

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420415

研究課題名(和文)非線形H 出力フィードバック制御問題の数値解法

研究課題名(英文) Numerical method for nonlinear H infinity output feedback control problem

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モデル化されていない変動要素を含む非線形システムに対して、その変動のシステムの制御性能への最悪の影響を想定して最適化される、非線形H ∞ 制御において、センサを通じて検出できる出力信号だけを利用して設計する制御手法、非線形H ∞ 出力フィードバック制御理論の実用化を目指し、その制御問題の数値解法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to elaborate a numerical method for the practical realization of the nonlinear H infinity output feedback control theory. The nonlinear H infinity controllers are optimized according to the consideration for the effects of unmodeled perturbations on control performances of nonlinear systems. We extend the control to output feedback controls that do not use full states of the systems, but observed signals.

研究分野：制御理論

キーワード：非線形システム 非線形最適制御 数値解法

1. 研究開始当初の背景

1990年頃完成し、現代制御工学の基礎となっている、(線形) H_∞ 制御理論は、周波数領域での性能評価に基づく最適な制御設計を目的とし、例えば、ある範囲の外乱やモデル化誤差の影響下でも安定な、ロバストな制御則が導出できる。ここで、変動要素の最悪値の定義に、関数の上界を意味する H_∞ ノルムを用いる事が、その名前の由来である。 H_∞ 制御は、設計概念の独創性に加え、古典制御の欠点である、設計変数の職人技的な調整過程に、理論的裏付けを与えたという意味でも重要な結果である。1990年以降、 H_∞ 制御は、周波数の概念を除き、非線形系へ拡張されてきた。非線形 H_∞ 制御では、従来、平衡点近傍でのみ有効(局所的)であった制御性能を、平衡点を含む広い領域(大域的)にまで拡張できる。

ところが、非線形 H_∞ 制御理論には、実用上重要な、観測可能な状態だけを用いて設計を行う、出力フィードバック制御問題に、未解決な点が残されていた。具体的には、観測誤差に関する証明に線形性が仮定されており、その結果、大域的な安定性が保証されず、非線形制御の特徴が発揮できていなかった。また、非線形 H_∞ 制御問題は、線形系の Riccati 方程式に相当する、Hamilton-Jacobi 方程式の可解性に帰着される。しかし、Taylor 近似などによる各論的手法以外の、Hamilton-Jacobi 方程式の系統的な解法が未知であった為、非線形 H_∞ 制御の適用例は極めて少なかった。

2. 研究の目的

本研究では、非線形 H_∞ 出力フィードバック制御理論の実用化を目的とする。非線形 H_∞ 出力フィードバック制御とは、モデル化されない変動要素を含む非線形系に対して、その変動の最悪ケースを想定し最適化される、観測可能な状態のみを用いて構成される制御手法である。この問題では、安定性の証明における未解決点、および、その必要条件となる Hamilton-Jacobi 方程式の系統的解法が未確立という問題が残されている。

本研究の具体的な目的は次の通りである。一つは、安定多様体法による非線形 H_∞ 出力フィードバック制御問題の数値解法の導出、もう一つは、非線形 H_∞ 出力フィードバック制御の柔軟構造物への適用である。

3. 研究の方法

解決法として、Hamilton-Jacobi 方程式の数値解法である安定多様体法に注目した。安定

多様体法は、近似解析解に基づく従来法からは導出困難な、非線形最適制御における大域的安定化領域を導出でき、上記の出力フィードバック制御問題の証明に見通しを与える幾何学的構造を備えている。しかし、安定多様体法には、効率的な解の探索法が未確立で、次元増加に伴う計算量爆発などの問題が存在する事が、近年、明らかになっていた。

4. 研究成果

本研究では、非線形 H_∞ 出力フィードバック制御問題の最終的な解決には至らなかったが、その基本的な問題である、非線形 H_∞ 状態フィードバック制御問題における数値解法(研究成果: 雑誌論文 ③, ⑦)の導出を行い、また、非線形分布定数系に対して、POD-Galerkin 法と呼ばれる低次元化を行う事で縮約モデルを導出し、非線形最適状態フィードバック制御設計の一手法(研究成果: 雑誌論文 ①, ②, 学会発表 ④, ⑧)を提案した。

非線形 H_∞ 状態フィードバック制御問題に関する最初の結果は、制御系の全状態が観測できると仮定した場合の制御設計法であり、これまで、問題自体の定式化は行われてきたものの、制御器の最適パラメータとなる解を与える Hamilton-Jacobi-Isaac 方程式の一般的な解法は知られていなかった。しかし、本研究では、安定多様体を拡張することで、この問題の解法を提案した。その効果の実証として、非線形 H_∞ 状態フィードバック制御を、入力制約が存在する車両の横滑り制御(研究成果: 雑誌論文 ⑤, 学会発表 ⑦)に適用し、圧雪路で横滑りが発生した状態の走行車両が、定常走行に復帰できる様子を、シミュレーションにより再現した(図1参照)。この場合、従来の線形 H_∞ 状態フィードバック制御では、車体にスピンが生じ、不安定化してしまった。

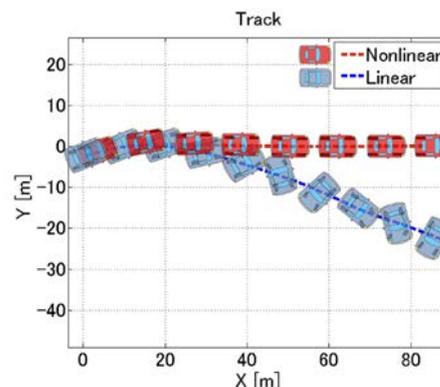


図1 横滑り抑制制御
(線形制御ではスピンが発生する場合において、非線形制御では安定化可能)

現在、車両の自動運転の実用化が注目されており、その多くは、人工知能によるものであるが、本研究の成果の様な、数学モデルに基づく制御手法は、具体的な制御仕様に応じて詳細なシステム設計を行う場面や、人工知能による物理現象の高精度な予測を用いて、例えば障害物回避を行う場合などで応用される可能性が考えられる。

非線形分布定数系のモデル縮約による最適制御に関する2番目の結果は、非線形領域に及ぶ偏微分方程式の制御における研究代表者の過去の成果に基づいて行われたものである。従来、偏微分方程式の挙動を、数値計算により再現する場合、何らかの離散化が必要である。この離散化に伴うモデル化誤差は、系の非線形性が強くなるにつれて無視できないものになる為、制御性能への影響も大きい。しかし、提案法では、離散化の過程、および、制御設計の段階において、制御系が本来有する非線形性を無視することなく、その特有の性質を十分に活用することができる、非線形最適制御設計の枠組みを提案した。そして、モデル化誤差が顕著となる例として知られている、非線形波動方程式「Burgers 方程式」を用いて、提案法の有効性を実証した（図2参照）。また、この手法におけるモデル縮約では、POD-Galerkin 法と呼ばれる低次元化を応用しており、実際の計算では、制御系のある自由応答をサンプリングしたデータから導出される（図3参照）。

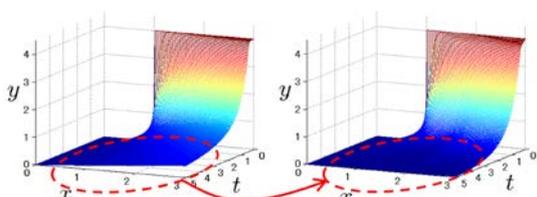


図3 非線形分布定数系のモデル縮約に基づく最適制御（左図の自然応答に対して、制御後の応答は、評価関数の値が改善されている）

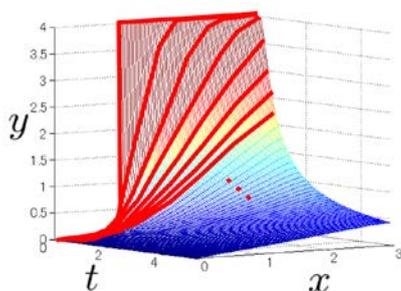


図2 非線形分布定数系に対する縮約モデルの導出の様子（自由応答曲面をサンプリングして得られた関数群より基底関数を求めている）

この応答は、ある初期値に対して決定されるものであるため、当初、予期されない外乱や状態変化に対して制御性能が劣化する、即ち、ロバスト性が低いのではないかと予想されたが、しかし、この手法により導出された最適制御器は、想定された初期値や、制御過程での外乱に対して、ある種のロバスト性を有することが数値実験によって確認された（研究成果：学会発表 ③, ⑤）。将来、このロバスト性を陽に制御指標とすることができる制御理論が展開できれば、一般的には非常に複雑であると考えられている非線形分布定数系に対して、最適性とロバスト性の両方を考慮できる実用的な設計手法が確立されうると考える。

その他、上記の2つの大きな成果の導出過程において得られた補助的な結果として、次の項目が挙げられる。一つは、安定多様体法の計算効率を改善するための並列化に関する基本的な考え方（研究成果：学会発表 ⑥）であり、現在継続して研究を行っている。二つ目は、Hamilton-Jacobi 方程式と関係の深い、Hamilton 系の構造を利用した制御手法（研究成果：雑誌論文 ④, ⑧, ⑨, 学会発表 ①, ②, ⑨）であり、今後、最適制御との関連性が示されることにより、これらの制御設計において最適性の議論が可能になり、本研究の主要な成果との相互発展の可能性が期待できる。三つ目は、モデル縮約の概念を、多粒子からなる Hamilton 系に対して応用したもの（研究成果：雑誌論文 ⑥）であり、本研究成果と共に、数値解法を利用した制御設計法の提案という身で、制御理論における新たな方向性を示していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 9 件）

- ① 濱口 謙一, 西田 豪, 坂本 登, 山本 裕, 「モデル縮約に基づく非線形偏微分方程式の最適フィードバック制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 51, No. 3, pp. 181-188, 2015. [査読有]
- ② 濱口 謙一, 西田 豪, 坂本 登, 山本 裕, 「安定多様体法における Hamilton-Jacobi 方程式の高速数値解法」, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 1, pp. 32-39, 2015. [査読有]
- ③ Yoshiki Abe, Gou Nishida, Noboru Sakamoto and Yutaka Yamamoto, "Robust Nonlinear H-infinity Control Design via Stable Manifold Method", Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, No. 198380, pp. 1-8, 2015.

[査読有]

- ④ Gou Nishida, “Hamiltonian Representation of Higher Order Partial Differential Equations with Boundary Energy Flows”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol. 3, No. 11, pp. 1472-1490, 2015. [査読有]
- ⑤ Yoshiki Abe, Gou Nishida, Noboru Sakamoto and Yutaka Yamamoto, “Symplectic Numerical Approach for Nonlinear Optimal Control of Systems with Inequality Constraints”, *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, Vol. 4, No. 4, pp. 234-248, 2015. [査読有]
- ⑥ Gou Nishida, Kenji Fujimoto, Daiji Ichishima, “Scalable Reduction of Elastic Continuum for Boundary Energy Control”, *SIAM J. Control and Optimization*, Vol. 53, No. 4, pp. 2424-2448, 2015. [査読有]
- ⑦ Gou Nishida, Yoshiki Abe, Noboru Sakamoto, and Yutaka Yamamoto, “Robustness Analysis of Optimal Regulator for Vehicle Model with Nonlinear Friction”, *Int. J. of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 5, No. 6, pp. 25-30, 2015. [査読有]
- ⑧ Gou Nishida, Bernhard Maschke and Ryojun Ikeura, “Boundary Integrability of Multiple Stokes-Dirac Structures”, *SIAM J. Control and Optimization*, Vol. 53, No. 2, pp. 800-815, 2015. [査読有]
- ⑨ 西田 豪, 「双 Hamilton 系の簡約化可能な境界エネルギー制御」, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 12, pp. 829-835, 2014. [査読有]

[学会発表] (計 9 件)

- ① Gou Nishida and Noboru Sakamoto, “Optimal Port Allocation for Nonlinear Distributed Parameter Systems”, *Proc. of the 2nd IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations: CPDE16*, Bertinoro, 2016. [査読有]

- ② 西田 豪, 「境界を持つ多様体上の大域的 Stokes-Dirac 構造」, 第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2B3-1, 南山大学 名古屋キャンパス, 3 月 8 日, 2015. [査読無]
- ③ Gou Nishida and Noboru Sakamoto, “Robustness of Nonlinear Optimal Regulator for Reduced Distributed Parameter System”, *Proc. of 2015 SIAM Conference on Control and Its Applications*, Paris, July, 2015. [査読有]
- ④ K. Hamaguchi, G. Nishida, N. Sakamoto and Y. Yamamoto, “Nonlinear Optimal Control in Catalytic Process via Stable Manifold Method”, *Proc. of the 5th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Non Linear Control*, Lyon, July, 2015. [査読有]
- ⑤ 西田 豪, 坂本 登, 「非線形分布定数系に対する最適制御の外乱に対するロバスト性について」, 第 57 回自動制御連合講演会, 群馬県 ホテル天坊, pp. 101-106, 11 月 10 日, 2014. [査読無]
- ⑥ 太田 清士郎, 西田 豪, 山本 裕, 「安定多様体法による非線形最適制御器の外乱に対するロバスト性について」, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都府 京都テルサ, 5 月 23 日, 2014. [査読無]
- ⑦ 阿部 義貴, 西田 豪, 坂本 登, 山本 裕, 「状態の不等式制約を考慮した非線形最適制御」, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都府 京都テルサ, 5 月 23 日, 2014. [査読無]
- ⑧ K. Hamaguchi, G. Nishida and N. Sakamoto, “Suboptimal Feedback Control of Nonlinear Distributed Parameter Systems by Stable Manifold Method”, *Proc. of the 19th IFAC World Congress*, pp. 11357-11362, Cape Town, 2014. [査読有]
- ⑨ G. Nishida and B. Maschke, “Control Lyapunov Function Construction using Symplectic Structure for Partial Differential Equations”, *Proc. of International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Groningen, pp. 834-839, 2014. [査読有]

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ee.ce.nihon-u.ac.jp/~g.n/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

坂本 登 (SAKAMOTO, Noboru)
南山大学・理工学部・教授
研究者番号：00283416

(3) 研究協力者

山本 裕 (YAMAMOTO, Yutaka)