

平成21年 5月 14日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760321

研究課題名(和文) アファイン拘束を考慮した新しい非線形制御理論

研究課題名(英文) A New Nonlinear Control Theory Considering Affine Constraints

研究代表者

甲斐 健也 (KAI TATSUYA)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60419471

研究成果の概要：本研究課題では、これまでほとんど考慮されることが無い「アファイン拘束」を受ける物理システムに対して、モデリング手法の確立、ならび非線形制御理論を用いた解析・設計を目的とした。その結果、今まで研究の行われていた「線形拘束」の結果を包含し、さらにそれを超えるような新しい結果・知見を導くことが出来た。この結果により、非ホロノミックシステム研究の新しい一分野が確立され、また非線形制御理論の分野において新たな問題提起が行えたといえる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	330,000	3,530,000

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、非ホロノミックシステム、アファイン拘束

1. 研究開始当初の背景

非線形制御理論の研究において、非ホロノミックシステムは移動体やロボットの制御と関連して、以前より注目されてきた。その中で、理論・応用の両面から数多くの研究が精力的に行われてきた。しかし、そのほとんどは、車・トレーラ・ホッピングロボットなどに代表される「線形拘束」を対象とした研究である。

一方、線形拘束にアファイン項が付加されているような「アファイン拘束」も実際に存在し、初期角運動量を持つ宇宙ロボット、流

れる川の上のボート、回転盤上の球・コイン、などはその物理例である(図1)。しかし、このようなアファイン拘束を受ける物理システムの研究は、これまで世界的に見てもほとんど行われていなかった。アファイン拘束は線形拘束を包含するさらに広いクラスの拘束条件であり、これまでに線形拘束に対して知られていた結果を越えるような理論展開の可能性を秘めていると考えた。そこで、アファイン拘束を制御理論の立場から、理論構築を行うことを考え、本研究課題を思いつくに至った。

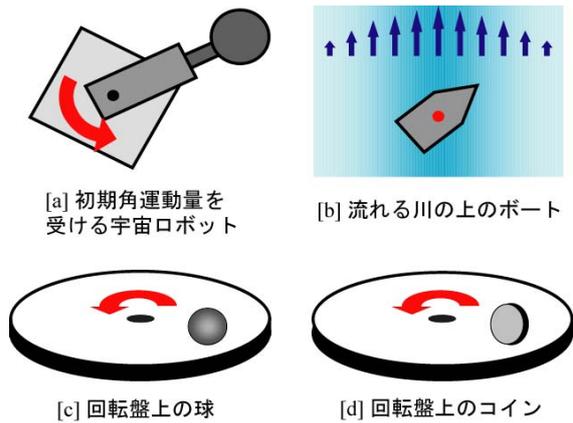


図1 アファイン拘束の物理例

2. 研究の目的

本研究課題では、これまで世界的にもほとんど扱われることが無かったアファイン拘束に対して、制御理論の立場からモデリング・解析・制御系設計などを行い、非線形制御理論の分野において、新しい知見を与え、これまでには存在しなかった新しい問題を提起することを目的としている。このような理論を構築することによって、これまですでに研究が行われてきた線形拘束に対する結果を包含し、さらに超越するような結果が得られ、制御工学だけではなく、ロボット工学などの応用分野へも新しい理論を提供できると考えている。

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3つの方法に従って研究が行われる。

- (1) モデリング：数学や物理学のツールを用いることによって、制御理論を適用する上で重要な、アファイン拘束を受けるシステムの数理モデルを導出する。具体的には、制御理論でよく扱われることが多い、運動学システム・動力学システム・ハイブリッドシステムなどのモデリングを行う。
- (2) システムの解析：システムを上手く制御するには、そのシステムを持つ特徴を解析することが重要である。そこで、アファイン拘束を受けるシステムに対して、非線形制御理論に基づく理論的解析を行う。特に可到達性・可制御性・可安定性などの基本的な性質について調べる。
- (3) 制御系設計・検証：システムを持つ性質に基づき、制御目的の設定ならびに制御

系の設計を行う。また、数値シミュレーションを実行することより、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、以下のような成果が得られた。

- (1) アファイン拘束を受けるシステムのモデリングを行い、運動学システム・動力学システム・ハミルトニアンシステムの3種類のモデルを得ることが出来た。これらは従来研究が行われてきた線形拘束の場合を含む、さらに広いクラスを表すモデルとなっている。
- (2) アファイン拘束を受ける運動学/動力学システムに対して、可到達性・可制御性・可安定性に関する解析を行い、ある条件下でシステムは可制御・可安定となることを示した。この結果は線形拘束の場合では知られておらず、アファイン拘束まで広いクラスを考えることによって得られた新しい知見といえる。この研究結果に対して、計測自動制御学会から制御部門部門大会賞が授与されている。
- (3) アファイン拘束を受ける運動学システムに対して、拡張チェインドフォームを提案し、変換則を導出した。それを用いて、「回転盤上のコイン」を目標状態へ遷移させる制御アルゴリズムを確立し、数値シミュレーションによって有効性を示した。
- (4) アファイン拘束を受けるハミルトニアンシステムに対して、拡張チェインドフォームを用いた一般化正準変換を提案し、受動的となるための条件ならびに受動性を利用した制御則の導出を行った。そして、「回転盤上のコイン」を目標状態まで遷移させる制御アルゴリズムを示し、数値シミュレーションで有効性を検証した。
- (5) 非線形アファインシステムに対して、フーリエ基底を用いた最適制御問題と準最適制御問題の間の理論的な関係を導き、準最適制御アルゴリズムを確立した。その結果を「初期角運動量を持つ3次元宇宙ロボット」に対して適用し、目標時刻に目標姿勢へと遷移できることを数値シミュレーションで示した。
- (6) 2次元非線形システムに対して、所望の

リミットサイクルを発生するような制御則を導出した。また、その制御則の持つ特徴について理論的な解析を行った。その結果を「初期角運動量を持つ平面型宇宙ロボット」に適用し、目標のリミットサイクルが発生できていることを数値シミュレーションで示した。

- (7) 離散時間力学を用いて、「台車型倒立振子」に対する安定化制御則の導出・陰関数システムの可解性解析・0次ホールド型連続入力への変換法などを提案した。さらに数値シミュレーションや実機実験を通して、システムの安定化が行われていることを示し、提案手法の有効性を確認することが出来た。

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4件)

- ① 甲斐健也、アファ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集、42巻、2009、査読有、掲載決定
- ② 甲斐健也、環一穂、初期角運動量を持つ2剛体宇宙ロボットに対する3次元姿勢準最適制御、計測自動制御学会論文集、2009、査読有、掲載決定
- ③ 甲斐健也、アファイン拘束を受ける非ホロノミック運動学システム、システム・制御・情報、51巻、2007、査読無
- ④ 甲斐健也、アイ・サイ問答教室「線形拘束からアファイン拘束へ・非ホロノミックシステム制御の新展開」、システム・制御・情報、50巻、2006、査読無

[学会発表] (計17件)

- ① 甲斐健也、2次元非線形システムに対するリミットサイクル制御と平面型宇宙ロボットへの応用、計測自動制御学会第9回制御部門大会、2009年3月5日、広島
- ② 甲斐健也、新谷勇志、離散時間力学に基づく台車型倒立振子の安定化制御と実機実験用、計測自動制御学会第9回制御部門大会、2009年3月5日、広島
- ③ 甲斐健也、環一穂、初期角運動量を持つ2剛体宇宙ロボットに対する3次元姿勢準最適制御、計測自動制御学会第37回制御理論シンポジウム、2008年9月18日、鹿児島
- ④ Tatsuya Kai、Ryo Masuda、Controller Design for 2-Dimensional Nonlinear

Control Systems Generating Limit Cycles and Its Application to Spacerobots、International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2008、2008年9月10日、Hungary

- ⑤ Tatsuya Kai、Kensuke Bito、Solvability Analysis and Stabilization of the Cart-Pendulum Modeled by Discrete Mechanics with Friction、International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2008、2008年9月10日、Hungary
- ⑥ 甲斐健也、尾藤健介、摩擦を考慮した場合の離散時間力学モデリングされた台車型倒立振子の解析と制御、第52回システム情報制御学会研究発表講演会、2008年5月17日、京都
- ⑦ Tatsuya Kai、Generalized Canonical Transformations and Passivity-based Control for Nonholonomic Hamiltonian Systems with Affine Constraints: Control of a Coin on a Rotating Table、46th IEEE Conference on Decision and Control、2007年12月13日、U.S.A
- ⑧ Tatsuya Kai、Yohei Yamamoto、On Analysis and Control of the Cart-Pendulum System Modeled by Discrete Mechanics、International Symposium of Nonlinear Theory and Its Application 2007、2007年9月19日、Canada
- ⑨ 甲斐健也、池野直也、アファ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、計測自動制御学会第36回制御理論シンポジウム、2007年9月07日、北海道
- ⑩ 甲斐健也、アファイン拘束を受ける非ホロノミックアファ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新しい解析法、日本機械学会第10回「運動と振動の制御」シンポジウム、2007年8月11日、東京
- ⑪ Tatsuya Kai、Derivation and Analysis of Nonholonomic Hamiltonian Systems with Affine Constraints、European Control Conference 2007、2007年7月5日、Greece
- ⑫ 環一穂、甲斐健也、量子スピン1/2システムに対する非線形 H_∞ 制御、第51回システム情報制御学会研究発表講演会、2007年5月17日、京都
- ⑬ 甲斐健也、山本洋平、離散時間力学モデリングされた倒立振子の制御について、計測自動制御学会第7回制御部門大会、2007年3月6日、東京

- ⑭ Tatsuya Kai, Extended Chained Forms and Their Applications to Nonholonomic Kinematic Systems with Affine Constraints: Control of a Coin on a Rotating Table, 45th IEEE Conference on Decision and Control, 2006年12月14日、U.S.A
- ⑮ Tatsuya Kai, Control of a Coin on a Rotating Table based on Its Equilibria Set, SICE-ICCAS International Joint Conference 2006, 2006年10月19日、Korea
- ⑯ 甲斐健也、池野直也、アファ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、計測自動制御学会 第35回制御理論シンポジウム、2006年9月19日、大阪
- ⑰ Tatsuya Kai, Affine Constraints in Nonlinear Control Theory, 3rd Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, 2006年6月21日、Nagoya

[その他]

ホームページ等

<http://www-watt.mech.eng.osaka-u.ac.jp/~kai/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 健也 (KAI TATSUYA)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60419471

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者