8] P. Jané-Soneira, A. Gießler, M. Pfeifer und S. Hohmann. „Distributed suboptimal model predictive control with minimal information exchange“. In: *IEEE Conf. Dec. Control.* 2022.
- [9] G. Stomberg, A. Engelmann und T. Faulwasser. „A compendium of optimization algorithms for distributed linear-quadratic MPC“. In: *at – Automatisierungstechnik*. 2022.
- [10] R. Rostami und D. Görjes. „An ADMM-based algorithm for stabilizing distributed model predictive control without terminal cost and constraint“. In: *Eur. J. Control.* 2023.
- [11] A. Bestler und K. Graichen. „Distributed model predictive control for continuous-time nonlinear systems based on suboptimal ADMM“. In: *Optim. Control Appl. Methods*. 2019.
- [12] G. Stomberg, A. Engelmann und T. Faulwasser. „Decentralized non-convex optimization via bi-level SQP and ADMM“. In: *IEEE Conf. Dec. Control.* 2022.
- [13] M. Diehl, H. G. Bock, J. P. Schlöder, R. Findeisen, Z. Nagy und F. Allgöwer. „Real-time optimization and nonlinear model predictive control of processes governed by differential algebraic equations“. In: *J. Process Control*. 2002.
- [14] G. Stomberg, A. Engelmann, M. Diehl und T. Faulwasser. „Decentralized real-time iterations for distributed nonlinear model predictive control“. In: *eingereicht bei IEEE Trans. Autom. Control*
- [15] G. Stomberg, H. Ebel, T. Faulwasser und P. Eberhard. „Cooperative distributed MPC via decentralized real-time optimization: Implementation results for robot formations “. In: *Control Eng. Pract.* 2023.

Dateneffiziente, approximative MPC basierend auf neuronalen Netzen mittels parametrischer NLP-Sensitivitäten

Lukas Lüken

Process Automation Systems
TU Dortmund
lukas.lueken@tu-dortmund.de

Sergio Lucia

Process Automation Systems
TU Dortmund
sergio.lucia@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare Modellprädiktive Regelung, Maschinelles Lernen, Lern-basierte Regelung, Nichtlineare Optimierung

Die modellprädiktive Regelung (MPC) ist eine leistungsfähige Methode zur Regelung komplexer technischer Systeme. Sie ermöglicht die Verwendung von Nebenbedingungen, nichtlinearer Dynamik oder ökonomischer Zielfunktionen und ist unter anderem auch für Systeme mit mehreren Eingangs- und Ausgangsgrößen geeignet. Im Gegensatz zu klassischen regelungstechnischen Methoden bietet sie hierbei erhebliche Vorteile^[1]. Da die Anwendung von MPC die Lösung eines nichtlinearen Optimierungsproblems (NLP) erfordert, stellt jedoch die Echtzeitfähigkeit dieses Verfahrens eine erhebliche Herausforderung dar.

Ein Ansatz zur Lösung dieses Problems besteht darin, das Regelgesetz mithilfe von Funktionsapproximatoren wie neuronalen Netzen (NN) zu approximieren^[2]. Hierbei wird das NLP in einer Offline-Phase für verschiedene Ausgangszustände gelöst und die Approximation anhand der berechneten Stellgrößenänderungen bestimmt. Bei der Online-Anwendung dieser approximativen MPC muss dann nur noch ein neuronales Netz ausgewertet werden, das auch auf sehr begrenzter Hardware sehr schnell ausgeführt werden kann. Obwohl die Idee bereits in den 1990er Jahren entstanden ist^[3], wurden in den letzten Jahren aufgrund von Entwicklungen im Bereich des maschinellen Lernens vielversprechende neue Ergebnisse erzielt. Diese zeigen zum Beispiel, dass die notwendige Online-Rechenzeit um mehrere Größenordnungen reduziert werden konnte.^[4]

Jedoch können Approximationsfehler durch die Approximation des Regelgesetzes die Leistungsfähigkeit des Reglers erheblich beeinträchtigen. Daher ist eine sehr genaue Approximation notwendig, die allerdings eine ausreichende Menge an Trainingsdaten voraussetzt. Insbesondere bei hochdimensionalen und komplexen Systemen kann die Beschaffung der Daten bereits in der Offline-Phase eine Schwierigkeit darstellen. Eine effiziente Nutzung der Daten ist daher von großem Interesse.

In diesem Beitrag wird erläutert, wie das sogenannte Sobolev-Training^[5] neuronaler Netze in Kombination mit den parametrischen Sensitivitäten des der MPC zugrundeliegenden NLP genutzt werden kann, um die Dateneffizienz zu erhöhen und mit der gleichen Datenmenge eine höhere Approximationsqualität zu erreichen. Dadurch wird eine bessere Performance der approximierten MPC erzielt.

Die parametrischen Sensitivitäten beschreiben die lokale Ableitung der vollständigen Lösung des NLP in Bezug auf dessen Parameter, einschließlich der Anfangszustände.^[6] Diese Information kann mithilfe des impliziten Funktionentheorems in der Offline-Phase mit vernachlässigbaren Kosten ermittelt werden. Das Sobolev-Training für neuronale Netze beinhaltet eine

Kostenfunktion, welche die Abweichung der Ableitung des Outputs der approximativen MPC in Bezug auf die Ausgangszustände von den entsprechenden parametrischen Sensitivitäten reduziert.

Zur Demonstration dieses Ansatzes wird eine Simulationsstudie einer MPC für einen nichtlinearen kontinuierlichen Rührkesselreaktor vorgestellt.^[7] Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Sobolev-Training mit den parametrischen Sensitivitäten die Approximationsgenauigkeit der approximativen MPC erheblich verbessern kann, insbesondere bei begrenzter Anzahl an Trainingsdaten.

Literatur

- [1] L. Grüne and J. Pannek, *Nonlinear Model Predictive Control*. in *Communications and Control Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2017
- [2] B. Karg and S. Lucia, "Efficient Representation and Approximation of Model Predictive Control Laws via Deep Learning," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 50, no. 9, pp. 3866–3878, Sep. 2020
- [3] T. Parisini and R. Zoppoli, "A receding-horizon regulator for nonlinear systems and a neural approximation," *Automatica*, vol. 31, no. 10, pp. 1443–1451, Oct. 1995.
- [4] P. Kumar, J. B. Rawlings, and S. J. Wright, "Industrial, large-scale model predictive control with structured neural networks," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 150, p. 107291, Jul. 2021
- [5] W. M. Czarnecki, S. Osindero, M. Jaderberg, G. Swirszcz, and R. Pascanu, "Sobolev training for neural networks," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, 2017
- [6] A. V. Fiacco and Y. Ishizuka, "Sensitivity and stability analysis for nonlinear programming," *Ann Oper Res*, vol. 27, no. 1, pp. 215–235, Dec. 1990
- [7] L. Lüken, D. Brandner, and S. Lucia, "Sobolev Training for Data-efficient Approximate Nonlinear MPC," presented at the IFAC World Congress 2023, 2023.

Datengetriebene Oberflächenregelung einer Kaltwalzanlage

Christopher Schulte, M.Sc.

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
c.schulte@irt.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Heike Vallery

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
h.vallery@irt.rwth-aachen.de

Schlüsselwörter: Modellprädiktive Regelung, Online-Identifikation, Gaußprozess-Regression, Kaltwalzen, Oberflächenrauheit

Zur Verbesserung der Flächeneigenschaften von kaltgewalzten Metallbändern, wie der Lackierbarkeit oder der Tribologie, wird der sogenannte Nachwalzprozess eingesetzt. Dabei wird das Band nach dem eigentlichen Kaltwalzprozess nochmals durch einen Walzspalt geführt, um die Oberflächenrauheit zu beeinflussen. Die Nachwalzprozesse stoßen jedoch an ihre Grenzen, da sie ein begrenztes Prozessfenster mit festgelegten Anfangs- und Enddicken des Bandes haben. In dieser Hinsicht ist es das Ziel, die Oberflächenrauheit des auslaufenden Bandes durch die gezielte Beeinflussung der Kontaktspannungen im Walzspalt anzupassen. Damit sollen die Qualitätsanforderungen moderner Metallbänder besser erfüllt und deren Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Anwendungen erweitert werden. [4]

Im Vortrag werden zwei Ansätze zur Regelung der Oberflächenrauheit des auslaufenden Bandes vorgestellt, miteinander verglichen und in den Regelkreis des Projektes eingeordnet (siehe Abbildung 1). Der erste Ansatz ist die Verwendung von zwei Walzgerüsten mit unterschiedlich behandelten Walzenoberflächen. Dabei wird die Oberflächenrauheit des auslaufenden Bandes durch Aufteilung der Gesamthöhe auf die zwei Walzstiche beeinflusst. Der Vorteil ist ein größerer Einstellbereich der Oberflächenrauheit. Der Nachteil ist jedoch, dass die zwei Walzstiche und damit zwei Walzenpaare mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten benötigt werden. [2, 3]

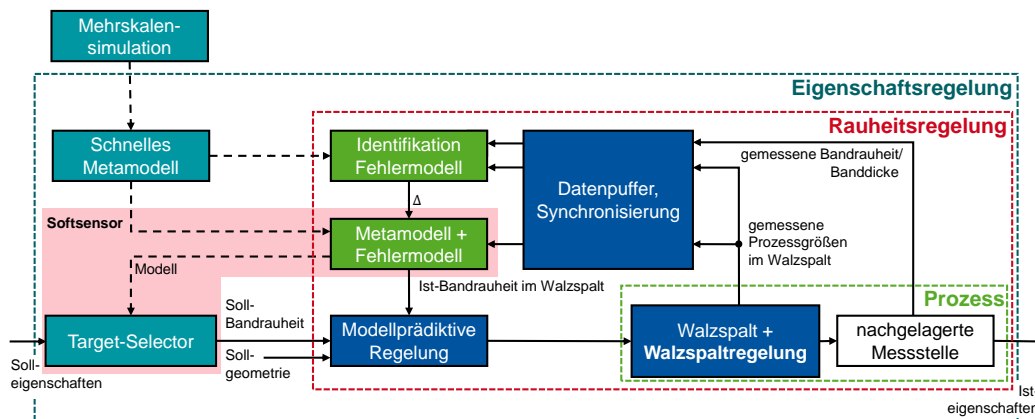


Abbildung 1: Regelkreis des Projektes, welches auf mehreren Ebenen zunächst den Walzspalt, dann die Geometrie und Oberfläche und zuletzt die Flächeneigenschaften einstellt.

Der zweite Ansatz ist die Beeinflussung der Kontaktspannung im Walzspalt durch die Einstellung der Bandzüge zusätzlich zum Walzspalt. Dabei wird die Oberflächenrauheit des auslaufenden Bandes durch die Zustellung des Walzspalts und die Einstellung der Bandzüge beeinflusst. Der Vorteil ist, dass nur ein Walzgerüst benötigt wird. Der Nachteil ist, dass der Einstellbereich der Oberflächenrauheit begrenzt ist. Beide Ansätze werden experimentell untersucht

und die zugrundeliegende Online-Modellidentifikation mittels Gaußprozess-Regression vorgestellt. [2]

Als kurzer Exkurs wird danach vorgestellt, wie die *Gaußprozess-Regression* verwendet werden kann, um den Verschleiß der Walzen zu identifizieren und damit eine Vorhersage für den Verschleißzeitpunkt zu treffen. Hierbei wird ein Linear-Gaußscher Kernel verwendet, der eine lineare Prädiktion des Walzenmodells entlang einer neuen Dimension ermöglicht. Diese neue Dimension ist eine Lastzahl, die mit dem zeitlichen Integral der Kontaktspannung korreliert, siehe Abbildung 2.

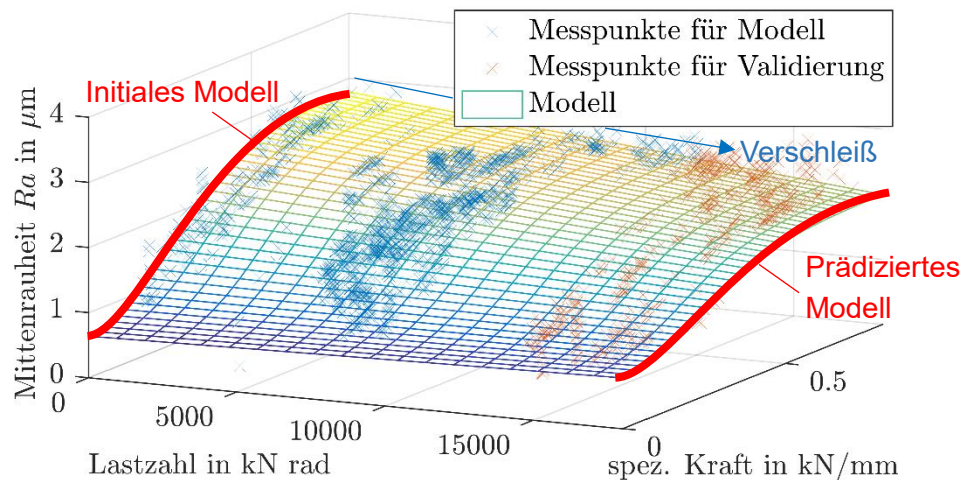


Abbildung 2: Prädiktion des Walzenverschleißes mithilfe der Gaußprozess-Regression

Anschließend wird das Problem der Exzentrizität im Walzspalt vorgestellt und diskutiert. Die Exzentrizität führt zu einer zeitlich veränderlichen Kontaktspannung im Walzspalt und damit zu einer zeitlich veränderlichen Oberflächenrauheit und Geometrie des auslaufenden Bandes. Um die Exzentrizität zu kompensieren, wird ein *Repetitive Control Algorithm* vorgestellt. Dieser Algorithmus lernt den zeitlichen Verlauf der Exzentrizität und kann eine Vorhersage für die Modellprädiktive Regelung des Walzspalts bereitstellen, die zeitgleich auch für die Lösung des überaktuierten Walzspalts verwendet wird. [1]

Zum Schluss wird ein Ausblick auf die zukünftige Forschung gegeben. Dabei werden verschiedene Effekte erläutert, die für produktionsnahe Prozessbedingungen, wie höhere Walzgeschwindigkeiten und Schmierung mit Öl, berücksichtigt werden müssen.

Literatur

- [1] M. Wehr et al. „Online model adaptation in cold rolling for improvement of thickness precision“. In *21st IFAC World Congress*. 2020.
- [2] X. Li et al. „Modeling and exploiting the strip tension influence on surface imprinting during temper rolling of cold-rolled steel“. In *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2021.
- [3] C. Schulte et al. „Model based control of the strip roughness in cold rolling“. In *IFAC-Papers OnLine*, 54(11). 2021.
- [4] C. Schulte et al. „Adaptive Pass Scheduling for Roughness Control in Cold Rolling“. In *22nd IFAC World Congress*. 2023

Regelung verteiltparametrischer Systeme für den Lastentransport mit Multikoptern

Abdurrahman Irscheid

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

Joachim Rudolph

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

Schlüsselwörter: kooperativer Lastentransport, schweres Seil, verteiltparametrische Systeme, nichtlineare PDE-ODE-Systeme, lösungsbasierter Reglerentwurf

Der kooperative Transport einer an schweren Seilen aufgehängten und mithilfe von Trikoptern beförderten Last (siehe Abbildung 1) stellt eine große regelungstechnische Herausforderung dar. Zwar existieren geeignete Methoden zur Regelung eines einzelnen Seils mit Last [2,3,7], doch scheitern diese im Falle des kooperativen Transports an der nichtlinearen Natur des Problems. Erste experimentelle Untersuchungen haben bereits gezeigt [1,5], dass eine auf Basis eines vereinfachten verteiltparametrischen Modells hergeleitete Steuerung hinreichend genaue Trajektorienfolge ermöglicht, sofern externe Störungen vernachlässigt werden können. Diese Einschränkung motiviert den Entwurf einer stabilisierenden Zustandsrückführung zur Unterdrückung von Störgrößen im geschlossenen Regelkreis.

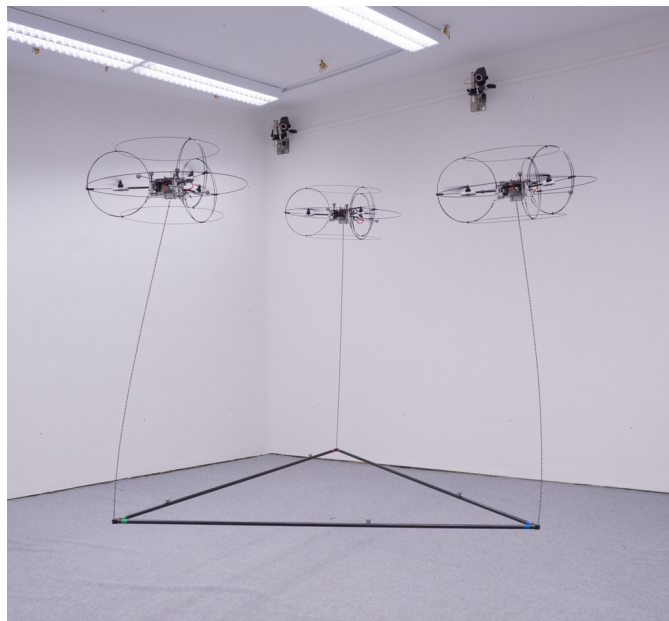


Abbildung 1: Kooperativer Transport mit an Trikoptern aufgehängten schweren Seilen

Die Dynamik der Trikopter wird zur Vereinfachung der Darstellung vernachlässigt. Die Auslenkung jedes einzelnen Seils kann unter Zuhilfenahme einer Kleinwinkelnäherung durch eine lineare hyperbolische partielle Differentialgleichung (PDE) modelliert werden. Die Aufhängungspunkte der Seile seien frei beweglich, während die unteren Enden fest mit der Last verbunden sind. Letztere wird als Starrkörper modelliert und somit durch eine Reihe von nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichungen (ODEs) beschrieben, die zu nichtlinearen dynamischen Randbedingungen für die PDEs führen. Das resultierende Modell gehört zur Klasse der sogenannten hyperbolischen PDE-ODE-Systeme. Insbesondere die bidirektionale Kopplung der linearen PDEs und der nichtlinearen ODEs erschwert den Reglerentwurf erheblich.

In diesem Vortrag wird ein einheitlicher Rahmen zur Regelung einer Klasse nichtlinearer PDE-ODE-Systeme mit Steuerung über den Rand im Kontext des sogenannten lösungsbasier-

sierten Ansatzes vorgestellt [4,6]. Dieser Zugang kann sowohl für hyperbolische als auch parabolische Systeme (wie bspw. Wärmeleitungsprobleme) zum Einsatz kommen. Der Schwerpunkt der Präsentation liegt in einer intuitiven Erläuterung der wesentlichen Konzepte anhand des kooperativen Transports mit schweren Seilen. Die Methode basiert auf der Lösung eines geeigneten Cauchy-Problems, eines Konzepts, welches auch für flachheitsbasierte Steuerungsentwürfe relevant ist [8]. Für die Implementierung des Regelgesetzes wird daher ein effizientes numerisches Verfahren verwendet, welches Echtzeit-Lösungen dieser Probleme ermöglicht.

Literatur

- [1] A. Angerer und F. Woittennek. Flatness-based heavy rope control: Experimental results with a 6R industrial manipulator. *IFAC-PapersOnLine*, 55(26):71–77, 2022.
- [2] J. Deutscher, N. Gehring, und R. Kern. Backstepping Control of Linear 2×2 Hyperbolic Systems with Dynamic Boundary Conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):4522–4527, 2017.
- [3] N. Gehring, A. Irscheid, J. Deutscher, F. Woittennek, und J. Rudolph. Control of distributed-parameter systems using normal forms: an introduction. *at – Automatisierungstechnik*, 71(8):624–646, 2023.
- [4] A. Irscheid, N. Gehring, J. Deutscher, und J. Rudolph. Solution-based control: An extension of backstepping for nonlinear parabolic PDE-ODE systems. Under review.
- [5] A. Irscheid, M. Konz, und J. Rudolph. A Flatness-Based Approach to the Control of Distributed Parameter Systems Applied to Load Transportation with Heavy Ropes. In Y.P. Kondratenko, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev, und J. Kacprzyk, Editoren, *Advanced Control Techniques in Complex Engineering Systems: Theory and Applications: Dedicated to Professor Vsevolod M. Kuntsevich*, S. 279–294. Springer, 2019.
- [6] A. Irscheid, J. Deutscher, N. Gehring, und J. Rudolph. Output regulation for general heterodirectional linear hyperbolic PDEs coupled with nonlinear ODEs. *Automatica*, 148:110748, 2023.
- [7] M. Krstic und A. Smyshlyaev. *Boundary Control of PDEs: A Course on Backstepping Designs*. SIAM, 2008.
- [8] J. Rudolph. *Beiträge zur flachheitsbasierten Folgeregelung linearer und nichtlinearer Systeme endlicher und unendlicher Dimension*. Steuerungs- und Regelungstechnik. Shaker Verlag, 2003.

Containment Control linearer Multi-Agenten-Systeme mittels Kontinuumsmodellen

Nick Jung

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

Joachim Deutscher

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

Schlüsselwörter: Containment Control, Multi-Agenten-Systeme, Führungs- und Störgrößenaufrichtung, parabolische Systeme, Backstepping, Bézierkurven

Die Synthese von Netzwerkregelungen für *Multi-Agenten-Systeme (MAS)* ist gegenwärtig ein hochaktuelles Forschungsthema in der Regelungstechnik. Dies lässt sich unter anderem auf die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten zurückführen, welche beispielsweise die Formationsregelung von autonomen Fahrzeugen, die Temperaturregelung von Netzwerken aus Wärmetauschern zur Gebäudeklimatisierung oder die Synchronisierung von Spannung und Frequenz in Smart Grids umfassen (siehe [6] und [7]). Eine interessante Aufgabenstellung für MAS ist das *Containment Control Problem*. Dabei muss ein Netzwerkregler entworfen werden, welcher sicherstellt, dass alle Agenten in die sogenannte *Containment Area* (siehe Abbildung 1) konvergieren und dort verbleiben. Letztere wird zeitabhängig von Leadern aufgespannt. Somit können die Leader das MAS in der Containment Area durch den Raum führen, was z.B.

für Explorationsaufgaben, Minensuche oder Drohnenformationen von Interesse ist. In der Literatur findet man zur Lösung des Containment Control Problems ausschließlich endlich-dimensionale Methoden (siehe z.B. [1] und [10]). Diese lösen zwar das Containment Control Problem, ermöglichen allerdings keine gezielte Vorgabe einer Formation innerhalb der Containment Area, was bei vielen Anwendungen jedoch von Interesse ist. Eine Alternative stellen deshalb *Kontinuumsmodelle* für MAS dar, bei denen diffusiv gekoppelte Agenten im Kontinuum durch eine PDE beschrieben werden. Auf diese Modelle lassen sich klassische Entwurfsmethoden für Systeme mit verteilten Parametern (SVP) anwenden, welche unabhängig von der Agentenanzahl, d.h. immer skalierbar, sind. Darüber hinaus wird die Kommunikationstopologie erst nach dem Netzwerkregler-Entwurf

durch eine Ortsdiskretisierung eingepreßt. Bisher wurde diese Vorgehensweise genutzt, um Multi-Agenten-Systeme mittels einer flachheitsbasierten Folgeregelung unter Verwendung von Backstepping in endlicher Zeit auf vorgegebene Formationsprofile zu überführen (siehe [4] und [8]). Die Behandlung der gleichen Aufgabenstellung erfolgte in [9] mittels Lyapunov-basierter Methoden. Bisher findet man jedoch noch keine Lösung des Containment Control Problems in der Literatur, welche die Vorteile von Kontinuumsmodellen nutzt.

In diesem Vortrag wird das Containment Control Problem für MAS unter Berücksichtigung von Störungen mittels eines Kontinuumsmodells gelöst. Die Störungen und die Leader werden

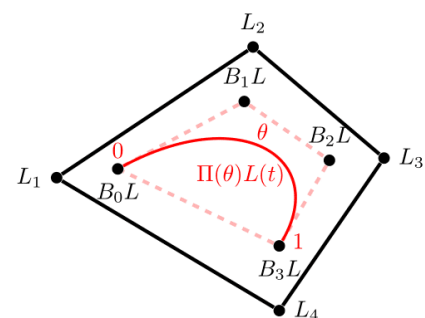


Abbildung 1: Das schwarze Polygon, welches von den Führungsagenten aufgespannt wird, bildet die Containment Area. Die Kontrollpunkte spannen rot gestrichelt die konvexe Hülle auf, in welcher die Sollformation, beschrieben durch eine Bézierkurve, liegt.

dazu durch ODEs beschrieben. Als Containment Area dient die konvexe Hülle der Leader-Positionen in der Ebene. Um das Containment der Agentenformation im Kontinuum sicherzustellen, wird eine Beziérkurve als Sollformation vorgegeben (siehe z.B. [3]). Diese liegt gesichert in der Containment Area, wenn ihre Kontrollpunkte in der durch die Leader aufgespannten konvexen Hülle enthalten sind. Letzteres kann durch eine geeignete Parametrierung der Kontrollpunkte sichergestellt werden. Jeder Agent muss dann nur die prinzipielle Form der Beziérkurve kennen. Zunächst erfolgt der Entwurf einer Führungs- und Störgrößenaufschaltung, um Konvergenz der Agenten auf die Wunschformation und damit Containment in Anwesenheit von Störungen zu gewährleisten. Anfangsfehler werden anschließend mittels bilateralem Backstepping berücksichtigt (siehe [2] und [5]), womit die Randagenten das zur Ausregelung von Anfangsstörungen nötige Stellsignal erhalten. Dabei kann durch Wahl des Faltungspunktes das Stellsignal geeignet auf diese Agenten verteilt werden. Weil nur die Randagenten Kenntnis über die Störung und die Leader-Positionen besitzen, wird diese Information mittels eines kooperativen Kontinuums-Signalmodellbeobachters an die Agenten kommuniziert. Nach Diskretisierung der Stellgesetze und des Beobachters ergibt sich damit eine verteilte Lösung des Containment Control Problems für das ursprüngliche endlich-dimensionale MAS. Die theoretischen Ergebnisse des Vortrags werden anhand von Experimenten für mobile Roboter validiert.

Literatur

- [1] H. Cai, Y. Su und J. Huang. *Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Distributed-Observer and Distributed-Internal-Model Approaches*. Berlin, Germany: Springer Nature, 2022.
- [2] S. Chen und M. Krstic. "Folding bilateral backstepping output-feedback control design for an unstable parabolic PDE". In: *IEEE Trans. Autom. Control* 67 (2022), S. 2389-2404.
- [3] G. Farin. *Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide*. Burlington: Morgan Kaufmann, 2002.
- [4] G. Freudenthaler und T. Meurer. "PDE-based multi-agent formation control using flatness and backstepping: Analysis, design and robot experiments". In: *Automatica* 115 (2020). – Art. Nr. 108897.
- [5] S. Kerschbaum und J. Deutscher. "Bilateral backstepping control of coupled linear parabolic PDEs with spatially varying coefficients". In: *Automatica* 135 (2022). – Art. Nr. 109923.
- [6] F. Lewis, H. Zhang, K. Hengster-Movric und A. Das. *Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] J. Lunze. *Networked Control of Multi-Agent Systems*. Edition MoRa, 2022.
- [8] T. Meurer und M. Krstic. "Finite-time multi-agent deployment: A nonlinear PDE motion planning approach". In: *Automatica* 47 (2011), S. 2534-2542.
- [9] M. Terushkin und E. Fridman. "Network-based deployment of nonlinear multi agents over open curves: A PDE approach". In: *Automatica* 129 (2021). - Art. Nr. 109697.
- [10] M. Thummalapeta und Y. Liu. "Survey of containment control in multi-agent systems: concepts, communication, dynamics and controller design". In: *Int. J. Syst. Science* 54 (2023), S. 2809-2835.

Zeitdiskrete dynamische Modellierung geometrisch exakter Balken in absoluten und relativen Variablen

Maximilian Herrmann
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
maximilian.herrmann@tum.de

Paul Kotyczka
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Technische Universität München
kotyczka@tum.de

Schlüsselwörter: Geometrisch exakte Balken, variationelle Integratoren, Soft Robotics, Lie-Gruppen-Methoden

In vielen technischen und nicht-technischen (Biophysik, DNA-Stränge) Problemstellungen spielen schlanke, hochdeformierbare elastische Strukturen eine zentrale Rolle; so etwa bei Kontinuum-Manipulatoren (Abbildung 1), ein Beispiel für *Soft Robotics*, die u. A. im medizinischen Bereich Anwendung finden. Die Lösung regelungstechnischer Bewegungsaufgaben für solch komplexe Systeme erfordert physikalisch konsistente und numerisch handhabbare Modelle. Dabei haben sich zur dynamischen Modellierung solcher Strukturen *geometrisch exakte* Balkenmodelle durchgesetzt, die – im Gegensatz zu klassischen linearen Modellen – auch große Deformationen genau beschreiben können. Eine wichtige Eigenschaft dieser Modelle ist die zugrundeliegende differentialgeometrische Struktur: Der Konfigurationsraum ist im allgemeinen Fall ein (unendlich-dimensionales) Produkt einer Lie-Gruppe. Diese Struktur kann bei der Modellbildung elegant ausgenutzt werden; eine Erhaltung der Struktur bei Orts- und Zeitdiskretisierung bringt numerische Vorteile im diskreten Modell.

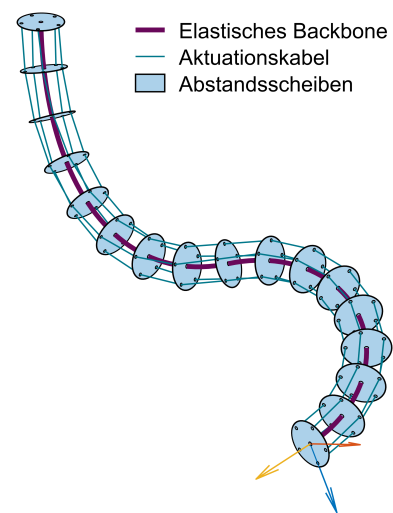


Abbildung 1: Anwendungsbeispiel kabelaktuierter Kontinuum-Manipulator

In diesem Vortrag werden zunächst zwei zeitdiskrete Modelle solcher Balken vorgestellt, die auf variationellen Integratoren [1, 2] basieren und die geometrische Struktur erhalten. Dabei unterscheiden sich die beiden Modelle darin, wie die Konfigurationsvariablen definiert sind, die die Lage und Orientierung der Balkenquerschnitte im diskretisierten Modell beschreiben: Bei einem Modell in *Absolutkoordinaten* [3], wie es in der Literatur weit verbreitet ist, werden alle Positionen und Orientierungen als Absolutgrößen in Bezug auf ein Inertialsystem angegeben, während bei einem *Relativmodell* die relativen Verschiebungen und Verdrehungen zwischen benachbarten Querschnitten im diskretisierten Modell verwendet werden [4].

Die Wahl von relativen Variablen hat dabei mehrere Vorteile, die insbesondere für die Anwendung in der Robotik und Regelungstechnik relevant sind: Das resultierende Modell besitzt eine minimale Anzahl an Zuständen, weist aber keine relevanten kinematischen Singularitäten auf. Ferner ist die Struktur der diskreten Bewegungsgleichungen identisch zu der von Starrkörpermodellen in Minimalkoordinaten, weswegen klassische Methoden aus der Robotik und Mehrkörperdynamik für Regelung und Simulation angewendet werden können [5]; so auch *re-*

kursive Verfahren [6, 7] zum effizienten Lösen der Bewegungsgleichungen. Weiterhin ist es auf elegante Art und ohne Verwendung von Zwangsbedingungen möglich, hochsteife Deformationsmoden aus den Schub- und Längungsfreiheitsgraden (vgl. [8]) zu sperren, die bei schlanken und steifen Balken auftreten und zu numerischen Problemen führen (Konvergenz, geringe Zeitschrittweiten). Aufgrund des variationellen Hintergrunds sind beide Modelle darüber hinaus symplektisch, Impulserhaltend und weisen hervorragendes Energieverhalten auf.

Der Vortrag geht neben allgemeinen Aspekten zur Modellstruktur und numerischen Lösung beider Modelle insbesondere auf die genannten Vorteile ein, die anhand numerischer Simulationen näher beleuchtet werden. Abschließend wird ein Ausblick auf die Verwendung zur Modellierung und Regelung von kabelaktuierten Kontinuum-Manipulatoren gegeben.

Literatur

- [1] Jerrold E. Marsden und Matthew West. “Discrete mechanics and variational integrators”. In: *Acta Numerica* 10 (2001), S. 357–514.
- [2] Taeyoung Lee. “Computational Geometric Mechanics and Control of Rigid Bodies”. Dissertation. Michigan, USA: University of Michigan, 2008.
- [3] François Demoures u. a. “Discrete variational Lie group formulation of geometrically exact beam dynamics”. In: *Numerische Mathematik* 130.1 (2015), S. 73–123.
- [4] Maximilian Herrmann und Paul Kotyczka. “Efficient Discrete-Time Dynamics of Geometrically Exact Beams Based on Relative Kinematics”. In: *11th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*. Hrsg. von Jorg Ambrósio. Lisboa, Portugal: Instituto Superior Technico, 2023.
- [5] Richard M. Murray, Zexiang Li und Shankar Sastry. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1994.
- [6] Roy Featherstone. *Rigid body dynamics algorithms*. New York, NY: Springer, 2008.
- [7] Jeongseok Lee u. a. “A Linear-Time Variational Integrator for Multibody Systems”. In: *Algorithmic Foundations of Robotics XII*. Hrsg. von Ken Goldberg u. a. Bd. 13. Springer Proceedings in Advanced Robotics. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2020, S. 352–367.
- [8] Holger Lang, Joachim Linn und Martin Arnold. “Multi-body dynamics simulation of geometrically exact Cosserat rods”. In: *Multibody System Dynamics* 25.3 (2011), S. 285–312.

Design concept for metadata of production data and data processing functions for automated data preparation

Wan Li

Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik
RWTH Aachen University
w.li@iat.rwth-aachen.de

Tobias Kleinert

Lehrstuhl für Informations- und Automatisierungssysteme für die Prozess- und Werkstofftechnik
RWTH Aachen University
kleinert@iat.rwth-aachen.de

Key words: Metadata, function ontology, data preprocessing, data mining

Advancements in data science and analytics as well as in automation and information technology have enhanced the capabilities to collect, store, and utilize production-related data in industrial environments. A typical data mining project involves several steps of data processing, including selection, understanding, preparation, and analysis of data and finally training and evaluating data-based models. Although initiatives such as automated machine learning [1] have developed methods to automate individual steps like data analysis, model training, and evaluation, most of the tasks still involve considerable manual work for the following reasons. Data exists in heterogeneous forms. Once data is retrieved from source systems, relation to context often gets lost, because creation and provision of context information is not yet standard when providing data. This complicates data preprocessing and necessitates consultation of domain experts to reestablish contextual information.

To address these problems, the presented research focuses on developing a metadata-based concept [2] aiming to answer two questions: How to re-establish the meaning of data while data is exchanged, and how to automate data preprocessing in data mining applications of industrial automation and control settings. The concept involves designing and utilizing metadata for both primary data as well as for the required data preprocessing functions.

The concept suggests storing and managing machine-interpretable metadata of primary data in a dedicated database, to allow for querying both data and its corresponding metadata (cf. Figure 1). The purpose is to establish machine interpretability during data transfer between different utilization stages. In a prototypical implementation, industrial data standards like Asset Administration Shells [3], Piping and Instrumentation Diagram in DEXPI (Data Exchange in the Process Industry) format [4], and database schemes of production time series data, are used as sources of metadata.

Additionally, metadata of data processing functions is essential for enabling automated interpretation of the processing functionality [5]. Consequently, we prototypically modelled the metadata of preprocessing functions in an ontology knowledge base. It presents a structure that maps three key elements: functionality (the programmatic implementation of a function), function (the abstraction of the functionality) and task (the addressed problem). This lays a foundation for determining the sequence of functions required to automate the process of data preparation within an operation framework for automated preprocessing of data (cf. Figure 2).

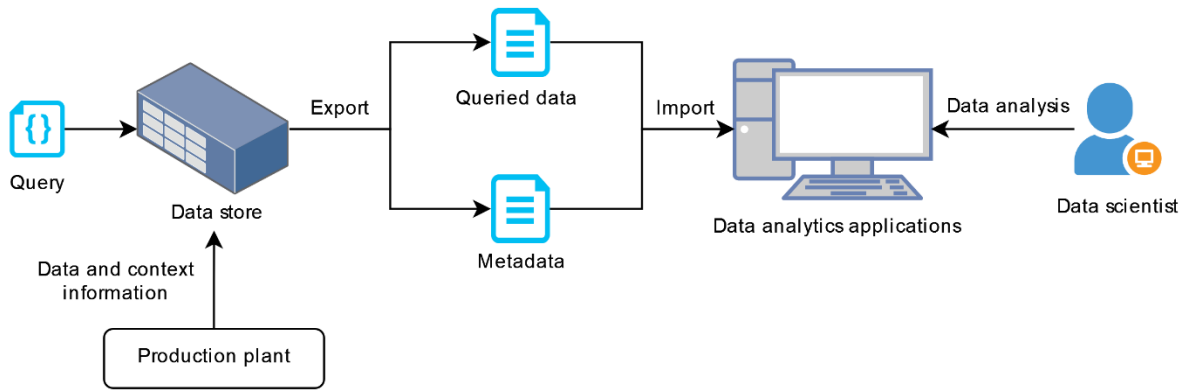


Figure 1: Automated data retrieval and annotation concept [2]

The interaction between metadata of data and of data processing functions as well as user inputs to control the data preprocessing includes the following parts:

- Data provision: The source system provides the queried data, accompanied by its source metadata.
- User inputs: Users select an analytics function and provide a declarative description of the data analysis task.
- Determining the actual state of data: The data analytics application interprets the source metadata and reads the data. A data profiler then examines the data, generates basic information, and enriches the metadata (modified) with this new information.
- Deriving the target state of data: The application uses the declarative task description and the function metadata, which describes the analytics function, to determine the metadata for the target state of the preprocessed data.
- Generating data preprocessing procedure: A procedure designer analyzes the metadata of both the current and target data states, as well as the metadata of the preprocessing functions, to create a data preprocessing sequence.
- Execution: The application executes the preprocessing sequence and then passes the results to the selected analytics functions.

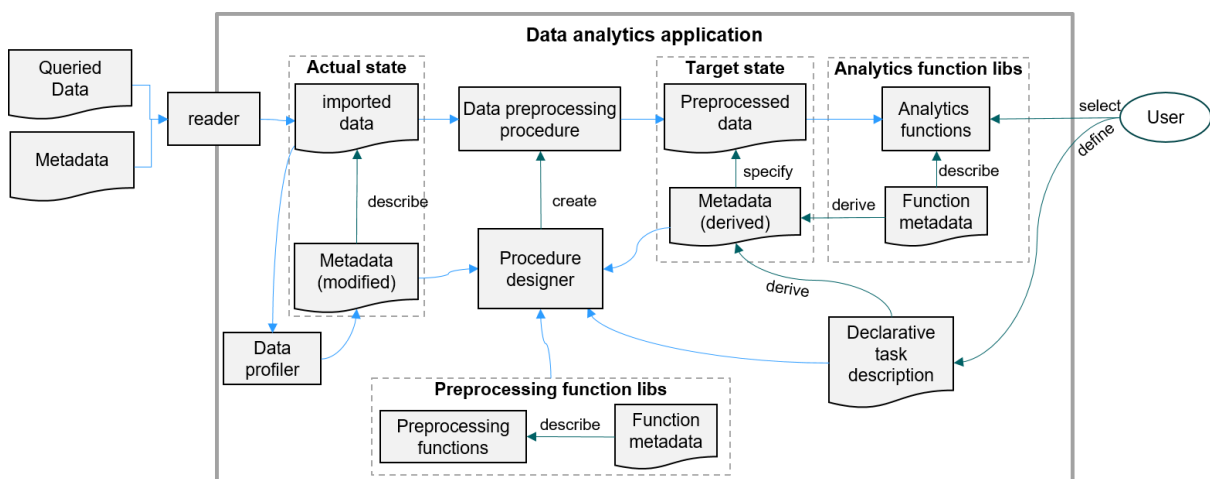


Figure 2: Interactions between metadata of data, metadata of data processing functions and user [2]

A general requirement is to ensure that metadata can be unambiguously interpreted. Therefore, it is demonstrated how standardized vocabulary or ontology, such as Dublin Core [6],

IEC Common Data Dictionary [7], Industrial Data Ontology [8] has to be used for modelling and creating metadata in the frame of a prototypical implementation, in order to accomplish the general task of automated data preparation and provisioning for data mining in industrial settings.

References

- [1] „AutoML,“ [Online]. Available at: <https://www.automl.org/>. [accessed: 06 12 2023].
- [2] W. Li und T. T. Kleinert, „A concept for providing and utilizing metadata in data analytics applications,“ *Automatisierungstechnik : at*, Bd. 71, Nr. 1, pp. 44-55, 2023.
- [3] Joint Working Subgroup “Asset Administration Shell”, "Details of the Asset Administration Shell - Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02)," Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), Berlin, 2022.
- [4] „DEXPI – Data Exchange in the Process Industry,“ [Online]. Available at: <https://dexpi.org/>. [accessed: 06 12 2023].
- [5] B. De Meester, T. Seymoens, A. Dimou und R. Verborgh, „Implementation-independent function reuse,“ *Future Generation Computer Systems*, Bd. 110, pp. 946-959, 2020.
- [6] „DublinCore,“ [Online]. Available at: <https://www.dublincore.org/>. [accessed: 06 12 2023].
- [7] IEC 61360-4, „IEC / SC 3D - Common Data Dictionary (CDD - V2.0015.0004),“ [Online]. Available at: <https://cdd.iec.ch/>. [accessed: 28 04 2023].
- [8] „Industrial Data Ontology,“ [Online]. Available at: <https://rds.posccaesar.org/ontology/>. [accessed: 16 11 2023].

Verifikation von GRAFCET mittels abstrakter Interpretation

Aron Schnakenbeck

Institut für Automatisierungstechnik
(Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay)
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
aron.schnakenbeck@hsu-hh.de

Schlüsselwörter: GRAFCET, formale Verifikation, Steuerungsentwurf, statische Analyse, abstrakte Interpretation

Während der Entwicklung von automatisierten Anlagen ist die Spezifikation der Steuerungslogik ein wichtiger Schritt. Formale Methoden können diesen Prozess unterstützen, indem zunächst die Steuerungslogik mithilfe eines formalen Modells spezifiziert wird. Dieses Vorgehen hat die Vorteile, dass das Modell als Dokumentation für den Code genutzt werden kann und eine automatisierte Codegenerierung möglich wird. Zudem kann eine formale Verifikation der Steuerungslogik früh in den Entwicklungsprozess eingebunden werden.

Bei Verifikationsmethoden wie dem Model Checking kommt es in der Anwendung zu einer sogenannten Zustandsraumexplosion, die dazu führt, dass Modellgrößen, wie sie in der Praxis vorkommen, nicht mehr effizient verifiziert werden können. In der Softwareverifikation haben sich daher Analysemethoden herausgebildet, die die zu verifizierende Programmlogik approximieren. Eine davon ist die abstrakte Interpretation. Dabei wird nicht mehr das konkrete Verhalten der Programmlogik berechnet, sondern ein abstraktes Verhalten. Beispielsweise werden die Werte von Variablen als Intervalle dargestellt.

In diesem Vortrag wird vorgestellt, wie die abstrakte Interpretation zur Analyse der Steuerungslogik von automatisierten Anlagen angewendet werden kann. Als Beschreibungsmittel wird dazu GRAFCET nach IEC 60848 verwendet. In dem Vortrag wird zunächst GRAFCET eingeführt und vorgestellt, wie die Semantik von GRAFCET approximiert wird, um eine möglichst effiziente Analyse zu erhalten. Der Analysealgorithmus wird beispielhaft vorgestellt und die Ergebnisse der Evaluation dieser Methode werden erläutert.

Eine GRAFCET-Instanz (siehe Abb. 1, rechte Seite) besteht aus Transitionen und Schritten, die alternierend durch Wirkverbindungen verbunden sind (für einen detaillierten Überblick siehe [1]). Die Menge der gerade aktiven Schritte bildet die sogenannte Situation der GRAFCET-Instanz. Das Schalten einer Transition (de-)aktiviert die (vor- und) nachgelagerten Schritte nach in der Norm festgelegten Regeln. Die Semantik von GRAFCET kann in Form eines Transitionssystems dargestellt werden (siehe Abb. 1, linke Seite). Ein Zustand in dem Transitionssystem besteht aus den jeweils aktiven Schritten und einer Variablenbelegung. Um das Transitionssystem kompakter zu gestalten und somit eine Zustandsraumexplosion zu vermeiden, werden Approximationen durchgeführt (dargestellt in Abb. 1). In dem approximierten Modell werden nicht mehr Zustände, sondern die Schritte in annotierter Form dargestellt. Jeder Schritt wird mit den potenziell nebenläufigen Schritten (blau in Abb. 1) annotiert, was eine Approximation der gleichzeitig aktiven Schritte darstellt. Zudem wird jeder Schritt mit der möglichen Variablenbelegung in Form von Intervallen annotiert (rot in Abb. 1), was eine Approximation der möglichen Variablenbelegungen darstellt, die eintreten kann, wenn der entsprechende Schritt aktiv ist. Die Berechnung der Annotationen basiert auf den Ansätzen in [2, 3].

Der Ansatz wurde unter zwei Gesichtspunkten evaluiert: In Bezug auf die Kosten für die Berechnung und in Bezug auf die Eigenschaften, die verifiziert werden können. Die Berechnungskosten wurden theoretisch in Big-O Notation analysiert und empirisch anhand von Beispielinstanzen gemessen. Im empirischen Vergleich zum Model Checking von GRAFCET (vorgestellt in [1]) konnten wesentlich größere GRAFCET-Instanzen verifiziert werden. Bei der Art der Eigenschaften, die verifiziert werden können hat sich gezeigt, dass vor allem Safety-Eigenschaften verifiziert werden können: Zum Beispiel, dass keine Schreibkonflikte auftreten, dass keine sicherheitskritischen Zustände erreicht werden, oder dass Zustände stabil sind.

Für zukünftige Forschungen sollen die Stärken der Ansätze Model Checking und statische Analyse kombiniert werden. Außerdem sollen Streckeninformationen in die Verifikation eingebunden werden, welche bis jetzt nicht betrachtet wurden.

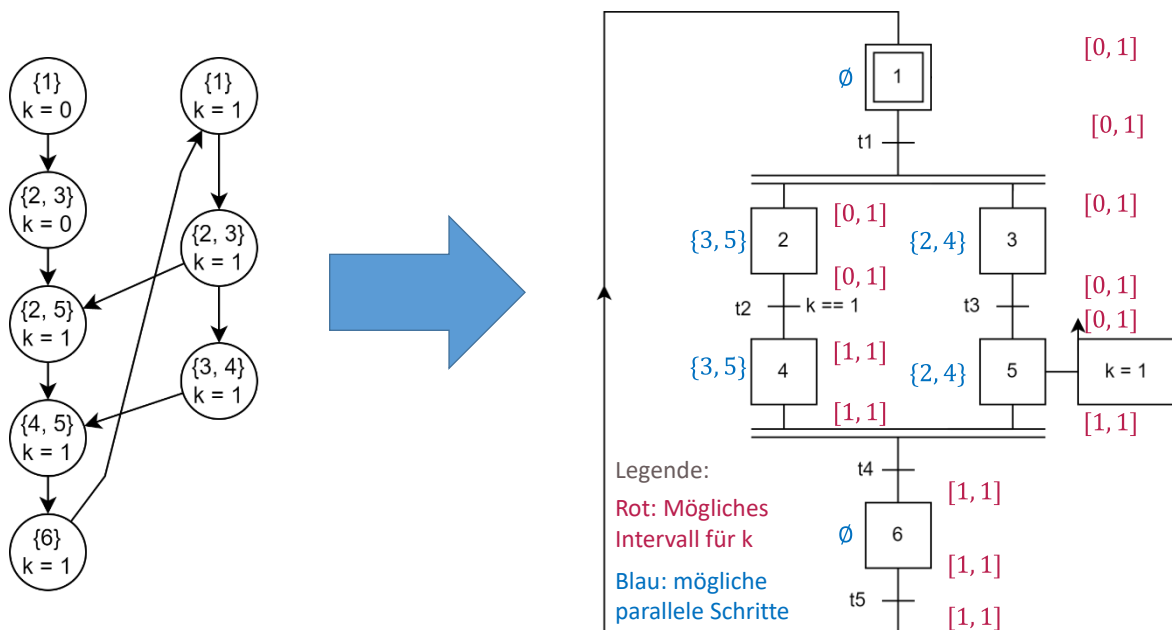


Abbildung 1: Approximation des Zustandsraums einer GRAFCET-Instanz

Literatur

- [1] R. Mross, A. Schnakenbeck, M. Völker, A. Fay and S. Kowalewski, "Transformation of GRAFCET Into GAL for Verification Purposes Based on a Detailed Meta-Model," *In IEEE Access*, vol. 10, pp. 125652-125665, 2022
- [2] A. Schnakenbeck, R. Mroß, M. Völker, S. Kowalewski and A. Fay, "Structural Analysis of GRAFCET Control Specifications," *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania, 2023
- [3] A. Schnakenbeck, R. Mroß, M. Völker, S. Kowalewski and A. Fay, "A Control Flow based Static Analysis of GRAFCET using Abstract Interpretation," *2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Lemgo, Germany, 2023

Konzept für die Umsetzung von auftragsgesteuerter Produktion

Alexander Belyaev

Lehrstuhl Integrierte Automation
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Alexander.belyaev@ovgu.de

Christian Diedrich

Lehrstuhl Integrierte Automation
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Christian.diedrich@ovgu.de

Schlüsselwörter: Merkmale, Fähigkeit, Digitaler Zwilling, Marktplatz

Zur Veranschaulichung der von Industrie 4.0 angestrebten digitalen Transformation der produzierenden Industrie formuliert die Plattform Industrie 4.0 Anwendungsszenarien [1]. Eines der relevanten Anwendungsfälle ist die Auftragsgesteuerte Produktion (AGP). Dieses Szenario beschreibt den Übergang von Massenfertigung zu kosteneffizienter Herstellung von individualisierten und einzigartigen Produkten [2]. Dahinter verbirgt sich die Idee, dass die Produktionsmittel nicht wie gewohnt in starre und immer wiederkehrende Produktionsabläufe eingebunden sind, sondern bezogen auf den aktuellen Auftrag ausgewählt, konfiguriert, parametrisiert und in den Produktionsprozess eingeplant werden.

Unternehmensübergreifend betrachtet, bedeutet die AGP, dass die Hersteller je nach Auftragslage ihr Fertigungsspektrum flexibel und automatisiert erweitern und externe Produktionskapazitäten ohne Einsatz eigener Investitionsmittel als Dienstleistungen einbinden können. Auf der anderen Seite können die Unternehmen auch eigene Produktionsfähigkeiten den anderen Unternehmen anbieten und damit die Auslastung ihrer Produktion erhöhen.

Basis für die Umsetzung des skizzierten Szenarios sollen Konzepte und Spezifikationen werden, die im Rahmen der Initiative Plattform I4.0 erarbeitet werden. Einige Konzepte, die aus Sicht der Plattform I4.0 für die Umsetzung der von I4.0 skizzierten Visionen maßgeblich sind, konnten bereits identifiziert werden. Jedoch ist die Lösung für die Umsetzung der AGP in aktuellen technischen Spezifikationen und Standardisierungsaktivitäten nicht direkt adressiert.

Dies motiviert das Forschungsziel dieser Arbeit. In dem vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz für die Umsetzung von AGP vorgestellt. Der vorliegende Beitrag identifiziert die für die Umsetzung des Szenarios notwendigen Bausteine [3], diskutiert ihre Ausprägungen und ordnet diese in ein ganzheitliches Konzept ein.

Die wichtigen Ergebnisse der Arbeit liegen auf folgenden Gebieten:

- Digitale Repräsentanz basierend auf Merkmalen in digitalen Zwillingen
- Produktionsplanung und -durchführung basierend auf Fähigkeitsbeschreibung
- Interoperabilität bei der Interaktion der Anwendungen und digitalen Zwillingen
- Interaktion digitaler Zwillinge in IT-Infrastruktur

Daraus lässt sich die Vision eines dezentralen firmenübergreifenden Marktplatzes ableiten.

Literatur

- [1] K. Bauer et al. "Anwendungsszenario trifft Praxis: Auftragsgesteuerte Produktion eines individuellen Fahrradlenkers," In: Plattform Industrie 4.0. 2017
- [2] M. Simon et al. Realisierung einer Shared Production. In atp Magazine 6-7. 2023
- [3] C. Urban et al. „Verwaltungsschale-basierter Ansatz für die Umsetzung von auftragsgesteuerter Produktion“. In: Automation - Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik. 2022

Stability of Momentum Stochastic Approximation Methods with Applications to Stochastic Control

Adrian Redder

Department of Electrical Engineering and
Information Technology
Automatic Control Group
Universität Paderborn
aredder@mail.upb.de

Erdal Kayacan

Department of Electrical Engineering and
Information Technology
Automatic Control Group
Universität Paderborn
erdal.kayacan@uni-paderborn.de

Keywords: Stochastic Approximation, Reinforcement Learning, Momentum, Stability, Stochastic Control

Stochastic Approximation (SA) and Reinforcement Learning (RL) have achieved cross-disciplinary success by enabling systems to reason about control policies from raw data and interactions without prior information or domain knowledge [1,2,3].

While highly successful in applications, our theoretical understanding of RL methods is still far away from how they are used in practice. For example, for the popular RL algorithms Q-Learning, Actor-Critic (AC), and their variants, it is common practice to implement the algorithm into your favorite Python library and to use an available optimizer like Adam, Adagrad, etc., to perform gradient-based optimization. These optimizers are typically momentum-based to accelerate the convergence, but they can lead to training oscillations and unstable behavior if not appropriately tuned. This has led to systematic approaches to finding the best hyperparameters for training, which often has the flavor of alchemistic trial-and-error. Therefore, a better understanding of momentum methods applied to SA and RL is important from both a theoretical and practical point of view.

In this talk, we discuss conditions for the stability and almost sure convergence of a family of stochastic approximation (SA) algorithms with momentum that hold significant importance in reinforcement learning (RL) applications. First, we will discuss a general stability and convergence theorem for SA with momentum caused by our progress on the stability of distributed SA algorithms [4]. The momentum stability theorem is established through the lens of SA affected by information delays; we study SA with momentum by viewing it as a dynamical system driven by a moving average of the SA drift $h(\cdot)$ accumulated along the past SA trajectory x_n :

$$x_{n+1} = x_n + a(n) \sum_{k=0}^n b(n,k)(h(x_k) + M_{n+1})$$

Here, $a(n)$ denotes the SA stepsize, $b(n,k)$ is a moving average weight sequence and M_{n+1} is a noise-process. SA with heavy-ball momentum or Nesterov acceleration can be expressed in this form and will be discussed as examples during the talk. However, instead of studying the moving average form as a non-autonomous second-order ODE

$$\ddot{x}(t) = -c(t)\dot{x}(t) + h(x(t))$$

we split the moving average into current and past drift contributions while treating past drifts as errors for the analysis. This allows a novel analysis of SA with momentum, while avoiding limitations of multi-timescale analysis [5].

Finally, we will discuss applications of the presented stability and convergence theory. We will discuss both heavy-ball momentum and Nesterov acceleration combined with temporal difference learning methods applied to discounted cost and average cost stochastic control problems.

References

- [1] M. Naeem, Rizv S.T.H., A. Coronato. "A gentle introduction to reinforcement learning and its application in different fields." IEEE Access 8 (2020).
- [2] U.I. Ugurlu, X.U. Pham, E. Kayacan. „Sim-to-Real Deep Reinforcement Learning for Safe End-to-End Planning of Aerial Robots." Robotics MDPI 11.5 (2022): 109.
- [3] A. Redder, A. Ramaswamy, H. Karl, "Multi-agent Policy Gradient Algorithms for Cyber-physical Systems with Lossy Communication." 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence." pp. 282-289 (2022).
- [4] A. Redder, A. Ramaswamy, H. Karl. "Stability and Convergence of Distributed Stochastic Approximations with Large Unbounded Stochastic Information Delays." Transaction on Automatic Control (under review). arXiv:2305.07091.
- [5] D. Rohan, S. Bhatnagar. "Gradient temporal difference with momentum: Stability and convergence." AAAI Conference on Artificial Intelligence. Vol. 36. No. 6. (2022).

Methodik zur Stabilitätsanalyse in totzeitbehafteten Systemen

Tessina H. Scholl

Institut für Automation
und angewandte Informatik
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
tessina.scholl@kit.edu

Lutz Gröll

Institut für Automation
und angewandte Informatik
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
lutz.groell@kit.edu

Veit Hagenmeyer

Institut für Automation
und angewandte Informatik
Karlsruher Institut
für Technologie (KIT)
veit.hagenmeyer@kit.edu

Schlüsselwörter: Totzeit, Lyapunov-Krasovskii-Funktionale, Stabilität, Robustheit

Wird ein Reglergesetz $u = k(x)$ für ein System $\dot{x} = p(x, u)$ entworfen, so wird zumeist angenommen, dass der geschlossene Regelkreis der Dynamik $\dot{x} = p(x, k(x)) = \tilde{f}(x)$ gehorcht. In der Praxis bringen aber Messungen, Netzwerkkommunikation, Berechnungszeiten oder die Aktuatorreaktion häufig eine Totzeit $h > 0$ mit sich. Die totzeitbehaftete resultierende Regelkreisdynamik $\dot{x}(t) = p(x(t), k(x(t-h))) = f(x(t), x(t-h))$ ist eine retardierte Funktionaldifferentialgleichung. Eine solche Gleichung kann mit den Standardmethoden für gewöhnliche Differentialgleichungen nicht analysiert werden.

Als Vorlage und zum Vergleich soll folgende einfache Herangehensweise für den totzeitfreien Fall $\dot{x}(t) = \tilde{f}(x(t))$ mit $\tilde{f} \in C^1$ und $\tilde{f}(0_n) = 0_n$ dienen, siehe z.B. [1]:

- i.* Die exponentielle Stabilität der Nullruhelage lässt sich über eine Eigenwertbetrachtung von $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ aus der Linearisierung $\dot{x} = Ax$ folgern.
- ii.* Für eine grobe Einzugsbereichsabschätzung kann eine quadratische Lyapunov-Funktion $V(x) = x^T P x$ konstruiert werden, die entlang der Lösungen des linearisierten Systems eine vorgegebene negativ definite Ableitung $D_{(x=Ax)}^+ V(x) = -x^T Q x$ aufweist. Die zugehörige Lyapunov-Gleichung $PA + A^T P = -Q$ nach P aufzulösen, erfordert nur eine Zeile Matlab-Code.
- iii.* Die derart konstruierte Lyapunov-Funktion $V(x)$ weist auch entlang der Lösungen des nichtlinearen Systems $\dot{x} = \tilde{f}(x) = Ax + g(x)$ eine negativ definite Ableitung auf, zumindest in dem Bereich, in dem $g(x)$ hinreichend klein ist – genauer gesagt, im Bereich $G = \{x \in \mathbb{R}^n: \|g(x)\|_2 \leq \gamma \|x\|_2\}$ mit $\gamma < \lambda_{\min}(Q)/(2 \lambda_{\max}(P))$ [1].
- iv.* Liegt $\{x \in \mathbb{R}^n: \|x\|_2 < r\}$ innerhalb dieses Bereichs G , so ist die Menge mit $V(x) < k_1 r^2$ eine grobe Einzugsbereichsabschätzung [1], wobei k_1 aus der Ungleichung $k_1 \|x\|_2^2 \leq V(x)$ stammt. Der bestmögliche Koeffizient k_1 ist der kleinste Eigenwert von P .

Im Gegensatz zum totzeitfreien Fall reicht für ein Totzeitsystem $\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-h))$ die Angabe eines Anfangsvektors $x(0) \in \mathbb{R}^n$ nicht aus, um die Lösung $x(t), t \geq 0$, zu berechnen. Bereits $\dot{x}(0)$ hängt von $x(-h)$ ab und Ähnliches gilt für $\dot{x}(t), t \in [0, h)$. Folglich ist eine Anfangsfunktion $x_0(t) = x(t)$ für $t = \theta \in [-h, 0]$ erforderlich, der Einzugsbereich ist eine Menge von Anfangsfunktionen, der Zustand x_t zum Zeitpunkt $t \geq 0$ ist durch das Lösungssegment auf dem zurückliegenden Totzeitintervall $[t-h, t]$ gegeben, definiert als $x_t(\theta) = x(t+\theta)$ für $\theta \in [-h, 0]$, und an die Stelle der Lyapunov-Funktion tritt ein Lyapunov-Krasovskii-Funktional $V(x_t)$. Dementsprechend fallen analoge Schritte zu *i.-iv.* aufwendiger aus:

- I.** Das linearisierte System lautet $\dot{x}(t) = A_0x(t) + A_1x(t - h)$. Im Gegensatz zu **i.** hat die charakteristische Gleichung $\det(\lambda I - A_0 - A_1e^{-\lambda h}) = 0$ generisch unendlich viele Lösungen λ . Dennoch lassen sich handhabbare Stabilitätskriterien daraus ableiten [4].
- II.** Vollständige Lyapunov-Krasovskii-Funktionale [2] sind ein etabliertes Konzept. Der Vorlage **ii.** folgend, wird eine Ableitung $D_{(\dot{x}(t)=A_0x(t)+A_1x(t-h))}^+V(x_t)$ einer bestimmten Form angesetzt. Es ergibt sich ein komplizierter Ausdruck für das zugehörige Funktional $V(x_t)$ mit Ein- und Zweifachintegralen, für den außerdem die sogenannte Totzeit-Lyapunov-Matrixfunktion zu berechnen ist. Um die Herangehensweise zu vereinfachen, wird eine numerische Bestimmung des Funktionals vorgeschlagen [5], die auf einer Näherung des Systems durch eine gewöhnliche Differentialgleichung basiert und somit nur die Lösung matrizenwertiger Lyapunov-Gleichungen erfordert.
- III.** Das Pendant zu G in **iii.** erweist sich für vollständige Funktionale als sehr restriktiv. Die Idee robuster Lyapunov-Krasovskii-Funktionale [6] besteht darin, die Vorlage der Lyapunov-Gleichung aus **ii.** durch die Vorlage einer algebraischen Riccati-Gleichung zu ersetzen und Methoden aus dem Bereich der absoluten Stabilität zu nutzen. Das Resultat sind signifikant weniger restriktive Schranken an den Störterm g in $\dot{x}(t) = f(x(t), x(t - h)) = A_0x(t) + A_1x(t - h) + g(x(t), x(t - h))$ (Linearisierungsrestterm, Sättigungsnichtlinearität oder Unsicherheitsterm). Die erzielbaren Schranken haben engen Bezug zum Small-Gain-Theorem, dem komplexen Stabilitätsradius, Passivitätstheoremen, dem Kreiskriterium und Integral-Quadratic-Constraints mit konstanten Multiplikatoren, wobei das Nominalsystem selbst totzeitbehaftet ist.
- IV.** Für Einzugsbereichsabschätzungen [3] ist zudem die partielle Positivdefinitheitsunter-schranke $k_1\|x(t)\|_2^2 \leq V(x_t)$ relevant. Formeln für k_1 in bei vollständigen Funktionalen stellen sich als konservativ heraus, wohingegen der Zugang in [5] numerisch auf den bestmöglichen Koeffizienten k_1 hinausläuft und auch auf robuste Funktionale [6] anwendbar ist.

Literatur

- [1] H. K. Khalil. "Nonlinear systems". 3. Aufl., Upper Saddle River: Prentice Hall. 2002.
- [2] V. L. Kharitonov und A. P. Zhabko. Lyapunov-Krasovskii Approach to the Robust Stability Analysis of Time-Delay Systems. In: *Automatica* 39 (1), S. 15–20. 2003.
- [3] T. H. Scholl; V. Hagenmeyer; L. Gröll. „Grundprinzipien für die Abschätzung von Einzugsbereichen in Totzeitsystemen“. In: *at-Automatisierungstechnik* 68 (8), S. 667–686. 2020.
- [4] T. H. Scholl und L. Gröll. "Stability Criteria for Time-Delay Systems from an Insightful Perspective on the Characteristic Equation. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 68 (4), S. 2352–2359. 2023.
- [5] T. H. Scholl; V. Hagenmeyer; L. Gröll. „What ODE-Approximation Schemes of Time-Delay Systems Reveal about Lyapunov-Krasovskii Functionals“. In: *IEEE Transactions on Automatic Control*, doi: 10.1109/TAC.2023.3347497, S.1-16. Online-Vorveröffentlichung 12/2023, im Druck 2024.
- [6] T. H. Scholl. "Lyapunov-Krasovskii Functionals of Robust Type for the Stability Analysis in Time-Delay Systems". In: *Zur Veröffentlichung eingereicht*, arXiv-Preprint verfügbar, arXiv:2312.16738, S.1-16. 2023.

Polynomiale Approximationen für datenbasierte Regelung von nichtlinearen Systemen

Tim Martin

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
tim.martin@ist.uni-stuttgart.de

Frank Allgöwer

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

Schlüsselwörter: Datenbasierte Regelung, nichtlineare Systeme, polynomiale Approximation, Sum-of-Squares Optimierung

Modellbasierte Regelungsmethoden setzen voraus, dass auf ein mathematisches Modell zugegriffen werden kann, das das Verhalten eines dynamischen Systems beschreibt. Eine mögliche Herleitung von Modellen basiert auf der Anwendung von beispielsweise den Bewegungsgesetzen von Newton oder dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Jedoch erfordert ihre Anwendung oft Expertenwissen, Vereinfachungen oder ist zeitaufwändig. Gleichzeitig ist das eigentliche Ziel der Entwurf einer Regelung, anstatt der Modellfindung.

Aus diesen Gründen haben datenbasierte Ansätze [1] an Beliebtheit gewonnen. Dort werden Regler aus gemessenen Trajektorien des zugrunde liegenden Systems entworfen. Neben der Synthese eines Reglers zielt die datengetriebene Systemanalyse darauf ab, wertvolle Einblicke in das System zu gewähren, indem regelungstechnische Eigenschaften wie Dissipativität [2] aus Daten überprüft werden.

Die Systemidentifikation repräsentiert eine sogenannte indirekte datengetriebene Methode, da zunächst ein Modell aus Daten identifiziert wird und dann durch modellbasierte Methoden analysiert oder ein Regler entworfen wird. Allerdings ist hier die Diskrepanz zwischen dem identifizierten Modell und dem zugrunde liegenden System oft unklar. Tatsächlich ist die Untersuchung der Modellabweichung selbst bei der Identifikation von linearen zeitinvarianten (LTI) Systemen ein aktives Forschungsfeld. Direkte datengetriebene Methoden für LTI-Systeme ohne einen Zwischenschritt der Modellbildung umfassen unter anderem PID-Regelung, adaptive Regelung, Reinforcement Learning, das fundamentale Lemma von [3] oder Dateninformativität.

Diese jüngsten Entwicklungen haben für LTI-Systeme umfassende Werkzeuge für die datengetriebene Systemanalyse und Regelung etabliert. Allerdings fehlen analoge Ergebnisse für nichtlineare Systeme aufgrund der Vielzahl zusätzlicher Herausforderungen. Tatsächlich ist die Identifikation eines nichtlinearen Systems aus einer endlichen Anzahl von Datenpunkten nicht möglich. Stattdessen sind zusätzliche Kenntnisse über das System erforderlich. Darüber hinaus sind die inhärenten Stabilitäts Garantien vieler Reglerentwurfsverfahren gefährdet aufgrund der nicht genau bekannten Nichtlinearitäten. Zuletzt führt eine direkte Analyse nichtlinearer Systeme im Allgemeinen zu nichtkonvexen Optimierungsproblemen für Systemanalyse und Reglerentwurf mit Performancespezifikationen. Zusammenfassend: Im Kontext der datengetriebenen Regelung nichtlinearer Systeme fehlen vielen Ansätzen rigorose Garantien, erfordern nichtkonvexe Optimierung oder setzen Kenntnisse über eine Funktionsbasis voraus, die die Systemdynamik einschließt.

Um diese Probleme zu umgehen, präsentieren wir in diesem Vortrag eine datenbasierte polynomiale Darstellung [4] nichtlinearer Systeme auf der Grundlage eines polynomialen Sektors

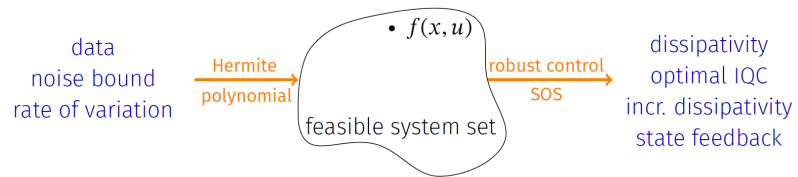


Abbildung 1: Illustration datenbasierter Systemanalyse und Regelung durch polynomiale Approximationen

aus der Taylor-Polynom-Approximation. Diese Art der Approximation wird häufig in der Regelungstechnik verwendet. Aufgrund des unbekanntem Taylor-Polynoms formulieren wir auf der Basis verrauschter Daten eine Menge von Polynomen, welche das tatsächliche Taylor-Polynom enthält. Durch die Einbeziehung des Messrauschens, des Fehlers der Polynomapproximation und von potentiell vorhandenem Vorwissen über die Systemdynamik erhalten wir durch Sum-of-Squares Relaxation konvexe semidefinite Programmierungen, um Dissipativitätseigenschaften von nichtlinearen Systemen mit rigorosen Garantien zu überprüfen oder Zustandsrückführungen mit Stabilitäts- und Performancegarantien zu entwerfen. Diese Vorgehensweise kann durch Hermite-Polynom-Approximation und die Kombination mehrere databasierter Polynomapproximationen erweitert werden, was zu einer weniger konservativen polynomiellen Systemdarstellung führt.

Literatur

- [1] Z. S. Hou and Z. Wang. "From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective". In: *Information Sciences*, 235:3-35, 2013.
- [2] J. C. Willems. "Dissipative dynamical systems part I: General theory". In: *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 45:321-351, 1972.
- [3] J. C. Willems, P. Rapisarda, I. Markovsky, and B. L. M. De Moor. "A note on persistency of excitation". In: *Systems & Control Letters*, 54(4):325-329, 2005.
- [4] T. Martin and F. Allgöwer. "Data-driven system analysis of nonlinear systems using polynomial approximation". In: *IEEE Transactions on Automatic Control (Early Access)*, DOI: 10.1109/TAC.2023.3321212, 2023.

Time-Freezing für Optimalsteuerungsprobleme mit Zustands-sprüngen

Armin Nurkanović

Lehrstuhl für Systemtheorie, Regelungstechnik
und Optimierung
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
armin.nurkanovic@imtek.uni-freiburg.de

Moritz Diehl

Lehrstuhl für Systemtheorie, Regelungstechnik
und Optimierung
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
moritz.diehl@imtek.uni-freiburg.de

Schlüsselwörter: Optimalsteuerung, Systeme mit Zustandssprüngen, Nichtglatten Dynamischen Systemen, Numerische Optimierung

Dieser Vortrag befasst sich mit der numerischen Lösung von Optimalsteuerungsproblemen mit nichtglatten dynamischen Systemen mit Zustandssprüngen. Bekannte Beispiele solcher Systeme sind Starrkörpermodelle mit Kontakten und Reibung, die z.B. in der Robotik häufig verwendet werden.

Optimalsteuerungsproblemen mit Systemen mit Zustandssprüngen sind aufgrund ihrer Nichtglattheit numerisch sehr schwierig zu behandeln. Konventionelle direkte Methoden erreichen für solche Probleme nur eine Genauigkeit erster Ordnung, und die zeitdiskreten numerischen Sensitivitäten konvergieren nicht zu den richtigen Werten. Infolgedessen können die Algorithmen zu lokalen Scheinlösungen konvergieren [1].

Um diese numerischen und theoretischen Schwierigkeiten zu überwinden, wird der Time-Freezing Ansatz eingeführt [2]. Dabei werden Systeme mit Zustandssprüngen in äquivalente stückweise glatte Systeme umformuliert. Diese haben nur noch eine unstetige Dynamik, aber stetige Lösungen und sind numerisch wesentlich einfacher zu behandeln. Die Hauptidee des Time-Freezings besteht darin, einen Zeitzustand und eine Hilfsdifferentialgleichung im unzulässigen Bereich des Zustandsraums des ursprünglichen Systems zu definieren. Diese Hilfsdifferentialgleichung verbindet die glatten Trajektorienstücke des ursprünglichen Systems und

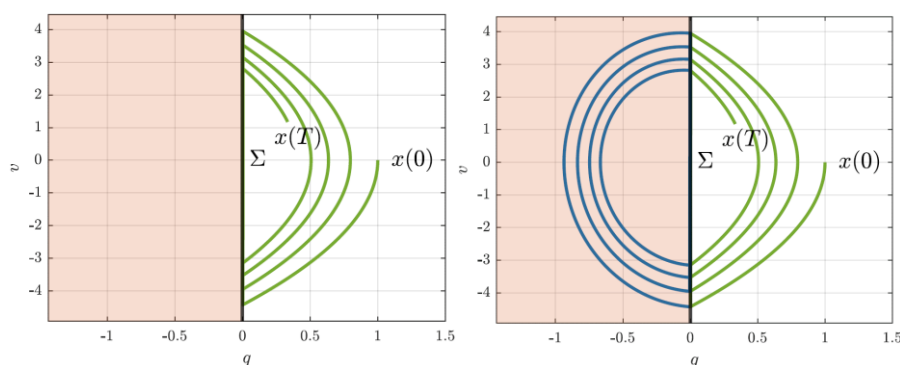


Abbildung 1. Die linke Abbildung zeigt eine Trajektorie des Originalsystems mit Zustandssprüngen (grüne Kurve) im Zustandsraum. Sobald die Trajektorie den rot markierten unzulässigen Bereich erreicht, muss die Trajektorie springen. Die rechte Abbildung zeigt das neue System mit der Erweiterung durch die Hilfsdynamik im unzulässigen Bereich (blaue Kurve), wodurch die Gesamtrajektorie stetig wird.

gibt dessen Zustandssprünge exakt wieder, siehe Abbildung 1. Der Time-Freezing Ansatz unterscheidet zwischen numerischer und physikalischer Zeit. Die Evolution des Zeitzustands (der physikalischen Zeit) ist im Definitionsbereich der Hilfsdifferentialgleichung eingefroren, wie in Abbildung 2 dargestellt. Betrachtet man nur die Teile der Trajektorie, in denen sich der Zeitzustand entwickelt hat, so erhält man die Lösung des ursprünglichen Systems wiederherstellen, siehe Abbildung 3. Dieser Ansatz wurde für verschiedene Modellklassen von Systemen mit Zustandssprüngen erweitert [3, 4].

Die neu formulierten Optimalsteuerungsprobleme können nun mit der Methode der Finiten Elemente mit Schalterkennung (FESD) [5] diskretisiert werden, wenn eine effiziente und hochgenaue Lösung gewünscht ist. Darüber hinaus ist das resultierende Optimierungsproblem praktisch mit kontinuierlichen Optimierungsmethoden lösbar, auch wenn die ursprünglichen Probleme aufgrund der Zustandssprünge diskrete Änderungen aufweisen. Die hier vorgestellten Methoden werden mit zahlreicheren numerischen Beispielen illustriert.

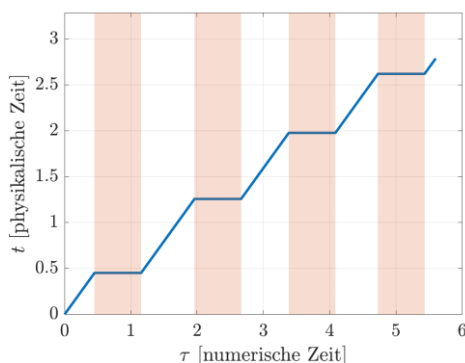


Abbildung 2. Verlauf der physikalischen Zeit in Abhängigkeit von der numerischen Zeit. Die physikalische Zeit bleibt stehen, wenn Zustandssprünge durch die Hilfsdynamik (rote Streifen) abgebildet werden.

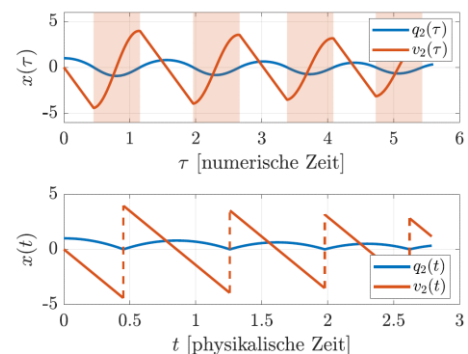


Abbildung 3. Trajektorien als Funktion der numerischen Zeit (oben), die roten Streifen markieren Intervalle, in denen die Hilfsdynamik aktiv war. Verlauf der rekonstruierten un stetigen Trajektorien als Funktion der physikalischen Zeit (unten).

Literatur

- [1] Stewart, D. E., Anitescu, M. Optimal control of systems with discontinuous differential equations. *Numerische Mathematik* 114, 4, (2010), 653–695,
- [2] Nurkanović, A., Sartor, T., Albrecht, S., Diehl, M. A time-freezing approach for numerical optimal control of nonsmooth differential equations with state jumps. *IEEE Control Systems Letters*, 5(2), (2021), 439-444.
- [3] Nurkanović, A., Diehl, M. Continuous optimization for control of hybrid systems with hysteresis via time-freezing. *IEEE Control Systems Letters*, 6, (2022), 3182-3187.
- [4] Nurkanović, A., Albrecht, S., Brogliato, B., Diehl, M. The time- Freezing reformulation for numerical optimal control of complementarity Lagrangian systems with state jumps. *Automatica*, 158, (2023), 111295.
- [5] Nurkanović, A., Diehl, M. NOSNOC: A software package for numerical optimal control of nonsmooth systems. *IEEE Control Systems Letters*, 6, (2022), 3110-3115.

Konvexe online Optimierung zur Regelung dynamischer Systeme

Marko Nonhoff
Institut für Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover
nonhoff@irt.uni-hannover.de

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

Schlüsselwörter: Konvexe online Optimierung, Dynamic Regret, optimale Regelung mit zeitvarianten Kostenfunktionen

Konvexe online Optimierung (engl. online convex optimization, OCO) ist ein Framework zur sequentiellen Entscheidungsfindung in dynamischen Umgebungen, charakterisiert durch zeitvariante Kostenfunktionen und Nebenbedingungen [1]. Im OCO Framework muss ein Algorithmus zu jedem Zeitschritt eine Aktion wählen, die nur auf vorherigen Kostenfunktionen und Aktionen des Algorithmus basieren darf. Erst nachdem die Aktion des Algorithmus implementiert wurde, wird die Kostenfunktion zum aktuellen Zeitpunkt enthüllt. In der Praxis wird OCO in vielen Anwendungsgebieten eingesetzt, die durch dynamische Umweltbedingungen gekennzeichnet sind, zum Beispiel in Energieverteilungsnetzen, in denen ein Algorithmus zu jedem Zeitschritt adaptiv auf zeitvariante regenerative Energieproduktion und dynamische Verbraucher reagieren muss.

Motiviert durch die immer komplexeren, dynamischen und zeitvarianten Umgebungen, in denen Regelungsalgorithmen heutzutage operieren, erweitern wir das OCO Framework in diesem Vortrag, so dass ein dynamisches System, das dem Problem zu Grunde liegt, berücksichtigt werden kann. Insbesondere stellen wir Regelungsalgorithmen vor, die niedrige Kosten für das zeitvariante Optimierungsproblem

$$\begin{aligned} \min_u \sum_{t=0}^T L_t(u_t, x_t) \\ \text{s. t. } \quad x_{t+1} = Ax_t + Bu_t \\ \quad \quad x_t \in X, u_t \in U \end{aligned}$$

erreichen. Wie im OCO Framework, sind die zeitvarianten Kostenfunktionen L_t unbekannt, das heißt, zu jedem Zeitschritt haben die vorgestellten Algorithmen nur Zugriff auf vorherige Kostenfunktionen. Solche Optimierungsprobleme entstehen in der Regelungstechnik zum Beispiel wenn ein dynamisches System einer Solltrajektorie folgen soll, die selber in Echtzeit berechnet und dem Regler zur Verfügung gestellt wird.

In diesem Vortrag stellen wir zuerst eine Methode zum Reglerentwurf [2] zur Lösung dieses Problems vor, wobei der Regler in der Lage ist, der zeitvarianten optimalen Ruhelage des Systems, die von der zeitvarianten Kostenfunktion abhängt, zu folgen. Wie im OCO Framework zeichnet sich der entwickelte Regler durch eine schnelle Berechnungszeit aus, da keine komplexen Optimierungsprobleme online gelöst werden müssen. Darüber hinaus zeigen wir, dass der geschlossene Kreis niedrige transiente Kosten erzielt, in dem wir eine obere Schranke für seinen „dynamic regret“ herleiten. Diese obere Schranke impliziert

asymptotische Stabilität der optimalen Ruhelage für den Fall, dass die Kostenfunktion konstant bleibt [3].

In der Praxis müssen Regler Nebenbedingungen wie Aktuatorlimitierungen und Sicherheitsbeschränkungen einhalten und mit Messrauschen und Modellunsicherheiten zurechtkommen. Zu diesem Zweck erweitern wir den vorgestellten Algorithmus und diskutieren seine Robustheit sowie Garantien zur Einhaltung dieser Nebenbedingungen [4]. Darüber hinaus entwickeln wir eine rein datenbasierte Version des vorgestellten Frameworks für den Fall, dass kein Modell und nur Eingangs-Ausgangs-Messungen zum Reglerentwurf zur Verfügung stehen.

Literatur

- [1] E. Hazan. „Introduction to Online Convex Optimization“. In: *MIT Press*. 2022.
- [2] M. Nonhoff und M. A. Müller. „Online Gradient Descent for Linear Dynamical Systems“. In: *IFAC-PapersOnLine*. 2020.
- [3] M. Nonhoff und M. A. Müller. „On the relation between dynamic regret and closed-loop stability“. In: *Systems & Control Letters*. 2023.
- [4] M. Nonhoff, E. Dall'Anese und M. A. Müller. „Online convex optimization for robust control of constrained dynamical systems“. Submitted to *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024. Available online at arXiv 2401.04487.
- [5] M. Nonhoff und M. A. Müller. „Online Convex Optimization for Data-Driven Control of Dynamical Systems“. In: *IEEE Open Journal of Control Systems*. 2022.

Semidefinite Programmierung zur Manipulation akustischer Fallen in Echtzeit

Sebastian Zehnter

Lehrstuhl für Regelungstechnik
in der Ingenieurinformatik
Universität Augsburg
sebastian.zehnter@uni-a.de

Christoph Ament

Lehrstuhl für Regelungstechnik
in der Ingenieurinformatik
Universität Augsburg
christoph.ament@uni-a.de

Schlüsselwörter: Berührungslose Handhabung, Akustische Levitation, Semidefinite Programmierung, akustische Fallen, Modellinversion



Abbildung 1: Skizze eines Positionsregelkreises für ein akustisches Greifsystem

Die akustische Strahlungskraft ist ein nichtlineares physikalisches Phänomen, das aus der Wechselwirkung von Schallwellen mit der Oberfläche von Objekten resultiert [1]. Bei der akustischen Levitation wird diese Kraft genutzt, um der Gravitation entgegenzuwirken und Objekte stabil in Schwebelage zu halten [2,3]. Im Vergleich zu anderen berührungslosen Handhabungsmethoden, die auf magnetischen, elektrischen, optischen oder aerodynamischen Kräften basieren [4], liegt der größte Vorteil der akustischen Levitation in ihrer Eignung für eine Vielzahl an Stoffen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften. Dies trägt maßgeblich dazu bei, dass die akustische Levitation eine vielversprechende Technik für zahlreiche Anwendungsgebiete darstellt, z.B. der Fotogrammetrie [5], der Kristallographie [6] oder der Pharmazie [7].

In aktuellen akustischen Greifern werden einzelne Langevin-Schallwandler durch Arrays mit phasengesteuerten Schallwandlern (phased arrays of transducers = PAT) [8] im Ultraschallbereich ersetzt, da PATs komplexere Schalldruckfelder erzeugen können. Durch eine nichtlineare Optimierung [3] kann ein Vektor der Phasenwinkel ϕ^* zur Ansteuerung des PATs gefunden werden, was zu einer Ausbreitung eines gewünschten Schalldruckfelds führt. Dieses übt auf ein Objekt an der Position \mathbf{r} die akustische Strahlungskraft $\mathbf{F}_{\text{rad}}(\mathbf{r}, \phi)$ aus, siehe Abb. 1. In diesem Feld, das auch als akustische Falle [9] bezeichnet wird, können Objekte gezielt umschlossen und stabil levitiert werden. Durch eine zeitliche Änderung des akustischen Feldes ist es weiterhin möglich, das Objekt durch eine Verschiebung der Falle berührungslos zu manipulieren.

Bei dieser Manipulation wird in den meisten akustischen Greifsystemen gegenwärtig eine modellfreie kinematische Steuerung basierend auf der Methode der holografischen akustischen Elemente [9] eingesetzt, bei welcher das Fallenzentrum durch eine zeitliche Änderung der Fokallinse verschoben wird. Der wesentliche Nachteil dieses Ansatzes ist der fehlende, eindeutige Rückschluss $\mathbf{F}^* \rightarrow \phi^*$, der für die Entwicklung einer modellbasierten Regelung obligatorisch ist. Eine solche Regelung ist wiederum notwendig, um bestehende Nachteile akustischer Greifsysteme, wie z.B. die geringe Dynamik und unerwünschte Oszillationen des levitierten Objekts, durch Kompensation unbekannter Störungen (z.B. acoustic streaming [10], acoustic viscous torques [11]) auszugleichen. Erst dann wird es möglich sein, akustische Greifer nicht nur als Prototypen im akademischen Kontext, sondern zuverlässig in industriellen

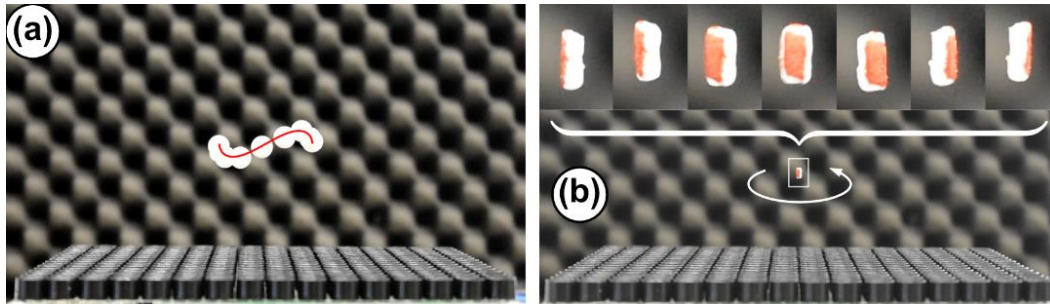


Abbildung 2: Translation (a) und Rotation (b) eines levitierten Objekts mittels einer Vorsteuerung

Anwendungen einzusetzen. Den Schlüssel, um diese Zielstellung zu erreichen, stellt ein inverses Modell da, das ausgehend von einer gewünschten kommandierten Kraft F^* des Reglers eine geeignete Ansteuerung ϕ^* für das PAT in Echtzeit berechnet, siehe Abb. 1.

Daher widmet sich dieser Vortrag der systematischen Realisierung eines solchen inversen Modells, mit welchem akustische Fallen in Echtzeit verschoben werden können. Hierbei haben detaillierte Untersuchungen gezeigt, dass die Unterteilung des Modells in zwei Komponenten zielführend ist. Die erste Komponente approximiert die räumliche Kraftdistribution einer gegebenen Falle durch multivariate polynomiale Modelle und führt eine gewünschte Strahlungskraft F^* eindeutig auf eine Verschiebung Δr des Fallenzentrums relativ zur aktuellen Position r des Schwerpunkts des Objekts zurück. Die zweite Komponente greift auf Methoden der semidefiniten Programmierung zurück, um das komplexe Schalldruckfeld einer gegebenen akustischen Falle um ebendiesen Vektor Δr zu verschieben und die kausale Wirkungskette $F^* \rightarrow \Delta r \rightarrow \phi^*$ zu realisieren. Eine Betrachtung experimenteller Resultate (siehe Abb. 2), welche das inverse Modell als Grundlage für eine optimale Vorsteuerung nutzen, rundet den Vortrag ab.

Literatur

- [1] Bruus, H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a chip* 12, 1014–1021 (2012).
- [2] Andrade, M. A. B., Camargo, T. S. A. & Marzo, A. Automatic contactless injection, transportation, merging, and ejection of droplets with a multifocal point acoustic levitator. *The Review of scientific instruments* 89, 125105 (2018).
- [3] Zehnter, S., Andrade, M. A. B. & Ament, C. Acoustic levitation of a Mie sphere using a 2d transducer array. *Journal of Applied Physics* 129, 134901 (2021).
- [4] Brandt, E. H. Levitation in physics. *Science (New York, N.Y.)* 243, 349–355 (1989).
- [5] Helander, P. et al. Omnidirectional microscopy by ultrasonic sample control. *Applied Physics Letters* 116, 194101 (2020).
- [6] Tsujino, S. & Tomizaki, T. Ultrasonic acoustic levitation for fast frame rate x-ray protein crystallography at room temperature. *Scientific reports* 6, 25558 (2016).
- [7] Barbosa, E. J. et al. Acoustic levitation and high-resolution synchrotron x-ray powder diffraction: A fast screening approach of niclosamide amorphous solid dispersions. *International journal of pharmaceutics* 602, 120611 (2021).
- [8] Zehnter, S. & Ament, C. A modular FPGA-based phased array system for ultrasonic levitation with MATLAB. In *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 654–658 (IEEE, 2019).
- [9] Marzo, A. et al. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature communications* 6, 8661 (2015).
- [10] Hasegawa, K., Abe, Y., Kaneko, A., Yamamoto, Y. & Aoki, K. Visualization measurement of streaming flows associated with a single-acoustic levitator. *Microgravity Science and Technology* 21, 9–14 (2009).
- [11] Busse, F. H. & Wang, T. G. Torque generated by orthogonal acoustic waves—theory. *The Journal of the Acoustical Society of America* 69, 1634–1638 (1981).

Ein Entwurfsverfahren zur robusten verteilten Parameterschätzung

Nicolai Lorenz-Meyer

Fachgebiet Regelungssysteme und
Netzleittechnik
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg
lorenz-meyer@b-tu.de

Johannes Schiffer

Fachgebiet Regelungssysteme und
Netzleittechnik
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg
schiffer@b-tu.de

Schlüsselwörter: Verteilte Parameterschätzung, strikte Lyapunov-Funktion, Robustifizierung, Trägheitsschätzung

Verteilte Parameterschätzung spielt in vielen modernen technischen und wissenschaftlichen Anwendungen aufgrund der großen und stetig wachsenden Anzahl von Sensoren im Feld eine immer wichtigere Rolle. Zwei wesentliche Gründe hierfür sind, dass bei einer zentralen Messdatenverarbeitung ein einzelner Fehlerpunkt die Gesamtfunktion zum Erliegen bringen kann und bei räumlich weit verteilten Sensoren Kommunikationskanäle leichter überlastet werden [1], [2]. Ein vielversprechender Ansatz zur verteilten Lösung dieses Problems wird allgemein als Consensus + Innovations (C+I) [1] bezeichnet. Dieser basiert auf der Kombination von Konsensprotokollen zur Erreichung globaler Parameterkonvergenz mit lokaler Innovation, d.h. einer Aktualisierung der Parameterschätzung auf Basis lokaler Messwerte. In der Literatur sind zwar zahlreiche Erweiterungen dieses Ansatzes vorhanden, es gibt jedoch keine Methode zur robusten Auslegung der Verstärkungsfaktoren bei Modellungenauigkeiten und Störgrößen, wie Messrauschen.

Im Vortrag wird eine, auf linearen Matrixungleichungen basierende, Methode zur Bestimmung der Verstärkungsfaktoren des C+I-Algorithmus vorgestellt [3]. Diese garantiert bei Vorliegen von Messrauschen und Modellungenauigkeiten eine obere Schranke der \mathcal{L}_2 –Verstärkung der globalen Fehlerdynamik in Bezug auf einen zu wählenden Performance-Ausgang. Grundlage für dieses Ergebnis ist die Konstruktion einer strikten Lyapunov-Funktion für die Fehlerdynamik des Algorithmus.

Des Weiteren wird die Anwendung der Methode zur Schätzung der Trägheit in elektrischen Verbundnetzen demonstriert. Selbige erstrecken sich über räumlich weit ausgedehnte Bereiche, wie z.B. das kontinentaleuropäische Verbundnetz, und werden typischerweise von einer Vielzahl unabhängiger Übertragungsnetzbetreiber betrieben. Die Trägheit des Gesamtsystems hat einen entscheidenden Einfluss auf die Systemdynamik und die Schätzung dieses Parameters spielt somit eine wichtige Rolle zur Gewährleistung eines stabilen Netzbetriebs.

Literatur

- [1] S. Kar und J. M. Moura. „Consensus + innovations distributed inference over networks: cooperation and sensing in networked systems“. In: IEEE Signal Processing Magazine, vol. 30, no. 3, pp. 99–109, 2013.

- [2] S. Xie und L. Guo. „A necessary and sufficient condition for stability of LMS-based consensus adaptive filters”. In: Automatica, vol. 93, pp. 12–19, 2018.
- [3] N. Lorenz-Meyer, J. G. Rueda-Escobedo, J. A. Moreno und Johannes Schiffer. „A robust consensus + innovations-based distributed parameter estimator“. 2024. Zur Veröffentlichung eingereicht.

Beobachterentwurf für lineare zeitinvariante Mehrgrößensysteme mit unbekanntem Eingangsgrößen

Helmut Niederwieser

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz
helmut.niederwieser@tugraz.at

Markus Reichhartinger

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik
Technische Universität Graz
markus.reichhartinger.tugraz.at

Schlüsselwörter: Beobachternormalformen, Mehrgrößensysteme, unbekanntem Eingangsgrößen

Die Schätzung von Zustandsgrößen dynamischer Systeme die von unbekanntem Eingangsgrößen, wie z.B. nicht messbarer externer Störungen, angeregt werden, ist in verschiedensten Anwendungsbereichen der Regelungstechnik von großem Interesse. Die Schwierigkeit im Beobachterentwurf besteht unter anderem darin, dass die unbekanntem Eingangsgrößen nicht explizit in den Beobachter aufgenommen werden können und somit auch die resultierende Schätzfehlerdynamik anregen.

Aus einer eingehenden Analyse geht hervor, dass alle bestehenden Beobachterkonzepte für Systeme mit unbekanntem Eingängen zumindest einen der folgenden Nachteile aufweisen:

1. Das System muss bestimmte strukturelle Bedingungen erfüllen, welche eine starke Einschränkung der Systemklasse darstellen, siehe z.B. [1] und [2].
2. Zur Sicherstellung der Konvergenz der Schätzfehler müssen die Trajektorien des Systems beschränkt sein, siehe z.B. [3]. Die Einstellparameter des Beobachters hängen dabei von den Schranken der einzelnen Systemzustände ab.
3. Die Anzahl der Einstellparameter sowie die Ordnung des Beobachters ist mindestens doppelt so groß wie die Systemordnung, siehe z.B. [4]. Die Hauptschwierigkeit bei diesen Methoden ist die Wahl der sich gegenseitig beeinflussenden Beobachterparameter.

Es wurde daher ein neues Beobachterkonzept für stark beobachtbare, linear zeitinvariante Mehrgrößensysteme mit unbekanntem Eingängen entwickelt, dieses wird im Rahmen dieses Vortrages präsentiert. Der wesentliche Teil des Beobachterkonzeptes beruht auf einer neuen Beobachternormalform [5], welche im Gegensatz zu klassischen Normalformen auch den Einfluss der unbekanntem Eingangsgrößen auf das System mitberücksichtigt. Diese Normalform stellt das Gesamtsystem als verkoppelte Teilsysteme mit jeweils einem einzigen Ausgang dar. Die Kopplungen sind aus Sicht des Beobachterentwurfes günstig gewählt, da diese entweder als Ausgangsrückführungen betrachtet werden können oder rein serielle Kopplungen darstellen, d.h., jedes Teilsystem wird nur von den Zustandsgrößen voriger Teilsysteme beeinflusst.

Für die einzelnen Teilsysteme können unterschiedliche Beobachter entworfen werden. Für Teilsysteme, die von keiner unbekanntem Eingangsgröße beeinflusst werden, ist beispielsweise die Wahl eines Luenbergerbeobachters ausreichend, um die Konvergenz des Schätzfehlers sicherzustellen. Für Teilsysteme mit einer Anregung durch unbekanntem Eingangsgrößen müssen hingegen geeignete robuste Beobachterentwurfverfahren angewandt werden.

Der resultierende gesamte Beobachter erfordert weder restriktive Bedingungen an die betrachtete Systemklasse, noch werden beschränkte Trajektorien des zugrundeliegenden Systems vorausgesetzt oder die Beobachterordnung sowie die Anzahl der Einstellparameter unnötigerweise erhöht. Im Eingrößenfall kann der Beobachterentwurf direkt in Originalkoordinaten erfolgen. Die einfache Entwurfsformel [6] kann dabei als nichtlineare Verallgemeinerung der Eigenwertvorgabe von Ackermann aufgefasst werden.

Neben Simulationen wird die vorgeschlagene Methode auch anhand einer praktischen Anwendung präsentiert. Dabei wird das Temperaturprofil entlang eines Aluminiumstabes geschätzt, in welchen an bestimmten Positionen für den Beobachter unbekannte Wärmeströme eingebracht werden [7]. Temperaturverläufe an beispielhaften Positionen sind in Abbildung 1 dargestellt.

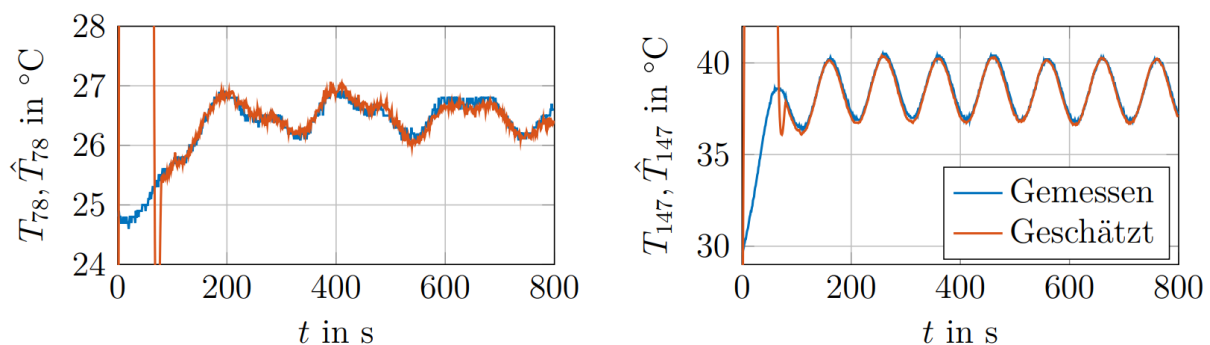


Abbildung 1: Exemplarische Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen entlang eines Aluminiumstabes, in welchen unbekannte Wärmeströme eingebracht werden.

Literatur

- [1] M. L. Hautus. „Strong detectability and observers “. In: *Linear Algebra and its Applications*. 1983.
- [2] H. Ríos et al. „Robust output-control for uncertain linear systems: Homogeneous differentiator-based observer approach “. In: *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2017.
- [3] J. Davila et al. „Finite-time state observation for nonlinear uncertain systems via higher-order sliding modes“. In: *International Journal of Control*. 2009.
- [4] L. Fridman et al. „Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding-modes“. In: *International Journal of Systems Science*. 2007.
- [5] H. Niederwieser et al. „Unknown input observer design for linear time-invariant multivariable systems based on a new observer normal form“. In: *International Journal of Systems Science*. 2022.
- [6] H. Niederwieser et al. „A generalization of Ackermann’s formula for the design of continuous and discontinuous observers“. In: *Proceedings of IEEE 58th conference on decision and control (CDC)*. 2019.
- [7] H. Niederwieser et al. „Unknown input observer for temperature profile estimation in systems with unknown heat fluxes“. Submitted to: *European Control Conference*. 2024.

Algebraische Flachheitsanalyse und nichtlinearer Beobachterentwurf

Klemens Fritzsche

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie
TU Dresden
klemens.fritzsche@tu-dresden.de

Klaus Röbenack

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

Schlüsselwörter: nichtlineare Systeme, differentielle Flachheit, flache Eingänge, Beobachterentwurf

Das systemtheoretische Konzept der Flachheit, welches in den frühen 1990er Jahren eingeführt wurde [1], hat sich als äußerst bedeutsam bei typischen nichtlinearen Regelungs- und Steuerungsproblemen verschiedener Systemklassen herausgestellt, sofern ein sog. flacher Ausgang des Systems bekannt ist. Trotz zahlreicher Anwendung flachheitsbasierter Methoden in praktisch motivierten Beispielen ist eine systematische Berechnung flacher Ausgänge ein nach wie vor ungelöstes Problem. Die als theoretisch ideale Sensorpositionen interpretierbaren rein virtuellen Größen erlauben (vereinfacht ausgedrückt) eine freie Parametrisierung aller Systemgrößen, woraus eine besonders einfache Systemdarstellung möglich wird. Die nichtlineare Regelung und Steuerung kann dadurch auf den Einsatz der wohlvertrauten linearen Methoden zurückgeführt werden. Darüber hinaus wurde das duale Konzept der flachen Eingänge eingeführt [2], welches durch die im Entwurfsprozess technischer Systeme aufkommende Frage nach geeigneten Stelleingriffen motiviert werden kann.

Der Vortrag befasst sich mit einer algebraischen Perspektive auf die Flachheitsanalyse, welche eine vereinheitlichte Untersuchung verschiedener Systemklassen ermöglicht. Hierfür wird das Konzept der verallgemeinerten Jacobi-Matrix betrachtet, welche den Matrizen über dem Ring der nichtkommutativen Ore-Polynome entstammt. Aufbauend darauf kann eine verbreitete differentialgeometrisch motivierte Aussage [3], welche als Grundlage für die Bestimmung flacher Ausgänge dient, im Kern auf eine dynamische Fassung des Satzes von der Umkehrabbildung zurückgeführt werden [4]. Daraus resultiert jedoch, dass diese Aussage nicht notwendigen Charakter hat, was durch ein Beispiel untermauert werden kann und damit Ergebnisse aus der Literatur in Frage stellt. Dass trotz erfolgreicher Anwendung der Aussage jedoch keine *freie* Parametrisierbarkeit und damit Flachheit folgen muss, kann durch ein weiteres Beispiel gezeigt werden. Damit ist die zu prüfende Bedingung auch nicht hinreichend. Dennoch hat der Zugang aus [3] in zahlreichen Fällen zur erfolgreichen Bestimmung flacher Ausgänge geführt, sodass die mit letzterem Beispiel zusammenhängende Problematik als Ausnahmefall eingestuft werden kann. Unter dem Ausschluss dieser, lässt sich der Ansatz durch eine algebraische Argumentation auch auf Systeme mit nicht-dynamischen Nebenbedingungen übertragen. Hierbei wird eine unimodulare Zeilenvervollständigung der verallgemeinerten Jacobi-Matrix des Systems bestimmt, die im Anschluss noch einer Integritätsbedingung genügen muss. Ist diese erfüllt, so erhält man durch Integration schließlich einen flachen Ausgang.

Dieser Ansatz lässt sich auch auf die Berechnung flacher Eingänge übertragen, wobei eine unimodulare Spaltenvervollständigung bestimmt wird und statt der Integrabilitätsbedingung eine zusätzliche Unimodularitätsbedingung erfüllt sein muss, was in der Regel jedoch der Fall ist. Für die unimodulare Zeilen- und Spaltenvervollständigung, sowie eine effiziente Unimodularitätsprüfung stehen Werkzeuge zur Verfügung [5].

Neben der Aktorplatzierung beim Entwurf technischer Systeme spielen flache Eingänge im nichtlinearen Beobachterentwurf eine Rolle [6]. Für zeitkontinuierliche Zustandssysteme ist der Normalformbeobachter weit verbreitet, dessen Anwendbarkeit jedoch an restriktive Existenzbedingungen geknüpft ist. Für den Fall, dass ein solcher Beobachter nicht existiert, kann dem System unter Zuhilfenahme eines Kompensators die Dynamik eines Systems mit flachem Eingang so aufgeprägt werden, dass die Existenzbedingungen des Normalformbeobachters erfüllt sind. Aus den geschätzten Größen dieses Systems lässt sich aufgrund der Flachheit anschließend eine Rekonstruktion des Zustands des ursprünglichen Systems bestimmen. Dieses Vorgehen kann auch auf andere Systemklassen übertragen werden.

Literatur

- [1] M. Fliess, J. Lévine, P. Martin und P. Rouchon. „Flatness and defect of non-linear systems: introductory theory and examples“. In: *International Journal of Control*, 61(6), S. 1327-1361, 1995.
- [2] S. Waldherr und M. Zeitz. „Conditions for the existence of a flat input“. In: *International Journal of Control*, 81(3), S. 439-443, 2008.
- [3] J. Lévine. „On necessary and sufficient conditions for differential flatness“. In: *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing*, 22, S. 47-90 2011.
- [4] K. Fritzsche. „Algebraische Flachheitsanalyse nichtlinearer Systeme“. *Dissertation, TU Dresden*. 2023.
- [5] K. Fritzsche und K. Röbenack. „Unimodular Completions and Orthogonal Complements of Matrices over Univariate Ore Extensions“. In: *SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications*, 44(1), S. 128-155, 2023.
- [6] K. Fritzsche, K. Röbenack und Y. Guo. „Flat input based canonical form observers for non-integrable nonlinear systems“. In: *System Theory, Control and Computing Journal*, 2(1), S. 13-21, 2022.

Nichtlineare Regelung von Kompressionskältemaschinen

Ricus Husmann

Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
ricus.husmann@uni-rostock.de

Harald Aschemann

Lehrstuhl für Mechatronik
Universität Rostock
harald.aschemann@uni-rostock.de

Schlüsselwörter: Nichtlineare Regelung, Thermofluidische Systeme

In Deutschland sind schätzungsweise 140 Millionen Kältemaschinen im Einsatz. Der Gesamtenergiebedarf war hierfür in 2017 etwa 87 TWh, wovon 84% elektrische Energie darstellt. Dies führte dazu, dass etwa 14% des gesamten deutschen Bedarfs an elektrischer Energie für die Kälte-Bereitstellung genutzt wird. Bei dem überwiegenden Teil der Kältemaschinen handelt es sich um Kompressionskältemaschinen (KKM). In den letzten Jahren ist die Anzahl durch die Verbreitung von Wärmepumpen und Serverkühlssystemen eher noch weiter gestiegen. Eine kleine Effizienzsteigerung in diesem Prozess lässt also eine erhebliche Auswirkung auf den Gesamtenergieverbrauch erwarten.

Eine KKM gemäß Abbildung 1 besteht standardmäßig aus 4 Komponenten: Verdampfer, Kompressor, Kondensator und Expansionsventil bzw. Drossel. Es gibt grundsätzlich zwei Regelgrößen, die Überhitzung des Kältemittels vor dem Kompressor und die Kälteleistung. Prozesstechnisch korreliert hierbei eine kleine Überhitzung mit einer großen Effizienz. Eine negative Überhitzung muss allerdings vermieden werden, um den Kompressor nicht zu beschädigen.

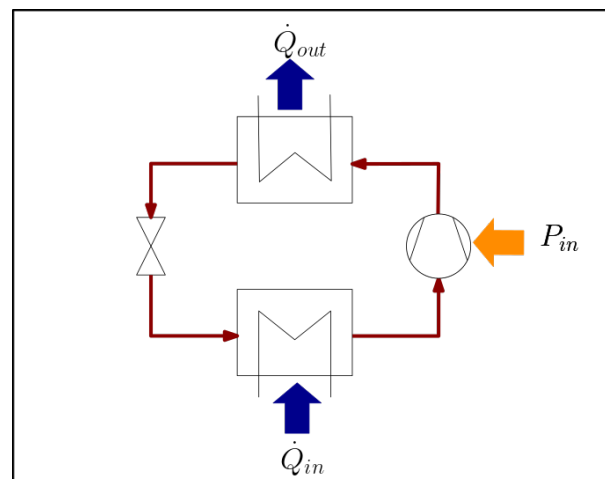


Abbildung 1: Kompressionskältemaschine

In der Praxis eingesetzte Regelungskonzepte umfassen häufig Zweipunktregler für den Kompressor und die Nutzung fester Drosseln oder thermostatischer Expansionsventile, die proportionale mechanische Regler darstellen. In den letzten Jahren sind zusätzlich elektronische Expansionsventile und drehzahlvariable Kompressoren aufgekommen, die in Verbindung mit PI-Reglern eingesetzt werden. Für den vorliegenden nichtlinearen MIMO-Prozess besteht allerdings noch ein gewisses Optimierungspotential durch die Anwendung nichtlinearer Regelungsverfahren.

Als Grundlage der Untersuchungen erfolgte eine physikalische Modellbildung unter Anwendung der Finiten-Volumen-Methode, um ein Systemmodell in ODE-Form zu erhalten. Diese ermöglicht gegenüber einer alternativen DAE-Darstellung gewisse Vorteile in Bezug auf Systemanalyse, Reglerauslegung und verfügbare Solver bei der Systemsimulation. Ein naives Umformulieren der DAE-Darstellung führt hierbei zu einem numerisch steifen System. Es wird daher eine Systembeschreibung vorgestellt, bei der mittels geschickter Wahl der Zustände und minimaler Vereinfachungen eine numerische Steifheit vermieden wird [1].

Auf Grundlage einer reduzierten Systembeschreibung wird dann unter Verwendung der Regelgrößen Überhitzung und Kälteleistung eine Ein-Ausgangs-Linearisierung durchgeführt [2]. Es zeigt sich, dass die interne Dynamik für bestimmte Arbeitspunkte instabil werden kann. Es werden daher geeignete Ansätze präsentiert, welche die Stabilität der nichtlinearen Regelung gewährleisten [2], [3].

Neben dieser in [2] publizierten Regelung wurde bereits eine kaskadierte Regelungsstruktur auf Grundlage eines Sliding-Mode-Reglers implementiert [3]. Abschließend werden aussagekräftige Messergebnisse von Implementierungen beider Regler an einem mit zusätzlicher Sensorik versehenen Laborprüfstand vorgestellt.

Literatur

- [1] Husmann, R. and Aschemann, H.: Dynamic modelling of a vapor compression cycle. *IFAC-PapersOnLine*, 55(20), 523–528. In: *10th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD)*, 2022.
- [2] Husmann, R., Weishaupt, S., and Aschemann, H.: Nonlinear control of a vapor compression cycle by input-output linearisation. In: *27th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 193–198. 2023.
- [3] Husmann, R., Weishaupt, S., and Aschemann, H.: Cascaded sliding-mode control of a vapor compression cycle. In: *27th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2023.

Physiologische Regelung der künstlichen Beatmung Frühgeborener

Valerie Pfannschmidt

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

André Stollenwerk

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

Stefan Kowalewski

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

Schlüsselwörter: Physiologische Regelung, Kaskadenregelung, arterieller Kohlenstoffdioxid-Partialdruck, nicht-invasive Messverfahren

Frühgeborene benötigen häufig künstliche Beatmung, da die Lunge zu den letzten Organen gehört, die sich in der Schwangerschaft entwickeln. Besonders extreme Frühchen, geboren vor der 28. Schwangerschaftswoche, sind zu einem großen Teil auf künstliche Beatmung angewiesen [1]. Die natürliche physiologische Regelung der Blutgase Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid wird dabei vollständig oder teilweise überbrückt und muss anhand der Einstellung der künstlichen Beatmung umgesetzt werden. Während bereits kommerzielle Produkte für die algorithmische Regelung der Sauerstoffsättigung bei Frühgeborenen existieren, wird Kohlenstoffdioxid im Blut heute manuell durch klinisches Personal geregelt. Dabei ist das Ziel, den arteriellen Kohlenstoffdioxid-Partialdruck (PaCO_2) in einem engen Zielbereich zu halten, da sowohl Extremwerte als auch Fluktuationen mit Hirnschädigung bei Frühgeborenen assoziiert sind [2]. Besonders ein zu niedriger PaCO_2 gilt dabei als zu vermeiden [3]. Dieser auch als Clinician-in-the-Loop bezeichnete [4] Regelkreis stellt jedoch nicht nur hohe Anforderungen an ärztliches Personal, sondern ist aufgrund der hohen Anzahl zu betreuender Patient auch häufig offen. Die algorithmische Regelung des PaCO_2 in künstlich beatmeten Frühgeborenen hat deshalb das Potential ärztliches Personal zu entlasten und die Gesundheit der kleinsten Patienten zu verbessern.

In diesem Vortrag wird eine kaskadierte PaCO_2 -Regelung für Frühgeborene [5] vorgestellt. Die Regelaufgabe wird dabei unterteilt in den langsameren Vorgang der Blutgasregelung, welche ein Ventilationsziel in Form des Atemminutenvolumens (Frischluftvolumen, das pro Minute eingeatmet wird) vorgibt, sowie den schnelleren Vorgang der Ventilationsregelung, aus welchem die konkreten Einstellungen des Beatmungsgeräts, z.B. Atemfrequenz und Spitzendruck bei der Inspiration, resultieren (s. Abbildung 1).

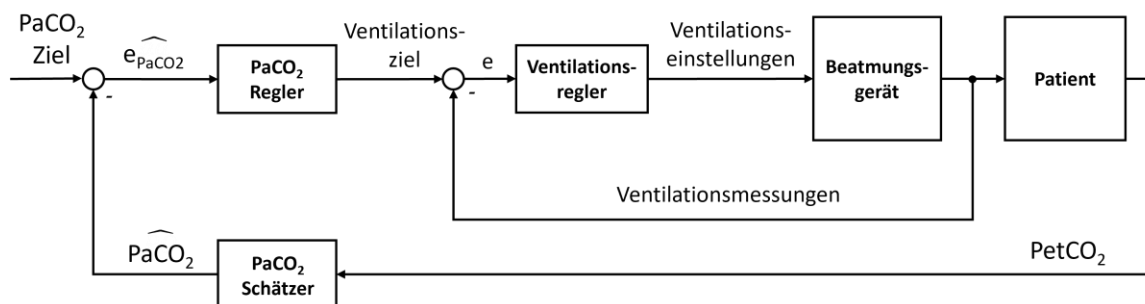


Abbildung 1: Kaskadierte Reglerstruktur zur CO₂-geführten automatisierten Beatmung Frühgeborener

Eine zentrale Herausforderung besteht dabei in der Bestimmung der physiologischen Regelgröße PaCO₂. Diese lässt sich nur durch invasive Methoden exakt messen, welche zum Schutz der sensiblen Patienten zu vermeiden sind. Auf Basis des im Atemgas nicht-invasiv messbaren end-tidalen Kohlenstoffdioxid-Partialdrucks (PetCO₂) sollen daher physiologisch wie statistisch motivierte datenbasierte Verfahren zu Schätzung des PaCO₂ zum Einsatz kommen. Die geringe Größe der Patienten, welche über Atemzugvolumina von nur wenigen Millilitern verfügen, stellt eine zusätzliche Herausforderung für die Messtechnik dar.

Neben der Bestimmung des PaCO₂ besteht ein weiteres Kernziel unserer Forschung in der Integration der Eigenatmung der Patienten (sog. Spontanatmung), welche über die Beatmungszeit die maschinelle Beatmung sukzessive ablösen soll. Schwierigkeiten liegen dabei in der Unreife der patientenseitigen Atemreglung, woraus eine hohe Dynamik der Spontanatmung resultiert.

Abschließend wird die Evaluation der Regelung im Tiermodell vorgestellt. Ergebnisse aus der Anwendung im frühgeborenen Lamm werden präsentiert und diskutiert und unterstreichen das klinische Potential der Regelung.

Literatur

- [1] B. J. Stoll *et al.* "Neonatal outcomes of extremely preterm infants from the NICHD Neonatal Research Network". In: *Pediatrics*. DOI: 10.1542/peds.2009-2959. 2010.
- [2] J. Fabres *et al.* "Both extremes of arterial carbon dioxide pressure and the magnitude of fluctuations in arterial carbon dioxide pressure are associated with severe intraventricular hemorrhage in preterm infants". In: *Pediatrics*. DOI: 10.1542/peds.2006-2434. 2007.
- [3] M. Murase and A. Ishida. "Early hypocarbia of preterm infants: its relationship to periventricular leukomalacia and cerebral palsy, and its perinatal risk factors." In: *Acta paediatrica*. DOI: 10.1111/j.1651-2227.2005.tb01793.x. 2005.
- [4] P. von Platen *et al.* "The dawn of physiological closed-loop ventilation-a review". In: *Critical care*. DOI: 10.1186/s13054-020-2810-1. 2020.
- [5] M. Buglowski and V. Pfannschmidt *et al.* "Closed-Loop Control of Arterial CO₂ in Mechanical Ventilation of Neonates." In: *2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*. DOI: 10.1109/EMBC48229.2022.9871185. 2022.

Werkzeuge und Methoden für die Freigabe von hochautomatisierten Funktionen in der Medizintechnik

Carlotta Hennigs

Institut für Medizinische Elektrotechnik
Universität zu Lübeck
carlotta.hennigs@uni-luebeck.de

Philipp Rostalski

Institut für Medizinische Elektrotechnik
Universität zu Lübeck
philipp.rostlaski@uni-luebeck.de

Schlüsselwörter: Mechanische Beatmung, In silico, Testkonzept, hochautonome Funktionen, Risikobewertung

Die zunehmende Automatisierung in der Medizintechnik erfordert innovative Ansätze, mithilfe derer die Sicherheit von hochautomatisierten und autonomen Funktionen gewährleistet werden kann. Eine besondere Herausforderung bietet hierbei eine gleichzeitig ausreichende sowie realisierbare Testfallabdeckung, da aufgrund der Komplexität in vielen Anwendungsfällen eine Überprüfung aller möglichen Testfälle schlichtweg nicht mehr möglich ist [1]. Hierfür wird im Folgenden ein Testkonzept für den Anwendungsfall von hochautonomen Funktionen (HAF) in der Beatmungstechnik vorgestellt [2]. Dieses Konzept folgt einem Cross-Innovation-Ansatz, indem Erkenntnisse und Methoden aus der Automobilindustrie für die Medizintechnik adaptiert und weiterentwickelt werden [3]. Ziel dieses Testkonzeptes ist es, in mehreren Schritten zu einer Sicherheitsargumentation für eine HAF zu gelangen, sodass gewährleistet werden kann, dass eine HAF in jeder Situation und für jeden Patienten weder eine Gefahr darstellt noch die Qualität der Therapie gefährdet. Das Testkonzept ist auf automatisierte Funktionen auf Systemebene ausgelegt, die die Physiologie von Patientinnen und Patienten und den klinischen Kontext für das Verhalten des Gesamtsystems berücksichtigen, z.B. bei physiologisch geregelten Systemen (PCLC). Die Herausforderung besteht dabei in der Auswahl potenziell kritischer und damit zwingend zu testender Szenarien, die zu einer Gefahrensituation für Patientinnen und Patienten führen können und die auch für alle anderen nicht explizit getesteten Szenarien repräsentativ sind. Das bedeutet, dass jeder Regler des PCLC-Systems, der den Regelkreis schließt, sicherstellen muss, dass alle Szenarien beherrscht werden können, ohne dass ein untragbares Risiko entsteht.

Eine Übersicht des Testkonzeptes ist in Abbildung 1 dargestellt. Die einzelnen Schritte des Testkonzeptes beinhalten zunächst eine Identifikation von relevanten Szenarien und deren Eigenschaften durch eine Vorwissensanalyse auf Basis von Expertenwissen und Studien. Dieser erste Schritt erlaubt eine Vorauswahl möglicher Risikogruppen und Szenarien. Anschließend werden mit Hilfe der Versuchsplanung konkrete Szenarien und Patientenkohorten generiert. Ausgehend von der Identifikation risikobehafteter Patientenkohorten wird eine virtuelle Simulationsumgebung auf Basis von mathematischen Patientenmodellen genutzt und die Simulation mit Szenarien durchgeführt (Schritt 2). Das dynamische Patientenmodell besteht aus Komponenten der Lungenmechanik, des Gasaustausches von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid [4] und des Atemzentrums. Nach einer Risikobewertung der simulierten Szenarien (Schritt 3) werden die als kritisch bewerteten Fälle mit dem finalen Medizinprodukt physikalisch getestet (Schritt 4). Zu diesem Zweck wird ein physikalischer Lungensimulator entwickelt, der es ermöglicht, physiologische Vorgänge, wie die Lungenmechanik und den

Gasaustausch, an der Geräteschnittstelle zu einem Beatmungsgerät möglichst realistisch abzubilden [5, 6]. Sowohl die virtuelle als auch die physikalische Simulation sind modular aufgebaut und können in Zukunft um weitere Modelle erweitert werden.

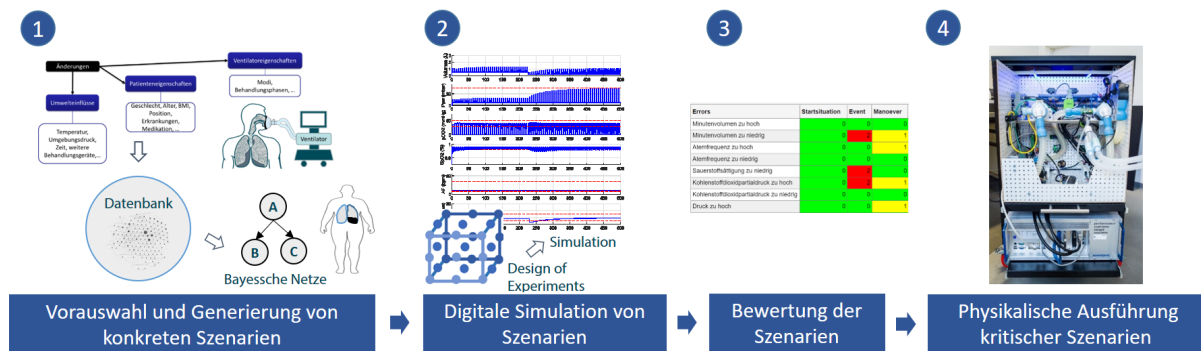


Abbildung 1: Darstellung des Ablaufs der vier Schritte zur Verfeinerung und Reduzierung der Testfälle sowie Auswertung.

Literatur

- [1] M. J. Khodaei, N. Candelino, A. Mehrvarz, and N. Jalili, "Physiological closed-loop control (PCLC) systems: review of a modern frontier in automation". In: *IEEE Access*. 2020.
- [2] S. Henn, B. Kabuth, F. Scholleman, C. Hennigs, G. Männel, M. Angern, and P. Rostalski. "Concept for the testing of automated functions in therapeutic medical devices". In: *at – Automatisierungstechnik*. 2022.
- [3] E. Böde, M. Bücker, W. Damm, et al., Identifikation und Quantifizierung von Automationsrisiken für hochautomatisierte Fahrfunktionen, Oldenburg, OFFIS e.V., 2019.
- [4] C. Hennigs, T. Becher, and P. Rostalski, "Mathematical lung model for local gas exchange based on EIT measurements". In: *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2022.
- [5] D. Pysik, S. Henn, G. Männel and P. Rostalski. "Control of a blower-based lung simulator for testing of mechanical ventilators". In: *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2022.
- [6] B. Köhne, S. Henn, G. Männel and P. Rostalski "Simulation of the respiratory CO2 concentration with a blower-based lung simulator". In: *Proceedings on Automation in Medical Engineering Proc AUTOMED*. 2023.

Domänenadaptation für feingranulare Fahrzeugklassifikation mittels Domain-Adversarial-Learning

Stefan Wolf^{1,2}

¹ Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES)
Karlsruher Institut für Technologie KIT
stefan.wolf@kit.edu

Jürgen Beyerer^{2,1}

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

Schlüsselwörter: Feingranulare Klassifikation, Domänenadaption, Adversarial Learning

Im Sicherheitskontext ist das Auffinden von Tatfahrzeugen in Überwachungskameras ein wichtiger Baustein bei der Fahndung von Verdächtigen. Da Kennzeichen bei schweren Kriminaldelikten üblicherweise getauscht werden und Zeugenaussagen meist keine Kennzeichen enthalten, ist eine Suche nach dem Fahrzeugmodell eine Lösung, um den Suchraum an möglichen Fahrzeugen einzuschränken. Für eine automatische Suche, wird dabei ein Verfahren zur feingranularen Klassifikation von Fahrzeugmodellen benötigt. Mit einer der größten technischen Herausforderungen dafür ist die Unterstützung einer großen Breite an Fahrzeugmodellen, da dies einen fortlaufenden Datensammelungsprozess von Fahrzeugbildern in Überwachungskameras erfordern würde, der arbeitsintensiv und datenschutzkritisch wäre.

Im Rahmen dieses Vortrags wird daher die Verwendung von im großen Umfang verfügbaren Web-Bildern als Lerndaten für diesen Einsatzzweck evaluiert. Die große Herausforderung dabei ist die Domänenlücke zwischen Web-Bildern und praxisrelevanten Szenarien wie bspw. Überwachungsbildern.

Insbesondere moderne Deep-Learning-Ansätze haben bei Bildklassifikation sehr gute Ergebnisse gezeigt, neigen aber aufgrund ihrer starken Abhängigkeit von Lerndaten und der hohen Anzahl an Parametern auch dazu, domänenspezifische Merkmale zu extrahieren, welche für eine Inferenz in einer anderen Domäne kaum geeignet sind.

Daher wird der Einsatz von Techniken zur Domänenadaption untersucht, die die Genauigkeit bei einer Domänenlücke zwischen Quell- und Zieldomäne (bspw. Web- und Überwachungs-

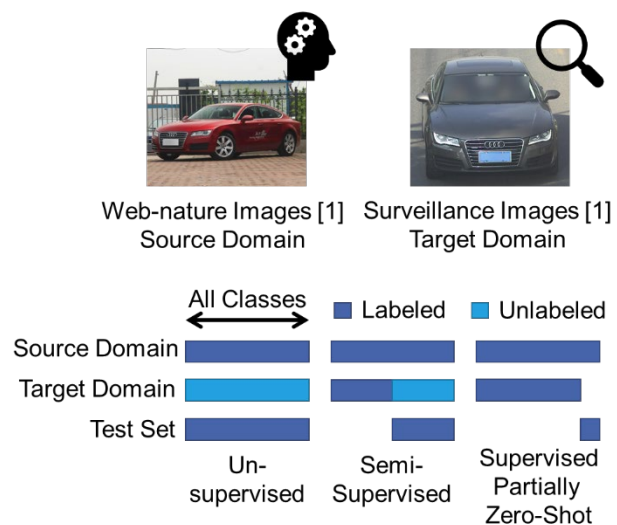


Abbildung 1: Für eine feingranulare Fahrzeugklassifikation sind Fahrzeugbilder aus dem Internet aufgrund der hohen Verfügbarkeit eine interessante Quelle für Lerndaten. Eine Herausforderung besteht darin, dass für den praktischen Einsatz im Sicherheitskontext andere Perspektiven relevant sind. Solche Domänenadaptionsszenarien werden meistens in einem unüberwachten oder semi-überwachten Szenario untersucht, das von einer breiten Verfügbarkeit an unannotierten Daten für die Zieldomäne ausgeht. Im Kontext dieses Vortrags wird der Fokus auf ein Szenario gelegt, in dem die Verfügbarkeit von Bildern in der Zieldomäne auf einen Teil der Klassen begrenzt ist.

bildern) deutlich steigern können. Hierbei hat sich insbesondere der Einsatz von Domain-Adversarial-Training [2] als vielversprechend herausgestellt. Eine Herausforderung dabei ist die Instabilität von Adversarial-Training, welche durch den Einsatz von Adversarial-Loss-Coupling [3] deutlich verbessert werden kann, wobei die Genauigkeit bei der Inferenz auf Überwachungsbildern durch einen stabileren Lernprozess noch weiter steigt [4]. Beim Loss-Coupling wird der Einfluss des Adversarial-Trainings auf die Gewichtanpassung dynamisch während des Trainings in Abhängigkeit von der Domäneninvarianz des Netzes angepasst.

Literatur

- [1] Yang, L., Luo, P., Change Loy, C., & Tang, X. (2015). A large-scale car dataset for fine-grained categorization and verification. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 3973-3981).
- [2] Ganin, Y., Ustinova, E., Ajakan, H., Germain, P., Larochelle, H., Laviolette, F., March, M. & Lempitsky, V. (2016). Domain-adversarial training of neural networks. *Journal of machine learning research*, 17(59), 1-35.
- [3] Wiedemer, T., Wolf, S., Schumann, A., Ma, K., & Beyerer, J. (2022). Few-shot supervised prototype alignment for pedestrian detection on fisheye images. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 4142-4153).
- [4] Wolf, S. (2023, July). A Baseline for Cross-Domain Fine-Grained Vehicle Classification in a Supervised Partially Zero-Shot Setting. In Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory (p. 87).

Enhancing Visual Inspection Planning through Robotic Vision Synergy

Vanessa Staderini

Automation and Control Institute
(ACIN), TU Wien &
Austrian Institute of Technology

vanessa.staderini@ait.ac.at

Tobias Glück

Center for Vision, Automation &
Control (VAC)
Austrian Institute of Technology

tobias.glueck@ait.ac.at

Andreas Kugi

Automation and Control Institute
(ACIN), TU Wien &
Austrian Institute of Technology

kugi@acin.tuwien.ac.at

Schlüsselwörter: viewpoint planning, kinematic constraints, integer linear programming, Bayesian optimization.

Automated visual quality inspection is a central topic in computer vision and robotics. One of the main application areas of quality inspection is manufacturing, where robotic solutions are applied to automate and speed up visual quality inspection. The most common practice is based on manual inspection performed by pre-trained personnel, but this takes a long time. In recent years, different automatic inspection planning methodologies have been developed to speed up the inspection process and improve defect identification. Unfortunately, there is still no method that is versatile for different geometries, offers object coverage with high accuracy, and allows the inspection to be performed in a short time. One reason is that the already developed methodologies address inspection planning only as a robotics or computer vision problem. In our work (see Figure 1), we propose a unified approach that combines the principles of

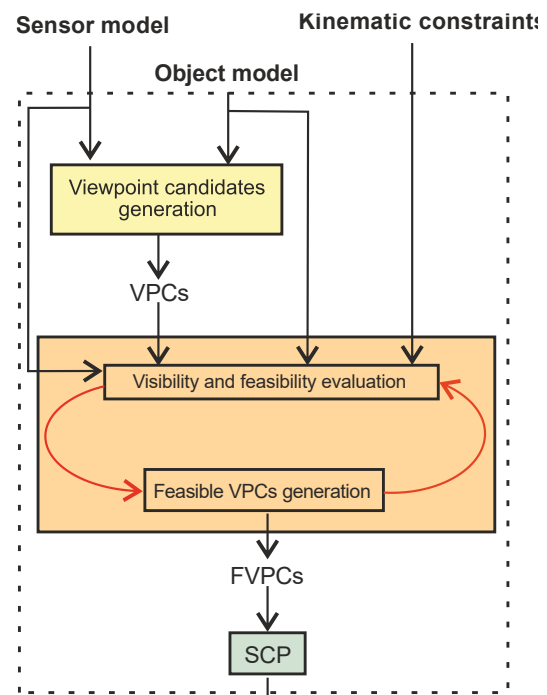


Figure 1 Viewpoint generation framework

computer vision and robotics and present a new algorithm that generates optimal viewpoints that are simultaneously related to the geometry of the object being inspected, the sensor adopted, and the kinematics of the robotic configuration adopted for inspection. Simulated and experimental results demonstrate the strength of our algorithm, which achieves complete coverage for a variety of geometries and materials with a reasonably small number of viewpoints.

Literatur

- [1] P. Gospodnetic, D. Mosbach, M. Rauhut, and H. Hagen, "Viewpoint placement for inspection planning," *Machine Vision and Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 1–21, 2022.
- [2] A. Magana, J. Dirr, P. Bauer, and G. Reinhart, "Viewpoint generation using feature-based constrained spaces for robot vision systems," *Robotics*, vol. 12, no. 4, 2023.
- [3] V. Staderini, T. Glück, P. Schneider, R. Mecca, and A. Kugi, "Surface sampling for optimal viewpoint generation," in *IEEE 13th International Conference on Pattern Recognition Systems*, 2023.