

Technische Universität Dresden

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

Studienarbeit

Provisorischer Titel: Semantische Katalogisierung Regelungstechnischer Systeme

vorgelegt von: Jonathan Rockstroh
geboren am: 14. Mai 1997 in Pirna

Betreuer: Dr.-Ing. C. Knoll
Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. K. Röbenack
Tag der Einreichung: 26. Juli 2021

Bitte ersetzen Sie diese Seite vor dem Binden mit der Aufgabenstellung.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik eingereichte Studienarbeit zum Thema

Provisorischer Titel: Semantische Katalogisierung Regelungstechnischer Systeme

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Pirna, 1. September 2021

Jonathan Rockstroh

Kurzfassung

An dieser Stelle fügen Sie bitte eine deutsche Kurzfassung ein.

Abstract

Please insert the English abstract here.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	1
1 Einleitung	2
1.1 Motivation	2
1.2 Präzisierung der Aufgabenstellung	2
2 Vorüberlegungen	3
2.1 Aktueller Stand	4
2.2 Struktur und Elemente des Kataloges	6
3 Katalog von Modellen der Regelungstechnik	8
3.1 Klassifikationssystem	8
3.1.1 Aufbau	8
4 Zusammenfassung und Ausblick	10
4.1 Übersicht zu aktuellem Funktions- und Modellumfang	10
4.2 Ausblick	10
Literatur	11

Verzeichnis der Formelzeichen

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Inhalt: Kurze Erklärung warum ein Katalog von Modellen sinnvoll ist und was die Idee attraktiv macht.

1.2 Präzisierung der Aufgabenstellung

Inhalt: Aufgabenstellung in stichpunktartigen Sätzen.

Im Rahmen dieser Studienarbeit soll eine Katalog für regelungstechnische Systeme entworfen werden. Darin sollen Modelle als Textrepräsentation und (optional) zusätzlich als implementierter Code enthalten sein. Für beide Repräsentationsarten soll es eine einheitliche Repräsentationsweise geben. Die Umsetzung so erfolgen, das neue Modelle möglichst einfach hinzugefügt werden können. Ebenso soll ein Klassifikationssystem erstellt werden mit dem die Modelle innerhalb der regelungstechnischen Theorie eingeordnet werden können. Das Klassifikationssystem soll auf eine signifikante Anzahl regelungstechnischer Veröffentlichungen angewandt werden. Außerdem sollen ausgewählte Modelle implementiert werden.

Original (letzter Part): Ziel der Arbeit ist es, mittels sogenannter ontologischer Methoden ein Klassifikationssystem zu erstellen und auf eine signifikante Anzahl (z.B. 50) regelungstechnischer Veröffentlichungen anzuwenden. Zudem sollen die wichtigsten Modelle aus den Veröffentlichungen in Python implementiert und mittels einer Hierarchie semantischer Eigenschaften (z.B. "nichtlinear", "Zustandsdimension: 8", "Flachheitsstatus: nicht flach") erfasst werden.

Kapitel 2

Vorüberlegungen

Inhalt:

Grundgedanken zu Modellkatalog. Ansprüche. Wünsche bzgl. Funktionsumfang und Anwendbarkeit, Prinzip: aufwändiges Hinzufügen, einfaches Anwenden

Ist-Stand: Was gibt es für vergleichbare Kataloge/Projekte? + Bewertung dieser

Beschreibung der aktuellen Situation zur Modellfindung -> Zeitintensive Suche nach Publikationen, nur ausgewählte Eigenschaften benannt und untersucht, teils uneinheitliche, unübersichtliche, komplexe Modelldarstellung, Reproduzierbarkeit der Implementierung der Ergebnisse einer Publikation aber auch allein schon des Modells oft sehr schwierig Grundüberlegungen zu den nützlichen Elementen des Kataloges:

Modell als Art Datenbankeintrag (Erschließbarkeit über Suche -> Einheitliche Attributnamen (-> KS) + Bedeutung, Erweiterbarkeit),

Textuelle (semantische?) Modelldarstellung mit einheitlicher Struktur und Modellnotation,

einheitliche Implementierung die einfache Nutzbarkeit der Modelle erlaubt

Umsetzung der einzelnen Elemente:

Metadata-File: Struktur aus ACKRep übernommen - leicht Angepasst

Klassifikationssystem: Semantische, ontologische Ausarbeitung des auf Modelle anwendbaren Teilbereich der Regelungstheorie, Anforderungen explizit? -> Graphentheorie, Finden einer fachlich korrekten, eindeutigen - in Bezug auf Ontologie selbst und auf Anwendung auf Modelle - und verständlichen Darstellung (Beispiel Polynom -> linear/nicht-linear) und Namensgebung (strictly_non_linear)

Textuelle Repräsentation: Struktur abgeleitet aus (guten) Publikationen[Referenzen], sinnvolle Informationsreihenfolge, Offenhaltung von Gestaltungsspielraum in Anbetracht des Umfangs der Regelungstechnik -> Vieles nur als Empfehlung enthalten

Das Nachdenken über das Wissen ist für die Erstellung des Modellkataloges, der eine Zusammenstellung und Aufbereitung des Wissens über regelungstechnische Modelle darstellt, ein wichtiger Aspekt gewesen. Der Prozess folgte dabei keiner Referenz. Die Grundlage für die gewählten Vorgehensweisen und getroffene Entscheidungen waren eigene Überlegungen und Schlussfolgerungen aus eigenen Analysen von Publikationen. Im diesem Kapitel wird der Ablauf zur Erstellung des Kataloges beschrieben. Ausgewählte

Entscheidungen und Schlussfolgerungen werden vorgestellt.

2.1 Aktueller Stand

Für die Zusammenstellung von Wissen wird eine Wissensbasis benötigt. Um diese zu erlangen und um geeignete Modelle für den Katalog zu finden erfolgte eine Modellsuche mit folgenden Erkenntnissen:

Aktuelle Situation der Modellfindung:

1. Regelungstechnische Modelle finden sich aktuell meist verteilt in wissenschaftlichen Publikationen, wie z.B. Lehrbüchern, Artikeln, Dissertationen, Diplom- und Studienarbeiten.
2. Die Qualität der Modelldarstellung ist uneinheitlich. Das die Modellgleichungen eindeutig gekennzeichneten und gemeinsam notiert, sowie die eingeführten Variablen gut beschrieben und klar definierten Typs (Parameter, Eingangs-, Zustandsvariable) sind ist nicht immer gegeben.
 - Beispiel 1: In [7] wird auf Seite 135 das Modell übersichtlich dargestellt. Die Zustandsvariablen und der Parameter σ werden direkt darunter beschrieben. Die Parameter r und b haben hingegen keinen Namen und werden nur als Gleichungen repräsentiert. Der Parameter a in der Gleichung für b wird im Artikel nicht explizit eingeführt.
 - Beispiel 2: In [11] werden die Variablen am Anfang alle eingeführt. Das Modell wird ausführlich hergeleitet. Eine zusammengestellte Übersicht der Modellgleichungen fehlt jedoch. Die Zustandsvariablen müssen aus Ausgangsvektor und Abbildungen erschlossen werden. Die Modellgleichungen sind im Artikel verteilt.
3. Die Darstellungsform der Modellgleichungen kann sich unterscheiden.
 - Beispiel 3: In [10] Seite 14 werden die Modellgleichungen als Gleichungssystem von Differentialgleichungen erster Ordnung dargestellt. Allerdings mit zusätzlichen Summanden auf der linken Seite der Gleichung.
 - Beispiel 4: In [1] Seite 3 wird die Modellgleichung als Differentialgleichung zweiter Ordnung dargestellt.
 - Beispiel 5: In [4] Seite 168f, Beispiel B.3 werden die Modellgleichungen als Gleichungssystem von Differentialgleichungen zweiter Ordnung dargestellt, wobei die linke Seite der Gleichung aus Summanden und Produkten besteht.

4. Die Modelleigenschaften sind oft nur implizit gegeben, z.B. kann bei einem Steuerungsentwurf geschlussfolgert werden, dass das untersuchte System stabil ist. Die explizite Nennung von Modelleigenschaften erfolgt meist nur, wenn diese für die Publikation von Relevanz sind.
 - Beispiel 6: Im Artikel [8] Seite 761, letzter Abschnitt wird auf die Steuerbarkeit der Modelldarstellung eingegangen. Andere Eigenschaften finden keine Erwähnung.
5. In nahezu allen Publikationen erfolgt die Erprobung der Ergebnisse mittels Simulation.
 - Beispiel 7: In [1] wurde der Eingang in die Modellgleichung eingesetzt. Für die Implementation musste dieser wieder extrahiert werden. Die Eingangsgröße ist nicht die Kraft, welche normalerweise für mechanische Systeme zu erwarten ist, sondern die Auslenkung. Für eine Darstellung mit der Kraft als Eingang wäre eine weitere Umformung nötig.
 - Beispiel 8: In [2] Seite 10910, Fig. 8 werden die Eingangswerte als grauer Graph dargestellt. Eine Darstellung als Gleichung fehlt. Ebenso fehlt bei den verwendeten Parameterwerte zum Beispiel der Wert für die Gleichspannung v_{DC} .
6. Die genutzte Implementation wird nicht publiziert bzw. veröffentlicht.

Die beschriebenen Sachverhalte in den Beispielen sind nicht zwangsläufig als Kritik gemeint. Es kann gute Gründe dafür geben. Für die Erfassung der Situation sind diese aber nicht von Bedeutung. Eine Beleuchtung möglicher Gründe findet deshalb nicht statt.

Feststellung:

Die zielgerichtete Suche nach Modellen, z.B. mit bestimmten Eigenschaften, ist oft eine zeitintensive und aufwendige Angelegenheit. Zudem braucht es häufig zusätzliche Eigenarbeit um zu einer brauchbaren Modelldarstellung zu gelangen. Die Implementierung muss aktuell fast immer von eigener Hand erfolgen. Für die Validierung des eigenen Codes und die Reproduktion der Resultate einer Publikation ist eine softwaretechnische Implementation des Modells sowie der daran angehängten Umgebung (Steuerung, Regelung, Beobachter etc.) oft notwendig (vgl. [5], Seite 1). Durch obige Aspekte ist das meist aufwendig oder nicht möglich.

Aktuelle Situation von Modellsammlungen und -Katalogen:

Bevor etwas neues entworfen wird ist es immer sinnvoll einen Blick darauf zu werfen, was schon existiert. Im folgenden bestehende Zusammenstellungen von Modellen betrachtet werden.

The Automatic Control Knowledge Repository (ACKRep):

Das in [3] vorgestellte ACKRep¹ ist ein Tool, mit dem Ziel die implementierten Ergebnisse von Publikationen reproduzierbarer zu machen. Die *ProblemSpecification* im ACKRep ist eine Sammlung von Modellen, die als Python-Quellcode repräsentiert werden. Weitere Informationen zu den Modellen sind in einer YAML-Datei hinterlegt.

Beispiele unteraktuierter mechanischer Systeme in [6]:

Im Zuge der Betrachtung unteraktuierter mechanischer Systeme werden in dem Artikel die Modellgleichungen von 11 Beispielen tabellarisch in einer vereinheitlichten Form aufgeführt. Es wurden Differentialgleichungen zweiter Ordnung als Darstellungsform gewählt. Zudem werden die Systeme bezüglich ihrer Beschränkungen, ihrer Konfigurationscharakteristik und ihrer regelungstechnischen Problemstellung klassifiziert.

2.2 Struktur und Elemente des Kataloges

Anforderungen an den Katalog:

Der Katalog soll den Prozess der Modellfindung und Nutzung vereinfachen, sodass die in Abschnitt: „[Aktueller Stand](#)“ beschriebenen Schwierigkeiten nicht durchlaufen werden müssen. Daher wurden folgende Anforderungen an den Katalog gestellt:

Anforderung A.1: Neue Modelle sollen einfach und unkompliziert zu finden sein.

Anforderung A.2: Die Modelleigenschaften sollen so gut wie möglich erfasst sein. Das heißt:

- Sie sollen möglichst vollständig sein.
- Sie sollen in einer übersichtlichen Darstellung aufgelistet sein.
- Sie sollen einer einheitlichen Namensgebung folgen.
- Sie sollen eine klare Definition haben.

Anforderung A.3: Die Modelle sollen eine einheitliche Darstellungsform haben.

Anforderung A.4: Die Variablen, deren Typ und Bedeutung sollen in einer sinnvollen, einheitlichen Darstellung notiert sein.

Anforderung A.5: Die Modelle sollen möglichst implementiert vorliegen. Die Implementierung soll einfach verwendbar sein.

Anforderung A.6: Der Katalog soll erweiterbar sein.

Die Anforderung [A.1](#) wird an sich schon durch die Ordnerstruktur, in der die herausgearbeiteten Modelle des Kataloges zusammen getragen wurden erfüllt. In Anbetracht

¹ACKRep GitHub Repository: https://github.com/ackrep-org/ackrep_data

von Anforderung A.6 und der daraus resultierenden Notwendigkeit der Betrachtung, das perspektivisch eine große Anzahl von Modellen in dem Katalog existieren sollen wird klar die Anforderung A.1 nicht durch die Ordnerstruktur erfüllt werden kann. Mit zunehmender Modellanzahl im Katalog wird es auch komplizierter bestimmte Modelle zu finden. Insbesondere in diesem Fall aber auch generell ist eine Suchfunktion für einen solchen Katalog erstrebenswert um die Anforderung A.1 zu erfüllen. Die Erstellung einer Suchfunktion soll durch folgende Entscheidung erleichtert werden:

Entscheidung E.1: Zu jedem Modell soll eine Datei (*Metadaten-Datei*) geben, in der wichtige Informationen wie der Modellschlüssel und -Name, die Modelleigenschaften und der Modellersteller hinterlegt werden. Die Metadaten-Datei soll im einfach les- und editierbaren YAML Format vorliegen.

Die Idee und Umsetzung von Entscheidung E.1 kommt aus Artikel [3] und dem darin vorgestellten *ACKRep*. Die Struktur der Metadaten-Datei wurde aus dem *ACKRep* übernommen und leicht angepasst.

Anforderung A.2 wird durch das in der Aufgabenstellung geforderte *Klassifikationssysteme (KS)* und die Anwendung dessen erfüllt. Die Auflistung der Modelleigenschaften erfolgt in der Metadaten-Datei. Die Namen der Attribute im KS stellen eine einheitliche Namensgebung sicher. Die Definition der Attribute und die Relationen zwischen diesen basieren auf im KS enthaltenen Referenzen.

Entscheidung E.2: Die Einträge des KS, welche unter anderem Namen, Relationen zu anderen Einträgen und Wertetyp enthalten werden im YAML Format gespeichert. Um eine grafische Darstellung des KS zu erhalten soll ein Python-Skript geschrieben werden.

Zur Erfüllung der Anforderungen wurden folgende Entscheidungen getroffen:

Entscheidung:

Modelldarstellung in Textform um eine für Menschen einfach lesbare Darstellungsform zu erreichen. Nutzung von \LaTeX . Um eine schnelle Notation der Modellgleichungen und Variablen zu ermöglichen.

Entscheidung:

Implementation der Modelle in Python und als Klasse. Sorgt für einfache Verwendbarkeit der implementierten Modelle.

Entscheidung:

Erstellung von Vorlagen um das Anlegen neuer Modelle unter Erfüllung der Anforderungen zu vereinfachen.

Kapitel 3

Katalog von Modellen der Regelungstechnik

3.1 Klassifikationssystem

Das *Klassifikationssystem (KS)* ist eine Übersicht von Attributen die Systemen im Rahmen der Regelungstechnik zugeordnet werden können. Da eine solche Übersicht bisher nicht im gewünschten Umfang existiert wurde diese selbst erstellt. Es lehnt stark an die in [3] eingeführte OCSE an von der es sich insofern unterscheidet, das im KS nur der Teilbereich des Wissens der Regelungs- und Steuerungstheorie enthalten ist, der sich auf regelungstechnische Systeme und Modelle bezieht. Die im KS verwendeten Bezeichnungen sollen in den metadaten-Dateien der Modelle bevorzugt verwendet werden um einen einheitlichen Sprachgebrauch zu erreichen.

3.1.1 Aufbau

Das KS ist ein Graph der aus Knoten und Kanten besteht. Jeder Knoten enthält ein Attribut¹. Die Kanten sind beschriftete Pfeile zwischen Knoten, welche einen Zusammenhang von zwei Attributen zeigen. Das Attribut des Kantenursprungs ist spezifischer als das Attribut des Kantenendes. Die Beschriftung der Kanten legt die genaue Art des Zusammenhanges fest. Für die Verwendung in den Metadaten-Dateien hat haben die dafür verwendbaren Knoten einen Werteintrag. Der Typ (boolean, string, list etc.) und gegebenenfalls die konkreten Werte, welche der Werteintrag annehmen kann sind im KS gegeben.

Es gibt drei Attribute die kein Kantenursprung sind. Diese stellen die Hauptkategorien des KS dar.

Mathematische Eigenschaften:

¹Knoten und Attribute werden in diesem Kapitel synonym verwendet.

Umfasst Eigenschaften die durch die mathematische Repräsentation des Modells gegeben sind.

Systemeigenschaften:

Umfasst Eigenschaften die aus der mathematischen Repräsentation mit Methoden aus der Regelungstechnik abgeleitet werden.

Verwendung:

Umfasst Anwendungsfälle und -bereiche in denen die Systeme häufig genutzt werden.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Übersicht zu aktuellem Funktions- und Modellumfang

Inhalt:

Aktueller Stand bzgl. Modellumfang und möglicher Modellkomplexität -> Problem mit komplexen Größen

Aktuelle Vorlagen und Limitierungen, Aufwandseinschätzung für das Hinzufügen neuer Modelle

4.2 Ausblick

Inhalt:

Was noch denkbar/wünschenswert/möglich wäre bzgl. Funktionsumfang

Versionsverwaltung, Ideen/Konzept zur Öffnung für breite(re) Nutzerschaft (Mögliche Vorlage: ACKRep, aber evtl. Orientierung auch an anderen Nutzer basierten Datenbanken (Wiki-like))

Abfragbare KS Implementierung via networkx-Package die weitere Informationen zu Einträgen des KS enthält (kurze Beschreibung, Referenz bzgl. Bedeutung -> Umsetzung mit .bib Datei und Verweis auf Kürzel + ggf. Seitenangabe etc.)

Suchfunktion

Automatische Erstellung einer Übersicht aller der enthaltenen Modelle (ist Verknüpft mit Suchfunktion?)

Literatur

- [1] Eugene I. Butikov. „Kapitza’s Pendulum: A Physically Transparent Simple Treatment“. Web Link: <http://butikov.faculty.ifmo.ru/InvPendulumCNS.pdf>. 2021.
- [2] Hendrik Fehr und Albrecht Gensior. „Improved Energy Balancing of Grid-Side Modular Multilevel Converters by Optimized Feedforward Circulating Currents and Common-Mode Voltage“. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.12 (Dez. 2018), S. 10903–10913. DOI: [10.1109/tpe1.2018.2805103](https://doi.org/10.1109/tpe1.2018.2805103).
- [3] Carsten Knoll; Robert Heedt. „Tool-based Support for the FAIR Principles for Control Theoretic Results: "The Automatic Control Knowledge Repository"“. [Soll im: System Theory, Control and Computing Journal veröffentlicht werden.] 2020.
- [4] Carsten Knoll. „Regelungstheoretische Analyse- und Entwurfsansätze für unteraktuierte mechanische Systeme“. Diss. Technische Universität Dresden, Juni 2016.
- [5] Carsten Knoll und Robert Heedt. „“Automatic Control Knowledge Repository” – A Computational Approach for Simpler and More Robust Reproducibility of Results in Control Theory“. In: *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. IEEE, Okt. 2020. DOI: [10.1109/icstcc50638.2020.9259657](https://doi.org/10.1109/icstcc50638.2020.9259657).
- [6] Yang Liu und Hongnian Yu. „A survey of underactuated mechanical systems“. In: *IET Control Theory & Applications* 7.7 (Mai 2013), S. 921–935. DOI: [10.1049/iet-cta.2012.0505](https://doi.org/10.1049/iet-cta.2012.0505).
- [7] Edward N. Lorenz. „Deterministic Nonperiodic Flow“. In: *Journal of Atmospheric Sciences* 20 (März 1963), S. 130–141.
- [8] Sharmila J. Petkar u. a. „Robust Model Predictive Control of PVTOL Aircraft“. In: *IFAC-PapersOnLine* 49.1 (2016), S. 760–765. DOI: [10.1016/j.ifacol.2016.03.148](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.148).
- [9] Otto E. Rössler. „Continuous Chaos - Four Prototype Equations“. In: *New York Academy of Sciences* (1979), S. 376–392.
- [10] Alecsandru Simion, Leonard Livadaru und Adrian Munteanu. „Mathematical Model of the Three-Phase Induction Machine for the Study of Steady-State and Transient Duty Under Balanced and Unbalanced States“. In: *Induction Motors - Modelling and Control*. InTech, Nov. 2012. DOI: [10.5772/49983](https://doi.org/10.5772/49983).

-
- [11] Sansal K. Yildiz u. a. „Dynamic modelling and simulation of a hot strip finishing mill“. In: *Applied Mathematical Modelling* 33.7 (Juli 2009), S. 3208–3225. DOI: [10.1016/j.apm.2008.10.035](https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.10.035).