

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	Koopmanアプローチを活用したモデル予測制御に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	金井政樹
Author(English)	Masaki Kanai
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12363号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:山北 昌毅,三平 満司,中島 求,塚越 秀行,早川 朋久
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12363号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	金井 政樹		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	山北昌毅	准教授		早川 朋久	准教授
	審査員	三平満司	教授	審査員		
		中島 求	教授			
塚越 秀行		教授				

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Koopman アプローチを活用したモデル予測制御に関する研究」と題し、全 7 章よりなっている。

第 1 章「序論」では本論文の全体としての研究背景と目的について、先行研究との対比を行いながら述べている。そして、本研究の目的が Koopman 理論に基づいた拡大線形化手法をモデル予測制御に適用する新しい手法を提案しその有効性を示すことであるとのべている。

第 2 章「事前知識」では、本研究に関する事前知識として、まずモデル予測制御の基礎的な内容について説明している。続いて、拡大線形化に関する基礎として、非線形自律システムに対する Koopman 理論を用いた線形化並びに入力を持つ制御系に対する拡張についても説明している。さらに、データに基づき拡大線形システムを同定する手法について説明している。

第 3 章「近似拡大線形モデルを用いた線形モデル予測制御」では、対象システムの非線形モデルが既知であるという仮定のもと、それに基づき導出される低次の拡大線形モデルを用いて、予測誤差補償を考慮した線形モデル予測制御 (Linear Model Predictive Control: LMPC) を提案している。まず、既知の非線形モデルに含まれる非線形項に基づいて観測関数 (拡大状態変数) を選定し、それを基にした低次の拡大線形モデルを近似的に導出する、近似拡大線形化について説明している。そして、近似拡大線形モデルを予測モデルとし、観測関数に関する制約条件と補償入力を考慮した予測誤差補償手法を導入した、LMPC のアルゴリズムを提案している。最後に、車両モデルを扱った数値シミュレーションにより提案手法の有効性を示している。

第 4 章「拡大双線形モデルを用いた線形モデル予測制御」では、対象システムの非線形モデルが未知の入力アフィンシステムであるという仮定のもと、データに基づき拡大双線形モデルを同定し、それを活用して予測誤差補償を考慮した LMPC を提案している。まず、2 章で説明している拡大線形化に関する事前知識をベースとして、拡大双線形化の基礎と、拡大双線形モデルの同定方法について説明している。続いて、拡大双線形モデルを用いた非線形モデル予測制御 (Nonlinear Model Predictive Control: NMPC) の定式化を行い、3 章の提案手法を応用した観測関数に基づく予測誤差補償を導入している。そして、予測ホライズン上の最適状態列の予測値である事前予測状態を用いて、拡大双線形モデルを時変線形モデルとして扱い、また観測関数に基づく制約条件を線形化する手法を導入し、拡大双線形モデルを用いた LMPC のアルゴリズムを提案している。最後に、入力アフィンシステムの例として平面ドローンを対象とした数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示している。

第 5 章「拡大双線形モデル誤差モデルを用いたモデル予測制御」では、4 章の拡大双線形モデルを用いた提案手法を応用して、既に得られているノミナルモデルのモデル誤差を補償することで、高性能なモデル予測制御を実現する手法を提案している。まず、本研究におけるモデル誤差モデルと、それによるモデル誤差補償の考え方について説明している。そして、対象システムおよびノミナルモデルから得られるデータに基づいて、拡大双線形モデル誤差モデルを同定する手法について説明している。続いて、ノミナルモデルと拡大双線形モデル誤差モデルを統合し、誤差補償モデルを導出している。さらに、4 章の提案手法を応用して、誤差補償モデルを活用した LMPC アルゴリズムを提案している。最後に、平面ドローンを対象システムとした数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示している。

ュレーションにより、提案手法の有効性を示している。

第6章「拡大双線形モデルを用いた線形モデル予測制御のスケラビリティ向上」では、4章の提案手法を発展させ、拡大双線形モデルに基づくスケラブルな LMPC を提案し、実践的な非線形システムに適用可能であることを示している。まず、3次元空間で動作するクアドロータモデルを対象システムとして、その解析的な拡大双線形モデルを導出している。また、モデル予測制御の定式化において、観測関数に基づく状態の要素間の拘束関係が満たされるように、誤差をフィードバックする補償入力を新たに導入している。これにより、4章の提案手法で問題であった、観測関数の数や予測ホライズンの長さに応じた制約条件および最適化変数の増加を回避し、計算コストの増大を抑制する手法を提案している。そして、クアドロータモデルを用いた数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示している。

第7章「結論」では本研究で得られた成果の総括と、研究の今後の発展と課題などについて述べている。

以上を要するに、本論文は、Koopman 理論に基づいた拡大線形化手法をモデル予測制御に適用する新しい手法を提案しその有効性を示したもので、工学上・工業上寄与するところ大である。よって本論文は、博士（工学）論文として十分価値あるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

(博士課程)