

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 18日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760332

研究課題名（和文） 離散時間力学に基づく離散構造を考慮した非線形制御理論の構築

研究課題名（英文） Development of Nonlinear Control Theory for Discrete Structure based on Discrete Mechanics

研究代表者

甲斐 健也（TATSUYA KAI）

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号：60419471

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、非線形力学システムの新しい離散化手法であり、様々な長所を持っている「離散時間力学」を制御工学へと応用し、計算機との親和性の高い制御手法の確立を目的とした。その結果、従来の手法とは全く異なる、離散時間力学に基づいた解析法や制御系設計法を提案し、数値シミュレーション・実機実験で提案手法の有効性を示すことができた。さらに、「離散構造を考慮した非線形制御理論」という、これまでに意識されていなかった新しい問題を提起することができた。

研究成果の概要（英文）：

This research project aims at application of discrete mechanics, which is one of the discretizing methods for nonlinear mechanical systems and has various advantages, to control engineering, and development of control strategies that have high compatibility with computers. As a result, I have proposed analysis and synthesis methods based on discrete mechanics, which are totally different from existing ones, and the effectiveness of them has been shown via numerical simulations and experiments. Moreover, I can raise a new problem “nonlinear control theory based on discrete structure,” which has not been given much thought to so far.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：非線形制御理論，力学システム，ロボット，離散時間力学，離散構造

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

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システムであり、連続時間モデルとして、常/偏微分方程式として記述される。そのモデルを用いて制御系設計・数値シミュレーション・実装などが行われるが、その際にはコンピュータが必要不可欠である。しかし、コンピュータは離散的な数値しか扱えないため、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、その離散化プロセスにおける近似によって、システムの特徴の損失や数値誤差などが発生し、それが原因となり、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危惧される。

一方、「離散時間力学」と呼ばれる力学システムに特化した新しい離散化手法が近年提案され、これは他の手法に比べ、様々な優れた長所を持っていることが知られている。しかし、離散時間力学の研究はまだ発展途上の段階にあり、制御工学への応用はほとんどされていない。そこで、離散時間力学の制御工学への応用を行い、計算機との親和性の高い制御系設計法の開発を目指して、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、近年提案された新しい離散化手法である「離散時間力学」に基づき、「離散構造を考慮した非線形制御理論」の構築を目的としている。このような考えに基づく研究課題はこれまでほとんど考えられて来なかったといえ、本研究課題を進めることによって、計算機の特性を十分に発揮できる制御系設計法が確立でき、大規模化・複雑化・細密化していくシステムの制御に対する有効な新しいアプローチになると考えられる。さらに制御工学以外の様々な分野や産業界への貢献も期待できる。

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4つの方法に従って研究が行われる。

- (1) 基礎的解析：離散時間力学の持つ特徴を数学や物理学のツールを用いて解析する。特に離散時間力学モデルの陰関数方程式の可解性、数値計算法としての特徴の調査などが挙げられる。
- (2) 離散時間力学モデルの制御系設計：離散時間力学モデルに対し、安定化コントロ

ラの設計法を開発する。その際に最適レギュレータ理論などの解析的手法、また非線形最適化手法に基づく数値的手法など、様々なアプローチを考える。

- (3) 連続時間入力への変換：上記(2)を用いることによって離散時間入力を得ることができるが、最終的に実機に実装する際には連続時間入力の形でなければならない。そこで離散時間力学の理論に基づいて、離散時間入力から連続時間入力へ変換する手法を開発する。連続時間入力の形としては、実装がしやすい零次ホールド型や一次ホールド型などを想定している。
- (4) 数値シミュレーションや実機実験：これまでに提案された制御系設計法を具体的な制御対象（倒立振子やヒューマノイドロボットなど）へと応用し、数値シミュレーションならびに実機実験を通して有効性を確認する。また、従来手法との比較を行い、提案手法の長所を調査する。

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、以下のような成果が得られた。

- (1) 離散時間力学モデルは一般的に陰関数方程式を含むことが分かっているが、それが陽関数となるための条件を導出した。さらに、具体的なシステムに対して、陽関数条件をシステムのパラメータを用いたて導出することができた。
- (2) 台車型倒立振子を離散時間力学でモデリングし、その線形近似システムを用いることによって、安定化コントローラを導出し、数値シミュレーションで有効性を示した。
- (3) 台車型倒立振子に対して、離散時間入力を連続時間零次ホールド型入力に変換する手法を提案し、数値シミュレーションならびに実機実験を通して、有効性を確認した。さらに、従来手法との比較を行い、いくつかの長所を持っていることが分かった。
- (4) 台車型倒立振子の振り上げ制御問題に対し、振り上げ領域と安定化領域から成る2段階制御法、そして有限次元最適化問題に帰着する数値解法の2種類を提案し、

数値シミュレーションによって制御目標が達成されることを確認した。

- (5) ヒューマノイドロボットの簡単なモデルである、コンパス型2足歩行ロボットに対し、安定な歩容を生成する問題を有限次元最適化問題として定式化した。さらに、最適化問題を解いて得られた離散時間入力を連続時間零次ホールド型入力へと変換する手法を用いて、数値シミュレーションを行った結果、平地だけではなく、下り坂・上り坂・不整地でも安定な歩容が生成できることを確認した。

本研究課題を通して、離散時間力学の制御工学への応用を行い、様々な興味深い研究結果を得ることができた。ゆえに「離散構造を考慮した非線形制御理論」の構築に向けて大きな礎ができたといえ、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て、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15件)

- [1] 甲斐 健也, 環 一穂: 初期角運動量をもつ2剛体宇宙ロボットに対する3次元姿勢準最適制御, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol. 45, No. 6, pp. 320-326, 2009
- [2] 甲斐 健也: アフライン拘束を受ける非ホロノミックハミルトニアンシステムのモデリングと受動性解析, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 22, No. 9, pp. 331-338, 2009
- [3] 甲斐 健也: 時変アフライン拘束を受ける非ホロノミックハミルトニアンシステムについて, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 23, No. 5, pp. 111-113, 2010
- [4] 甲斐 健也: モデル予測制御を用いた初期角運動量をもつ3次元2剛体宇宙ロボットに対する軌道追従制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 23, No. 6, pp. 136-138, 2010
- [5] 甲斐 健也, 近藤克則: 初期角運動量をもつ2剛体宇宙ロボットに対する3次元姿勢モデル予測制御とロバスト性の検証, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol. 46, No.

7, pp. 415-417, 2010

[6] 甲斐 健也: アフライン拘束を受ける非ホロノミックハミルトニアンシステムに対する一般化正準変換と受動性に基づく制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 23, No. 9, pp. 207-214, 2010

[7] 甲斐 健也, 原 辰次: アフライン拘束を受ける非ホロノミック運動学システムに対する非線形制御論的解析, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol. 46, No. 12, pp. 759-764, 2010

[8] Tatsuya Kai: Integrating Algorithms for Integrable Affine Constraints, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E94-A, No. 1, pp. 464-467, 2011

[9] 甲斐 健也, 原 辰次: アフライン拘束を受ける非ホロノミック動力学システムのモデリングと解析, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 24, No. 1, pp. 9-15, 2011

[10] Tatsuya Kai: Transformation and Chained Structure for a Class of Nonlinear Affine Control Systems, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E94-A, No. 6, pp. 1468-1472, 2011

[11] Tatsuya Kai and Kazuho Tamaki, A Near-Optimal Control Approach to 3D Ball-in-Socket Joint Space Robot Models with Initial Angular Momenta, Acta Astronautica, 査読有, Vol. 68, pp. 1702-1711, 2011

[12] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: A Discrete Mechanics Approach to Gait Generation for the Compass-Type Biped Robot, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, 査読有, Vol. 2, No. 4, pp. 533-547, 2011

[13] Tatsuya Kai and Ryo Masuda: Limit Cycle Synthesis of Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Systems, Mathematical and Computer Modelling, 査読有, Vol. 55, pp. 505-516, 2012

[14] Tatsuya Kai: Control of the Cart-Pendulum System based on Discrete

Mechanics - Part I : Theoretical Analysis and Stabilization Control -, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E95-A, No. 2, pp. 525-533, 2012

[15] Tatsuya Kai, Kensuke Bito, and Takeshi Shintani: Control of the Cart-Pendulum System based on Discrete Mechanics - Part II : Transformation to Continuous-time Inputs and Experimental Verification -, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, Vol. E95-A, No. 2, pp. 534-541, 2012

[学会発表] (計20件)

[1] 甲斐 健也, 勝田 真登: 2次元離散時間非線形システムに対するリミットサイクル制御とカオス制御への応用, 第53回システム情報制御学会研究発表講演会, 神戸, pp. 449-450, 2009年05月21日

[2] 甲斐 健也, 尾藤 健介: 離散時間力学モデリングされた台車型倒立振り子に対する振り上げ制御則の一構成法, 計測自動制御学会 第38回制御理論シンポジウム, 大阪, pp. 87-92, 2009年09月14日

[3] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: Stabilization Control and Experiments of the Cart-Pendulum based on Discrete Mechanics, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application, Sapporo (Japan), pp. 82-85, October 19, 2009

[4] Tatsuya Kai and Masato Katsuta: Limit Cycle Control for 2-Dimensional Discrete-time Nonlinear Control Systems and Its Application to Chaos Systems, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application, Sapporo (Japan), pp. 86-89, October 19, 2009

[5] Tatsuya Kai and Kazuho Tamaki: 3D Attitude Near-Optimal Control of a Universal Joint Space Robot Model with Initial Angular Momentum, The Seventh IEEE International Conference on Control and Automation, Christchurch (New Zealand), pp. 2335-2340, December 11, 2009

[6] 甲斐 健也, 近藤 克則: 初期角運動量を持つ2剛体宇宙ロボットに対する3次元姿勢モデル予測制御, 初期角運動量を持つ2剛体

宇宙ロボットに対する3次元姿勢モデル予測制御, 計測自動制御学会 第10回制御部門大会, 熊本, 2010年03月18日

[7] 甲斐 健也, 新谷 勇志: 離散時間力学モデリングされたコンパス型2足歩行ロボットに対する離散時間歩容生成, 第54回システム情報制御学会研究発表講演会, 京都, pp. 271-272, 2010年05月20日

[8] Tatsuya Kai and Kazuho Tamaki: Control of a 3D Ball-in-Socket Joint Space Robot Model with Initial Angular Momentum based on the Near-Optimal Control Algorithm, 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Bologna (Italy), pp. 957-962, September 02, 2010

[9] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: Discrete Gait Generation for the Compass-Type Biped Robot Modeled by Discrete Mechanics, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application, Krakow (Poland), pp. 434-437, September 07, 2010

[10] Tatsuya Kai and Kazunori Kondoh, Attitude Stabilization Control of 3D Space Robot Model with Initial Angular Momentum via Model Predictive Control, International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application, Krakow (Poland), pp. 438-441, September 07, 2010

[11] 甲斐 健也, 新谷 勇志: 離散時間力学に基づいたコンパス型2足歩行ロボットに対する歩容生成法, 計測自動制御学会 第39回制御理論シンポジウム, 大阪, pp. 89-94, 2010年09月27日

[12] 甲斐 健也, 増田 亮: 所望のリミットサイクルを発生する2次元区分的アファインシステムの一設計法, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 大阪, pp. 85-90, 2010年10月29日

[13] 甲斐 健也, 新谷 勇志: 離散時間力学に基づいたコンパス型2足歩行ロボットに対する坂道での歩容生成法, 計測自動制御学会 第11回制御部門大会, 沖縄, 2011年03月16日

[14] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: Discrete Mechanics Approach to Gait Generation for the Compass-type Biped Robot, 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), pp. 8101-8107, August 31, 2011

[15] Tatsuya Kai: Modeling and Passivity Analysis of Nonholonomic Hamiltonian Systems with Time-varying Affine Constraints, 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), pp. 13462-13467, September 2, 2011

[16] Tatsuya Kai and Kensuke Bito: Swing-up Control of the Cart-Pendulum System based on Discrete Mechanics, SICE Annual Conference 2011, Tokyo (Japan), pp. 1914-1919, September 16, 2011

[17] 甲斐 健也: レオノーマスアファイン拘束を受ける非ホロノミックハミルトニアシステムについて, 計測自動制御学会 第40回制御理論シンポジウム, 大阪, pp. 125-130, 2011年09月26日

[18] Tatsuya Kai and Takeshi Shintani: A Gait Generation Method for the Compass-type Biped Robot on Slopes via Discrete Mechanics, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando (USA), pp. 675-681, December 12, 2011

[19] Tatsuya Kai: A Model Predictive Control Approach to Attitude Stabilization and Trajectory Tracking Control of a 3D Universal Joint Space Robot with an Initial Angular Momentum, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando (USA), pp. 3547-3552, December 13, 2011

[20] Tatsuya Kai and Ryo Masuda: A Limit Cycle Synthesis Method of Multi-Modal and 2-Dimensional Piecewise Affine Systems, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando (USA), pp. 4759-4764, December 14, 2011

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計0件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 健也 (KAI TATSUYA)
九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教
研究者番号 : 60419471

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし