

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760339

研究課題名(和文) 超離散力学アプローチによる非線形分布定数系に対する高精度制御法の開発

研究課題名(英文) Development of High-Accuracy Control Methods for Nonlinear Distributed Parameter Systems based on Ultra-Discrete Mechanics

研究代表者

甲斐 健也 (KAI, TATSUYA)

東京理科大学・基礎工学部・講師

研究者番号：60419471

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、非線形分布定数系に対する新しい数値計算法である「離散力学」の理論構築と制御工学への応用を目的として研究を進め、様々な成果を挙げることができた。特に、従来の制御手法とは全く異なる、離散力学に基づいた新しい制御手法を開発し、数値シミュレーションによって有効性を示すことができた。ゆえに、提案手法は制御を必要とする様々な場面において応用が期待されるといえる。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at development of “discrete mechanics” as a new numerical method for nonlinear distributed parameter systems and applications to control engineering. In this research project, we have derived some new results on discrete mechanics. Especially, we have proposed a new control method based on discrete mechanics, which is totally different from the existing ones, and shown the effectiveness of the new methods via numerical simulations. Therefore, the proposed method is expected to be applicable in various situations.

研究分野：制御工学

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

### 1. 研究開始当初の背景

世の中に存在するモノは厳密にはすべて非線形の要素を持ち、連続時間モデルの非線形微分方程式として記述される。そのようなモデルをコンピュータ上で扱うためには、連続時間モデルを離散化して離散時間モデルへと近似を行う必要がある。しかし、その離散化によって、システムの特徴の損失や数値誤差などが発生し、数値シミュレーション時の数値的不安定現象や、実装時のパフォーマンスの低下などが発生することが知られている。

一方、非線形集中定数系に対して、「離散時間力学」なる新しい離散化手法が近年提案され、これは他の離散化手法に比べ、様々な優れた長所を持っていることが知られている。そこで、離散時間力学の制御工学への応用を目指して様々な研究を行い、一定の成果を得た。しかし、このようなアプローチは集中定数系のみを対象としており、分布定数系への拡張は行われていなかった。そこで、非線形分布定数系に対して離散力学を構築し、さらに制御工学への応用を目指して、本研究課題を計画するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、一般的に制御することが非常に難しいと知られ、柔軟構造物・熱交換器・膜・梁・液面などに代表される「非線形分布定数系」に対し、「離散力学」という新しいアプローチで取り組み、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と予想され、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く、高精度なパフォーマンスを実現することが期待される。提案した手法は非線形分布定数系を扱う様々な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いえる。

### 3. 研究の方法

本研究課題においては、以下のような大まかに5つの方法に従って研究が行われる。

- (1) 離散力学の理論構築：集中定数系に対して開発された「離散時間力学」は時間方向のみの離散化を行うが、空間方向へも離散化を行うことによって、分布定数系に対する「離散力学」を構築する。
- (2) 離散力学モデルの理論解析：離散力学によって得られた「離散 Euler-Lagrange 方程式」がもつ性質について理論的に解析を行う。特に数値安定性や他の数値計算法との関係性について調べる。
- (3) 数値シミュレーションによる検証：離散

Euler-Lagrange 方程式を様々な条件下で数値シミュレーションし、連続時間モデルの偏微分方程式の振る舞いと比較を行う。離散力学モデルの妥当性を検証する。さらに数値計算法としての性質についても調べる。

- (4) 最適制御問題の定式化・解法：離散力学モデルに対して目的関数や制約条件を設定することによって最適制御問題を定式化する。
- (5) 物理例への応用：1次元分布定数系の物理例として弦や梁などが挙げられ、これらに対して本研究課題で開発した制御手法を適用する。さらに様々な条件下において制御シミュレーションを行うことによって、提案手法の有効性を確認する。

### 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、以下に挙げるような成果が得られた。

- (1) 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、離散力学においてもっとも重要な運動方程式である「離散 Euler-Lagrange 方程式」を導出することができた。さらに、外力を考慮するために「離散 Lagrange-d'Alembert の原理」を導出し、外力が存在する場合への拡張を行うことができた。
- (2) 分布定数系の物理例である弦や梁に対して、von Neumann の安定性条件を導出することができた。また、様々な条件下で数値シミュレーションを行い、離散力学モデルの妥当性を示すことができた。
- (3) 制御入力項を含む離散力学モデルに対して、目的関数や制約条件を設定することによって、非線形最適制御問題を定式化することができた。これは有限次元非線形最適化問題で記述されているため、逐次2次計画法などの数値計算法で解くことが可能である。
- (4) 物理例である弦や梁に対する振動抑制制御問題に取り組んだ。弦と梁に制御入力が発生できるアクチュエータが1箇所のみ設置し、その制御入力のみを用いて振動を0にするような難易度の高い問題を設定した。(3)の非線形最適制御手法を適用した結果、弦・梁ともに振動が抑制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、提案手法の有効性が示された。

(5) これまでに得られた結果は1次元の非線形分布定数系に限定されたものであるが、これを2次元の場合へと拡張する試みを行った。(1)の手法を拡張し、2次元空間を離散化していくことによって、離散力学を構築した。また、2次元分布定数系の物理例である膜の数値シミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証した。

本研究課題を通して、非線形分布定数系に対して「離散力学」なる新しい数値計算法、ならびに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結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

(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19件)

[1] 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, Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 査読有, 採択済, 2015

[2] Tatsuya Kai: Real-time Control of a 3D Space Robot with an Initial Angular Momentum, International Journal of Engineering Research and Industrial Applications, 査読有, Vol. 7, No. 3, pp. 137-151, 2014  
URL:[http://www.ascent-journals.com/ijeria\\_contents\\_Vol7No3.html](http://www.ascent-journals.com/ijeria_contents_Vol7No3.html)

[3] Tatsuya Kai: Partial Integrability Conditions and an Integrating Algorithm for Fully Rheonomous Affine Constraints, Circuits and Systems, 査読有, Vol. 5, No. 6, pp. 133-141, 2014  
DOI: 10.4236/cs.2014.56015

[4] Tatsuya Kai and Kazuho Tamaki: A Nonlinear Robust Control Approach to Stabilization of the Quantum 1/2 Spin System Represented by a Real-type Stochastic Differential Equation, International Journal of Engineering Research and Industrial Applications, 査読有, Vol. 7, No. 2, pp. 175-185, 2014  
URL:[http://www.ascent-journals.com/ijeria\\_contents\\_Vol7No2.html](http://www.ascent-journals.com/ijeria_contents_Vol7No2.html)

[5] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: A New Gait Generation Method on Slopes for the Compass-type Biped Robot via Discrete Mechanics, International Journal of Mathematical Sciences and Engineering Applications, 査読有, Vol. 8, No. 2, pp. 271-294, 2014

URL:[http://www.ascent-journals.com/ijms\\_ea\\_contents\\_Vol8No2.html](http://www.ascent-journals.com/ijms_ea_contents_Vol8No2.html)

[6] Tatsuya Kai: Modeling and Analysis of Nonholonomic Dynamic Systems with a Class of Rheonomous Affine Constraints, Nonlinear Dynamics, 査読有, Vol. 76, Issue. 2, pp. 1411-1422, 2014

DOI: 10.1007/s11071-013-1218-8

[7] Tatsuya Kai and Kensuke Bito: A New Discrete Mechanics Approach to Swing-up Control of the Cart-Pendulum System, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 査読有, Vol. 19, pp. 230-244, 2014

DOI:10.1016/j.cnsns.2013.05.021

[8] Tatsuya Kai: An Integrating Algorithm and Theoretical Analysis for Fully Rheonomous Affine Constraints: Completely Integrable Case, Applied Mathematics, 査読有, Vol. 4, No. 12, pp. 1720-1725, 2013  
DOI: 10.4236/am.2013.412235

[9] Tatsuya Kai: A New Limit Cycle Generation Method and Theoretical Analysis for Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Systems, International Journal of Mathematical Sciences and Engineering Applications, 査読有, Vol. 7, No. 6, pp. 15-35, 2013

URL:[http://www.ascent-journals.com/ijms\\_ea\\_contents\\_Vol7No6.html](http://www.ascent-journals.com/ijms_ea_contents_Vol7No6.html)

[10] Tatsuya Kai: Limit Cycle Generation for Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Control Systems, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 査読有, Vol. 4, No. 9, pp. 200-206, 2013  
DOI:10.14569/IJACSA.2013.040931

[11] Tatsuya Kai: Experimental Comparison between Nonholonomic and Vakonomic Mechanics in Nonlinear Constrained Systems, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, Vol. 4, No. 4, pp. 482-499, 2013  
DOI: 10.1587/nolta.4.482

[12] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: A

Discrete Mechanics Approach to Gait Generation on Periodically Unlevel Grounds for the Compass-type Biped Robot, International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 査読有, Vol. 2 No. 9, pp. 43-51, 2013  
DOI:10.14569/IJARAI.2013.020908

[13] Tatsuya Kai: On Integrability of Fully Rheonomous Affine Constraints, International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application, 査読有, Vol. 2, No. 2, pp. 130-134, 2013  
DOI: 10.4236/ijmnta.2013.22016

[14] Tatsuya Kai: Limit-Cycle-Like Control for 2-Dimensional Discrete-time Nonlinear Control Systems and Its Application to the Henon Map, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 査読有, Vol. 2012, Vol. 18, pp. 171-183, 2013  
DOI:10.1016/j.cnsns.2012.06.012

[15] Tatsuya Kai: Theoretical Analysis for a Class of Rheonomous Affine Constraints on Configuration Manifolds - Part II : Foliation Structures and Integrating Algorithms, Mathematical Problems in Engineering, 査読有, Vol. 2012, Article ID 345942, 2012  
DOI:10.1155/2012/345942

[16] Tatsuya Kai: Theoretical Analysis for a Class of Rheonomous Affine Constraints on Configuration Manifolds - Part I : Fundamental Properties and Integrability/Nonintegrability Conditions, Mathematical Problems in Engineering, 査読有, Vol. 2012, Article ID 543098, 2012  
DOI: 10.1155/2012/543098

[17] Tatsuya Kai: Modeling and Passivity Analysis of Nonholonomic Hamiltonian Systems with Rheonomous Affine Constraints, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 査読有, Vol. 17, pp. 3446-3460, 2012  
DOI:10.1016/j.cnsns.2011.12.019

[18] Tatsuya Kai: Mathematical Modelling and Theoretical Analysis of Nonholonomic Kinematic Systems with a Class of Rheonomous Affine Constraints, Applied Mathematical Modelling, 査読有, Vol. 36, pp. 3189-3200, 2012  
DOI:10.1016/j.apm.2011.10.015

[19] Tatsuya Kai: Limit-Cycle-Like

Control for Planar Space Robot Models with Initial Angular Momenta, Acta Astronautica, 査読有, Vol. 74, pp. 20-28, 2012  
DOI:10.1016/j.actaastro.2011.12.024

[学会発表](計10件)

[1] Tatsuya Kai: A Limit Cycle Control Method for Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Control Systems, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2014, Luzern (Switzerland), pp. 711-714, September 14-18, 2014

[2] Tatsuya Kai: Obstacle Avoidance Control for the Compass-type Biped Robot via Discrete Mechanics: Circular Obstacle Case, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2014, Luzern (Switzerland), pp. 24-27, September 14-18, 2014

[3] 甲斐 健也, 高橋 知彰: 分布定数力学システムに対する外力を考慮した離散力学の提案, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 京都テルサ, Paper No.: 112-4, 2014年05月21-23日

[4] 甲斐 健也: 力学システムにおける離散構造: 離散力学とその応用, 計測自動制御学会 第1回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 電気通信大学, Paper No.: 7C5-4, 2014年03月04-07日

[5] 甲斐 健也: 多モード2次元区分的アフィン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 非線形問題研究会, 北海道, ニセコパークホテル, pp. 57-62, 2014年01月21-22日

[6] 甲斐 健也, 高橋 知彰: 分布定数力学システムに対する離散力学の提案, 第56回自動制御連合講演会, 新潟, 新潟大学, pp. 1633-1638, 2013年11月16-17日

[7] Tatsuya Kai: A New Limit Cycle Design Method of Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Systems, 6th International Conference "Advanced Computer Systems and Networks: Design and Application", Lviv (Ukraine), pp. 235-238, September 14-16, 2013

[8] 甲斐 健也: 離散時間力学と非線形最適化の融合によるコンパス型2足歩行ロボットに対する安定歩容生成, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 沖縄, 宮古島マリンターミナル, pp. 25-30, 2013年07月8-9日

[9] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: Gait Generation on Periodically Unlevel Grounds for the Compass-type Biped Robot via Discrete Mechanics, 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Dubrovnik (Croatia), pp. 1374-1381, October 03-05, 2012

[10] Tatsuya Kai: New Hamiltonian Formulation of Rheonomous Affine Constraints based on the Rheonomous Bracket, 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Dubrovnik (Croatia), pp. 1362-1368, October 03-05, 2012

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

甲斐 健也 (KAI TATSUYA)

東京理科大学・基礎工学部・講師

研究者番号：60419471