

令和元年6月10日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06154

研究課題名(和文) 離散力学と非線形最適化の融合による非線形システムの高速度・高精度制御

研究課題名(英文) High Speed and High Accuracy Control of Nonlinear Systems by Blending of Discrete Mechanics and Nonlinear Optimization

研究代表者

甲斐 健也 (Kai, Tatsuya)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・准教授

研究者番号：60419471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、「非線形システム」を主な制御対象とし、「離散力学」と「非線形最適化」を融合した、これまでにない新しい制御系設計手法の開発を目的として研究を進め、様々な成果を上げることができた。特に、従来の手法とは全く異なる新しい制御手法を開発し、実例に対する数値シミュレーションによってその有効性・優位性を示すことができた。そして、提案手法は現実世界において制御を必要とする様々な状況での応用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で提案された制御系設計手法は従来のものとは全く異なり、コンピュータとの親和性を重視した新しい手法であり、制御工学における学術的意義は高いといえる。さらに、本研究課題で得られた研究成果は非線形システムを扱う多くの分野へと応用可能であり、それ故に社会的意義のある研究課題であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the research project is to develop a new control synthesis method for nonlinear systems based on a blending of “discrete mechanics” and “nonlinear optimization,” and various results have been derived. Especially, a new control method, which is totally different from the existing results, has been developed, and some numerical simulations have indicated effectiveness and superiority of the new method. Furthermore, it is expected that the proposed new method is successfully applied to various situations that require control.

研究分野：制御工学

キーワード：離散力学 非線形最適化 非線形システム 非線形制御理論 最適制御理論 集中定数システム 分布定数システム 数値計算法

1. 研究開始当初の背景

世の中に存在するすべてのモノは、厳密には非線形の要素をもつ非線形システムであり、常/偏微分方程式の連続時間モデルを用いて振舞いが記述される。そして、その連続時間モデルに従って理論解析や制御系設計が行われているが、コンピュータは離散的な数値しか扱えない為、連続時間モデルから離散時間モデルへと近似を行ってからコンピュータ上で数値計算が行われる。しかし、その近似によって元の連続時間モデルが持つ特徴の損失や離散化誤差が発生し、シミュレーションや制御の場面において様々な数値的問題が発生することが良く知られている。

一方、非線形システムを連続時間を經由せずに、初めから離散モデルとして導出する研究が海外の研究者を中心に行われており、そのアプローチは一般に「離散力学(Discrete Mechanics)」と呼ばれている[West, Marsden ら 1998~]。離散力学では、離散 Hamilton の原理、離散 Euler-Lagrange 方程式、離散 Lagrange-d'Alembert の原理などの離散空間における新しい概念が提案され、それらはコンピュータへ直接適用が可能である。さらに離散力学は従来の離散化手法よりも数値誤差が小さい、大きなサンプリング間隔でも誤差が小さい、元の連続時間モデルの特徴(エネルギーや基本的な物理法則等)を保存する、シンプレクティック写像性を持つ、などといった画期的な報告がされており、新しい離散モデリングツールとして大きな可能性を持っている(図1)。しかし、これらの理論は発展途上の段階にあり、特に制御工学との関連研究は皆無であった。そこで申請者は離散力学の非線形制御理論への応用を目指し、理論・応用の両面から様々な研究を行って、離散力学の制御分野での有効性を示してきた。さらに、離散力学は時間方向のみを離散化したモデルを扱う為、主に常微分方程式で記述されるような集中定数系のみにはしか用いることができなかったが、時間方向だけではなく空間方向へも離散化を行い、偏微分方程式で記述される分布定数系への拡張を行った。しかしながら、集中定数系・分布定数系を含む一般的な非線形システムに対して、離散力学を用いた統一的な制御系設計手法はまだ得られていなかった。本来、連続時間の場合における最適制御問題は無限次元最適化問題として定式化され、これは一般的に解くことは非常に難しい。しかし、離散力学のモデルは有限次元のモデルとして記述され、その最適制御問題は有限次元の非線形最適化問題として定式化される為、比較的容易に解くことができる。さらに、制約条件を加えることも可能である。そこで、離散力学と非線形最適化を融合させた非線形システムに対する新しい制御系設計手法の発想を考えるに至った。

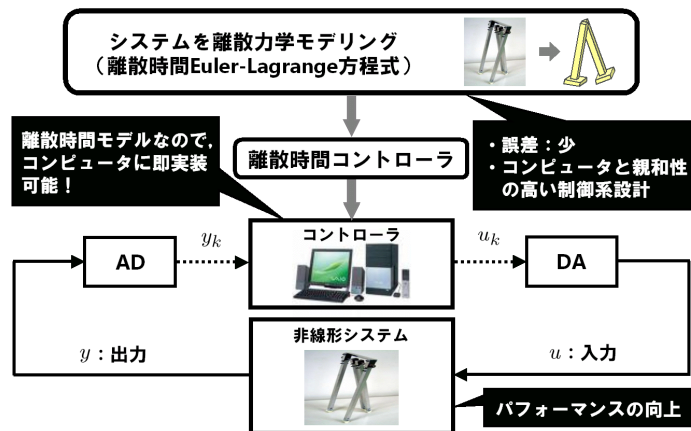


図1 離散力学アプローチの長所

2. 研究の目的

本応募研究課題では、「非線形システム」を主な制御対象とし、「離散力学」と「非線形最適化」を融合した、これまでにない新しい制御系設計手法の開発を目的としている。「離散力学」は他の離散化手法と比べて、数値誤差や物理的性質などの点において様々な長所を持つことが知られており、本アプローチによって得られる制御系設計法はコンピュータとの親和性が高いといえる。ゆえに、制御時において高速・高精度なパフォーマンスを実現することが期待される。さらに、非線形最適化手法を用いる為、等式・不等式で表される条件を組み込むことが用意にでき、制御時に要求される様々な制約条件を考慮することが可能である。提案手法は非線形システムを扱う多くの分野へと応用可能であり、学術的にも非常に意義のある研究課題であると考えられる。

3. 研究の方法

本応募研究課題「離散力学と非線形最適化の融合による非線形システムの高速度・高精度制御」の研究目的を達成するために、理論ならびに応用に関する以下のような具体的なテーマにより進めていく。

- (1) 集中定数系・分布定数系に対する離散力学の検証。本研究課題では、集中定数系・分布定数系に対する離散化手法である「離散力学」を主に扱う為、離散力学における概念や数理モデルについて再度検証を行う。特に重要な事項としては「離散ラグランジ

アン」離散Hamiltonの原理」離散Euler-Lagrange方程式」離散Lagrange-d'Alembertの原理」が挙げられ、これらのもつ特徴や理論解析などを行う。

- (2) 離散力学モデルに対する非線形最適制御問題の定式化・理論解析．離散力学を用いて得られたモデル(離散力学モデル)に対して、ある離散評価関数を設定し、その評価関数を最小化するような離散制御入力を求めるような、非線形最適制御問題の定式化を行う．特に評価関数の設定方法、システムに課される等式型・不等式型の拘束条件の取り扱い方法などに焦点を当てる．
- (3) 離散力学モデルに対する非線形最適制御問題に対する数値解法の開発．離散力学モデルに対する非線形最適制御問題は、有限次元の非線形最適化問題として定式化されるが、これを解いて最適制御入力を得るためには、効率的な数値解法が必要不可欠である．そこで、ニュートン法や逐次2次計画法などの既存の数値解法を基礎として、離散力学と親和性の高い数値解法を構築する．
- (4) フィードフォワード制御則・フィードバック制御則の構成方法の検討．はじめに制御目標を達成する制御入力を最初に一度に計算する「フィードフォワード制御法」の構成方法について考える．つぎに、(4)で得られた知見をもとにして、システムの状態を用いて制御則を変更していく「フィードバック制御則」の構成方法について考え、システムにおいてパラメータ誤差がある場合にも制御目標を達成するような制御系設計手法の開発を目指す．
- (5) 非線形システム的具体例に対するコンピュータシミュレーションによる有効性の検証．提案した制御手法を実際具体例に対して適用し、コンピュータシミュレーションによって制御が適切に行われているか確認を行う．取り扱う非線形システム的具体例としては、集中定数系では倒立振り子・2足歩行ロボット・マルチエージェントロボット・人工衛星、分布定数系では柔軟ビーム・柔軟構造物・単管熱交換器・液面・弦・梁・膜などが挙げられる．

4．研究成果

本研究課題では、上記の研究方法に基づいて、様々な研究を行った．その結果、以下に挙げられるような成果が得られた．

- (1) 自由境界条件をもつ1次元の分布定数力学システムに対して、時間方向・空間方向の両方を離散化し、離散Hamiltonの原理や離散変分を用いて、離散力学において最も基本的な運動方程式である「離散Euler-Lagrange方程式」と「離散境界方程式」を導出した．
- (2) 離散Euler-Lagrange方程式で表現される離散力学モデルに対し、評価関数を設定し、離散境界方程式を制約条件として設定することによって、安定化制御問題を有限次元非線形最適化問題へと帰着することができた．これは逐次2次計画法によって解くことが可能であることを示した．
- (3) 離散力学モデルが線形である場合、離散力学モデルの安定化制御問題は有限次元2次計画問題として表現できることを示し、この場合に高速で最適解を得るためのアルゴリズムを開発した．
- (4) 外乱やモデル化誤差が存在する場合にも有効なロバスト制御手法を目指し、(2)で提案された安定化制御問題を逐次的に解き、制御入力を更新していく「モデル予測型フィードバック制御」を開発した．
- (5) 1次元の場合では弦・梁、2次元の場合では膜に対して、上記提案手法を振動抑制制御問題へと適用した．その結果、システム全体で振動が抑えられ、安定化が実現されていることが数値シミュレーションによって確認できた．さらに、外乱やモデル化誤差が存在する場合にもフィードバック制御の効果によって、安定化が実現できることがわかった．
- (6) 上記では安定化制御問題のみを取り扱ってきたが、任意の信号への追従を行う「軌道追従制御問題」について取り組み、評価関数に実際の軌道と目標軌道との誤差を反映させることによって、軌道追従制御を可能にした．
- (7) 1次元の弦・梁に対して、任意の周期的波形を生成するような「波形生成制御問題」を取

り扱い，提案手法によって所望の周期的波形が生成できることが数値シミュレーションによって確認できた．

- (8) 2次元の膜に対して，膜面上に所望の文字を生成するような「文字生成制御問題」を取り扱い，提案手法によって所望の文字列が順番に生成でき，目視によって確認できることを数値シミュレーションによって確認した．

本研究課題を通して，非線形システムに対し，離散力学と非線形最適化を融合した新しい制御系設計手法が提案することができ，様々な興味深い研究成果を得ることができた．今後もさらなる発展に向けて研究を進めていく予定である．上記の研究成果は，国際誌・国内誌に複数採択され，現在も複数の論文が投稿中である．さらに，国際学会・国内学会においても複数の研究発表が行われている．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

[1] Tatsuya Kai, A New Efficient Obstacle Avoidance Control Method for Cars Based on Big Data and Just-In-Time Modeling, 査読有, Journal of Computer and Communications, Vol. 6, No. 11, pp. 12-22, 2018

[2] Tatsuya Kai, Robust Control of a 3D Space Robot with an Initial Angular Momentum Based on the Nonlinear Model Predictive Control Method, 査読有, International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol. 5, Issue 58, pp. 104-109, 2016

[3] Tatsuya Kai, Moving Obstacle Avoidance Control of Cars based on Big Data and Just-In-Time Modeling, 査読有, International Journal of Science and Engineering Investigations, Vol. 5, Issue 58, pp. 104-109, 2016

[4] Tatsuya Kai and Shunsuke Miyashita, A Just-In-Time Modeling Approach to Obstacle Avoidance Control of a Car, 査読有, International Journal of Advances in Mechanical & Automobile Engineering, Vol. 3, Issue 1, pp. 110-113, 2016

[5] Tatsuya Kai, Circular Obstacle Avoidance Control of the Compass-type Biped Robot based on a Blending Method of Discrete Mechanics and Nonlinear Optimization, 査読有, International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application, Vol. 4, No. 3, pp. 179-189, 2015

[6] Tatsuya Kai and Tomohiko Shibata, Gait Generation for the Compass-type Biped Robot on General Irregular Grounds via a New blending Method of Discrete Mechanics and Nonlinear Optimization, 査読有, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, Vol. 26, No. 5, pp. 484-492, 2015

〔学会発表〕(計32件)

[1] 甲斐 健也, 前原 光志, 知久 真吾, ハイブリッド振動子の設計と応用, 計測自動制御学会 第6回制御部門大会マルチシンポジウム, 熊本, Paper No.: 2D1-4, 2019年3月6-9日

[2] 前原光志, 甲斐 健也, あるクラスの多モード2次元区分的非線形システムに対するリミットサイクル制御, 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 東京, pp. 101-106, 2019年1月24~25日

[3] 八住 拓利, 甲斐 健也, 離散力学と非線形最適化の融合による分布定数力学システムに対する軌道追従制御, 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 東京, pp. 95-100, 2019年1月24~25日

[4] 佐藤 心洋, 甲斐 健也, Particle Swarm Optimization に基づくパーガーズセルオートマトン交通流モデルの最適信号制御 -セル内の車が複数台の場合への拡張-, 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 東京, pp. 91-94, 2019年1月24-25日

[5] 甲斐 健也, 前原 光志, 円形状リミットサイクルをもつ区分的非線形振動子の一設計法, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 札幌, pp. 11-16, 2019年1月23-24日

[6] 甲斐 健也, 佐藤 心洋, Particle Swarm Optimization に基づくパーガーズセルオートマ

トン交通流モデルの最適信号制御, 第 24 回交通流と自己駆動粒子系のシンポジウム, 名古屋, pp. 37-40, 2018 年 12 月 6-7 日

[7] 甲斐 健也, 知久 真吾, 前原 光志, 多角形状リミットサイクルをもつ区分的アファイン振動子, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, Paper No.: GS05-01, 2018 年 11 月 25-27 日

[8] 甲斐 健也, 知久 真吾, 前原 光志, 多角形状リミットサイクルをもつ区分的アファイン振動子, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会, Paper No.: GS05-01, 2018 年 11 月 25-27 日

[9] Tatsuya Kai and Kouhei Yamaki, A Discrete Mechanics Approach to Vibration Suppression Control of Free-fixed Euler-Bernoulli Beams, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2018, Tarragona (Spain), pp. 423-426, September 2-6, 2018

[10] Tatsuya Kai, A Limit Cycle Control Method for Multi-modal and 2-dimensional Piecewise Affine Systems - State Feedback Control Case, The 17th annual European Control Conference, Limussol (Cyprus), pp. 428-434, June 12-15, 2018

[11] 甲斐 健也, 奥平 いくみ, 泉 幸祐, 多モード 2 次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御 -出力フィードバック制御の場合-, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, 東京, Paper No.: ps-53, 2018 年 03 月 08-11 日

[12] 八巻 航平, 甲斐 健也, 離散力学と非線形最適化の融合による分布定数力学システムのモデル予測制御, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, 東京, Paper No.: ps-53, 2018 年 03 月 08-11 日

[13] 泉 幸祐, 甲斐 健也, 奥平 いくみ, 多モード 2 次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御と 2 タンクシステムへの応用, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, 東京, Paper No.: ps-52, 2018 年 03 月 08-11 日

[14] 廣川 俊彦, 甲斐 健也, 強化学習に基づいたヒューマノイドロボットの全身運動生成, 計測自動制御学会 第 5 回制御部門大会マルチシンポジウム, 東京, Paper No.: ps-22, 2018 年 03 月 08-11 日

[15] Tatsuya Kai and Kousuke Izumi, An Analytic Solution to the Limit Cycle Control Problem for Multi-modal and 2-dimensional Piecewise Affine Systems, The SICE Annual Conference 2017, Kanazawa (Japan), pp. 365-368, September 19-22, 2017

[16] Tatsuya Kai and Kouhei Yamaki, Discrete Mechanics for 1-dimensional Distributed Parameter Mechanical Systems under Free Boundary Conditions and Its Application to Vibration Suppression Control of Free-fixed Strings, The SICE Annual Conference 2017, Kanazawa (Japan), pp. 361-364, September 19-22, 2017

[17] 甲斐 健也, 泉 幸祐, 多モード 2 次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御問題における設計条件の緩和, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 沖縄, pp. 7-12, 2017 年 07 月 13-14 日

[18] 甲斐 健也, 八巻 航平, 離散力学と非線形最適化の融合による片端固定 Euler-Bernoulli 梁の振動抑制制御, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 沖縄, pp. 1-6, 2017 年 07 月 13-14 日

[19] 甲斐 健也, 八巻 航平, 分布定数力学システムに対する自由境界条件下での離散力学の導出と片端固定弦の振動抑制制御への応用, 計測自動制御学会 第 4 回制御部門マルチシンポジウム, 岡山, Paper No.: 1A1-4, 2017 年 03 月 06-09 日

[20] 甲斐 健也, 泉 幸祐, 多モード 2 次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御 -状態フィードバック制御の場合-, 計測自動制御学会 第 4 回制御部門マルチシンポジウム, 岡山, Paper No.: 1A1-3, 2017 年 03 月 06-09 日

[21] 甲斐 健也, 泉 幸祐, 多モード 2 次元区分的アファインシステムに対するリミットサイクル制御問題の解析解と存在条件, 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 東京, pp. 109-114, 2017 年 01 月 26-27 日

[22] Tatsuya Kai and Kouhei Yamaki, Development of Discrete Mechanics for 2-dimensional Distributed Parameter Mechanical Systems and Its Application to Vibration Suppression Control of a Film, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2016, Yugawara (Japan), pp. 638-641, November 27-30, 2016

[23] Tatsuya Kai and Kouhei Yamaki, Vibration Suppression Control of an Euler-Bernoulli Beam via a New Blending Method of Discrete Mechanics and Nonlinear Optimization, The SICE Annual Conference 2016, Tsukuba (Japan), pp. 1087-1090, September 20-23, 2016

[24] Tatsuya Kai, Kouhei Yamaki, and Shunpei Koike, Development of Discrete Mechanics for Distributed Parameter Mechanical Systems and Its Application to Vibration Suppression Control of a String, The 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Lisbon (Portugal), pp. 492-498, July 29-31, 2016

[25] Tatsuya Kai and Shunsuke Miyashita, A Just-In-Time Modeling Approach to Obstacle Avoidance Control of a Car, International Conference on Artificial Intelligence and Manufacturing Engineering, London (United Kingdom), pp. 16-21, July 26-27, 2016

[26] 甲斐 健也, 離散力学の基礎理論と制御工学への応用, 日本応用数理学会 研究集会「常微分方程式の数値解法とその周辺」2016, 大阪, 2016年07月04-06日

[27] 蜂須賀 貴重, 甲斐 健也, モデル予測制御法に基づくディスクリプタ形式で表現された宇宙ロボットの姿勢整定制御, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: B-1, 2016年06月12日

[28] 根岸 裕太郎, 甲斐 健也, マルチエージェントシステムに対するフォーメーション度を考慮した障害物回避制御, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: B-12, 2016年06月12日

[29] 越川 知大, 甲斐 健也, スライディングモード制御法に基づく電気自動車に対するスリップ防止制御, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: B-11, 2016年06月12日

[30] 八巻 航平, 甲斐 健也, 2次元分布定数力学システムに対する離散力学の提案と膜の振動抑制制御への応用, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: A-10, 2016年06月12日

[31] 宮下 隼丞, 甲斐 健也, ビッグデータを活用したジャストインタイムモデリングに基づく車の障害物回避制御, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: A-8, 2016年06月12日

[32] 廣川 俊彦, 甲斐 健也, 強化学習による2足歩行ロボットの転倒回復動作獲得, 2016年電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティ大会, 東京, Paper No.: A-7, 2016年06月12日

〔図書〕(計1件)

[1] 川田 昌克, 東 俊一, 市原 裕之, 浦久保 孝光, 大塚 敏之, 甲斐 健也, 國松 禎明, 澤田 賢治, 永原 正章, 南 裕樹, 森北出版, 倒立振子で学ぶ制御工学, 2017年, 240ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ウェブサイト:

<https://www.tus.ac.jp/ridai/doc/ji/RIJIA01Detail.php?act=nam&kin=ken&diu=66da>

6. 研究組織

(1)研究分担者: なし

(2)研究協力者: なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。