

20. – 22. Februar 2019

Programm

Kurzfassungen zum Download unter:

www.iosb.fraunhofer.de/?Boppard

Mittwoch, 20. Februar 2019

nachmittags **Anreise**

18:00 **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

Donnerstag, 21. Februar 2019

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

Prof. Dr.-Ing. Johann Reger (Technische Universität Ilmenau)

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Modellprädiktive Regelung Sitzungsleitung: Prof. Dirk Abel	Lernende Verfahren Sitzungsleitung: Prof. Steven Ding
08:30 – 09:00	Hierarchische Modellprädiktive Regelung der Leistungsaufteilung eines Brennstoffzellen-Hybridsystems <i>Verena Neisen (Institut für Regelungstechnik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Prof. Dr.-Ing. Dirk Abel, Gr. 1)</i>	Adaptation auf Basis von Selbstbeobachtung in Lernenden Steuerungssystemen: Experimente und Querverbindungen zur Psychologie <i>Moritz Schneider (Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik, Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy, Gr. 7)</i>
09:00 – 09:30	Zeitoptimale nichtlineare modellprädiktive Regelung mit variablen Diskretisierungsgittern <i>Christoph Rösmann (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Technische Universität Dortmund, Prof. Dr.-Ing. Torsten Bertram, Gr. 8)</i>	Data-driven realization of reinforcement learning aided performance recovery of feedback control systems <i>Hua Changsheng (Fachgebiet Automatisierungstechnik und komplexe Systeme, Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr.-Ing. Steven Ding, Gr. 11)</i>
09:30 – 10:00	Flexible model-prädiktive Regelung biotechnologischer Prozesse <i>Lisa Carius (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Prof. Dr.-Ing. Rolf Findeisen; Lehrstuhl für Modellbildung, Institut für Automatisierungstechnik, Prof. Dr.-Ing. Achim Kienle, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Gr. 20)</i>	Datenbasierte Regelung mit Garantien <i>Thomas Beckers (Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Sandra Hirche, Gr. 21)</i>
10:00 – 10:30	Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle	

20. – 22. Februar 2019

10:30 – 12:00 Mechatronische Anwendungen I Sitzungsleitung: Prof. Joachim Horn		Anwendungen in der Optik Sitzungsleitung: Prof. Oliver Sawodny
10:30 – 11:00	Modellbasierte stochastische Analyse von Synchronisationsfehlern in Mechatronischen Systemen <i>Thomas Mutzke, Andrey Morozov (Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden, Prof. Dr. techn. Klaus Janschek, Gr. 9)</i>	Messgerät-invariante Merkmalsextraktion für die Analyse hyperspektraler Daten <i>Julius Krause (Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr. Jürgen Beyerer, Gr. 18)</i>
11:00 – 11:30	Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen <i>Mario Aldag (Professur für Regelungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Prof. Dr.-Ing. Joachim Horn, Gr. 13)</i>	Störgrößenkompensation und Strahlformung durch deformierbare Spiegel in Hochleistungslasern <i>Kevin Schmidt (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny, Gr. 27)</i>
11:30 – 12:00	Positionsbestimmung und sensorlose Regelung von Magnetaktoren <i>Tristan Braun (Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität des Saarlandes, Prof. Dr.-Ing. Joachim Rudolph, Gr. 25)</i>	Regelung regenerativer optischer Verstärker für ultrakurze Laserpulse <i>Andreas Deutschmann (Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, Technische Universität Wien, Prof. Dr.-Ing. Andreas Kugi, Gr. 29)</i>

12:00 - 15:00 Mittagessen im Bellevue Rheinhotel / Pause

15:00 – 16:00 Automotive Anwendungen Sitzungsleitung: Prof. Markus Maurer		Diskrete Systeme Sitzungsleitung: Prof. Thomas Moor
15:00 – 15:30	Ein MPC-basiertes Framework zur Koordination zwischen einer wertebasierten Entscheidungsfindung und der Bewegungsplanung für ein automatisiertes überaktuiertes Fahrzeug <i>Markus Nolte (Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer, Gr. 4)</i>	Kooperative Regelung in vernetzten ereignisdiskreten Systemen <i>Markus Zgorzelski (Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze, Gr. 3)</i>
15:30 – 16:00	Multimodale Verkehrsflussregelung — Ein Ansatz für eine nachhaltige, urbane Mobilität <i>Angelika Hirrle, Birgit Jaekle (Professur für Verkehrsleitsysteme und -prozessautomatisierung, Technische Universität Dresden, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling, Gr. 10)</i>	Formal Semantics for the Verification of Sequential Behaviour Diagrams <i>Yiheng Tang (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. Thomas Moor, Gr. 12)</i>
16:00 - 16:30 Kaffee-/Teepause im Foyer der Stadthalle		

20. – 22. Februar 2019

16:30 – 17:30 Plenarvortrag im Haupttagungsraum EG**Robuste un stetige Regelung von nichtlinearen Systemen**

Prof. Dr.-Ing. Jaime A. Moreno Pérez
(Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM))

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, 22. Februar 2019**

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
08:30 – 10:00	Mechatronische Anwendungen II Sitzungsleitung: Prof. Ansgar Trächtler	Optimalsteuerung / Optimierung Sitzungsleitung: Prof. Olaf Stursberg
08:30 – 09:00	Ein rekonfigurierbarer Seilroboter für die präzise Handhabung in wandelbaren Arbeitsumgebungen <i>Marcus Hamann (Lehrstuhl Regelungstechnik in der Ingenieurinformatik, Universität Augsburg, Prof. Dr.-Ing. Christoph Ament, Gr. 15)</i>	Algebraische dynamische Programmierung für linear-quadratische Optimalsteuerungsaufgaben mit Beschränkungen <i>Ruth Mitze (Lehrstuhl für Regelungstechnik und Systemtheorie, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Martin Mönnigmann, Gr. 3)</i>
09:00 – 09:30	Hybride Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod <i>Andreas Kohlstedt (Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Prof. Dr.-Ing. Ansgar Trächtler, Gr. 23)</i>	Kombinierte Pfadplanung und prädiktive Regelung für den automatisierten und autonomen Schiffsbetrieb <i>Max Lutz (Lehrstuhl für Regelungstechnik Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Prof. Dr.-Ing. Thomas Meurer, Gr. 24)</i>
09:30 – 10:00	Stabilität des elektrischen Verbundsystems bei hohem Anteil stromeinprägender Umrichter <i>Christian Schöll (Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, Gr. 16)</i>	Optimalsteuerung unter Berücksichtigung nichtkonvexer Zustandsbeschränkungen und Echtzeitanforderungen <i>Jan Eilbrecht (Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie, Universität Kassel, Prof. Dr.-Ing. Olaf Stursberg, Gr. 19)</i>

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

20. – 22. Februar 2019

Haupttagungsraum im EG		Tagungsraum im 3. OG
10:30 – 12:00	Verteilte / Vernetzte Systeme Sitzungsleitung: Prof. Boris Lohmann	Filterung und Schätzung Sitzungsleitung: Prof. Puenta León
10:30 – 11:00	Dynamik periodisch reinitialisierter LTI-Systeme nicht-ganzzahliger Ordnung <i>Christoph Weise (Fachgebiet Regelungstechnik, Technische Universität Ilmenau, Prof. Dr.-Ing. Johann Reger, Gr. 15)</i>	Finite-Time Estimation of Time-Varying Frequency Signals for Low-Inertia Power System Applications <i>Juan Rueda Escobedo (Fachgebiet Regelungssysteme und Netzleittechnik, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Prof. Dr.-Ing. Johannes Schiffer, Gr. 2)</i>
11:00 – 11:30	Regelung eines pneumatischen Systems mit verteilten Parametern <i>Richard Kern (Lehrstuhl für Regelungstechnik, Technische Universität München, Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann, Gr. 22)</i>	3D Innenraum-Lokalisierung durch kombinierte Ultraschall-Distanz- und Inertialmessung mittels Partikelfilter <i>Dominik Esslinger (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Cristina Tarín, Gr. 28)</i>
11:30 – 12:00	Dissipativität vernetzter Systeme in der verteilten ökonomischen modellprädiktiven Regelung <i>Philipp Köhler (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Frank Allgöwer, Gr. 27)</i>	Robuste Materialanteilsschätzung mithilfe iterativer optischer Spektralfilterung <i>Wolfgang Krippner (Institut für Industrielle Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Prof. Dr.-Ing. Fernando Puenta León, Gr. 30)</i>

12:00 – 12:45 Abschluss im Haupttagungsraum EG

Prämierung des besten Vortrags

durch Dr.-Ing. Jörg Neupert, TRUMPF Werkzeugmaschinen, Ditzingen

Aufruf für Boppard 2020

12:45 – 13:45 Mittagessen im Bellevue Rheinhotel

13:45 Ende des Kolloquiums

Hierarchische Modellprädiktive Regelung der Leistungsaufteilung eines Brennstoffzellen-Hybridsystems

Verena Neisen

Institut für Regelungstechnik
RWTH Aachen University
v.neisen@irt.rwth-aachen.de

Dirk Abel

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

Schlüsselwörter: Modellbasierte Prädiktive Regelung, Mixed-Integer Optimierung, Brennstoffzellen-Hybridsystem, Speicherung erneuerbarer Energien

Hybride Speichersysteme, bestehend aus Akkumulator und Wasserstoffspeicher mit Brennstoffzelle und Elektrolyseur vereinen die ökonomischen Vorteile der Technologien hinsichtlich Effizienz, Maximalleistung und Kapazität. Damit können sie zur Reduktion der stark fluktuierenden Einspeisung von Wind- und Photovoltaikenergie beitragen. Wesentlich für den dynamischen Betrieb derartiger hybrider Speichersysteme ist eine prädiktive Regelungsstrategie zur möglichst optimalen Leistungsaufteilung im Hinblick auf hohe Gesamteffizienz und lange Lebensdauer. Herausforderungen ergeben sich durch komponentenabhängige a) Minimalleistungen, b) Startenergien und c) weitere Nichtlinearitäten, die explizit berücksichtigt werden müssen.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Zeitskalen des Hybridsystems (von 10^{-19} s auf Zellebene bis hin zu einem Tag auf Ebene der Verbrauchsprognosen) wird eine hierarchische Regelungsstruktur bestehend aus drei Ebenen entworfen [1]. Im unterlagerten Regelkreis werden einfache SISO Komponentenregler zur Folgeregelung eingesetzt. Eine überwachende Mittelebene in Form einer modellbasierten prädiktiven Regelung gibt die Sollwerte der Komponentenregler vor und reagiert auf Abweichungen gegenüber den Verbrauchsprognosen. Auf überlagerter Ebene wird schließlich mithilfe einer ökonomischen und ebenfalls modellbasierten prädiktiven Regelung die Betriebsführung realisiert. Die Wahl des Optimierungsverfahrens ist hierbei von zentraler Bedeutung hinsichtlich des Kompromisses zwischen erforderlicher Rechenzeit und der erzielbaren Modellgenauigkeit und wird in diesem Beitrag untersucht.

Vier verschiedene Verfahren werden miteinander verglichen: Heuristik, Linear Programming (LP), Mixed-Integer Linear Programming (MILP) und Mixed-Integer Quadratic Constraint Programming (MIQCP). Die entscheidungsbasierte Heuristik als Referenz bevorzugt in allen Betriebspunkten die Batterie aufgrund des im Schnitt höher liegenden Wirkungsgrades. Alle weiteren Verfahren nutzen detaillierte Grey-box-Komponentenmodelle, die anhand des Hybrid Energy Labs der Firma Heliocentris [4] identifiziert wurden. Im LP werden Nichtlinearitäten zunächst vernachlässigt und das Verhältnis von Ein- zu Ausspeicherleistung vereinfacht als konstant angenommen (konstanter Wirkungsgrad). Mithilfe von MILPs wird die Modellkomplexität anschließend sukzessiv um a) Mindestleistungen, b) Energieverluste beim Startvorgang des Wasserstoffwandlers und c) eine stückweise lineare Abbildung des Wirkungsgrades gesteigert. Für die Modellierung der Brennstoffzelle und des Elektrolyseurs wird dabei die Konvexität der Leistungsbeziehung ausgenutzt. Dadurch kann eine effiziente MILP-Formulierung nach [3] gewählt werden, womit die Anzahl ganzzahliger Variablen (und damit die Rechenzeit)

reduziert wird. Im MIQCP wird die stückweise lineare Approximation des Wirkungsgrades schließlich durch einen quadratischen Zusammenhang ersetzt.

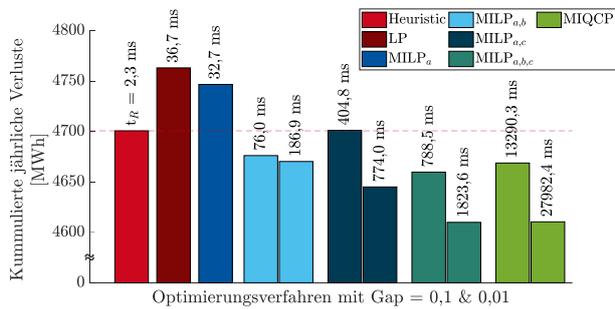


Abbildung 1: Simulierte Energieverluste und Rechenzeit je nach Optimierungsmethode

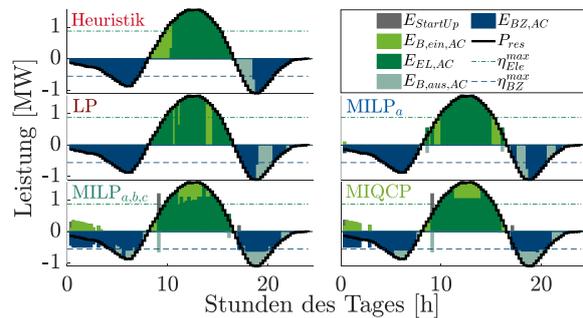


Abbildung 2: Beispielfahrplan der Betriebsregelung je nach Optimierungsmethode [2]

Abbildung 1 zeigt eine Gegenüberstellung der simulierten Optimierungsverfahren hinsichtlich der summierten Jahres-Energieverluste und der Rechenzeit. Die Heuristik gilt als Vergleichswert. Das LP verursacht die höchsten Energieverluste bei zwar niedriger Rechenauslastung. Durch die Steigerung der Modellkomplexität mithilfe der MILPs werden die Verluste wie erwartet reduziert: a) alleine hat nur wenig Effekt, in Kombination mit b) und c) kann die Heuristik deutlich übertroffen werden. Die Erweiterung auf einen nichtlinearen Wirkungsgrad (MIQCP) birgt nur noch geringes Potential, führt allerdings zu einer wesentlich höheren Rechenzeit. Auch in Bezug auf einen alterungsreduzierenden Betrieb (Minderung von großen Lastsprüngen und Reduzierung der Anfahrvorgänge) weist das MIQCP keinen relevanten Vorteil auf.

Die Wahl des Optimierungsverfahrens beeinflusst des Weiteren maßgeblich die resultierende Betriebsführung (vgl. Abbildung 2). Durch Berücksichtigung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens bei MILP c) und MIQCP findet eine Verschiebung hin zu besseren Wirkungsgradbereichen statt. Ermöglicht wird dies durch Ausnutzung des hybriden Speicherbetriebs.

Zusammengefasst bietet das MILP einen guten Kompromiss aus Rechenzeit (und damit Echtzeitfähigkeit) und Modellgenauigkeit und ist somit das zu bevorzugende Verfahren. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die intelligente Leistungsaufteilung zu einer deutlichen Reduktion der Wandlungsverluste führt.

Literatur

- [1] V. Neisen, F. J. Baader und D. Abel. „Supervisory Model-based Control using Mixed Integer Optimization for stationary hybrid fuel cell systems“. In: *IFAC Control Applications of Optimization*. 2018.
- [2] V. Neisen, M. Fütting und D. Abel. „Optimization Approaches for Model Predictive Power Flow Control in Hybrid Fuel Cell Systems“. In: *European Control Conference*. (eingereicht).
- [3] M. Carrión und J. M. Arroyo. „A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem“. In: *IEEE Transactions on power systems*, vol. 21, no. 3. 2006.
- [4] Heliocentris Academia International GmbH. „Hybrid Energy Lab-System“. In: <http://heliocentrisacademia.com/portfolio-item/hybrid-energy-lab-system/>. [Zuletzt aufgerufen: 28.11.2018].

Zeitoptimale nichtlineare modellprädiktive Regelung mit variablen Diskretisierungsgittern

Christoph Rösmann

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
christoph.roesmann@tu-dortmund.de

Torsten Bertram

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik
Technische Universität Dortmund
torsten.bertram@tu-dortmund.de

Schlüsselwörter: Zeitoptimale Regelung, modellprädiktive Regelung, nichtlineare Systeme

Die modellprädiktive Regelung stellt ein leistungsfähiges Regelungskonzept dar, das im Gegensatz zu klassischen Reglern explizit Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen berücksichtigt. Für die Realisierung wird ein Modell des Prozesses, üblicherweise in Form eines (nicht-)linearen Zustandsraummodells, während der Regelung benötigt. Der Regler prädiziert mit diesem dynamischen Modell das zukünftige Systemverhalten über einen endlichen Horizont und ermittelt über eine Online-Optimierung die optimale Steuerfolge bezüglich eines gewählten Gütemaßes und definierten Nebenbedingungen. Dieses sogenannte Optimalsteuerungsproblem wird in jedem Abtastschritt wiederholt gelöst und die jeweils erste ermittelte Stellgröße aus der optimalen Steuerfolge wird zur Regelung eingesetzt.

Im Kontext der modellprädiktiven Regelung werden zeit-kontinuierliche Optimalsteuerungsprobleme in der Regel mit Hilfe sogenannter direkter Methoden bezüglich eines zeitlichen Gitters diskretisiert, um eine Approximation durch ein nichtlineares Programm zu erhalten. Dieses nichtlineare Programm kann dann unter Ausnutzung der inhärent dünnbesetzten Optimierungsstrukturen effizient gelöst werden. Optimalsteuerungsprobleme mit minimaler Übergangszeit benötigen aufgrund der Zeitvariabilität eine besondere Berücksichtigung. Neben einer zweistufigen Optimierungsstrategie in [1] und einer l_1 -Norm-Kostenfunktion in [2] wird häufig eine Zeittransformation eingesetzt. Hierbei wird das Diskretisierungsgitter auf das Einheitsintervall fixiert und die Systemdynamik mit der variablen Übergangszeit skaliert. In den in diesem Vortrag vorgestellten Ansätzen wird nicht die Übergangszeit als freier Optimierungsparameter gewählt, sondern die Gitterpartitions-längen sind explizit Bestandteil der Optimierung. Hier ergeben sich verschiedene Strategien:

- Ein globales Zeitintervall für alle Gitterpartitionen als Optimierungsparameter: Das resultierende Diskretisierungsgitter ist uniform [3, 4].
- Jedes Zeitintervall für eine Gitterpartition ist ein individueller Optimierungsparameter: Je nach Kostenfunktion lässt sich ein quasi-uniformes Gitter [5] beziehungsweise ein nicht-uniformes Gitter einstellen [6, 7].

Der Vortrag stellt diese Strategien für verschiedene direkte Methoden vor, beispielsweise für das Mehrfachschieß- und das Kollokationsverfahren. Besonders im Hinblick auf Regelungsaufgaben, bei denen sich der zeitoptimale Stellgrößenverlauf aus stückweise-konstanten Stellgrößen mit wenigen Umschaltungen zusammensetzt (*Bang-Singular-Bang*), kann ein nicht-uniformes Gitter Vorteile bei der Berechnungszeit aufweisen. Für die Anwendung im geschlossenen Regelkreis werden sowohl das uniforme als auch das nicht-uniforme Gitter während der Regelung adaptiert. Somit kann zum einen die Berechnungszeit reduziert werden,

während die Regelstrecke sich dem Sollzustand nähert und auf der anderen Seite kann der Horizont bei möglichen Störungen verlängert werden.

Die oben genannten Strategien und direkten Methoden werden mit ihrer mathematischen Formulierung vorgestellt. Weiterhin werden diese anhand von Benchmark-Beispielen und einem Experimentalsystem veranschaulicht und miteinander verglichen.

Ein weiteres Augenmerk liegt auf den Besetzungsstrukturen der Jacobi- und Hessematrizen für die oben genannten Strategien und wie diese sich in der Berechnungszeit äußern. Für die effiziente Berechnung mittels finiter Differenzen werden die nichtlinearen Programme als Hypergraph formuliert. Ein Hypergraph besitzt im Gegensatz zu konventionellen Graphen sogenannte Hyperkanten, welche nicht nur zwei, sondern eine beliebige Anzahl an Knoten miteinander verbinden. Die Kanten sind hierbei lokale Kostenfunktionsterme und Nebenbedingungen. Die Knoten repräsentieren die verknüpften Optimierungsvariablen. Mittels Iteration über die Kanten beziehungsweise Knoten können so unnötige Nullelemente in den Jacobi- und Hessematrizen übersprungen werden [8].

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, BE 1569/13-1).

Literatur

- [1] L. Van den Broeck, M. Diehl, J. Swevers. „A model predictive control approach for time optimal point-to-point motion control“. In: *Mechatronics*. Elsevier, Vol. 21, Nr. 7, S. 1203-1212, 2011.
- [2] R. Verschueren et al. „A stabilizing nonlinear model predictive control scheme for time-optimal point-to-point motions“. In: *Conference on Decision and Control*, 2017.
- [3] C. Rösmann, F. Hoffmann, T. Bertram. „Prädiktive Regelung mit Timed-Elastic-Bands“. In: *at - Automatisierungstechnik*, Vol. 62, Nr. 10, S. 720 – 731, 2014.
- [4] C. Rösmann, F. Hoffmann, T. Bertram. „Timed-elastic-bands for time-optimal point-to-point nonlinear model predictive control“. In: *European Control Conference*, 2015.
- [5] C. Rösmann, F. Hoffmann, T. Bertram. „Convergence analysis of time-optimal model predictive control under limited computational resources“. In: *European Control Conference*, 2016.
- [6] C. Rösmann, A. Makarow, F. Hoffmann, T. Bertram. „Time-optimal nonlinear model predictive control with minimal control interventions“. In: *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, 2017.
- [7] C. Rösmann, A. Makarow, F. Hoffmann, T. Bertram. „Sparse shooting at adaptive temporal resolution for time-optimal model predictive control“. In: *Conference on Decision and Control*, 2017.
- [8] C. Rösmann, M. Krämer, A. Makarow, F. Hoffmann, T. Bertram. „Exploiting sparse structures in nonlinear model predictive control with hypergraphs“. In: *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2018.

Flexible model-prädiktive Regelung biotechnologischer Prozesse

Lisa Carius*, Achim Kienle**, und Rolf Findeisen*

* Lehrstuhl für Systemtheorie und Regelungstechnik, Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg; {Lisa.Carius, [Rolf.Findeisen](mailto:Rolf.Findeisen@ovgu.de)}@ovgu.de

** Lehrstuhl für Modellbildung, Institut für Automatisierungstechnik, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, und, Prozesssynthese und Prozessdynamik, Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg

Schlüsselwörter: Biotechnologie, Unsicherheiten, nichtlineare Systeme, model-prädiktive Regelung, lernende Ansätze, Cloud.

Biotechnologische Prozesse bilden die Basis zahlreicher Produktionsprozesse, welche von der Herstellung pharmazeutischer Produkte und Feinchemikalien über die Erzeugung von Biopolymeren aus Abfallprodukten, bis hin zur Energiegewinnung in Biogasanlagen reichen. Diese Prozesse werden häufig rezeptbasiert (im Batch oder Semi-Batch Betrieb) betrieben, was bedeutet, dass das Substrat in endlicher Zeit anhand eines gegebenen Rezepts in einem Bioreaktor in ein Produkt übergeführt wird. Die zur Steuerung nötigen rezeptbasierten Führungsstrategien sind oftmals das Ergebnis umfangreicher experimenteller Vorversuche, und somit zeitaufwendig, kostenintensive und nicht optimal. Ziel der verwendeten, oftmals sehr einfachen Regelungsstrategien, ist es, dem Rezept welches den Prozess mit der höchsten Ausbeute erzielt hat (Golden Batch) möglichst gut zu folgen.

Durch den Einsatz modellbasierter Ansätze könnten die Phasen der Prozessentwicklung, -überwachung, -regelung und -optimierung deutlich effizienter durchgeführt werden. Diese Ansätze finden jedoch, trotz erheblicher Fortschritte im Bereich der Modellierung und der Prozessanalytik, aufgrund erhebliche Parameter- und Modellunsicherheiten kaum Verwendung.

Im ersten Teil dieses Vortrags werden die auftretenden Herausforderungen modellbasierter Regelungsstrategien betrachtet, wobei Aspekte der geeigneten Modellierung der biotechnologischen Prozesse, sowie der Schätzung von Systemzuständen und der Prozessführung umrissen werden. Danach werden model-basierter Regelungs- und Überwachungsverfahren für die flexible, robuste und autonome Prozessführung biotechnologischer Prozesse vorgestellt. Die Kernidee dabei ist die Synthese von auf nichtlinearen Modellen basierenden prädiktiven Regelungsverfahren mit optimierungsbasierten Schätzverfahren zur Zustands- und Parameterschätzung. Diese Methode zielt darauf ab, Modellkomponenten sowie deren Modellparameter in Echtzeit dynamisch zu lernen und adaptieren, was durch Echtzeitanalyse von Bioprozessdaten sowie Vergleich von Daten aus gleichen oder ähnlichen Batch Prozessen, welche von Cloud-basierten Ansätzen bereitgestellt werden können, ermöglicht wird. Diese dynamische Adaption erlaubt einerseits die schnelle Reaktion auf sich ändernde Prozessbedingungen. Andererseits können Informationen vorheriger Prozesszyklen gleicher oder ähnlicher biotechnologischer Prozesse unmittelbar in die Optimierung einfließen, was eine optimale Ausnutzung aller vorhandenen Prozessinformationen gewährleistet. Als Abschluss des Vortrages diskutieren wir Bedingungen, unter welchen die Stabilität des geschlossenen Kreises unter Berücksichtigung der Lern- und Adaptationsstrategien nachgewiesen werden können.

Literatur:

L. Carius, J. Pohlodek, B. Morabito, M. Mangold, R. Findeisen, and A. Kienle. Model-based state estimation utilizing a hybrid cybernetic model. Adchem 2018. submitted 2017.

S. Lucia, L. Carius, and R. Findeisen. Adaptive nonlinear predictive control and estimation of microaerobic processes. In Proc. of the IFAC World Congress, 50(1):12635-12640, 2017.

L. Carius and R. Findeisen. The impact of experimental data quality on computational systems biology and engineering. In IFAC-PapersOnLine - Proceedings of the 6th Foundations of Systems Biology in Engineering FOSBE 2016,49(1):140--146. Elsevier, 2016.

L. Carius, P. Rumschinski, T. Faulwasser, D. Flockerzi, H. Grammel, and R. Findeisen. Model-based derivation, analysis and control of unstable microaerobic steady-states - considering *Rhodospirillum rubrum* as an example. *Biotechnology and Bioengineering*, 111(4):734--747, 2014.

Adaptation auf Basis von Selbstbeobachtung in Lernenden Steuerungssystemen: Experimente und Querverbindungen zur Psychologie

Moritz Schneider

Ehem: FG RMR, IAT, ETIT, TU Darmstadt

Jetzt: SCHOTT AG, Mainz

moritz.schneider@schott.com

Jürgen Adamy

FG Regelungsmethoden und Robotik, IAT, ETIT

Technische Universität Darmstadt

jadamy@iat.tu-darmstadt.de

Schlüsselwörter: Beschränkte Rationalität, Reinforcement Learning, Kognitive Modellierung, Adaptive Verfahren, Künstliche Emotionen

Die gemeinsame Basis von Regelungstheorie und zeitgenössischen Modellen intelligenten Verhaltens besteht in der grundlegenden Annahme der Rationalität handelnder Subjekte, ausgeprägt in der Zielsetzung des Auffindens einer bzgl. vorgegebener Kriterien optimalen Lösung [1]. Augenfällig hierbei ist, dass die Eigenschaft von Rationalität bezüglich vordefinierter Zielkriterien gerade keine Eigenschaft von in biologischen Nervensystemen implementierten Informationsverarbeitungs- und Steuerungssystemen ist [2,4]. Historisch wurde dies oft als ein Mangel betrachtet, der beispielsweise Menschen gegenüber hypothetischen, perfekt rational handelnden Agenten in einen prinzipiellen Nachteil versetzt [3,4].

Dieser Beitrag beleuchtet die Inkompatibilität klassischer Rationalitätsannahmen mit der Beschreibung natürlicher Systeme aus der Perspektive der inhärenten Beschränkung von Rationalität in ressourcenbeschränkten Systemen, die mit imperfekter Information, beschränkter Rechenzeit und endlichem Speicher, in Echtzeit mit ihrer Umgebung interagieren. Aus der Betrachtung dieser (universellen) Beschränkungen physikalisch implementierter Systeme [2,3] ergeben sich in natürlicher Weise relative Begriffe von Rationalität, die Erreichen von Zielsetzungen unter expliziten Ressourcenbeschränkungen eines Systems beschreiben [4,6].

Faszinierenderweise ergibt sich aus der Analyse von Interaktionen zwischen Kognition und Emotion beim Menschen eine Parallelität zwischen den konkreten Adaptionen, die über diese Interaktion stattfinden, und den erforderlichen Selbstanpassungen eines beschränkt rationalen Agenten an seine momentanen Möglichkeiten [4,6,7]. Dies deutet auf eine tiefe Verbindung zwischen Wirkungen von Emotionen auf Denken und Handeln mit dem grundlegenden Problem der prinzipiellen Unmöglichkeit voller klassischer Rationalität in realen, physikalischen Systemen hin. Anders ausgedrückt motiviert diese Sichtweise ein Verständnis von emotionaler Adaption als evolutionär entwickelte Strategie zum Umgang mit beschränkten Ressourcen in komplexen Informationsverarbeitungssystemen [5].

Der vorliegende Beitrag fasst die über dieses Thema angefertigte Dissertation des Erstautors zusammen. Zunächst wird das Problem beschränkter Rationalität in realen Systemen – von technischer wie biologischer Seite – beleuchtet. Anschließend wird der Kontext zu psychologischen Modellen, wie der gegenseitigen Beeinflussung von Kognition und Emotion, hergestellt. Dieses Vorgehen ist analog zu dem Beitrag [6]. Abschließend

werden die Ergebnisse von Simulationsexperimenten vorgestellt, in denen Lernexperimente mit einem selbstadaptiven Steuerungssystem auf Basis eines online-lernenden, modellbasierten Reinforcement Learning Ansatzes evaluiert und im Kontext psychologischer Modelltheorie analog zu [7] diskutiert werden.

Literatur

- [1] John von Neumann und Oskar Morgenstern: „Theory of Games and Economic Behavior“. Princeton University Press, 1947.
- [2] Gerd Gigerenzer et al.: „Rethinking Rationality“. In: *Bounded Rationality: The adaptive toolbox*, 2001.
- [3] Richard L. Lewis und Andrew Howes und Satinder Singh: „Computational Rationality: Linking mechanism and behavior through bounded utility maximization“. In: *Topics in Cognitive Science*, 2014.
- [4] Roberta Muramatsu und Yaniv Hanoch: „Emotions as a mechanism for boundedly rational agents: The fast and frugal way“. In: *Journal of Economic Psychology*, 2005.
- [5] Aaron Sloman und Ron Chrisley und Matthias Scheutz: „The architectural basis of affective states and processes“. In: *Who needs emotions?*, 2005.
- [6] Moritz Schneider: „A cybernetical perspective on emotion-cognition interactions as self-directed adaptation in situated decision-makers“. In: *Cognitive Systems Research*, 2018.
- [7] Moritz Schneider und Jürgen Adamy: „Modeling Emotional Adaptation of Cognition and Motivation in a Learning Model-Based Control System“. In: *Connection Science*, eingereicht 2018.

Title: Data-driven realization of reinforcement learning aided performance recovery of feedback control systems

Abstract: Often, when adverse changes or faults happen in industrial processes, it is desirable to retain the original control structure and improve the capability of the existing controller to minimize the control performance degradation, rather than decommission the whole system and replace it with a new one. This study is aimed at solving such a performance degradation recovery problem. To achieve this, initially, a new input output recovery (IOR) method is proposed, which provides an alternative approach to many existing methods, such as loop transfer recovery, to achieve performance recovery. The implementation of this IOR method is accomplished in a purely data-driven manner by means of reinforcement learning technique. Finally, a benchmark study on an electric motor demonstrates the application of the proposed performance recovery method.

Datenbasierte Regelung mit Garantien

Thomas Beckers *

Sandra Hirche **

* Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Barer Straße 21
089 289 28441
t.beckers@tum.de

**Lehrstuhl für Informationstechnische Regelung
Technische Universität München
Barer Straße 21
089 289 28395
hirche@tum.de

Keywords: Lernende Regelung, Datenbasierte Modellierung, Stabilität nichtlinearer Systeme

Parametrische Modellierungsverfahren stoßen immer häufiger an ihre Grenzen, da die zu regelnden Systeme zunehmend komplexer werden; beispielsweise bei der Regelung flexibler Roboter [1] oder wenn menschliches Verhalten in der Regelschleife berücksichtigt werden muss. In der Vergangenheit wurde die Dynamik eines Systems häufig mit klassischen Methoden basierend auf physikalischen Grundprinzipien hergeleitet. Bei komplexen Systemen gestaltet sich dies zunehmend schwieriger und zeitaufwendiger, wenn nicht gar unmöglich. Das Problem verschärft sich durch den immer engeren Kontakt mit unbekanntem Umgebungen wie zum Beispiel bei der Mensch-Roboter-Interaktion.

Datenbasierte Verfahren haben bei der Modellierung solcher Systeme vielversprechende Ergebnisse erzielt und daher in den letzten Jahren signifikant an Bedeutung gewonnen. Die Grundidee dieser Verfahren beruht darauf, dass, mit möglichst wenig Vorwissen und Strukturen, die Daten für sich selbst sprechen sollen. Im Gegensatz zu parametrischen Ansätzen wächst die Komplexität eines datenbasierten Modells mit der Anzahl der Datenpunkte und wird daher auch nichtparametrische Modellierungsform genannt. Die so gewonnene Flexibilität ermöglicht ein effizientes Lernen von komplexen Dynamiken.

Ein großer Nachteil bei der Verwendung von datenbasierten Modellen ist jedoch die fehlende formale Garantie bezüglich der Stabilität und Performanz des geregelten Systems. Auch wenn bereits eine Vielzahl von erfolgreichen Anwendungen existieren, so ist vor allem bei sicherheitskritischen Systemen ein formaler Nachweis dringend notwendig.

In diesem Vortrag präsentieren wir einen Ansatz für die datenbasierte Regelung mit formalen Performanzgarantien. Hierfür verwenden wir den Gauß-Prozess, welcher, im Gegensatz zu vielen anderen Methoden, zusätzlich Informationen über die Unsicherheit des Modells bereitstellt, siehe Abb. 1. Die Funktionsweise des Gauß-Prozess basiert auf der linearen Regression mittels der Methode der kleinsten Quadrate. Dafür werden jedoch die Daten vorher in einen meist hochdimensionalen Raum projiziert, in dem dann die eigentliche Regression durchgeführt wird. Dabei wird ausgenutzt, dass der Raum nur implizit über die verwendete Kovarianzfunktion des Gauß-Prozess vorgegeben werden muss [2].

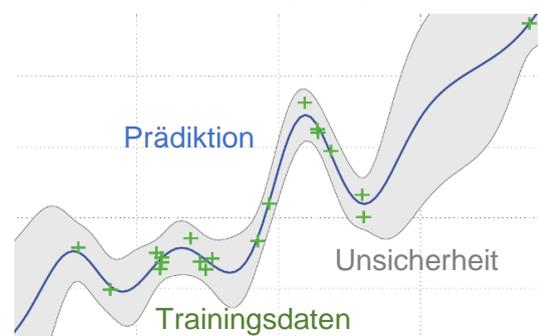


Abb. 1: Regression mittels Gauß-Prozess

Die Wahl der Kovarianzfunktion ermöglicht außerdem zusätzliches Vorwissen in das Modell zu integrieren. Durch die Beeinflussung des Priors des Gauß-Prozess können spätere Eigenschaften des Modells wie Stabilität oder die Anzahl der Ruhelagen garantiert werden [3,4]. Wir präsentieren Ergebnisse über die Eigenschaften des datengetriebenen Modells in Abhängigkeit von der eingesetzten Kovarianzfunktion.

Des Weiteren zeigen wir den Einsatz von Gauß-Prozess-Modellen im Regelkreis. Als Beispiel benutzen wir die Auslegung einer präzisen Folgeregelung für Manipulatoren mit einer zusätzlichen, unbekanntem Dynamik. Diese kann durch externe, schwierig zu modellierenden Kräften wie den Menschen, Reibung oder der Manipulation von Flüssigkeiten entstehen. Für die Modellierung der unbekanntem Dynamik mittels Gauß-Prozess werden zunächst Trainingsdaten des Systems gesammelt. Das so erzeugte, datenbasierte Modell wird zusammen mit eventuell vorhandenem Vorwissen über das Systemverhalten als Vorsteuerung zur Kompensierung der unbekanntem Dynamik genutzt [5], siehe Abb. 2. Die Information über die Unsicherheit des Modells wird hierbei verwendet, um die Verstärkung

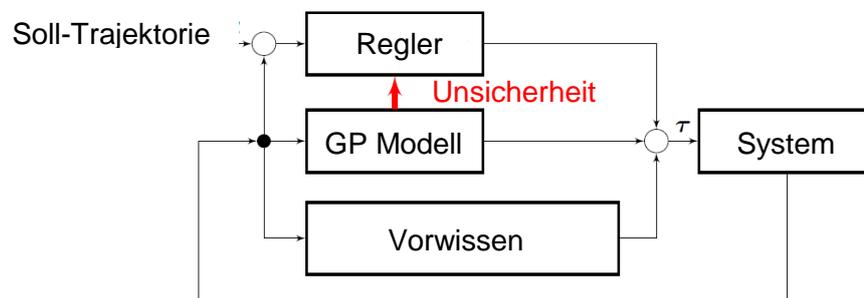


Abb. 2: Regelkreis mit Gauß-Prozess-Modell

der Rückkopplung zu variieren. Die Kernidee ist hierbei, dass in den Regionen mit vielen Trainingspunkten durch Vorsteuerung mittels Gauß-Prozess-Modells das gewünschte Systemverhalten erreicht wird und daher die Rückkopplungsverstärkung verringert werden kann. Befindet sich das System jedoch in Zustandsraumregionen, in denen der Gauß-Prozess nur wenig Information über die unbekanntem Dynamik hat, so wird die Verstärkung der Rückkopplung erhöht, um den Regelfehler gering zu halten [6].

Schlussendlich kann basierend auf der Unsicherheit des Modells die Stabilität des Regelkreises garantiert und die Größe des Regelfehlers bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen wird mit wenig Vorwissen und Zeitaufwand eine garantiert sichere Interaktion mit den Manipulatoren ermöglicht.

Literatur:

- [1] A.A. Moghadam, K. Torabi: Control-oriented modeling of a polymeric soft robot. *Soft Robotics*, 3(2), 2016.
- [2] C.E. Rasmussen, Carl Edward, and C.K. Williams: Gaussian processes for machine learning. The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2006
- [3] T. Beckers, S. Hirche: Stability of Gaussian Process State Space Models. *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*, 2016
- [4] T. Beckers, S. Hirche: Equilibrium distributions and stability analysis of Gaussian Process State Space Models. *Proceedings of the 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2016
- [5] T. Beckers, J. Umlauf, S. Hirche: Stable Model-based Control with Gaussian Process Regression for Robot Manipulators. *Proceedings of the 20th IFAC WC*, 2017
- [6] T. Beckers, J. Umlauf, D. Kulić, S. Hirche: Stable Gaussian Process based Tracking Control of Lagrangian Systems. *Proceedings of the 56th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2017

Modellbasierte stochastische Analyse von Synchronisationsfehlern in Mechatronischen Systemen

Thomas Mutzke^{1,2}, Andrey Morozov², Klaus Janschek²

¹*Mechatronic Products, Technology and Innovation, Siemens Healthineers.*

E-mail: thomas.mutzke@siemens-healthineers.com

²*Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Dresden.*

E-mail: {andrey.morozov, klaus.janschek}@tu-dresden.de

Die modellbasierte Systementwicklung ermöglicht die Analyse und Verifikation des Systemverhaltens in frühen Phasen der Produktentwicklung. Eine Herausforderung bei der Entwicklung mechatronischer Systeme ist die Verifikation von Zuverlässigkeitseigenschaften. In modernen mechatronischen Systemen treten typischerweise konkurrierende Prozesse auf. Fehler im zeitlichen Ablauf, verursacht durch mangelnde Synchronisationsmechanismen, können zu Fehlerzuständen führen und die Zuverlässigkeit beeinträchtigen. Verteilte Komponenten kommunizieren typischerweise über ein Netzwerk, in dem stochastische Effekte wie Verzögerungen bei der Übertragung auftreten können. In diesem Beitrag wird eine neue Methode für die modellbasierte Analyse von zeitlichen Anforderungen in Systemen mit konkurrierenden Prozessen, basierend auf einem annotierten Basismodell welches den Daten- und Steuerfluß umfaßt, vorgestellt (siehe Abbildung 1). Als Basismodell wird beispielhaft ein SysML Aktivitätsdiagramm [3] verwendet. Die Methode ist jedoch unabhängig vom verwendeten Basismodell und ist z.B. auch anwendbar auf andere UML/SysML Verhaltensmodelle, sowie AADL Modelle. Aktivitätsdiagramme in SysML erlauben die Modellierung von Abläufen in unterschiedlichen Domänen, sie sind jedoch aufgrund der semi-formalen Semantik nicht eindeutig interpretierbar.

Der erste Schritt der vorgestellten Methode ist die Transformation in ein formales Petri Netz Modell und erlaubt die Anwendung von formalen Model Checking Methoden zur Analyse des Verhaltens [2]. Model Checking ist eine automatisierte Technik, die es ermöglicht für ein endliches Zustandsmodell zu prüfen, ob eine formale Eigenschaft erfüllt wird [1]. In einem zweiten Schritt kann ein Zustandsmodell mittels Erreichbarkeitsanalyse aus dem Petri Netz Modell generiert werden. Aus den annotierten Parametern des Basismodells, z. B. stochastische Ausführungszeiten von Prozessen, können Übergangswahrscheinlichkeiten für die Transitionen im Zustandsmodell bestimmt werden. Das Zustandsmodell, erweitert um die Übergangswahrscheinlichkeiten repräsentiert eine Markov Kette. Identifikation und Formalisierung der Anforderungen ist der dritte Schritt. Die formalen Eigenschaften werden basierend auf den zeitlichen Randbedingungen in temporärer Logik spezifiziert. Hier schlagen wir eine neue Methode zur automatischen Identifikation und Formalisierung der Anforderungen, basierend auf der Analyse des Steuer- und Datenflusses, vor. Im vierten Schritt erhalten wir quantitative Ergebnisse durch Anwendung von aktuellen Model Checking Methoden, die eine Bewertung des Systementwurfs ermöglichen (siehe Abbildung 1).

Die Anwendbarkeit der vorgestellten Methode wird an einem Fallbeispiel aus der Medizintechnik demonstriert. Abbildung 2 zeigt eine Designstudie für eine mobile Patientenliege, die auf einem omni-direktionalen Antrieb basiert. Das Konzept ermöglicht beliebige Bewegungen in allen drei Freiheitsgraden in der Ebene. Jedes Rad repräsentiert eine Bewegungsachse und hat eine Antriebssteuerung die über ein Netzwerk mit einer zentralen Steuerung kommuniziert (siehe Abbildung 3). Die zentrale Steuerung plant die Bewegung und übermittelt die Sollwerte an die Bewegungsachsen. Die Bewegungsachsen liefern die aktuelle Position an die zentrale Steuerung. Eine zeitliche Anforderung ist, dass die Sollwerte zyklisch innerhalb eines Interpolationstaktes übertragen werden.

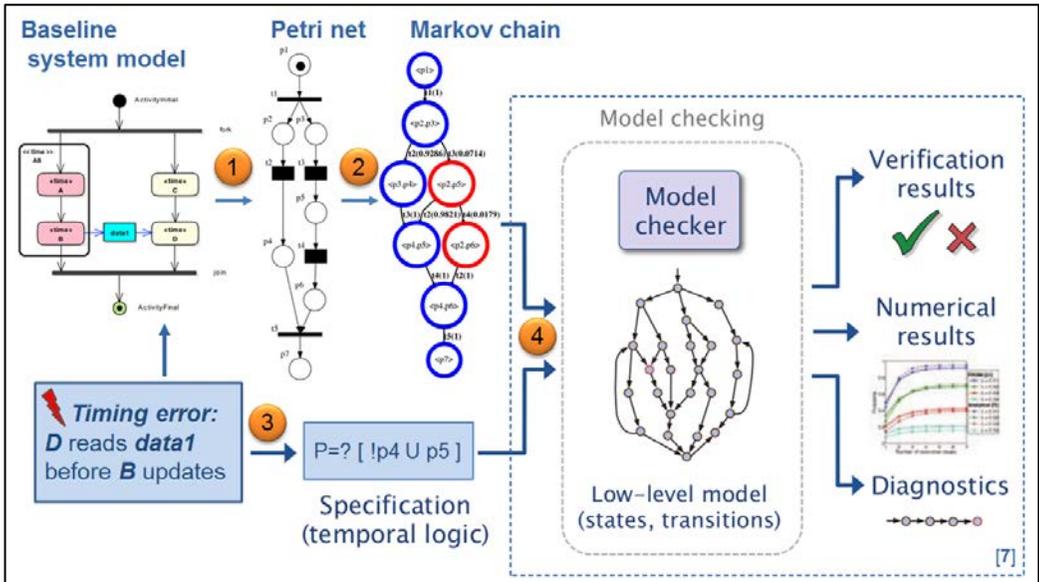


Abb. 1: Modellbasierte stochastische Analyse von Synchronisationsfehlern



Abb. 2: Designstudie einer mobile Patientenliege

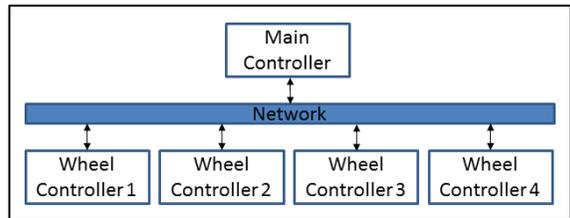


Abb. 3: Netzwerk Topologie für die mobile Patientenliege

References

1. Baier, C., Katoen, J.-P., in *Principles of Model Checking*, The MIT Press, 2008.
2. T. Murata: *Petri nets: Properties, analysis and applications*, 1989.
3. OMG SysML, <https://www.omg.org/spec/SysML>.
4. Mutzke, T., Morozov, A., Ding, K., Janschek, K. & Braun, J., *Verification of Timing Properties of a Medical Patient Table Case Study Using Probabilistic Model Checking*, European Safety and Reliability Conference ESREL, 2018.
5. Mutzke, T., Ding, K.; Morozov, A., Janschek, K. & Braun, J., *Model-based analysis of timing errors for reliable design of mechatronic medical devices*, 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 2016, pp. 233-238.
6. Mutzke, T., Morozov, A., Ding K., Janschek, K., Braun, J., *Stochastic Model-based Analysis of Timing Errors for Mechatronic Systems with User-defined General Discrete-time Distributions*, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 24, 2018, pp. 1417-1424
7. Norman, G., Parker, D., *Quantitative Verification: Formal Guarantees for Timeliness, Reliability and Performance*, London Mathematical Society and Smith Institute, 2014.

Regelung rotativer Direktantriebe bei Servoanwendungen

Mario Aldag

Professur für Regelungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Mario.aldag@hsu-hh.de

Joachim Horn

Professur für Regelungstechnik
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg
Joachim.horn@hsu-hh.de

Schlüsselwörter: Servoantrieb, Streckenidentifikation, Adaptive Notch-Filter, Zwei-Massen-Schwinger, Relay-Feedback-Experiment

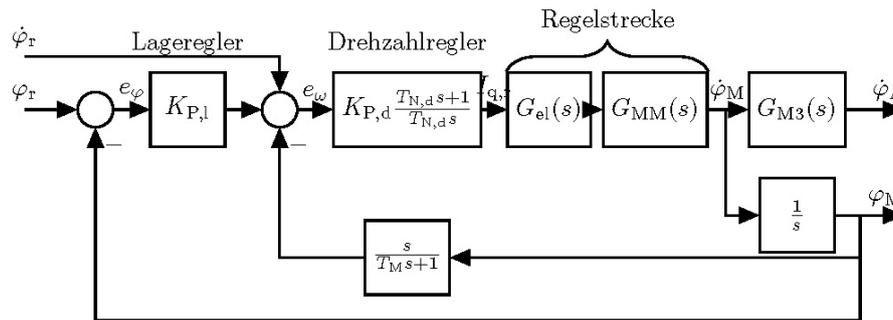


Abbildung 1 Blockschaltbild des Systems

Dieses Forschungsprojekt leistet einen Beitrag zum industrietauglichen Einsatz von Identifikationsalgorithmen von Regelstrecken, die am Beispiel einer Produktionsmaschine gezeigt werden. Dabei wird das Relay-Feedback-Experiment, welches mit einem Nelder-Mead-Optimierungsalgorithmus gekoppelt ist, als ein parametrisches Verfahren mit einem neu entwickelten nicht-parametrischen Scanning-Verfahren verglichen. Dies wird an zwei unterschiedlichen Maschinen validiert. Ziel beider Verfahren ist, Resonanzfrequenzen mit dominierendem Streckeneinfluss zu identifizieren, sodass diese mit Notch-Filtern gedämpft werden können.

Das Scanning-Verfahren berechnet das Leistungsdichtespektrum des Drehzahlwertes, welches für die automatische Identifikation der benötigten Notch-Filterparameter benutzt wird. Im Vergleich zum parametrischen Identifikationsansatz wird nicht in das bestehende Regelungssystem eingegriffen, sodass es zum Beispiel auch bei endlagenbeschränkten sowie bei schwerkraftbehafteten Maschinenachsen einsetzbar ist. Ferner ist damit die Anzahl der Resonanzfrequenzen nicht an eine Modellordnung gekoppelt.

Die Messungen werden an serienmäßig eingesetzten Maschinen, die weltweit im Einsatz sind, direkt auf dem Frequenzumrichter auf einem Signalprozessor unter Echtzeitanforderungen umgesetzt. Das Scanning-Verfahren ist daher derart gestaltet, dass dieses echtzeitfähig mit wenig Ressourcen lauffähig ist. Die Wirksamkeit der automatisch eingemessenen Notch-Filter wird sowohl im Zeit- als auch Frequenzbereich nachgewiesen. Dazu werden Gütefunktionale benutzt, um Metriken zu entwerfen, die diese Wirksamkeit aufzeigen. Durch das Einführen des Gütefunktionals wird die Parametrierung von Notch-Filtern auf ein Optimierungsproblem zurückgeführt.

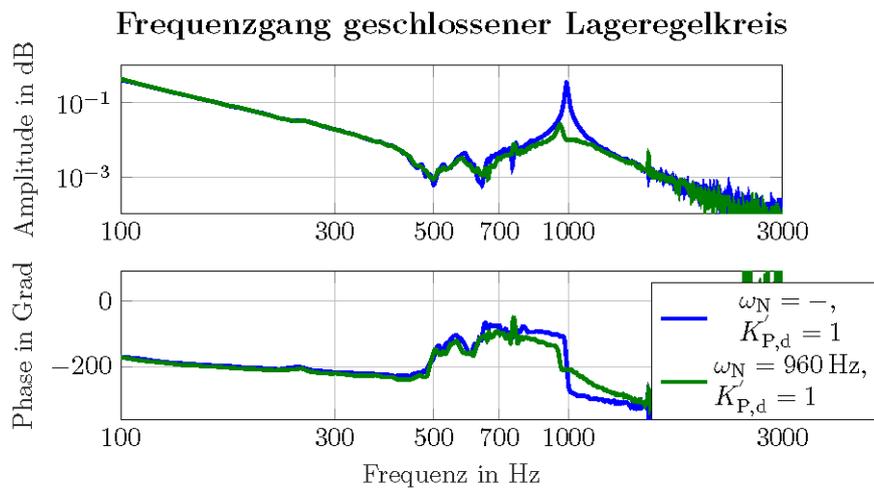
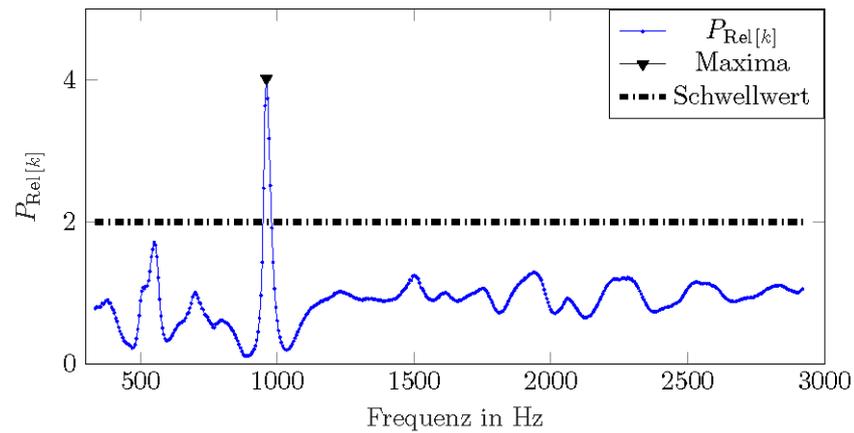


Abbildung 2 Oben: Berechnetes relatives Leistungsdichtespektrum zur Identifikation von Notch-Filtern
 Unten: Vergleich eines Frequenzgangs mit und ohne automatisch identifizierte Notch-Filtern

Literatur

- [1] Mario Aldag und Joachim Horn. „Automatic Notch Filter Width Tuning for Resonance Peaks in Gearless Servo Drives“. In: *European Control Conference*. Hrsg. von IEEE. 2018.
- [2] Mario Aldag und Joachim Horn. „Damping of resonance peaks using adaptive notch filters in gearless servo drives“. In: *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. 2017, S. 164–169. doi: 10.1109/MMAR.2017.8046817.
- [3] Mario Aldag und Joachim Horn. „Quantifying the Control Performance of Gearless Servo Drives for Real Time Applications“. In: *Asian Control Conference*. Hrsg. von IEEE. 2017.
- [4] Mario Aldag und Joachim Horn. „Real Time Multiple Resonance Peak Detection in Servo Drive Applications“. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Control, Mechatronics and Automation*. ACM, 2017. isbn: 978-1-4503-5339-7.
- [5] Mario Aldag und Joachim Horn. „Regelung rotativer Achsen mit Direktantriebstechnik“. In: *Modellbildung, Identifikation und Simulation in der Automatisierungstechnik*. Hrsg. von GMA Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik. 2018.

Positionsbestimmung und sensorlose Regelung von Magnetaktoren

Tristan Braun
ZF Friedrichshafen
Z. Forsch. u. Entwicklung
tristan.braun@zf.com

Johannes Reuter
Institut f. Systemdynamik
Hochschule Konstanz
jreuter@htwg-konstanz.de

Joachim Rudolph
Systemtheorie u. Regelungstechnik
Universität des Saarlandes
j.rudolph@lsr.uni-saarland.de

Schlüsselwörter: Magnetaktoren, nichtlineare Beobachter, sensorlose Regelung

Elektromagnetisch betätigte Aktoren (kurz Magnetaktoren) dienen, unter anderem in der Fahrzeugtechnik, als Steuerungs- und Antriebselemente mechatronischer Systeme und werden dabei bspw. als Verriegelungen, magnetische Kupplungen und als Hydraulik- und Pneumatikventile eingesetzt.

Die Kenntnis mechanischer Größen wie die Ankerposition ist zur Überwachung und Diagnose von Magnetaktoren nützlich und außerdem aus regelungstechnischer Sicht sehr erwünscht. Mögliche Einsatzgebiete sind bspw. die Verringerung der Aufprallgeschwindigkeit des Ankers an der Endlage (sog. „Softlanding“), um Geräusche und Verschleiß zu reduzieren sowie ferner die Realisierung einer proportionalen Aktor-Charakteristik unter Verwendung eines kosten- und bauraumgünstigen Schaltmagneten. Jedoch besitzen Magnetaktoren normalerweise keine dedizierten Sensoren zur Positionsmessung. In der Literatur existiert eine Vielzahl an Methoden zur Schätzung der Ankerposition basierend auf der Messung der elektrischen Größen der Magnetspule, siehe z.B. [1,2].

In diesem Beitrag wird zunächst der Entwurf nichtlinearer Beobachter auf der Basis eines generischen, dynamischen Aktor-Modells näher beleuchtet. Diese Methode zur Positionsbestimmung ermöglicht eine systematische Berücksichtigung nichtlinearer und transienter Effekte, die z. B. bei schnellen Schaltvorgängen nicht vernachlässigbar sind. Ein geeigneter Zugang zum Beobachterentwurf für Magnetaktoren beruht auf der singulären Störungsrechnung [3]. Außerdem werden zwei einfache und numerisch effiziente Verfahren zur Positionsbestimmung vorgestellt, die auf der Injektion eines harmonischen Signals beruhen. Dieses Verfahren, das häufig zur sensorlosen Regelung elektrischer Maschinen eingesetzt wird, ist bei rein translatorischen Magnetaktoren vorteilhaft zur Schätzung langsamer Ankerbewegungen [4].

Die betrachteten Methoden zur Positionsbestimmung werden anhand verschiedener Fallbeispiele miteinander verglichen und ihre praktische Nützlichkeit demonstriert. Zum einen wird eine sensorlose Folgeregelung zur Reduktion der Aufprallgeschwindigkeit basierend auf nichtlinearen Beobachtern betrachtet und zum anderen der geregelte Proportionalbetrieb basierend auf der Positionsbestimmung durch Signalinjektion.

Literatur

- [1] T. Glück. „Soft landing and self-sensing strategies for electromagnetic actuators“. Modellierung und Regelung komplexer dynamischer Systeme. Shaker. 2013.
- [2] T. Braun, Reuter, J. und Rudolph, J. „Observer design for self-sensing of solenoid actuators“. In: *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* DOI: 10.1109/TCST.2018.2821656. 2018.
- [3] T. Braun, Reuter, J. und Rudolph, J. „A singular perturbation approach to nonlinear observer design with an application to electromagnetic actuators“. In: *Int. J. Control.* DOI: 10.1080/00207179.2018.1539873. 2018.
- [4] T. Braun, Reuter, J. und Rudolph, J. „Sensorlose Positionsregelung eines hydraulischen Proportional-Wegeventils mittels Signalinjektion“. In: *at-Automat.* 65(4): S. 260-269. 2017.

Messgerät-invariante Merkmalsextraktion für die Analyse hyperspektraler Daten

Julius Krause¹

¹ Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme IES
Karlsruher Institut für Technologie KIT
Haid-und-Neu-Str. 7, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 6091-273
julius.krause@kit.edu

Jürgen Beyerer^{1,2}

² Fraunhofer Institut für Optronik,
Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 (0) 721 6091-210
juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

Schlüsselwörter: hyperspektrale Bildverarbeitung, optische Spektroskopie, Prozessanalyse, Modelltransfer, Wavelet Transformation

Die optische Spektroskopie im elektromagnetischen Spektralbereich von 780 nm bis 2500 nm ist eine etablierte Labormethode in Wissenschaft und Qualitätskontrolle. In diesem Spektralbereich wird das Licht durch Anregung polarer Wasserstoffbindungen (CH, NH, OH, ...) absorbiert. Die Analyse dieser Absorptionen ermöglicht eine qualitative und quantitative Aussage zu vorhandenen Inhaltsstoffen in Materialien. Insbesondere in der Petrochemie, Lebensmittel- und Pharmaindustrie sowie in der Landwirtschaft finden sich zahlreiche Anwendungsbeispiele.

In diesem Beitrag wird eine Methode zur Messgerät-invarianten Merkmalsextraktion in hyperspektralen Daten vorgestellt. Ziel der Methode ist die Rekonstruktion des Absorptionsspektrums

$$S(\lambda) = \sum_{j=1}^N c_j \exp \left\{ - \left(\frac{\lambda - \lambda_j}{\sqrt{2} \sigma_j} \right)^2 \right\},$$

bestehend aus N Absorptionen durch Anregung von Molekülschwingungen [1].

Eine besondere Herausforderung in der Auswertung spektraler Daten ist der Umstand, dass die Absorption nur indirekt aus dem Reflexionsgrad $R(\lambda)$ einer Probe bestimmt werden kann. Genauer, die von einer Probe emittierte Strahldichte variiert, je nach Winkel, Wellenlänge und Distanz zur Probe, entsprechend einer materialspezifischen bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion $BRDF$ [2]. Besonders deutlich zeigt sich dieser Einfluss bei pulverförmigen Proben, weshalb zahlreiche Methoden zur Vorverarbeitung spektraler Daten entwickelt wurden [3]. Eine bewährte Methode zur Korrektur von Streueinflüssen, welche einen niederfrequenten Signalanteil erzeugen, ist die Bildung einer spektralen Ableitung [4].

Der im folgenden vorgestellte Ansatz bietet eine Möglichkeit zur Rekonstruktion der Absorptionen $S(\lambda)$ aus dem gemessenen Reflexionsgrad einer Probe. Durch eine kontinuierliche Wavelet-Transformation des Spektrums mit dem *Mexican Hat Wavelet*

$$\psi_{a,b}(\lambda) = \frac{d^2}{d\lambda^2} \exp \left\{ - \left(\frac{\lambda - a}{2\sqrt{2}b} \right)^2 \right\},$$

wird die Ähnlichkeit von $R(\lambda)$ zur Funktion $S(\lambda)$ ermittelt. Anschließend können die Positionen λ_j , sowie die zugehörigen Halbwertsbreiten (FWHM) σ_j , der Absorptionsbänder anhand der lokalen Maxima im berechneten Wavelet Skalogramm ermittelt werden. Die Wavelet-Transformierte ist zudem mit der Molekülkonzentration c_j verknüpft und kann für quantitative Aussagen ausgewertet werden.

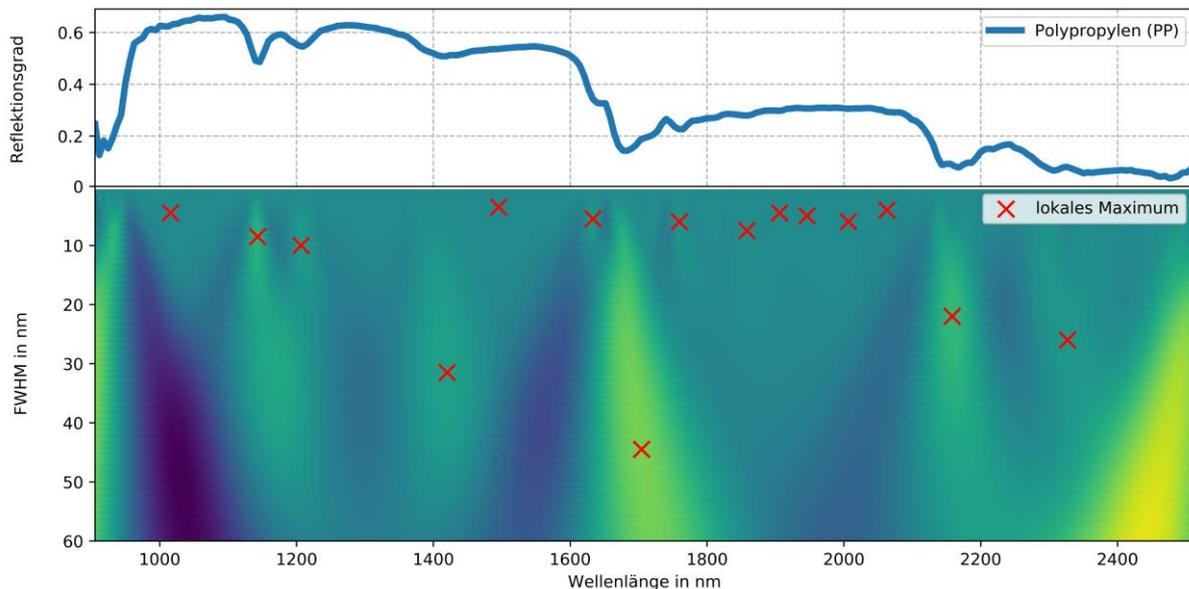


Abbildung 1: Reflexionsgrad einer Kunststoffprobe sowie das dazugehörige Wavelet-Skalogramm. Deutlich zu erkennen ist eine gute Übereinstimmung zwischen den lokalen Maxima im Skalogramm und den sichtbaren Absorptionen im gemessenen Reflexionsgrad. Der Trend im spektralen Verlauf entsteht durch die wellenlängenabhängigen Reflexionseigenschaften.

Gegenüber klassischen Methoden der spektralen Signalauswertung bietet die Beschreibung des Spektrums über die vorgestellten Deskriptoren einige Vorteile, insbesondere bei der Verwendung unterschiedlicher Sensoren. Eine Materialerkennung ist in vielen Fällen bereits auf Basis der beiden Deskriptoren λ_j und σ_j möglich. Diese beiden Merkmale sind zudem unabhängig von multiplikativen und additiven Einflüssen in der detektierten Strahlendichte. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass die Berechnung der Deskriptoren auch bei Verwendung unterschiedlicher Sensorik nahezu identische Ergebnisse liefert. Es handelt sich daher um eine Messgerät-invariante Beschreibung der Absorptionen in spektralen Daten.

Literatur

- [1] A. J. Brown, "Spectral curve fitting for automatic hyperspectral data analysis", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 6, pp. 1601–1607, 2006.
- [2] J. Beyerer, C. Frese, and F. Puente León, *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Springer Vieweg, 2012.
- [3] Å. Rinnan, F. van den Berg, and S. B. Engelsen, "Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra", *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 28, no. 10, pp. 1201–1222, Nov. 2009.
- [4] K. Norris and P. Williams, "Optimization of mathematical treatments of raw near-infrared signal in the measurement of protein in hard red spring wheat. I. Influence of particle size.", *Cereal Chemistry*, vol. 61, no. 2, pp. 158–164, 1984.

Störgrößenkompensation und Strahlformung durch deformierbare Spiegel in Hochleistungslasern

Kevin Schmidt

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

Oliver Sawodny

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

Schlüsselwörter: Optomechatronik, adaptive Optik, verteiltparametrische Systeme, Störgrößenkompensation, Geometrieoptimierung

Hochleistungslaser sind ein essentieller Bestandteil zahlreicher Materialbearbeitungsverfahren in industriellen Fertigungsprozessen. Durch Anpassung der Strahlparameter ist es prinzipiell möglich eine Vielfalt an Materialbearbeitungsverfahren – wie Schneiden, Schweißen oder Bohren – in einem adaptiven Hochleistungslaser zu vereinen. Somit haben Laser in der Materialbearbeitung ein großes Potential um die Vision flexibler Fertigungsanlagen ohne Umrüstzeiten im Rahmen des Industrie 4.0-Konzepts zu ermöglichen [4]. Die Kompensation thermischer Effekte durch adaptive optische Aktoren im Laserresonator stellt sich als Schlüsselaufgabe heraus, weil die Leistungsskalierbarkeit im Hochleistungsbetrieb durch diese Effekte limitiert wird. Da die verminderte Strahlqualität und Effizienzverluste außerhalb des Resonators nicht oder nur unzureichend korrigiert werden können, ist es notwendig die Störeffekte direkt im Laserresonator zu kompensieren (siehe Abb. 1).

Ursprünglich wurden adaptive Optiken in der Astronomie verwendet, um Abbildungsstörungen bei terrestrischen Teleskopen durch deformierbare Spiegel zu kompensieren. Um dieses Konzept auf adaptive Hochleistungslaser zu übertragen, sind neuartige Spiegeltechnologien notwendig, die für den Einsatz im Hochleistungsresonator geeignet sind. Bei pneu-

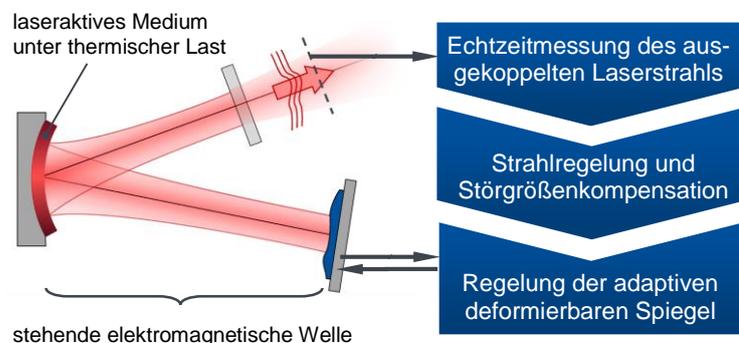


Abbildung 1: Aufbau eines adaptiven Hochleistungs-Scheibenlasers.

matisch aktuierten Flächenlastspiegeln wird die Deformation einer Spiegelmembran infolge von Überdruck ausgenutzt um gewünschte Deformationen zu realisieren [2]. Während sich diese Bauform wegen festen Deformationsprofilen besonders zur Kompensation *a priori* bekannter Störprofile eignet, wird auch eine komplementäre Spiegeltechnologie analysiert: Optisch adressierte Spiegel ermöglichen nahezu beliebige Deformationen, welche durch eine lokale Erwärmung des Spiegels realisiert werden [3].

Im Vergleich zu konventionellen Scheibenlasern werden für den adaptiven Betrieb drei zusätzliche Bestandteile benötigt (vgl. Abb. 1). Zunächst muss der ausgekoppelte Laserstrahl durch geeignete Sensoren zur Laufzeit erfasst werden. Auf dieser Basis werden der Resonator-Zustand und die vorliegenden Störgrößen rekonstruiert [1], sodass eine über-

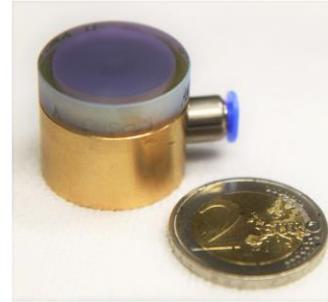
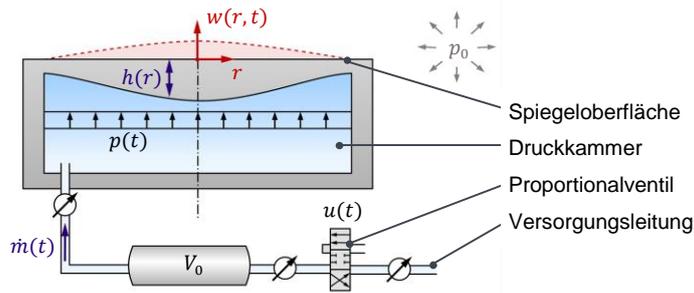


Abbildung 2: Pneumatisch aktivierte Flächenlastspiegel: Funktionsprinzip (links) und Prototyp (rechts).

geordnete Instanz im Rahmen einer modellbasierten Strahlregelung die Sollgrößen für die deformierbaren Spiegel generiert. Jene werden im unterlagerten Aktor-Regelkreis eingestellt.

Die Thematik wird anhand einer konkreten Kompensationsaufgabe am Beispiel eines pneumatisch aktuierten Flächenlastspiegels weiter ausgeführt. Durch den in Abbildung 2 gezeigten adaptiven Spiegel kann der Strahlradius des ausgekoppelten Lasers unabhängig von den thermischen Lasten im laseraktiven Medium eingeregelt werden [2].

Zunächst wird die Entwurfsmethodik und die modellbasierte Regelung des Spiegels näher erläutert. Die verteiltparametrischen Bewegungsgleichungen des Spiegels sind durch eine partielle, ortsvariante Integro-Differentialgleichung gegeben, die mit der nichtlinearen pneumatischen Dynamik über einen verteilt-wirkenden Druckeingriff gekoppelt ist. Um gewünschte Deformationsprofile zu erreichen, wird die Dicke $h(r)$ der Spiegelmembran örtlich variiert. Dazu kann ein nichtlineares Optimierungsproblem basierend auf den stationären Systemgleichungen definiert und mit Optimalsteuerungsmethoden gelöst werden. Dieses Konzept wird durch eine Zwei-Freiheitsgrade-Regelung ergänzt.

Daraufhin wird die Integration des geregelten Aktors in die übergeordnete Regler-Architektur erläutert und Aspekte zur Störgrößenschätzung und –aufschaltung thematisiert. Durch den Vergleich mit nicht-modellbasierten Ansätzen wird abschließend die Notwendigkeit des modellbasierten Konzepts aufgezeigt, die durch die Nichtlinearitäten des optischen Teilsystems bedingt ist.

Literatur

- [1] P. Wittmüß, S. Piehler, T. Dietrich, M. Abdou Ahmed, T. Graf und O. Sawodny, "Numerical modeling of multimode laser resonators". In: *Journal of the Optical Society America B* 33, 2278-2287, 2016.
- [2] S. Piehler, T. Dietrich, P. Wittmüß, O. Sawodny, M. Abdou Ahmed und T. Graf, "Deformable mirrors for intra-cavity use in high-power thin-disk lasers". In: *Optics Express* 25, 4254-4267, 2017.
- [3] K. Schmidt, P. Wittmüß, S. Piehler, M. Abdou Ahmed, T. Graf und O. Sawodny, "Modeling and simulating the thermoelastic deformation of mirrors using transient multilayer models". In: *Mechatronics* 53, S. 168-180, 2018.
- [4] T. Graf "Laser: the ideal universal tool for industry4.0", In: *Stuttgart Laser Technology Forum*, 2018.

Regelung regenerativer optischer Verstärker für ultrakurze Laserpulse

Andreas Deutschmann

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

Andreas Kugi

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

Schlüsselwörter: regenerative optische Verstärker, nichtlineare Schrödingergleichung, iterative Pulsformung, chaotische Systeme, Stabilisierung

Zur Erzeugung energiereicher Laserpulse werden üblicherweise regenerative Verstärker verwendet, welche die durch kontinuierliches Pumpen über einen vergleichsweise langen Zeitraum aufgebaute Besetzungsinversion in kurzer Zeit auf einen eintreffenden Laserpuls übertragen, indem dieser mehrfach durch das angeregte Lasermedium geführt wird.

Während die Gesamtenergie des erzeugten Laserpulses im Wesentlichen durch die Speicherfähigkeit des Lasermediums limitiert ist, führen bei kurzen Pulsen die enormen Leistungsdichten zur Selbstzerstörung des Mediums bereits bei wesentlich kleineren Pulsenergien. Um diese Limitierung zu umgehen, wurde auf bekannte Techniken der gechirpten Pulsverstärkung [5] übergegangen, die durch die jüngsten Nobelpreise breitere Aufmerksamkeit erfahren haben. Dabei wird der zu verstärkende Puls zuerst durch positive Dispersion zeitlich gedehnt, danach spektral homogen verstärkt und letztlich durch entsprechende negative Dispersion wieder rekomprimiert. Die Annahme homogener Verstärkungsprofile ist für ultra-kurze Laserpulse zunehmend verletzt, weshalb versucht wird, durch geeignete Eingangsfiler einer zunehmend unvollständigen Rekompression entgegen zu wirken [4].

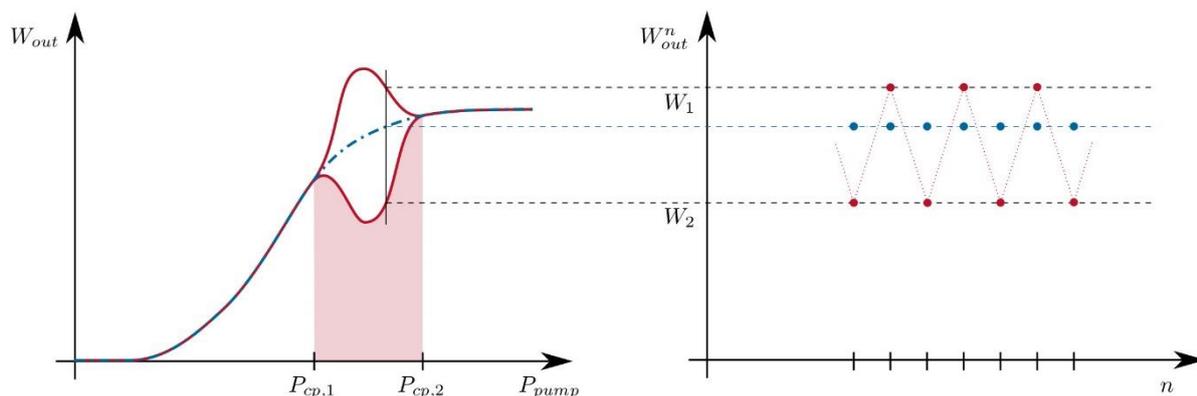


Abbildung 1: Illustration der Grenzmenge W_{out} eines stabilen (blau) und eines instabilen (rot) regenerativen Verstärkers für veränderliche Pumpleistungen (links) und die zugehörigen Grenzzyklen W_{out}^n (rechts).

Werden regenerative Verstärker mit hoher Repetitionsrate betrieben, kann die intrinsische Verkopplung aufeinander folgender Pulse zu einer Destabilisierung der Dynamik des Verstärkers führen [3]. Dabei treten sogenannte Periodenverdopplungsbifurkationen auf, wie in Abb. 1 für einen stabilen (blau) und einen instabilen (rot) Verstärker für veränderliche

Pumpleistungen dargestellt. Ein sicherer Betrieb des Verstärkers jenseits der kritischen Pumpenergie $P_{cp,1}$ ist daher im Allgemeinen nicht möglich, obwohl dieser Bereich günstige Betriebs-eigenschaften aufweisen würde.

Die Verfügbarkeit programmierbarer optischer Filter legt die Anwendung regelungstechnischer Konzepte auf optische Pulsverstärker nahe. In diesem Beitrag sollen daher mehrere regelungstechnische Problemstellungen für optische Verstärker behandelt werden.

Dazu wird zuerst ein detailliertes, verteilt-parametrisches Modell des Verstärkers hergeleitet, welches auf der nichtlinearen Schrödingergleichung gekoppelt mit der Von-Neumann-Gleichung der atomaren Populationen basiert. Darauf aufbauend soll eine gewünschte Pulsform der Ausgangspulse durch iterativ lernende Regelungsmethoden erzeugt werden [1,2]. Hierfür wird die Kopplung aufeinander folgender Pulse durch die komplexen atomaren Populationsdynamiken vernachlässigt, um das spektrale Eingangs-Ausgangsverhalten durch ein reduziertes lineares Modell zu beschreiben. Auf Basis eines akausalen Wiener-Filters [6] kann daraus ein adaptives Lerngesetz entwickelt werden, welches unabhängig von einem identifizierten (atomaren) Modell oder einem gewählten Arbeitspunkt funktioniert.

In einem zweiten Schritt soll die Puls-zu-Puls-Dynamik unter Vernachlässigung der spektralen Eigenschaften beschrieben werden, welche sich in Form eines nichtlinearen, zeitdiskreten Systems darstellen lässt. Abhängig von den verfügbaren Messgrößen können auf Basis dieses Modells schließlich instabile Arbeitsbereiche durch Regelung stabilisiert werden, wodurch einstufige Pulsverstärker mit sehr hohen Verstärkungen sicher in und durch instabile Bereiche geführt werden können.

Literatur

- [1] A. Deutschmann et al. „Identifikation und Simulation optischer Verstärker für ultra-kurze Laserpulse“. In: at - Automatisierungstechnik, 66: 66–78, 2018.
- [2] A. Deutschmann et al. „Modeling and Iterative Pulse-Shape Control of Optical Chirped Pulse Amplifiers“. Automatica, 98: 150-158, 2018.
- [3] M. Grishin et al. „Dynamics of high repetition rate regenerative amplifiers“. Optics Express, 15:9434–9443, 2007.
- [4] P. Malevich et al. „High energy and average power femtosecond laser for driving mid-infrared optical parametric amplifiers“. Optics Letters, 38:2746–2749, 2013.
- [5] D. Strickland und G. Mourou. „Compression of amplified chirped optical pulses“. Optics Communications, 56:219–221, 1985.
- [6] N. Wiener. „Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series“. MIT Press, 1964.

Ein MPC-basiertes Framework zur Koordination zwischen einer wertebasierten Entscheidungsfindung und der Bewegungsplanung für ein automatisiertes überaktuiertes Fahrzeug

Im Feld des automatisierten Fahrens erfährt die Bewegungsplanung und -regelung aktuell große Beachtung in Industrie und Wissenschaft. Vor allem modellprädiktive Verfahren erfreuen sich dabei auch aufgrund der möglichen Berücksichtigung fahrdynamischer Randbedingungen großer Beliebtheit. Oft wird jedoch bei der Verwendung solcher Verfahren mit etablierten Architekturprinzipien wie Sense-Plan-Act gebrochen, sodass auf Trajektorienplanungs- und -regelungsebene implizite Entscheidungen z.B. über Überholvorgänge getroffen werden. Spätestens, wenn Fahrzeuge in die Lage versetzt werden sollen, wertebasierte Entscheidungen zu treffen und umzusetzen, die auch die zeitweise Übertretung von Regeln bedeuten, müssen Entscheidungen jedoch explizit auf einer taktischen Ebene im System getroffen werden. Die Berücksichtigung wertebasierter Einflüsse bekommt dabei einen entscheidenden Einfluss auf die zu repräsentierenden Randbedingungen und Optimierungsgewichte sowie auf die Wahl der zur Planung verwendeten Modelle.

Dieser Vortrag präsentiert einen Ansatz zur Realisierung des Zusammenspiels zwischen Entscheidungsfindung und Bewegungsplanung mit Hilfe eines modellprädiktiven Planungsframeworks. Die Einflüsse wertebasierter Entscheidungen auf ein solches Framework werden am Beispiel des überaktuierten Versuchsträgers MOBILE diskutiert.

Multimodale Verkehrsflussregelung – Ein Ansatz für eine nachhaltige, urbane Mobilität

Angelika Hirrle, Birgit Jaekel

Lehrstuhl für Verkehrleitsysteme und -prozess-
automatisierung
Technische Universität Dresden
angelika.hirrle@tu-dresden.de
birgit.jaekel@tu-dresden.de

Jürgen Krimmling

Lehrstuhl für Verkehrleitsysteme und -prozess-
automatisierung
Technische Universität Dresden
jürgen.krimmling@tu-dresden.de

Schlüsselwörter: Verkehrsflussregelung, Fundamentaldiagramm, MPC, Optimalregelung

Das Ziel eines modernen, städtischen Verkehrsmanagements ist die Befriedigung individueller Mobilitätsbedürfnisse bei gleichzeitiger Minimierung der gesellschaftlichen und ökologischen Kosten (Verkehrsgüte). Diese Kosten sind beispielsweise entstehende Emissionen sowie die Länge der Reisewege und Reisezeiten. Zur Befriedigung des Mobilitätsbedürfnisses stehen den Akteuren verschiedene Verkehrsmittel zur Verfügung. Dabei ist der Modal Split als prozentuale Zusammensetzung des Verkehrs aus den verschiedenen Verkehrsmitteln ein Resultat dieser Verkehrsmittelwahl. Das Erreichen des eingangs beschriebenen Ziels hängt maßgeblich von dieser Zusammensetzung ab. Ein verstärkter Einsatz von Bussen und Straßenbahnen wird beispielsweise eine Verringerung der mittleren Geschwindigkeit aller Verkehrsteilnehmer zur Folge haben, es wird jedoch auch eine höhere Anzahl an Personen befördert. Eine Beeinflussung des Modal Split führt also zu einer Anpassung der Verkehrsgüte.

Um in Abhängigkeit des Modal Splits eine optimale Lösung für die oben gestellte Aufgabe zu finden, wird zunächst ein (Verkehrs-)prozessmodell benötigt. Grundlage dafür bietet die Beschreibung durch das sogenannte Makroskopische Fundamentaldiagramm (kurz: MFD). Es stellt den Verkehrsfluss (Fzg/h) in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (Fzg/km) auf einer Strecke dar. Unter bestimmten Voraussetzungen kann dieses Konzept auf ein urbanes Streckennetz übertragen werden und gibt dann einen Zusammenhang zwischen der Akkumulation der Fahrzeuge in einem Gebiet und dem Abfluss (Fzg/h) aus diesem wieder. Erweitert werden kann dieses Modell in zweierlei Hinsicht (siehe [1]). Anstelle eines einzelnen Verkehrsmittels – meist der motorisierte Individualverkehr (MIV) – können weitere Verkehrsmittel wie der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) einbezogen werden, was zu einem mehrdimensionalen Fundamentaldiagramm (hier: 3D-MFD) führt, welches die Abhängigkeit des Fahrzeugflusses von der Akkumulation der Fahrzeuge der verschiedenen Verkehrsmittel darstellt. Des Weiteren kann zusätzlich an Stelle des Fahrzeugflusses der Passagierfluss (Pax/h) betrachtet werden. Das so gebildete Fundamentaldiagramm (3D-pMFD) stellt somit die Befriedigung individueller Mobilitätsbedürfnisse in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Verkehrs dar.

In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze, Fundamentaldiagramme für die Regelung von urbanen Verkehrsprozessen zu nutzen. Ziel ist dabei meist, den Fahrzeugfluss innerhalb eines Gebietes zu maximieren, wobei als Stellgröße der Zufluss aus den angrenzenden Gebieten genutzt wird. In [2] wird dabei das einfache MFD verwendet und ein modellprädiktiver Ansatz verfolgt. In [3] wird die Regelung anhand eines 3D-MFD für MIV und Busse konzipiert. Die Zusammensetzung des Verkehrs wird dabei als bekannt vorausgesetzt.

Die hier vorgestellte Arbeit verbindet und erweitert die in den oben genannten Veröffentlichungen vorgestellten Konzepte. Mit einem modellprädiktiven Ansatz soll die eingangs genannte Zielsetzung der Maximierung des Passagierflusses bei Minimierung von Reisezeit, -weg und Emission erreicht werden. Daher dient hier ein 3D-pMFD als Grundlage, welches mittels simulierter Verkehrsdaten eines realistischen Verkehrsnetzes erstellt worden ist. Ferner wird der Modal Split nicht als bekannt vorausgesetzt, sondern soll als Stellgröße dienen. Abschließend erfolgt eine Betrachtung von Möglichkeiten zur Beeinflussung des Modal Split an einem Beispiel.

Literatur

- [1] N. Geroliminis, N. Zheng und K. Ampountolas. „A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks “. In: *Transportation Research Part C*. 2014.
- [2] N. Geroliminis, J. Haddad und M. Ramezani. „Optimal Perimeter Control for two Urban Regions with Macroscopic Fundamental Diagrams: A model Predictive Approach “. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems*. 2012.
- [3] K. Ampountolas, N. Zheng und N. Geroliminis. „Macroscopic modelling and robust control of bi-modal multi-region urban road networks“. In: *Transportation Research Part B*. 2017.

Kooperative Regelung in vernetzten ereignisdiskreten Systemen

Markus Zgorzelski *

* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Tel.: 0234 32 24096
Fax.: 0234 32 14101
zgorzelski@atp.rub.de

Jan Lunze **

** Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und
Prozessinformatik (ATP)
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150, 44801 Bochum
Tel.: 0234 32 24071
Fax.: 0234 32 14101
lunze@atp.rub.de

Schlüsselwörter: Vernetzte ereignisdiskrete Systeme, E/A-Automaten, Trajektorienfolgeregelung, Flexible Fertigungssysteme, Industrie 4.0

Ein vernetztes ereignisdiskretes System bezeichnet einen Verbund von geregelten Teilsystemen mit diskreten Zuständen $z_i \in \mathcal{Z}_i$ (Abbildung 1), die ein digitales Kommunikationsnetz einsetzen, um bei Bedarf ihre Aktivitäten untereinander zu koordinieren [1]. In der in Abbildung 1 gezeigten Struktur sind die Teilsysteme durch Netzwerkeinheiten über das Kommunikationsnetz miteinander verbunden. Diese Strukturen werden gebraucht, wenn die Roboter in Abbildung 1 die Autotür und Motorhaube autonom, jedoch die Windschutzscheibe kooperativ einbauen sollen.

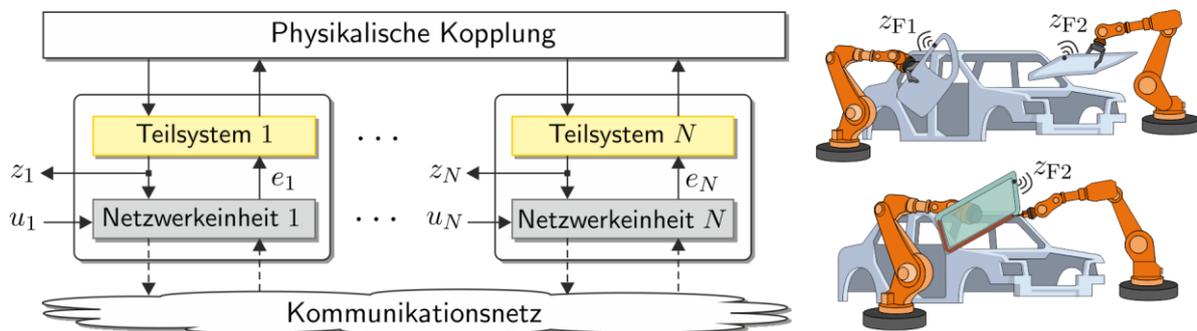


Abbildung 1: Vernetztes ereignisdiskretes System und kooperative Roboter

Lokale Trajektorienfolgeregler [2] statten die Teilsysteme mit einer weitgehenden Autonomie aus, sodass diese auf äußere Anforderungen u_i , die als Zielzustände $u_i = z_{Fi} \in \mathcal{Z}_i$ formuliert sind, flexibel reagieren können. In einem vernetzten System schränken gemeinsame Steuerungsaufgaben die Teilsysteme derart ein, dass diese einen bestimmten Anteil ihrer lokalen Aufgaben z_{Fi} nur gemeinsam durch eine temporäre Kooperation erledigen können. Deshalb müssen Methoden entwickelt werden, die die folgende Frage beantworten:

Wann und wie muss das Kommunikationsnetz von den diskreten Teilsystemen eingesetzt werden, um autonome und kooperative Aufgaben zu erfüllen?

Derartige Methoden sind notwendig, um die unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ anvisierte flexible Systemstruktur zu schaffen.

Der hier vorgestellte Ansatz verwendet die Modellform der Eingangs/Ausgangsautomaten (E/A-Automaten) und hat das Ziel, die lokalen Zustände der Teilsysteme z_i nach endlich vielen Schritten k_i in die vorgegebenen Zielzustände $(u_1 \dots u_N)^T = (z_{F1} \dots z_{FN})^T$ zu überführen:

$$\text{Trajektorienfolgeregelung: } \forall \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_N \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_{F1} \\ \vdots \\ z_{FN} \end{pmatrix} \in \mathcal{Z}_1 \times \dots \times \mathcal{Z}_N, \exists k_1, \dots, k_N: \begin{pmatrix} z_1(k_1) \\ \vdots \\ z_N(k_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{F1} \\ \vdots \\ z_{FN} \end{pmatrix}.$$

Gemeinsame Steuerungsaufgaben werden durch synchronen Zustandsübergänge γ in der Form $\gamma = (z_i \rightarrow z'_i, z_j \rightarrow z'_j), (i \neq j)$ beschrieben. Wenn mehrere derartige Übergänge in Folge auftreten besteht die Gefahr, dass sich die Teilsysteme gegenseitig blockieren können. Um ein Verklemmen des Gesamtsystems zu verhindern, werden Netzwerkeinheiten derart entworfen, dass sie die Verklemmungen erkennen und mittels temporärer Kommunikation auflösen, indem sie die lokalen Steuereingaben e_i der Teilsysteme zeitweise modifizieren (Abbildung 1) [3,4].

Da für die Behandlung der Abhängigkeiten zwischen den synchronen Zustandsübergängen γ das autonome Verhalten der Teilsysteme weitgehend bedeutungslos ist, kann das kooperative Verhalten mit Hilfe eines reduzierten Modells beschrieben werden, welches durch eine im Vortrag beschriebene Abstraktion entsteht. Es wird gezeigt, dass die Netzwerkeinheiten durch die Trajektorienfolgeregelung des abstrahierten Gesamtmodells in der Lage sind, die lokalen Steuereingaben e_i der Teilsysteme derart anzupassen, dass keine Verklemmungen zwischen diesen auftreten und die vorgegebenen Zielzustände $(u_1 \dots u_N)^T = (z_{F1} \dots z_{FN})^T$ erreicht werden.

Die beschriebenen Methoden werden an einem Handhabungsprozess im Handling System HANS demonstriert (Abbildung 2).

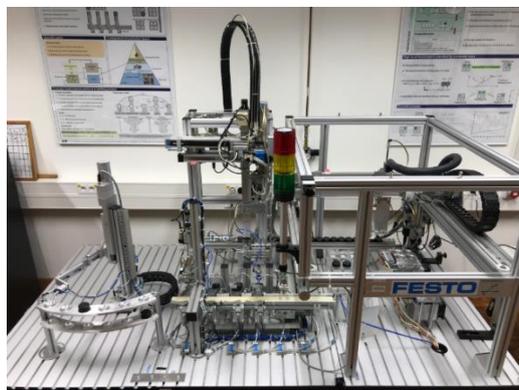


Abbildung 2: Handling System HANS

Literatur

- [1] M. Zgorzelski und J. Lunze. „A Method for the Synchronisation of Networked Discrete-Event Systems“. In: *Proc. of Workshop on Discrete Event Systems*, Xi'an, China, 2016, pp. 444 - 451.
- [2] M. Zgorzelski und J. Lunze. „Feedforward and state-feedback control of deterministic I/O automata“. In: *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 50, No. 1, 2017, pp. 13426 - 13433, IFAC World Congress, Toulouse, France.
- [3] M. Zgorzelski und J. Lunze. „Ein Ansatz zur vernetzten Steuerung ereignisdiskreter Systeme“. In: *at - Automatisierungstechnik*, Vol. 66, Iss. 8, 2018, pp. 617 - 632.
- [4] M. Zgorzelski und J. Lunze. „A new approach to tracking control of networked discrete-event systems“. In: *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 7, 2018, pp. 448 - 455, Workshop on Discrete Event Systems, Sorrento Coast, Italy.

Formal Semantics for the Verification of Sequential Behaviour Diagrams

Yiheng Tang

Lehrstuhl für Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg
Cauerstraße 7, D-91058 Erlangen, Germany
Tel.: + 49 (0)9131/85-27462
E-mail: yiheng.tang@fau.de

Abstract. In order to verify the reliability and correctness of digital systems, the theory of model checking has been well established in various fields such as digital circuits and computer software. The main focus of our research is to utilize the principle of model checking in automated manufacturing. The base models for formal verification, as introduced in [CGP01] and [BK08], are transition systems such as automata and Kripke-structures. In industrial practice, however, manufacturing systems are usually modelled by modelling languages such as *unified modelling language* and *system modelling language* (UML and SysML, see e.g.[Wei06]). To our current phase of research, we have investigated *sequential behaviour diagrams* (SBD) as defined by the *interdisciplinary modelling language* (IML) (see [BOO⁺16]). An SBD is a Petri-net-like graph describing the specification of automated manufacturing systems, and to the current stage, the main focus is to clarify and refine the semantics of SBDs, so that it can be transformed to automata which can be utilized in the formal verification.

Literatur

- [BK08] BAIER, C. ; KATOEN, J. P.: *Principles of Model Checking*. MIT Press, 2008
- [BOO⁺16] BRECHER, C. ; OBDENBUSCH, M. ; ÖZDEMIR, D. ; FLENDER, J. ; WEBER, A. R. ; JORDAN, L. ; WITTE, M.: Interdisciplinary Specification of Functional Structures for Machine Design. In: *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (2016)
- [CGP01] CLARKE, E. M. ; GRUMBERG, O. ; PELED, D. A.: *Model Checking*. MIT Press, 2001
- [Wei06] WEILKIENS, T.: *Systems Engineering with SysML/UML*. Elsevier Science, 2006

Ein rekonfigurierbarer Seilroboter für die präzise Handhabung in wandelbaren Arbeitsumgebungen

Marcus Hamann

Lehrstuhl Regelungstechnik
in der Ingenieurinformatik
Universität Augsburg
marcus.hamann@informatik.uni-augsburg.de

Christoph Ament

Lehrstuhl Regelungstechnik
in der Ingenieurinformatik
Universität Augsburg
christoph.ament@informatik.uni-augsburg.de

Schlüsselwörter: Seilroboter, Kalibration, Lasertracker

Um auch bei Fertigungsaufgaben, die in einer Werkstattfertigung mit geringeren Stückzahlen und wechselnden Anforderungen durchgeführt werden, zu assistieren und zu automatisieren, soll ein flexibles Handhabungssystem entwickelt werden. Dieses soll sich wandelnden Arbeitsumgebungen anpassen können, präzise, dynamisch schnell und für den Menschen ungefährlich sein.

Hier bieten Seilroboter als Vertreter von parallelen Kinematiken eine Vielzahl von Vorteilen gegenüber traditionell in der Industrie eingesetzten seriellen Kinematiken. Durch das häufig vernachlässigbare Gewicht der Seile und dem geringen Gewicht des Endeffektors sind hohe Beschleunigungen im Arbeitsbereich erreichbar. Außerdem ist der von Seilrobotern aufgespannte Arbeitsbereich in der Regel deutlich größer als der von seriellen Kinematiken.

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber. So ist eine Mensch-Roboter-Interaktion nur schwer realisierbar, falls der Endeffektor sowohl nach oben als auch nach unten verspannt ist, da so der sichere Bereich für den Menschen stark eingeschränkt ist. Weiterhin ist der Arbeitsbereich dieser Roboter – ebenso wie der serieller Kinematiken – nach der Inbetriebnahme unveränderlich. Schließlich arbeiten heute verfügbare Seilroboter wenig präzise mit einem Positionsfehler im Zentimeterbereich.

Der Seilroboter MoCaRo („Modular Cable Robot“, Abb. 1) der Universität Augsburg begegnet diesen Nachteilen dadurch, dass der Endeffektor (Abb. 2) ausschließlich nach oben abgespannt ist. Des Weiteren bietet die modulare Struktur durch die Möglichkeit ihrer Konfigurierbarkeit ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich der Adaption an neue Arbeitsbereiche. Positionsfehler werden schließlich durch ein Lasertracker-System berührungslos am TCP erfasst und ausgeregelt, um die Präzision zu erhöhen.

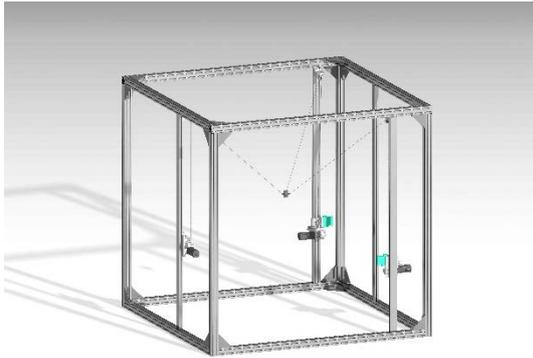


Abbildung 1: CAD-Modell des Seilroboters



Abbildung 2: Endeffektor mit Greifer

Die Flexibilität dieses Roboters erfordert ein systematisches Konzept der Identifikation geometrischer und dynamischer Parameter, da sowohl die Dynamik als auch die Präzision der Handhabung durch einen veränderten Arbeitsraum nicht eingeschränkt werden sollen.

Zur Umsetzung dieses Ziels wird eine Möglichkeit der automatisierten modellbasierten Kalibration geometrischer Parameter mit Hilfe eines Lasertrackers [2] vorgestellt. Der modulare Seilroboter kann z.B. in einer Halle rasch montiert werden. Danach ist eine Kalibration in jedem Fall der erste Schritt nach einer Rekonfiguration des Systems. Die Kalibration basiert auf der Lösung der parametrisierten inversen Kinematik durch eine geeignete Optimierung [1]. Nachfolgend weiterhin auftretende Fehler der statischen Positionierung des Endeffektors werden im Anschluss durch ein modellfreies Verfahren auf Basis radialer Basisfunktionen ausgeglichen.

Da die kinematische Kette nach diesen ersten beiden Schritten erfolgreich identifiziert ist, kann nun eine Regelung des Endeffektors erfolgen. Zur Messung der Endeffektorposition dient dabei wieder das Lasertracker-System, welches die Position des TCP mit einer Abtastrate von 10 kHz erfasst und den Regelkreis in Echtzeit schließt.

Literatur

- [1] M. Hamann und C. Ament. „Calibration Procedure for a Geometrically Reconfigurable 3-DoF Cable-Driven Parallel Robot“. In: *Modelling, Simulation and Identification (MSI)*. 2018.
- [2] T.T. Nguyen, A. Amthor, M. Springer und C. Ament. „Nonlinear Modelling and Identification of a High Precision Laser Tracking System“. In: *International Conference on Control, Automation and Information Science (ICCAIS)*. 2012.

Hybride Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod

Andreas Kohlstedt

Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
andreas.kohlstedt@hni.uni-paderborn.de

Ansgar Trächtler

Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
ansgar.traechtler@hni.uni-paderborn.de

Schlüsselwörter: Hybride Kraft-/Positionsregelung, Achsprüfstand, Parallelkinematik

Das Heinz Nixdorf Institut betreibt einen Prüfstand für den mehrdimensionalen Test von Fahrzeugachsen. Als Anregungseinheit kommt ein hydraulischer Hexapod zum Einsatz. Die Anwendungsgebiete des Prüfstands schließen klassische Betriebsfestigkeitsversuche ebenso ein wie neuartige HiL-Versuche für die Entwicklung von Fahrwerkregelsystem mit physisch vorhandener Achse. Abbildung 1 zeigt ein Foto des Prüfsystems.



Abbildung 1: Achsprüfstand des Heinz Nixdorf Instituts

Moderne industrielle Achsprüfstände setzen zur Nachbildung gemessener Achsbelastungen keine Regelungen, sondern iterativ eingelernte Steuerungen ein, vgl. z. B. [1]. Das Einlernen der Steuersignale ist zeit- und kostenintensiv. Die Herangehensweise ist zudem prinzipbedingt nicht für die Durchführung von HiL-Versuchen geeignet. Unser Ziel ist die Entwicklung einer Prüfstandsregelung, mit deren Hilfe Sollbelastungen und / oder -bewegungen auch unter Echtzeitbedingungen schnell und genau mithilfe der Anregungseinheit eingestellt werden können.

Im Vortrag wird kurz auf den Stand der Technik sowie den Hintergrund industrieller Achserprobungen eingegangen. Dann erfolgt eine ausführlichere Darlegung der in der Literatur zu findenden Verfahren zur Regelung von Manipulatoren im Umgebungskontakt. Ein einfaches, zweidimensionales Beispielsystem dient zur Veranschaulichung der Verfahren.

Daraufhin werden ausgewählte Ansätze zur Regelung des Hexapoden im Kontakt mit einer MacPherson-Radaufhängung diskutiert. Allen diesen Regelungsansätzen ist gemein, dass in jedem Freiheitsgrad eine weitgehend freie Wahl zwischen einer Kraft- und einer Positionsre-

gellung mithilfe einer Selektionsmatrix möglich ist. Das allgemeine Grundkonzept der sogenannten hybriden Kraft-/Positionsregelung [2] zeigt Abbildung 2. Darin bezeichnen z_r und z die Soll- bzw. Istposition und -orientierung des Endeffektors (d. h. der Arbeitsplattform des Hexapoden) sowie τ_r und τ die Soll- und Istkontaktkräfte und -momente zum Radträger. S ist die Selektionsmatrix.

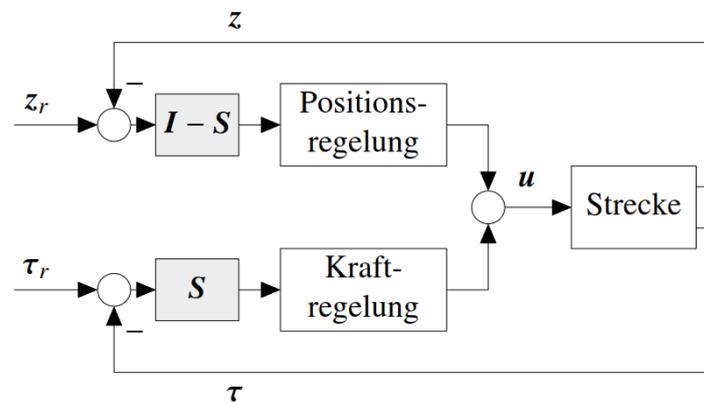


Abbildung 2: Hybride Kraft-/Positionsregelung (Schema)

Sämtliche diskutierten Regelungsverfahren wurden zunächst mithilfe einer umfangreichen Simulationsumgebung erprobt, die auch genaue (MKS-) Modelle des Hexapoden sowie der Radaufhängung beinhaltet, anschließend wurden einige der Verfahren auch experimentell am Prüfstand untersucht. Im Vortrag wird auf beides eingegangen. Vorarbeiten zum Thema am betrachteten Prüfsystem sind bspw. in [3–6] zu finden.

Literatur

- [1] J. de Cuyper, “Linear feedback control for durability test rigs in the automotive industry,” Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2006.
- [2] M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 103, no. 2, pp. 126–133, 1981.
- [3] A. Kohlstedt *et al.*, “Control of a hydraulic hexapod for a Hardware-in-the-Loop axle test rig,” *at - Automatisierungstechnik*, vol. 64, no. 5, 2016.
- [4] A. Kohlstedt, S. Olma, P. Traphöner, K.-P. Jäker, and A. Trächtler, “Kinematics-based force/position control of a hexapod in a HiL axle test rig,” in *Proceedings, 17. Internationales Stuttgarter Symposium*, M. Bargende, H.-C. Reuss, and J. Wiedemann, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, pp. 1217–1230.
- [5] A. Kohlstedt, P. Traphöner, S. Olma, K.-P. Jäker, and A. Trächtler, “Fast hybrid position / force control of a parallel kinematic load simulator for 6-DOF Hardware-in-the-Loop axle tests,” in *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2017, pp. 694–699.
- [6] S. Olma, A. Kohlstedt, P. Traphöner, K.-P. Jäker, and A. Trächtler, “Observer-based non-linear control strategies for Hardware-in-the-Loop simulations of multiaxial suspension test rigs,” *Mechatronics*, vol. 50, pp. 212–224, 2018.

Stabilität des elektrischen Verbundsystems bei hohem Anteil stromeinprägender Umrichter

Christian Schöll

Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme
Universität Stuttgart
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
Pfaffenwaldring 23, D-70569, Germany
T +49 711 685 66209
F +49 711 685 63491
christian.schoell@ifk.uni-stuttgart.de

Prof. Hendrik Lens

Professur für Kraftwerks- und Netzsysteme
Universität Stuttgart
Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik
Pfaffenwaldring 23, D-70569, Germany
T +49 711 685 66213
F +49 711 685 63491
hendrik.lens@ifk.uni-stuttgart.de

Schlüsselwörter: Phase-locked loop, Umrichterregelung, Voltage Source Converter, Stromeinprägung, Spannungseinprägung

Synchrongeneratoren konventioneller Erzeugungsanlagen leisten bislang einen erheblichen Beitrag zur Stabilität der elektrischen Energieversorgung. Ihre stabilisierenden Eigenschaften basieren zum einen auf dem spannungseinprägenden Verhalten durch die Erregerpolradwicklungen und zum anderen auf der in den rotierenden Massen gespeicherten Rotationsenergie. Eine Veränderung des am Synchrongenerator anliegenden Netzspannungswinkels, zum Beispiel infolge eines Wirkleistungsungleichgewichts, bewirkt eine Ein- bzw. Ausspeicherung von Rotationsenergie und somit eine intrinsische Anpassung der an das Netz abgegebenen Leistung ohne regelungstechnische Eingriffe. Der stabile Verbundnetzbetrieb beruht wesentlich auf diesem intrinsischen Verhalten der Synchrongeneratoren, welches auch als Momentanreserve bezeichnet wird [1].

Auf der anderen Seite speist ein Großteil der Erneuerbaren-Energien-Anlagen (EEA) über stromeinprägende Umrichterregelkonzepte ins Verbundsystem. Zur korrekten Leistungseinspeisung sind deren netzseitige Wechselrichter auf die Synchronisierung mit einem vorhandenen Netz und auf die Nachführung des Netzspannungswinkels mittels einer Phasenregelschleife (PLL) angewiesen. Die netzseitige Umrichterregelung regelt die Ströme in Abhängigkeit der Netzspannung so, dass die verfügbare Wirkleistung und ggf. eine gewünschte Blindleistung eingespeist werden. Umrichter müssen vor Überströmen geschützt werden und weisen üblicherweise keinen nennenswerten Energiespeicher auf, weshalb die Wirkleistungseinspeisung in das Netz dem Verlauf der primärseitig (z.B. aus einer Windturbine oder PV-Anlage) eingespeisten Leistung möglichst schnell folgen muss. Aus diesen Gründen wird die Stromregelung üblicherweise sehr schnell ausgelegt. Die Kehrseite dieser hohen Regelungsperformance ist, dass diese Umrichter im Gegensatz zum Synchrongenerator kein intrinsisch netzstützendes Verhalten aufweisen. Im Gegenteil: Das Regelungskonzept ist auf ein ausreichend starkes Netz angewiesen. Sobald die vom Umrichter erfasste Netzspannung signifikant von seiner Leistungseinspeisung beeinflusst wird, kann es zur Instabilität kommen. Ab einem gewissen Anteil derartiger Anlagen an der Gesamtstromerzeugung können deshalb Netzstabilitätsprobleme auftreten [2, 3].

Der anhaltende Zubau von EEA verdrängt gegenwärtig Synchrongeneratoren immer mehr durch umrichterbasierte Einspeisungen. Damit fehlt deren intrinsisch stabilisierende Wirkung. Die destabilisierenden Eigenschaften der neuen Einspeiser zeigen sich bereits in Netzen mit einem hohen Anteil umrichterbasierter Einspeisung wie Teilen von Dänemark und Australien [4]. Hinsichtlich der Spannungsstabilität müssen beispielsweise vorübergehend Synchrongeneratoren in Form von kostenintensiven rotierenden Phasenschiebern eingesetzt werden, um den stabilen Verbundsystembetrieb aufrecht zu erhalten. Die destabilisierenden Eigenschaften der Umrichter zeigen sich auch dann, wenn der Stromregelung überlagerte netzstabilisierende Regelungsverfahren – wie etwa eine Anpassung der Wirkleistung in Abhängigkeit der Frequenz oder der Frequenzänderungsgeschwindigkeit – implementiert werden. Für die Stabilitätsprobleme ist das Fehlen einer intrinsischen Reaktion der Wirk- und Blindleistungseinspeisung auf Änderungen der Netzspannung verantwortlich. Die Ursache liegt demnach in der Betriebsweise selbst.

Im Vortrag wird den Ursachen dieser auf das elektrische Verbundsystem destabilisierenden Eigenschaften nachgegangen. Der Vortrag liefert wichtige Erkenntnisse über das Stabilitätsverhalten stromregelnder Umrichterregelungskonzepte im elektrischen Verbundsystem. Die Ursache für das destabilisierende Verhalten der stromgeregelten Umrichter auf das elektrische Verbundsystem zu verstehen, kann bei der Entwicklung neuer Regelungskonzepte für Umrichter der nächsten Generation helfen. Dabei sind die Anforderungen in einem Verbundsystem von denen in kleineren Netzen (Microgrids) zu unterscheiden. In solchen Netzen kann ein einzelner leistungsstarker Umrichter als Spannungsquelle mit vorgegebener Frequenz betrieben werden, auf die sich alle anderen Umrichter synchronisieren. Für die Stabilisierung von Microgrids existiert eine Vielzahl an regelungstechnischen Konzepten [5]. Dagegen müssen für den Betrieb im Verbundnetz eine Vielzahl von räumlich verteilten Umrichtern die Aufgabe der Netzstabilisierung ohne Kommunikation auf Basis von inhärenten Eigenschaften übernehmen können.

Literatur

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [2] entso-e, *High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (HPoPEIPS)*. [Online] Verfügbar unter: https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf. Zugriff am: Sep. 26 2018.
- [3] H. Liu, L. Jin, D. Le und A. A. Chowdhury, „Impact of high penetration of solar photovoltaic generation on power system small signal stability“ in *2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2010) 24.10.2010 - 28.10.2010*.
- [4] Nahid-Al-Masood, R. Yan, T. K. Saha und N. Modi, „Frequency response and its enhancement using synchronous condensers in presence of high wind penetration“ in *IEEE Power & Energy 26.07. - 30.07.2015*.
- [5] J. Schiffer *et al.*, „A survey on modeling of microgrids—From fundamental physics to phasors and voltage sources“, *Automatica*, Jg. 74, S. 135–150, 2016.

Algebraische dynamische Programmierung für linear-quadratische Optimalsteuerungsaufgaben mit Beschränkungen

Ruth Mitze
Lehrstuhl für Regelungstechnik
und Systemtheorie
Ruhr-Universität Bochum
ruth.mitze@rub.de

Martin Mönnigmann
Lehrstuhl für Regelungstechnik
und Systemtheorie
Ruhr-Universität Bochum
martin.moennigmann@rub.de

Schlüsselwörter: dynamische Programmierung, Riccati-Regler, Kalmansche Zustandsvektorrückführung, Optimalsteuerung mit Beschränkungen, modellprädiktive Regelung

Die dynamische Programmierung ist ein wichtiges Werkzeug zur Lösung von Optimalsteuerungsaufgaben (siehe z.B. [3]). Mit Hilfe der dynamischen Programmierung kann die geschlossene Lösung der linear-quadratischen Optimalsteuerungsaufgabe ohne Beschränkungen, d.h. der Riccati-Regler bzw. die Kalmansche Zustandsvektorrückführung [5], elegant durch schrittweises Vergrößern des Horizontes hergeleitet werden (siehe z.B. [1]). Es liegt die Frage nahe, ob die dynamische Programmierung auch auf die linear-quadratische Optimalsteuerungsaufgabe *mit Beschränkungen* angewendet werden kann. Abgesehen von einem theoretischen Interesse an der Beantwortung dieser Frage wäre eine solche Technik möglicherweise auch von großer praktischer Bedeutung, weil sie in der modellprädiktiven Regelung zum Einsatz kommen könnte.

Leider entzieht sich das optimale Regelgesetz für die linear-quadratische Optimalsteuerungsaufgabe mit Eingangs- und Zustandsbeschränkungen einer Analyse mit der dynamischen Programmierung. Es ist zwar bekannt, dass die zeitdiskrete Variante dieser Aufgabe für einen beliebigen aber festen Horizont N durch ein stetiges stückweise affines Regelgesetz gelöst wird [2], aber es gibt keinen so eleganten Zusammenhang zwischen der Lösung für N , $N + 1$ usw. wie im Fall ohne Beschränkungen [7].

Während der geometrische Zusammenhang zwischen den Regelgesetzen für N , $N + 1$ usw. nicht leicht zu fassen ist, tritt ein einfacher Zusammenhang zwischen diesen Regelgesetzen zutage, wenn sie *algebraisch* statt *geometrisch* definiert werden [6]. Mit „algebraischer Definition“ ist gemeint, dass das Regelgesetz für einen festen aber beliebigen Horizont N eindeutig durch die Menge der tatsächlich möglichen Kombinationen von aktiven Beschränkungen festgelegt ist. Weil von den kombinatorisch denkbaren Kombinationen aktiver Beschränkungen nur ein Bruchteil tatsächlich regelungstechnisch relevant ist, ist diese Charakterisierung sogar schlank [4]. Wir nennen die Menge der tatsächlichen Kombinationen die „Menge der aktiven Mengen für den Horizont N “ und bezeichnen sie hier mit \mathcal{M}_N .

Die Charakterisierung des optimalen Regelgesetzes mit \mathcal{M}_N ist für eine Analyse mit der dynamischen Programmierung sehr vorteilhaft, weil mit ihr ein schrittweises Vergrößern von N auf $N + 1$, $N + 2$ usw., das die Herleitung des Riccati-Reglers im Fall ohne Beschränkungen so elegant macht, wieder möglich wird: Jedes Element aus \mathcal{M}_{N+1} , d.h. jede tatsächlich auftretende Kombination von aktiven Beschränkungen, enthält ein Element aus \mathcal{M}_N . Vereinfacht formuliert kann \mathcal{M}_{N+1} aus \mathcal{M}_N konstruiert werden, indem nur die durch die Verlängerung des

Horizontes hinzukommenden Beschränkungen untersucht werden. In diesem Sinne kann die dynamische Programmierung auf die Berechnung der Folge $\mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \mathcal{M}_3$ usw. angewendet werden.

Der Beitrag stellt einen Algorithmus vor, der die dynamische Programmierung und kombinatorische parametrische Optimierung kombiniert. Wir untersuchen die Komplexität des Algorithmus' und zeigen, dass wie im Fall ohne Beschränkungen auf einfache Weise der Teil des optimalen Regelgesetzes gefunden werden kann, der nicht vom Horizont abhängt. Dieser Teil ergibt sich wie im Fall ohne Beschränkungen mit Hilfe des Grenzübergangs $N \rightarrow \infty$.

Literatur

- [1] B.D.O. Anderson und J.B. Moore. „Linear Optimal Control“. In: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1971.
- [2] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, und E. N. Pistikopoulos. „The explicit linear quadratic regulator for constrained systems“. In: Automatica, Vol. 38, S. 3-20, 2002.
- [3] D.P. Bertsekas. „Dynamic Programming and Optimal Control“. In: Athena Scientific, 2015.
- [4] A. Gupta, S. Bhartiya, und P. Nataraj. „A novel approach to multiparametric quadratic programming“. In: Automatica, Vol. 47, S. 2112-2117, 2011.
- [5] R.E. Kalman. „Contributions to the theory of optimal control“. In: Boletín de la Sociedad Matemática Mexicana, Vol. 5, S. 102-119, 1960.
- [6] M. Mönnigmann. „On the structure of the set of active sets in constrained linear quadratic regulation“. Eingereicht bei Automatica, verfügbar auf arxiv.org/abs/1808.03592, 2018.
- [7] D. Muñoz de la Peña, T. Alamo, A. Bemporad und E. F. Camacho. „A dynamic programming approach for determining the explicit solution of linear MPC controllers“. In: 43rd IEEE Conference of Decision and Control, S. 2479-2484, 2004.

Kombinierte Pfadplanung und prädiktive Regelung für den automatisierten und autonomen Schiffsbetrieb

Max Lutz
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
mlut@tf.uni-kiel.de

Thomas Meurer
Lehrstuhl für Regelungstechnik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
tm@tf.uni-kiel.de

Schlüsselwörter: Pfadplanung, modellprädiktive Regelung, Schiffsregelung, Autonomie

Eine zunehmende Automatisierung des Schiffsverkehrs innerhalb von Hafenregionen kann durch eine optimierte zeitliche Abstimmung zwischen Containerschiffen bei An- und Ablegemanövern den Warendurchsatz erhöhen. Weiterführende Automation kann z.B. zur Realisierung energieoptimierter Routen beitragen, wobei bei autonom fahrenden Schiffen der Wegfall der Besatzung signifikante Einsparungsmöglichkeiten bietet. Hier sei insbesondere die Möglichkeit der Fahrt mit dauerhaft reduzierter Geschwindigkeit genannt, welche derzeit auf Grund von Personalkosten und Zeit auf See der Besatzung nicht realisierbar ist. Da unmittelbare menschliche Fehler ausgeschlossen werden können, ist auch in engen und viel befahrenen Bereichen wie Hafeneingängen, Kanälen und Schleusen der Einsatz von Lotsen an Bord nicht weiter erforderlich und es kann über eine Überwachung – ähnlich der Fluglotsen im Luftverkehr – nachgedacht werden.

In dem Beitrag werden die kombinierte Pfadplanung und prädiktive Regelung für den Betrieb und das Manövrieren von (autonomen) Schiffen in ruhigen Gewässern, wie beispielsweise Häfen, vorgestellt [1]. Die betrachteten Manöver umfassen das An- und Ablegen und die Kollisionsvermeidung in beengten Umgebungen. Basierend auf einem mathematischen

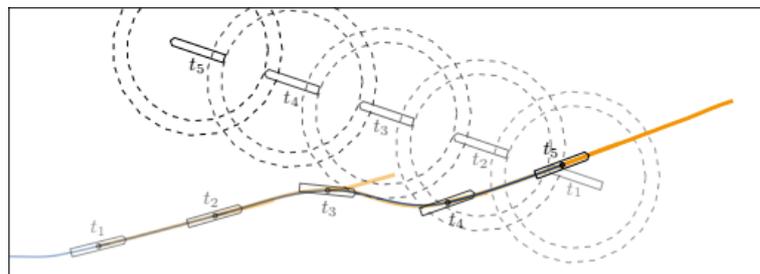


Abbildung 1: Autonome Pfadplanung unter Berücksichtigung dynamischer Hindernisse.

Modell der Schiffsdynamik wird ein dynamisches Optimierungsproblem formuliert und gelöst. Hierbei ist es möglich die Zeitoptimalität der Transition oder den wirtschaftlich bzw. energetisch optimalen Betrieb des Schiffes zu realisieren. Zusätzlich zu den Stellgrößenbeschränkungen für den Antrieb und das Ruder werden statische und sich dynamisch bewegende Hindernisse, die andere im selben Gebiet operierende Schiffe darstellen, explizit berücksichtigt. Um in Echtzeit auf Veränderungen in der Umgebung, z.B. durch aufkommende oder verschwindende Hindernisse oder Änderung von Umwelteinflüssen wie Wind und Strömung, reagieren zu können wird das optimale Steuerungsproblem auf einem wandernden Zeithorizont gelöst. Dieser modellprädiktive Ansatz erlaubt es, gezielt Online-Informationen in die Lösung des Führungs- und Regelungsproblems einzubeziehen, um einen automatisierten bzw. autonomen Betrieb zu ermöglichen. Die Eignung von Konzepten der modellprädiktiven Regelung zur Pfadfolgeregelung für Binnenschiffe wurde u.a. in [2] gezeigt. Eine Erweiterung zur Trajek-

torienfolgeregelung wurde in [3] vorgeschlagen. Eine Methode zur kollisionsfreien Pfadplanung mit dynamischen Hindernissen unter Ausnutzung der speziellen Gegebenheiten von Binnenwasserstraßen lieferte [4].

In der Präsentation werden unterschiedliche Ansätze für die Formulierung der Kostenfunktion hinsichtlich ihrer Echtzeitfähigkeit evaluiert und verglichen, was im Hinblick auf die Implementierung der resultierenden Algorithmen von entscheidender Bedeutung ist. Für die Bewertung der Ansätze werden verschiedene Simulationsszenarien mit anspruchsvollen Führungs- und Regelungsaufgaben durchgeführt. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von statischen und beweglichen Hindernissen sowie externen Störungen durch Wind oder Strömung sowie Parameterunsicherheiten. Derzeit laufen die Arbeiten zum Aufbau eines Versuchs zur experimentellen Validierung des entwickelten Ansatzes für die Steuerung eines automatisierten Schiffes im Labormaßstab.

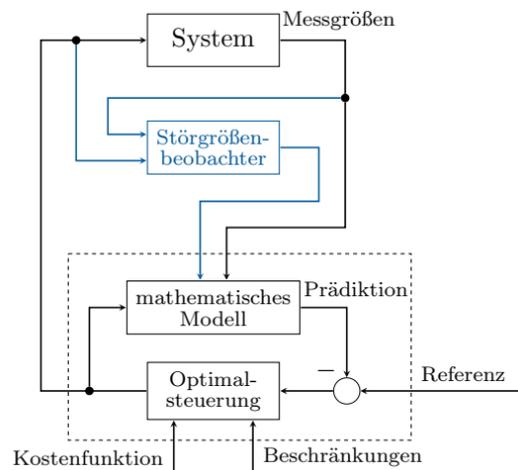


Abbildung 2: Struktur des geschlossenen Regelkreises.

Literatur

- [1] B. Storr, M. Lutz, T. Meurer: "Combined Path Planning and Motion Control for Ships using Model Predictive Control", Eingereicht.
- [2] A. Wahl, E.-D. Gilles (1998): "Track-Keeping on Waterways Using Model Predictive Control", IFAC Proceedings Volumes, 31(30), 149–154.
- [3] H. Zheng, R. R. Negenborn, G. Lodewijks (2014): "Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control", IFAC Proceedings Volumes, 47(3), 8812-8818.
- [4] A. Lutz, E.-D. Gilles (2010): "An Automatic Collision Detection and Avoidance Module for Inland Navigation", IFAC Proceedings Volumes, 43(20), 254–259.

Optimalsteuerung unter Berücksichtigung nichtkonvexer Zustandsbeschränkungen und Echtzeitanforderungen

Jan Eilbrecht, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Olaf Stursberg

Fachgebiet Regelungs- und Systemtheorie
Fachbereich Elektrotechnik/Informatik
Universität Kassel

Wilhelmshöher Allee 73, 34121 Kassel

jan.eilbrecht@uni-kassel.de
+49 - (0)561 - 804 - 6494

stursberg@uni-kassel.de
+49 - (0)561 - 804 - 6367

Schlüsselwörter: Optimale Steuerung, hybride Dynamik, steuerbare Mengen, gemischt-ganzzahlige Programmierung

Aufgaben wie die Trajektorienplanung für autonome Fahrzeuge oder Roboter stellen hohe Anforderungen an die Sicherheit resultierender Trajektorien, welche gleichzeitig möglichst effizient bezüglich eines gewählten Gütekriteriums sein sollen. Diese Rahmenbedingungen legen eine Formulierung als Optimalsteuerungsproblem nahe, in dem das Systemverhalten basierend auf einem dynamischen Modell unter Berücksichtigung von Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen prädiziert wird. Dabei kommt Zustandsbeschränkungen zur Kollisionsvermeidung eine besondere Rolle zu, da diese grundsätzlich zu einem nichtkonvexen Problem führen. Zusammen mit nichtlinearen Systemmodellen liegt dann eine sehr komplexe Aufgabenstellung vor [1].

Algorithmen zur Lösung dieses Problems unterliegen ebenfalls strengen Anforderungen, beispielsweise bezüglich ihrer Echtzeitfähigkeit und des Garantierens rekursiver Zulässigkeit. Diese Eigenschaften lassen sich aktuell nur für verhältnismäßig einfache Problemklassen sicherstellen, sodass die Anforderungen an die resultierenden Trajektorien und jene an die Algorithmen erst einmal gegensätzlich sind.

Ausgehend von einer Beschreibung als nichtlineares, nichtkonvexes Optimalsteuerungsproblem wird in diesem Vortrag ein Ansatz vorgestellt, der durch geeignete Vereinfachungen auf Vereinbarkeit der bislang gegensätzlichen Anforderungen abzielt. Dieser Ansatz beruht auf drei Grundelementen [2]: Ausgehend von affinen Dynamiken werden zuerst Klassen homotoper Trajektorien, sog. Manöver, unter Verwendung hybrider Automaten charakterisiert. Aus diesen lässt sich eine optimale Trajektorie durch Lösung eines hybriden Optimalsteuerungsproblems, welches als gemischt-ganzzahliges Programm implementiert wird, durch Ausnutzung von Struktureigenschaften effizient bestimmen. Im Gegensatz zu anderen, ebenfalls auf gemischt-ganzzahligen Programmen beruhenden Ansätzen, z. B. [3], ist das Resultieren eines bestimmten qualitativen Systemverhaltens nicht allein von der Wahl der Parameter der Kostenfunktion abhängig, sondern kann durch Beschränkungen erzwungen werden.

Zweitens werden Mengen zulässiger Anfangszustände von Manövern über steuerbare Mengen ermittelt, sodass Aussagen zur Durchführbarkeit eines Manövers und damit auch zur Lösbarkeit des Planungsproblems a priori getroffen werden können.

Die Kombination dieser beiden Elemente ermöglicht drittens den Aufbau eines hierarchischen Manöverautomaten, der auf einer oberen Ebene mögliche Manöver enthält, deren konkrete Umsetzung auf der unteren Ebene durch hybride Automaten beschränkt wird. Damit ist das Optimalsteuerungsproblem auf ein diskretes Entscheidungsproblem auf der oberen Ebene reduziert worden, ohne dabei die kontinuierliche Dynamik der Systeme zu ignorieren.

Untersuchungen zur Funktionsweise des entworfenen Verfahrens anhand von Szenarien aus dem Bereich des kooperativen autonomen Fahrens unterstreichen die oben genannten Vorteile. Der Vortrag nennt zusätzlich Herausforderungen, die im vorgestellten Ansatz zu berücksichtigen sind, wie z. B. die effiziente Berechnung steuerbarer Mengen und die Lösung diskreter Entscheidungsprobleme zur Auswahl von kooperativen Manövern [4].

Literatur

- [1] Z. Liu und O. Stursberg. „Optimierungsbasierte Regelung und Steuerung Hybrid-Dynamischer Systeme“. In: *at-Automatisierungstechnik* 66.11, 928-938, 2018.
- [2] J. Eilbrecht und O. Stursberg: „Optimization-based Maneuver Automata for Cooperative Trajectory Planning of Autonomous Vehicles“. In: *Proceedings of the European Control Conference*, S. 82-88. 2018.
- [3] X.Quian, F.Altché, P. Bender, C. Stiller und A. de La Fortelle: „Optimal Trajectory Planning for Autonomous Driving Integrating Logical Constraints: An MIQP Perspective“. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, S. 205 - 210, 2016.
- [4] J. Eilbrecht und O. Stursberg: „Cooperative Driving Using a Hierarchy of Mixed-Integer Programming and Tracking Control“. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, S. 673 - 678, 2017.

Dynamik periodisch reinitialisierter LTI Systeme nicht-ganzzahliger Ordnung

Christoph Weise
Fachgebiet Regelungstechnik
Technische Universität Ilmenau
christoph.weise@tu-ilmenau.de

Johann Reger
Fachgebiet Regelungstechnik
Technische Universität Ilmenau
johann.reger@tu-ilmenau.de

Die Nutzung nicht-ganzzahliger Ableitungen bei der Regelung von klassischen ganzzahligen Systemen bietet Vorteile im Vergleich zu klassischen Verfahren. So wird beispielsweise durch die Einführung eines weiteren Parameters im PI^α -Regler ein Freiheitsgrad geschaffen, welche herkömmliche Reglerarchitekturen nur mit hoher Reglerordnung ermöglichen, nämlich beliebige Steigungen im Amplitudengang [1, 2].

Ein Nachteil linearer nicht-ganzzahliger Regelungssysteme ist jedoch, dass die Konvergenz nicht exponentiell, sondern algebraisch ist [3] und somit für große Zeiten de facto stationäre Abweichungen entstehen, obwohl ein integrierender Anteil enthalten ist.

In [4] wurde gezeigt, dass im Zusammenspiel eines nicht-ganzzahligen Beobachters und einer ganzzahligen Strecke, die Konvergenz des Schätzfehlers mit Hilfe einer periodischen Reinitialisierung verbessert werden kann. Wir wollen dies genauer beleuchten und eine Charakterisierung des Verfahrens im Frequenzbereich angeben.

Dazu betrachten wir zunächst ein homogenes fraktionales System der Form

$$\begin{aligned} {}_{t_0}\mathcal{D}_t^\alpha x(t) &= Ax(t), \\ x(0) &= x_0. \end{aligned}$$

Dabei wird der Operator ${}_{t_0}\mathcal{D}_t^\alpha$ nach CAPUTO [2] für $\alpha \in (0, 1)$ verwendet. Dieser eignet sich zur Beschreibung ganzzahliger LTI-Systeme [4], da die Anfangsbedingungen der nicht-ganzzahligen Ableitungen verschwinden. Die Lösung dieses Anfangswertproblems, d.h.

$$x(t) = \mathcal{E}_{\alpha,1}(A(t-t_0)^\alpha)x_0$$

kann mit Hilfe der MITTAG-LEFFLER-Funktion

$$\mathcal{E}_{\alpha,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}, \quad \alpha, \beta > 0$$

angegeben werden. Wird nun das Gedächtnis mit einer Periode δ gelöscht, entspricht die Lösung nur noch abschnittsweise dem Verhalten eines Systems nicht-ganzzahliger Ordnung. Es wird die Initialzeit des Operators geändert und wir betrachten nun das folgende System:

$$\begin{aligned} {}_{k\delta}\mathcal{D}_t^\alpha x(t) &= Ax(t), & t \in [k\delta, (k+1)\delta) \\ x(k\delta^+) &= x(k\delta^-), \\ x(0) &= x_0, & k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Dieses Umschalten des Operators ist natürlich lediglich in einem Regler und nicht an einer nicht-ganzzahligen Strecke möglich. Für ganzzahlige Strecken sind die Operatoren identisch, da die Zustandsinformation dem gesamten Gedächtnis entspricht.

Wenn Reinitialisierung möglich ist, so entsteht dadurch ein zeitdiskretes System, dessen Dynamikmatrix von der Mittag-Leffler-Funktion beschrieben wird:

$$x_{k+1} = A_D x_k = \mathcal{E}_{\alpha,1}(A\delta^\alpha)x_k.$$

Für entsprechende Systemmatrizen A und Reinitialisierungsperioden δ ist dieses zeitdiskrete System exponentiell stabil und die langsame algebraische Konvergenz tritt nur innerhalb kurzer Zeitintervalle auf.

Bei der Betrachtung im Frequenzbereich ergibt sich somit ein näherungsweise ganzzahliges Verhalten unterhalb der Reinitilisierungsfrequenz. Der nicht-ganzzahlige Anteil wird lediglich bei höheren Frequenzen offensichtlich.

- [1] I. Podlubny, *Fractional Differential Equations: An Introduction to Fractional Derivatives, Fractional Differential Equations, to Methods of Their Solution and Some of Their Applications*. Academic Press, 1999.
- [2] C. Monje, Y. Chen, B. Vinagre, D. Xue, and V. Feliu-Batlle, *Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*. Springer, 2010.
- [3] F. Mainardi and R. Gorenflo, “On Mittag-Leffler-type functions in fractional evolution processes,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 1–2, pp. 283–299, Jun. 2000.
- [4] C. Weise, K. Wulff, and J. Reger, “Fractional-Order Observer for Integer-Order LTI Systems,” in *Asian Control Conference (ASCC)*, Dec 2017.

Regelung eines pneumatischen Systems mit verteilten Parametern

Richard Kern

Lehrstuhl für Regelungstechnik (Prof. B. Lohmann)
Technische Universität München
richard.kern@tum.de

Schlüsselwörter: Pneumatik, Modellbildung, verteilt-parametrisch, Ausgangsfolgeregelung, Experiment

In industriellen Anwendungen ist es aus Kostengründen und aufgrund konstruktiver Beschränkungen oftmals nicht möglich, die Druckluftversorgung pneumatischer Aktoren in deren Nähe zu installieren. Um die Aktoren mit Druckluft zu versorgen, werden daher lange Schläuche benötigt. Weil dadurch die Drosselung des Versorgungsdrucks nicht nahe am Aktor erfolgt, wird die Regelung eines benötigten Drucks an diesem erschwert. Für Versuchszwecke wurde die beschriebene Anordnung im in Abb.1 dargestellten experimentellen Aufbau nachempfunden. Dabei ist ein Tank, stellvertretend für den pneumatischen Aktor, durch einen langen Schlauch mit einem Ventil verbunden, welches die Druckluft drosselt und so einen Massenstrom stellt (vgl. auch [1, 2]).

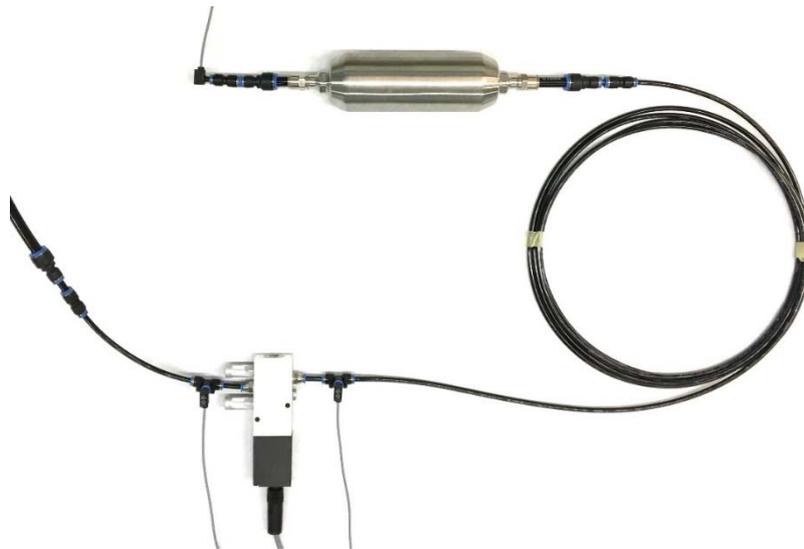


Abbildung 1: Versuchsstand des pneumatischen Systems

In diesem Vortrag wird zunächst eine auf Erhaltungsgleichungen basierende Modellbildung vorgestellt. Das daraus resultierende sehr präzise Modell wird mathematisch durch eine quasilineare, hyperbolischen PDE für den Schlauch und eine nichtlineare ODE für den Tank beschrieben. Ausgehend von dieser relativ komplexen Systembeschreibung werden sukzessiv geeignete Annahmen getroffen, wodurch vereinfachte Modelle mit abnehmender Komplexität entstehen, letztlich ein lineares, hyperbolisches PDE-ODE System (vgl. [3]). Basierend auf diesen vereinfachten, jedoch unendlich-dimensionalen Modellen, wird ein Ausgangsfolgeregler entworfen, bestehend aus einer flachheitsbasierten Steuerung und einem backstepping-basierten Ausgangsregler (vgl. [4,5]). Dieser wird anschließend am Versuchsstand für eine Konfiguration mit einem fünf Meter langem Schlauch in einem Echtzeitsystem implementiert.

Damit unterscheidet sich dieser late-lumping Ansatz wesentlich von den bisherigen early-lumping Regelungsentwürfen [6,7,8] in diesem Kontext. Die experimentellen Ergebnisse bestätigen, dass der Regler auch bei sehr schnellen Druckwechselln von fünf Bar pro Sekunde ein nahezu perfektes Folgeverhalten erzielt.

Literatur

- [1] S. V. Krichel und O. Sawodny. „Non-linear friction modelling and simulation of long pneumatic transmission lines“. In: *Math. Comput. Model. Dyn. Syst.*, 20(1):23–44, 2013.
- [2] D. Rager et al. „Simplified fluid transmission line model for pneumatic control applications“. In: *Proc. 14th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP15)*, Tampere, Finnland, 2015.
- [3] R. Kern. „Physical modelling of a long pneumatic transmission line: models of successively decreasing complexity and their experimental validation“. In: *Math. Comput. Model. Dyn. Syst.*, (23):536–553, 2017.
- [4] R. Kern und N. Gehring. „Tracking control for a long pneumatic transmission line“. In: *Proc. 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, S. 180–185, Miedzyzdroje, Polen, 2017.
- [5] R. Kern et al. „Design and experimental validation of an output feedback controller for a pneumatic system with distributed parameters“. In: *18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018)*, S. 1391–1396, PyeongChang, Südkorea, 2017.
- [6] O. Alaya und M. Fiedler. „Optimal pressure control using switching solenoid valves“. In: *Proc. 10th International Fluid Power Conference (IFK)*, S. 281–292, Dresden, Deutschland, 2016.
- [7] D. Rager et al. „Remote pressure control – considering pneumatic tubes in controller design“. In: *Proc. 10th International Fluid Power Conference (IFK)*, S. 239–254, Dresden, Deutschland, 2016.
- [8] M. Turkseven und J. Ueda. „Model-based force control of pneumatic actuators with long transmission lines“. In: *IEEE ASME Trans. Mechatron*, 23(3):1292–1302, 2018.

Dissipativität vernetzter Systeme in der verteilten ökonomischen modellprädiktiven Regelung

Philipp N. Köhler

Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik
Universität Stuttgart
philipp.koehler@ist.uni-stuttgart.de

Frank Allgöwer

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

Schlüsselwörter: Modellprädiktive Regelung, Vernetzte Systeme, Economic MPC

Die moderne Regelungstechnik ist mit zunehmend komplexen, vielschichtigen und vernetzten Systemen konfrontiert. Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie ein zunehmender Automatisierungsgrad transformieren klassische Regelungssysteme zu komplexen vernetzten Systemen wie zum Beispiel „Smart Grids“, kooperierende autonome Fahrzeuge, oder intelligente selbstorganisierte Fabriken im Kontext von „Industrie 4.0“. Diese zunehmende Vernetzung bietet zahlreiche Möglichkeiten für den kooperativen und (kosten-) optimalen Betrieb interagierender Systeme, birgt jedoch auch eine Vielzahl an Herausforderungen, die mit entsprechenden Regelalgorithmen beantwortet werden müssen.

Die ökonomische modellprädiktive Regelung (economic MPC) ist ein flexibler Ansatz für die Regelung solcher komplexer nichtlinearer Systeme, der neben der expliziten Berücksichtigung von Zustands- und Stellgrößenbeschränkungen insbesondere die Optimierung eines ökonomischen Kostenkriteriums, wie zum Beispiel der Betriebskosten oder des Gewinns, erlaubt [1,2]. Aufgrund der Größe und Komplexität der betrachteten Systemnetzwerke ist eine zentrale Regelung aller Subsysteme nicht praktikabel, weshalb verteilte (ökonomische) modellprädiktive Regelalgorithmen entwickelt wurden [3,4]. Hierbei ist jedes Subsystem mit einem lokalen modellprädiktiven Regelalgorithmus ausgestattet, der mit benachbarten Subsystemen kommuniziert. Bisherige Arbeiten auf dem Gebiet der verteilten ökonomischen modellprädiktiven Regelung basieren zumeist auf iterativen Lösungsansätzen [5], die einen sehr hohen Kommunikations- und Rechenaufwand mit sich bringen und die Analyse des vernetzten Systems auf eine zentralisierte Analyse des Gesamtsystems zurückführen, wobei die Vernetzungsstruktur unbeachtet bleibt.

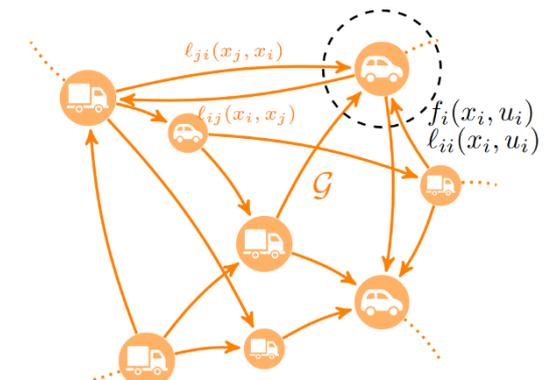


Abbildung 1: Beispielhafte Netzwerkstruktur.

Hierbei ist jedes Subsystem mit einem lokalen modellprädiktiven Regelalgorithmus ausgestattet, der mit benachbarten Subsystemen kommuniziert. Bisherige Arbeiten auf dem Gebiet der verteilten ökonomischen modellprädiktiven Regelung basieren zumeist auf iterativen Lösungsansätzen [5], die einen sehr hohen Kommunikations- und Rechenaufwand mit sich bringen und die Analyse des vernetzten Systems auf eine zentralisierte Analyse des Gesamtsystems zurückführen, wobei die Vernetzungsstruktur unbeachtet bleibt.

Im Gegensatz hierzu wird in diesem Vortrag ein neuer Bottom-up-Ansatz vorgestellt, der basierend auf lokalen Dissipativitätseigenschaften der einzelnen Subsysteme und deren Vernetzungsstruktur eine Dissipativitätseigenschaft des Gesamtsystems ableitet, die Aussagen über das optimale Systemverhalten ermöglicht [6]. Betrachtet werden dynamisch entkoppelte nichtlineare Subsysteme, die über eine separierbare Kostenfunktion miteinander verkoppelt sind. Solche verkoppelten Kosten repräsentieren beispielsweise ein kooperatives Ziel oder treten auf, wenn Subsysteme auf dieselbe Ressource zugreifen. Der modulare Ansatz dieser Arbeit beantwortet Herausforderungen, die sich aus realen Anwendungsszenarien ergeben und zum

Beispiel die Berücksichtigung heterogener Subsysteme, die dynamische Anpassung des Systemnetzwerks (plug-and-play), oder die Optimierung eines (realen) ökonomischen Kostenkriteriums erfordern. Darüber hinaus entspricht die Struktur der resultierenden Dissipativitätseigenschaft des Gesamtsystems der Netzwerkstruktur, was den Entwurf und die Analyse von nicht-iterativen verteilten ökonomischen MPC Schemata erlaubt.

Literatur

- [1] M. Diehl, R. Amrit und J.B. Rawlings. „A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control“. In *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 56, S. 703-707. 2011.
- [2] D. Angeli, R. Amrit und J.B. Rawlings. „On average performance and stability of economic model predictive control“. In *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 57, S. 1615-1626. 2012.
- [3] M.A. Müller und F. Allgöwer. „Economic and Distributed Model Predictive Control: Recent Developments in Optimization-Based Control“. In *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, The Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 10, S. 39-52. 2017.
- [4] P.N. Köhler, M.A. Müller und F. Allgöwer. „A distributed economic MPC framework for cooperative control under conflicting objectives“. In *Automatica*, Vol. 96, S. 368-379. 2018.
- [5] J. Lee und D. Angeli. „Cooperative economic model predictive control for linear systems with convex objectives“. In *European Journal of Control*, Vol. 20, S. 141-151. 2014.
- [6] P.N. Köhler, M.A. Müller und F. Allgöwer. „Interconnections of dissipative systems and distributed economic MPC“. In *Proc. 6th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control*. 2018.

Finite-Time Estimation of Time-Varying Frequency Signals for Low-Inertia Power System Applications

Juan G. Rueda*, Johannes Schiffer*

*Fachgebiet Regelungssysteme und Netzleittechnik
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus
Tel: 355-692809
Fax: 355-692453
{ruedasec,schiffer}@b-tu.de

Keywords: Frequency estimation; Time-varying parameters; Sliding modes

The steady uprise of renewable energy sources in power systems worldwide is expected to drastically impact the dynamics and the control of future power systems [1]. A main reason for this is that most renewable generation units are interfaced to the network via power electronics, instead of via synchronous generators (SGs) as employed in conventional power plants. Hence, the current developments result in a decreasing amount of rotational inertia, which is in turn is expected to yield faster and more volatile system dynamics [1]. In addition, for decades SGs have been the main actuators used to ensure power system stability. Yet, as conventional SG-interfaced units are being faded out, inverter-interfaced units need to take over system control tasks [1]. Amongst these, frequency regulation is one of the most important operational objectives in any AC power system.

Clearly, a fundamental prerequisite for a fast and efficient deployment of frequency control action via power converters is the availability of an accurate measurement of the electrical frequency. Unlike in SGs, in power inverters there are no rotational elements allowing to measure the angular speed. Therefore, the frequency needs to be estimated from the available AC measurements at the inverter terminals. The standard estimation algorithms used for this purpose are called phase-locked-loops (PLLs) [2]. There exist several PLL schemes and most of them share the property that a linear control is used to track the frequency signal, such as the popular PI-based synchronous reference frame PLL (SRF-PLL) [2]. Yet, it has been widely recognized that this approach exhibits severe limitations in the presence of fast frequency variations [3] and high deviations from the nominal frequency [4].

Motivated by the above discussion, we present a frequency estimator, which is capable of exactly tracking a time-varying frequency signal of a symmetric three-phase AC waveform. This is achieved by interpreting the frequency as a time-varying parameter and, inspired by [5] and [6], deriving a time-varying version of the super twisting algorithm in vector form for the estimator design. Our approach avoids the typical over-parameterization pertinent to methods based on series expansion and does, hence, not increase the dimension of the frequency estimator. Furthermore, we provide a set of sufficient conditions for the estimator gains, the feasibility of which guarantees exact convergence of the estimated frequency signal in finite time. The improved performance of the proposed algorithm with respect to the standard SRF-PLL [2] is demonstrated via several numerical examples and it is shown how the proposed estimator can be used for enhanced frequency control tasks in low-inertia power systems.

The described results have been developed in close collaboration with the National Autonomous University of Mexico (Jaime A. Moreno).

References

- [1] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill, G. Verbič, Foundations and challenges of low-inertia systems, in: 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), IEEE, 2018, pp. 1–25. doi:10.23919/PSCC.2018.8450880.
- [2] R. Teodorescu, M. Liserre, P. Rodriguez, Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems, Vol. 29, John Wiley & Sons, 2011. doi:10.1002/9780470667057.
- [3] H. Karimi, M. Karimi-Ghartemani, M. R. Iravani, Estimation of frequency and its rate of change for applications in power systems, IEEE Transactions on Power Delivery 19 (2) (2004) 472–480. doi:10.1109/TPWRD.2003.822957.
- [4] M. H. El-Shafey, M. M. Mansour, Application of a new frequency estimation technique to power systems, IEEE Transactions on Power Delivery 21 (3) (2006) 1045–1053. doi:10.1109/TPWRD.2005.860246.
- [5] E. Guzmán, J. A. Moreno, Super-twisting observer for second-order systems with time-varying coefficient, IET Control Theory Applications 9 (4) (2015) 553–562. doi:10.1049/iet-cta.2014.0348.
- [6] I. Nagesh, C. Edwards, A multivariable super-twisting sliding mode approach, Automatica 50 (3) (2014) 984 – 988. doi:10.1016/j.automatica.2013.12.032.

3D Innenraum-Lokalisierung durch kombinierte Ultraschall-Distanz- und Inertialmessung mittels Partikelfilter

Dominik Esslinger

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

Cristina Tarín

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

Schlüsselwörter: BPSK-CDMA, Innenraumpositionierung, Partikelfilter, Posenschätzung, unilaterale Distanzmessung.

Im industriellen Kontext bildet die Lokalisierung von Objekten die Grundlage für zahlreiche Anwendungen. Bei komplexen, manuellen Montageprozessen kann beispielsweise durch eine Bestimmung der Pose (Position und Orientierung) von Werkzeugen, wie Akkuschaubern, unter anderem die Prozessqualität erhöht und eine lückenlose Dokumentation garantiert werden. Hierfür ist jedoch ein kostengünstiges, skalierbares Innenraum-Lokalisierungssystem mit einer Positioniergenauigkeit im Zentimeterbereich und einer Reichweite von einigen Metern erforderlich.

Opto-akustische Positionierungssysteme, basierend auf der Multilateration unilateraler Distanzmessungen zwischen mobilen Sendern (TX), die an Werkzeugen befestigt werden, und ortsfesten Empfängern (RX) im Raum, eignen sich hierfür besonders. Wie in Abbildung 1 skizziert, erfolgt die Distanzmessung dabei durch Laufzeitdifferenzmessung zwischen Ultraschall- und Infrarotsignalen. Die Orientierungsbestimmung ist im präsentierten System zusätzlich durch mehrere Ultraschallsender je Objekt realisiert. Um gleichzeitig mehrere Werkzeuge im Arbeitsraum detektieren zu können, werden im vorgestellten System quasi-orthogonale Gold-Codes auf das Trägersignal moduliert, sodass eine Nutzung als BPSK-CDMA-System möglich ist [1], [2]. Hierfür werden die am Empfänger ankommenden Signale mit modellbasiert erzeugten Signalreplikaten korreliert.

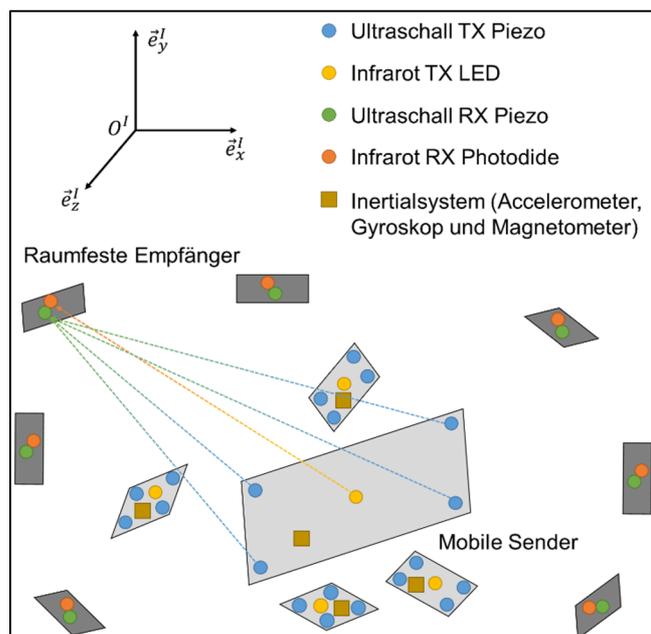


Abbildung 1: Topologie des Innenraum-Lokalisierungssystems

Bei sich bewegenden Sendern muss zusätzlich eine Doppler-Effekt-Korrektur durchgeführt werden [3]. Nichtsdestotrotz erlaubt die Einbindung von Inertialmessdaten (Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer), die im Sender erfasst werden, die zusätzliche Stützung des

Positionssignals bei hochdynamischen Bewegungen. Die vorgestellte Konfiguration nutzt hierfür ein Partikelfilter basierend auf einem nichtlinearen Zustandsraummodell des Systems mit den Sensor- und Distanzwerten als Messungen der Systemeingänge und Systemausgänge, wie in Abbildung 2 skizziert [4]. Ziel ist die Bestimmung des Zustandsvektors x , der die Position, Geschwindigkeit und Orientierung als Quaternion des Objekts enthält. Hierbei werden die Inertialmessdaten des Accelerometers a_{mess} und des Gyroskops \dot{q}_{mess} in einem Propagations-Schritt für eine Zustandsprädiktion genutzt. Die Magnetometer- und Distanzmessdaten, h_{mess} und d_{mess} , werden bei jeder zehnten Iteration für einen Korrekturschritt herangezogen.

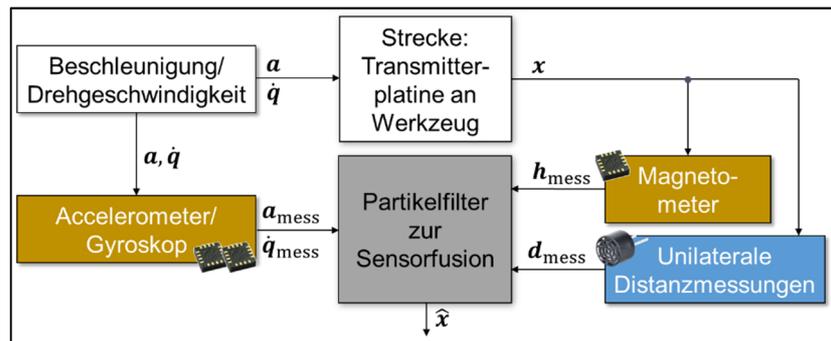


Abbildung 2: Blockdiagramm des Lokalisierungssystems

Basierend auf der Auswertung der Dynamik menschlicher Handbewegungen während Montagevorgängen, wird die Leistungsfähigkeit des Systems anhand reproduzierbarer, dynamischer Bewegungen einer elektrischen Linearachse gezeigt, wobei die Position und Orientierung des Schlittens bestimmt und mit den Messungen eines kamerabasierten Referenzsystems verglichen wird. Hierbei werden eine Positioniergenauigkeit im Zentimeterbereich und eine für den Anwendungsfall ausreichend genaue Orientierungsschätzung erreicht.

Literatur

- [1] D. Esslinger et al., „High precision optoacoustic BPSK-CDMA distance measurement for object tracking“. In: *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Oct 2018.
- [2] D. Esslinger et al., „Highly Accurate 3D Pose Estimation for Economical Opto-Acoustic Indoor Localization“. In: *2018 15th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. Nov 2018.
- [3] D. Esslinger et al. „Moving object tracking based on high precision opto-acoustic BPSK-CDMA distance measurement“. In: *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Sep 2018.
- [4] P. Rapp et al., „Characterization of a 6 DOF Acoustic-Inertial Navigation System for Minimally-Invasive Surgery“. In: *2014 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*. Dec 2014.

Robuste Materialanteilsschätzung mithilfe iterativer optischer Spektralfilterung

Wolfgang Krippner

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
wolfgang.krippner@kit.edu

Fernando Puente León

Institut für Industrielle Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie
fernando.puente-leon@kit.edu

Schlüsselwörter: Hyperspektralbild, Materialanalyse, optische Messverfahren, spektrale Filterung, spektrale Entmischung.

Im Gegensatz zu RGB-Bildern liegen bei Hyperspektralbildern an einem Pixel nicht drei, sondern bis zu mehrere hunderte Intensitätswerte vor. Während der betrachtete Wellenlängenbereich mit dem sichtbaren Spektrum unverändert bleiben kann, erfolgt bei der Aufzeichnung von Hyperspektralbildern eine wesentlich höher aufgelöste spektrale Abtastung. Mit der spektralen Dimension kann mehr Information aus der betrachteten Szene extrahiert werden. Beispielsweise können mit der Aufnahme eines Hyperspektralbilds über eine Materialmischung die einzelnen Materialanteile bestimmt werden. Ein RGB-Bild über die gleiche Szene ermöglicht eine solche Analyse von Materialmischungen im Allgemeinen nicht [1].

Anwendung fanden Hyperspektralbilder zunächst in der Fernerkundung. Mit zunehmender Weiterentwicklung der für die Aufzeichnung notwendigen Hardware und der Reduzierung derer Kosten werden Hyperspektralbilder immer öfter auch in anderen Bereichen eingesetzt, wie beispielsweise Sortieranlagen in der Industrie oder Qualitätskontrollen im Lebensmittelbereich und in der Medizin [2,3]. Neben der meist aufwändigen und zeitintensiven Aufzeichnung hyperspektraler Bilder ist deren Verarbeitung mit hohen Anforderungen an die Hardware verbunden. Hyperspektralbilder besitzen einen hohen Speicherbedarf, da für jeden abgetasteten Wellenlängenkanal ein Intensitätsbild in der Größe der räumlichen Auflösung vorliegt. Soll zudem beispielsweise für jedes Pixelspektrum ein Skalarprodukt berechnet werden, so ergeben sich schnell zahlreiche Rechenoperationen. Mithilfe optischer Spektralfilter können diese Rechenkosten und der hohe Speicherbedarf verringert werden. Es wird unmittelbar das Ergebnis solcher Skalarprodukte in Form eines einzigen Intensitätsbilds aufgezeichnet und abgespeichert [4].

Innerhalb dieses Beitrags wird die Hardware für die Realisierung von optischen Spektralfiltern nicht behandelt. Sämtliche Auswertungen erfolgen simulativ, d.h. weiterhin computergestützt an aufgezeichneten Hyperspektralbildern. Stattdessen steht der Entwurf von optischen Spektralfiltern im Vordergrund mit dem Ziel der Schätzung von Materialanteilen. Für die analytische Bestimmung der Spektralfilterkoeffizienten muss eine mathematische Beschreibung von Mischspektren in Form eines Mischmodells vorliegen. Dabei bietet das lineare Mischmodell (LMM) eine Darstellung der Mischspektren, welche ausschließlich die Spektren der reinen Materialien als Vorwissen voraussetzt. Somit ist eine breite Anwendung möglich. Da sich jedoch häufig Mischspektren aufgrund eines nichtlinearen Mischverhaltens ergeben, führt die Annahme des LMM zu ungenauen Materialanteilsschätzungen. Nichtlineare Mischmodelle wiederum besitzen im Vergleich zum LMM zusätzliche Parameter, die in Abhängig-

keit jeder Anwendung bestimmt werden müssen. Die Angabe der Spektralfilterkoeffizienten als Schätzer für die gesuchten Materialanteile ist bei diesen Mischmodellen nicht stets gegeben, solange keine aufgezeichneten Mischspektren vorliegen [5].

Deshalb wird vorgeschlagen, optische Spektralfilter unter Verwendung des LMM jedoch iterativ zu bestimmen. Es wird in einer Iteration ein Intensitätsbild mithilfe optischer Spektralfilterung gewonnen und mit Hinzunahme dessen Auswertung der optische Spektralfilter für den nächsten Iterationsschritt berechnet. Dadurch soll eine Materialanteilsschätzung möglich sein, die sich robust gegenüber Abweichungen der Mischspektren zum LMM zeigt und somit auf verschiedene Materialmischungen anwendbar ist. Insbesondere wird das Augenmerk auf physikalisch interpretierbare Materialanteilsschätzungen gelegt. Sämtliche Anteilschätzungen sollen nichtnegativ sein und die Materialanteile an einem Pixel sollen sich zu eins aufsummieren.

Bereits existierende, mit optischen Spektralfiltern realisierbare iterative Algorithmen erfordern für physikalisch interpretierbare Materialanteilsschätzungen geringe Abweichungen der Mischspektren zum LMM [6]. Der hier vorgestellte Ansatz ist robust gegen Modellabweichungen und bezieht zusätzlich eine sog. Spektrenvariabilität ein. Einem reinen Material wird nicht ein Spektrum zugewiesen, sondern eine Sammlung von Spektren [7,8].

Literatur

- [1] J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, N. Dobigeon, M. Parente, Q. Du, P. Gader und J. Chanussot. Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2):354–379, 2012. ISSN 1939-1404.
- [2] G. Lu und B. Fei. Medical hyperspectral imaging: a review. *Journal of biomedical optics*, 19(1):10901, 2014.
- [3] H. Huang, L. Liu und M. O. Ngadi. Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(4):7248–7276, 2014.
- [4] W. Krippner, S. Bauer und F. Puente León. Ortsaufgelöste optische Bestimmung von Materialanteilen in Mischungen. *tm – Technisches Messen*, 84(3):207–215, 2017.
- [5] N. Dobigeon, Y. Altmann, N. Brun und S. Moussaoui. Linear and Nonlinear Unmixing in Hyperspectral Imaging, volume 30 of *Data Handling in Science and Technology*, pages 185–224. Elsevier, Niederlande, 2016. ISBN 9780444636386
- [6] D. Heinz, C.-I. Chang und M. Althouse. Fully constrained least-squares based linear unmixing [hyperspectral image classification]. In *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No.99CH36293)*, pages 1401–1403. IEEE, 1999. ISBN 0-7803-5207-6.
- [7] W. Krippner, S. Bauer und F. Puente León. Considering spectral variability for optical material abundance estimation. *tm – Technisches Messen*, 85(3):149–158, 2018..
- [8] B. Somers, G. P. Asner, L. Tits und P. Coppin. Endmember variability in spectral mixture analysis: A review. *Remote Sensing of Environment*, 115(7):1603–1616, April 2011. ISSN 0034-4257.