

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630080

研究課題名(和文) 有理式表現に基づく非線形機械システム制御理論の構築

研究課題名(英文) Control system design method of nonlinear mechanical systems based on rational representation

研究代表者

成清 辰生 (Narikiyo, Tatsuo)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70231496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、学習理論と制御理論の統合による新たな非線形学習制御理論を構築し、機械システムおよび人間機械融合システムの制御系設計法を開発することを目的とする。機械システムの多くは有理式表現となることから、多項式展開可能なディスクリプタ表現を用いて未知システムを記述し、このシステムに対して、Lyapunov関数を用いた安定領域DOA(Domain of Attraction)の推定とDOA内での安定化制御則の導出を行い、シームレスにDOA内の制御則に接続する学習制御系を設計し、大域的な安定性を保証するモデルフリーの非線形学習制御理論を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study we develop a new control system design method for nonlinear systems combining the learning theory with control theory. This new approach is applied to the control of mechanical systems and human-machine systems. Since many of these systems are described by rational function representation, the descriptor non-polynomial systems are used to synthesis of stabilizing controller. For descriptor non-polynomial systems we give a stabilizing controller and the domain of attraction(DOA) by means of the Lyapunov function. To do this we derive the stability conditions for estimating the DOA with input magnitude constraints. From these conditions stabilizing controller is obtained by parallel asynchronous particle swarm optimization. The proposed strategy can be easily exploited to search for both the stabilizing controller and optimal estimates of DOA. Usefulness and validity are demonstrated by numerical simulations.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形制御理論 最適化

1. 研究開始当初の背景

モデル化が困難なシステム、例えば超多自由度の機械システムや人間機械融合システムなどに対する一般的な制御理論は存在しない。この問題に対して、モデルを用いない(モデルフリーの)制御手法として、強化学習による制御が提案されてきた。この制御手法は未知の制御対象に対して、学習に基づく制御を行うものであり、行動の結果の評価に基づく学習により次の行動を決める手法である。このため、広い適用範囲を持つが、結果的には試行錯誤を前提としており、厳密な安定性の保証ができないため、人間機械融合システムなどへの適用は難しい。また、部分的に未知なシステムに対しては、Hamilton Jacobi Bellman 方程式に基づく制御手法も提案されているが、初期補償器の設計など残されている課題も多い。

2. 研究の目的

本研究では、局所モデルを GMDH(Group Method of Data Handling)を用いて有理式システムとしてモデル化し、凸最適化問題を解き、局所的に既知なシステムの安定化制御則と安定領域 DOA(Domain of Attraction)を導出・推定することを目的とする。DOA は Lyapunov 関数のレベル集合で与えられる。開発する制御手法では、DOA 内では有理式システムの安定化制御則を用い、DOA 外では有理式システムに対して得られた Lyapunov 関数を状態価値関数とする強化学習による制御則を構成し、シームレスに DOA 内のフィードバック制御則と接続する。

3. 研究の方法

本研究では、モデル化が困難なシステムの制御系設計理論を構築するため、未知システムの状態空間上に局所多項式空間を仮定し、Black Box として扱われるシステムに対しても、多項式システムとして局所的な特性を表現する。そして、この多項式システムに対して、有理関数表現の Lyapunov 関数を用いて最大化した DOA を求め、シームレスに DOA 内の安定化制御則に接続する強化学習を設計することで、安定化と所望の制御性能を実現

する制御手法を開発することを目的とする。すなわち、本研究は局所有理式表現という針の穴を突破口として、完全に未知なシステムに対しての制御系設計理論の構築を目指す挑戦的な研究である。

本研究で提案する有理式システムは、未知システムの多項式展開を入出力データとして用いた GMDH で実現するものであり、次数によって展開近似を任意に調整することができる。この有理式システムの安定化制御則は凸最適化問題を SOS(Sum of Square)手法を用いて解くことで与えられる。最適化により導出した Lyapunov 関数を価値関数とした強化学習を設計することで、局所領域の安定化制御則とシームレスにつながる学習制御系を構築する。

4. 研究成果

(1) 多項式システムの制御系設計法を提案した。多項式システムは非ホロノミック特性のようなある種の非線形特性を保ちつつ、多くの非線形システムを表現することが出来る。これが多項式システムの制御系設計法と多項式システム同定法を本章で議論する理由である。GMDH は最小多項式の形式で未知ダイナミクスを記述できるデータマイニング手法として知られている。ただし、その応用としてはデータ解析、データクラスタリング、パターン認識などのダイナミクスを含まない保守的な問題に制限されている。一方で、制御対象の同定問題への応用はほとんど行われていない。多項式システムの制御系設計問題への応用を目的として、観測データの解析に基づく新たなモデル化手法が提案されている。この同定アルゴリズムは制御される変数とその他の変数の観測データ集合から両者の関係を導出し、それをアフィンな多項式表現に落とし込むものである。

このように、実用的なシステムを考慮した場合、メカニカルシステムなどの非線形システムのダイナミクスの記述や近似などで、多項式システムは極めて有用である。ここでは、入力制約のある多項式システムに対して、安定化制御器とリアプノフ関数によって表現された DOA を導出する。これらの計算におい

ては、線形及び非線形システムに対する行列不等式の効果的な計算法を開発した。この計算法の基本的な考えは、リアプノフ安定定理（消散不等式）と単項式ベクトルを用いた多項式システムの線形表現の組み合わせを行うことである。この考えに基づき、制御問題が所謂 SOS 手法によって効果的に解くことが出来る凸最適化問題として定式化した。

(2) ディスクリプタ非多項式システムの安定化制御器の設計を行った。SOS 手法を非多項式システムの安定性解析に用いた。さらに、非多項式システムの DOA の推定のための戦略を提案した。この戦略は非線形項を未知要素を含んだ多項式項へと変換することが重要なカギになる。この未知要素は、非線形項の Taylor 展開を有限で打ち切った際の剰余項に対して、最悪の場合を考慮して定義される多角形に拘束されている。これらの手法はディスクリプタ非多項式システムの安定領域 DOA の推定および DOA を推定するための安定条件の導出に用いられる。しかしながら、安定化制御器を設計する際、設計パラメータに関する双線形の項が現われるため、この制御系設計問題に対して従来の線形行列不等式 (LMI: Linear Matrix Inequality) 手法を直接適用することができない。それゆえ、この問題をパラメータ検索問題と安定解析問題の二つに分割し、それらを同時に解く手法を採用する。パラメータ検索問題、すなわち、制御器のゲインとリアプノフ関数を求める問題に対して、鳥や魚群の振る舞いを模擬する粒子群最適化法 (PSO: Particle Swarm Optimization) を用いる。しかしながら、制御器のゲインとリアプノフ関数を求める問題の計算負荷はあまりに重く、従来の PSO では、膨大な計算時間を要する。このため、新たに並列非同期型 PSO (PAPSO: Parallel asynchronous particle swarm optimization) を用いた制御系設計法を開発する。これらの手法により、極めて単純で容易なディスクリプタ非多項式システムの制御系設計手法を開発する。この提案手法は安定化制御器の設計と DOA の推定の両方を容易に実現する。提案手法の有用性と妥当性はいくつかのシミュレーションによって示される。

(3) 多項式システムの制御系設計法を未知システムの制御問題へ適用した。また、並列非同期型 PSO (PAPSO) を人間機械系の制御問題へ適用した。

その数学モデルが未知の制御対象に対する制御系は強化学習やデータ駆動型設計法を用いて盛んに研究されてきた。強化学習は数学モデルを用いない制御系設計法としての可能性を有するが、閉ループ系の安定性を厳密に（理論的に）保証できないという問題点を有する。このため、モジュール型強化学習や複数モデルベース強化学習 (MMRL) が提案された。これらの手法においては、制御対象のモデルを学習する機能を有しており、モデルの学習と制御器の学習を同時に行うという点に特徴を有している。推定された制御対象のモデルは非線形モデルも許容するものであり、限定された領域ではあるが、安定性も保証されている。しかしながら、計算時間や狭い安定領域などの問題があり、実システムへの適用は行われていない。また、Bellman 方程式と TD 誤差を組み合わせた政策反復法が提案されている。この手法は理論的に安定性を保証する手法であるが、初期制御器が安定化制御器であることを前提としているため、実用化は困難である。

これらの複雑な手法に対して本研究では、未知システムを安定化するため、多項式状態フィードバックと SARSA 法を組み合わせた単純な制御手法を提案する。未知システムは GMDH によるデータマイニング手法によって任意の平衡点回りでアフィンな多項式システムで近似できる。多項式システムに対しては、多項式システム制御系設計手法を用いて、多項式状態フィードバックと安定領域 DOA を求める。一方、安定領域の外の領域では、SARSA 法によって設計された強化学習による制御を行う。強化学習の報酬は多項式システムの制御系設計で得られたリアプノフ関数によって与える。制御系の構造は、多項式システムの安定化制御と強化学習との切り替え制御である。すなわち、DOA 上では多項式状態フィードバックを用い、DOA の領域外では強化学習によって DOA への状態遷移制御が実行される。制御の切り替えは DOA の境界上

で行う。提案手法を Furuta 振子の安定化制御へ適用することで、その有用性と妥当性を確認した。

並列非同期粒子群最適化法 PPSO は複雑な非線形システムの制御系設計に対して極めて有効な手法である。本章では、PPSO を人間のハンドル操作を補助する半自動運転システムに適用する。自動車の運動学モデルは time-scaling 入力を用いることで、flat なシステムへ変換できる。Flat システムは非線形入力と変数変換で線形システムへと変換できる。この線形システムの目標軌道追従制御は線形制御により容易に設計できるが、操舵角が大きく振れるなどの問題が生じるため、線形制御のパラメータの設計に PPSO を用いる。PPSO により、安定な追従制御を実現し、指定した範囲内に操舵角を制限することが可能となった。提案手法を実際の自動車の 1/10 モデルに適用し、その有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Michihiro Kawanishi, Yuta Tsuge, Shi-Jia Pei, Tatsuo Narikiyo, Feedback Control for Steering Support System Based on Flatness and Particle Swarm Optimization, 査読有, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.10, No.2 2016, DOI:10.1299

Yuta Tsuge, Tatsuo Narikiyo and Michihiro Kawanishi, Controller Design for Nonlinear Descriptor Systems using Particle Swarm Optimization, 査読有, Control and Intelligent Systems, Vol.43, No.3, 2015, 134-143

Yuta Tsuge, Tanagorn Jennawasin, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Nonlinear Control of Partially Known Systems Based on Polynomial Representation and Reinforcement Learning, 査読有, IEEE Transactions on Electronics, Information and

Systems, Vol. 135, No.2, 2015, 215-224

[学会発表](計4件)

Yuta Tsuge, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Controller Design for Nonlinear Descriptor Systems using Parallel Asynchronous Particle Swarm Optimization, 査読有, Proceedings of 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration(SII 2014), Chuo University, Tokyo, Japan, December 13-15, 2014, 263-268

Tatsuo Narikiyo, Stabilizing Control of Nonlinear Descriptor Systems and Compliant Control of Legged Robots, Workshop on Recent Advances in Nonlinear Dynamical Systems and Robotics, June 17, NCHU, Taichung, Taiwan, 2014(招待講演) Yuta Tsuge, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo and Tanagorn Jennawasin, Nonlinear Controller Design Based on Polynomial and Non-polynomial Representation, 査読有, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Control & Automation, Taichung, Taiwan, June18-20,2014, 831-838

Yuta Tsuge, Tatsuo Narikiyo and Michihiro Kawanishi, Controller Design for Nonlinear Descriptor Systems using Particle Swarm Optimization, 査読有, Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Systems and Control(ISC2013), Marina del Rey, USA, November 11-13,2013, 211-21

6. 研究組織

(1)研究代表者

成清 辰生 (NARIKIYO, Tatsuo)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号 : 70231496