

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04213

研究課題名(和文) 数値解に基づく非線形分布定数系の最適境界制御設計法

研究課題名(英文) Optimal boundary control design method based on numerical solutions for nonlinear distributed parameter systems

研究代表者

西田 豪 (NISHIDA, Gou)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：80435669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非線形分布定数系に対して、固有の非線形性を最大限に利用し、かつ、従来法のような解析解の情報が必要としない「数値解に基づく非線形分布定数系の最適境界制御設計法」の研究を実施した。最初に、数値解を利用する方法として「動的モード分解」を用い制御対象の時間応答から制御モデルを導出し、非線形最適制御問題の数値解法「安定多様体法」を適用する方法を提案した。さらに、境界制御に関しては、領域変化と境界変化との等価変換を与える「Stokes-Dirac構造」の幾何学的性質について新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、あらゆる制御対象が本来有する性質を有効利用するものであり、注目する指標に対して最適な動作を行うよう設計できるため、制御システムに対して、エネルギー効率向上、環境汚染の低減などを考えつつ制御性能を最大化することが可能となる。また、時系列データから制御を行う仕組みは、各種のセンサーから得られる測定情報と、特に、映像や音声データの様なデータ量の大きい情報を用いた処理、例えば、自動走行システムの高精度化、人工知能による高効率・高速処理などへの応用が考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research proposed an optimal boundary control method based on numerical solutions for nonlinear distributed parameter systems. The method can use the non-linearity as an effective way to improve control performances without analytical solutions of the system. Firstly, we proposed the method for deriving a numerical control model from time responses by using dynamic mode decomposition, and the method of application of stable manifold method to the model. Secondly, we obtain facts on boundary controls from the Stokes-Dirac structure that gives the equivalent transformation between domain variations and boundary variations.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形制御 分布定数系 最適制御 数値計算法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 実際のおよそすべての制御系は、本来、非線形分布定数系として考えることができる。即ち、制御系の動作を定める支配則は、様々な要因が複合して単純な比例関係ではなく非線形であり、また、空間的に分布して存在する変数を関数として考える、偏微分方程式により数理モデルを考える必要がある。例えば、非圧縮性流体の運動を記述する Navier-Stokes 方程式、大変形を含む柔軟梁の方程式、蓄電池モデルにおける化学反応式や物質の輸送方程式など、実用的にも応用範囲が極めて広く、重要な制御系となる。しかし、非線形分布定数系を理論的に取り扱うにあたり、非線形性、および、分布定数から生じる無限次元性により、支配方程式からは、解を得る事さえ一般には困難となる。
- (2) 制御工学では、解析の容易さ、表現の統一性などのため、解析解(数式で表現できる解)に基づき設計論がまとめられる傾向があり、非線形分布定数系に対する統一的な制御設計論の研究は極めて少ない。即ち、従来の制御設計では、人間の都合や理論の限界により、非線形性は簡略化されたり、解析解が存在する範囲に限定された問題を扱ったりした。
- (3) 一方で 2008 年、研究分担者らにより、最適レギュレータ(安定化器)問題に対する Hamilton-Jacobi 方程式の統一的数値解法「安定多様体法」が提案され、非線形最適制御の実用化が進んだ。研究代表者は、分担者と共に、安定多様体法の分布定数系への拡張を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、制御系固有の非線形性を最大限に活用でき、多くの従来法のように解析解の存在性に束縛されない「数値解に基づく非線形分布定数系の最適境界制御設計法」を確立することである。その実現において、次の概念を統合することで目標達成を図る。

- (1) 非線形最適制御問題の厳密な数値解法「安定多様体法」による非線形性の活用研究分担者独自の手法「安定多様体法」は、近似を仮定しない Hamilton-Jacobi 方程式の数値解法として実用実績のある唯一の手法で、解析解を用いない方向性と整合する。
- (2) 時系列データから基底関数を抽出できる「動的モード分解」によるモデル縮約「動的モード分解」は時間応答から動力学情報を抽出できる。一方、研究代表者らは、動的モード分解の基礎的手法「固有直交分解」を用いた非線形分布定数系の最適制御に関する最新の成果を得ており、応用の準備は整っている。
- (3) 領域内部変化と境界変化の等価性を表す「Stokes-Dirac 構造」を利用した境界制御安定多様体は、Hamilton-Jacobi 方程式と等価な Hamilton 系の解軌道の集合である。「Stokes-Dirac 構造」とは、Hamilton 系のもつ Stokes の定理の境界可積分性の幾何学的表現であり、数値解に基づく手法への応用が期待される。

3. 研究の方法

研究項目と実施計画を述べる。最初に、研究基盤である「安定多様体法」の適用範囲を拡大するため、次のような基礎課題を遂行する。ただし、下記は状況に応じて、規模縮小可能である。

- (1) 安定多様体法を、非線形最適レギュレータ設計問題から 2 点境界値問題へ拡張
境界値制御や追従制御など、任意の目標状態を実現する制御設計法は、2 点境界値問題として定式化される。この問題の解空間は、原点に安定な軌道群(=安定多様体)だけでなく、不安定な軌道群(=不安定多様体)とそれら近傍となるため、安定多様体法の拡張が必要となる。
- (2) 解空間の効率的な表現法と探索法の導出
(1)の解空間拡張への対応として、A) Hamilton 系の解曲面の幾何学的性質を利用した解空間の情報圧縮表現、B) 各最適軌道計算と類似解削減の並列処理を活用した効率的探索法の導出を試みる。

以上の準備の下、次のような、本研究の目的のため必達の重要課題に取り組む。

- (3) 動的モード分解によるモデル縮約法の考案
固有直交分解を用いた成果を応用し、動的モード分解から、安定多様体法に適用可能な形式となる低次元化縮約モデルを導出し、両手法を比較評価する。
- (4) 幾何学的性質を利用した境界制御の適用

固有直交分解による結果では,分布入力を用いていたため,これを境界入力へと拡張する. その際に,領域変化と境界変化との等価変換を与える幾何学的性質, Stokes-Dirac 構造に関する結果を利用する.

- (5) 非線形分布定数系の最適境界制御法の検証
上記の結果を統合し,拡張された安定多様体法のプログラムを作成し,実績のある制御対象にて,従来法と提案法の比較検証を行う.

4. 研究成果

- (1) 安定多様体法により最適フィードバック制御器が設計された非線形分布定数系に対して,出力信号の伝送路においてむだ時間(伝送遅れ)が生じた場合において,計測された時系列データを元に遅れない信号を予測することで,むだ時間による制御性能の低下を削減する仕組みを考案した[1].

この成果は,研究の方法における項目(2) 解空間の効率的な表現法と探索法の導出,および,項目(3) 動的モード分解によるモデル縮約法の考案の実施項目に該当している.

- (2) 領域変化と境界変化との等価変換を与える幾何学的性質, Stokes-Dirac 構造に関して,多様体上の微分形式のもつ性質を利用することで導かれる変分的性質,特に,波動方程式を定めるための Laplace 作用素と Stokes-Dirac 構造との関係を明らかにした[2], [4].

研究の方法における項目(4)幾何学的性質を利用した境界制御の適用の実施項目に該当している.

- (3) 非線形分布定数系を Hamilton 系として表現し,ポートと呼ばれる特別な入出力変数を用いてシステムの相互接続を可能とする表現, port-Hamilton 系において,複雑な相互接続がなされている場合に成立する境界におけるエネルギーの時間変化の平衡式を導出した[3].

研究の方法における項目(4)幾何学的性質を利用した境界制御の適用の実施項目に該当している.

<引用文献>

- [1] Gou Nishida and Noboru Sakamoto, "Data-Driven Nonlinear Optimal Control for Distributed Parameter Systems with Output Delay", 6th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, Valparaiso, Chile, May 3rd, 2018.
- [2] 西田豪, "境界エネルギー制御系の変分構造について", 第6回制御部門マルチシンポジウム, 熊本, 3月8日, 2019.
- [3] Gou Nishida and Bernhard Maschke, "Topological geometric extension of Stokes-Dirac structures for global energy flows", ECC 19, Naples, Italy, June 27, 2019.
- [4] Gou Nishida and Bernhard Maschke, "Stokes-Dirac operator for Laplacian", NOLCOS2019, Vienna, Austria, September 5th, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 西田 豪	4. 巻 65
2. 論文標題 数値解を用いた分布定数系の非線形最適制御について	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tran Anh Tuan, Sakamoto Noboru, Mori Koichi	4. 巻 80
2. 論文標題 Nonlinear gain-scheduled flight controller design via stable manifold method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Aerospace Science and Technology	6. 最初と最後の頁 301 ~ 308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ast.2018.07.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Horibe Takamasa, Sakamoto Noboru	4. 巻 27
2. 論文標題 Nonlinear Optimal Control for Swing Up and Stabilization of the Acrobot via Stable Manifold Approach: Theory and Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 2374 ~ 2387
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCST.2018.2865762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NAKAMURA Takuto, OISHI Yasuaki, SAKAMOTO Noboru	4. 巻 56
2. 論文標題 Nonlinear Optimal Tracking Control for a Periodic Reference Signal	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 243 ~ 248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.56.243	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Gou Nishida
2. 発表標題 Topological geometric extension of Stokes-Dirac structures for global energy flows
3. 学会等名 European Control Conference 19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gou Nishida
2. 発表標題 Stokes-Dirac operator for Laplacian
3. 学会等名 The 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems (NOLCOS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Gou Nishida
2. 発表標題 Data-Driven Nonlinear Optimal Control for Distributed Parameter Systems with Output Delay
3. 学会等名 6th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西田豪
2. 発表標題 境界エネルギー制御系の変分構造について
3. 学会等名 第6回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	坂本 登 (SAKAMOTO Noboru) (00283416)	南山大学・理工学部・教授 (33917)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------