

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289128

研究課題名(和文)劣駆動システムの解析と非安定化運動生成

研究課題名(英文)Underactuated Systems Analysis and Unstabilized Motion Generation

研究代表者

三平 満司 (Sampei, Mitsuji)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00196338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、劣駆動システムの解析および単純な安定化では実現できないダイナミックな運動や省エネルギーな運動を実現する制御系の設計を目的としている。まず、劣駆動システムにおける特徴的な運動として、(1)非安定化運動生成に基づく素早い運動、(2)省エネルギー性を考慮した運動、(3)重力場を陽に取り入れた運動を考慮した。つぎに、それぞれの運動に対して具体的な機械システムを取り扱い、運動の特徴の考察に基づく新たな制御手法を提案した。さらに、収束性解析や運動性能解析を行い、数値シミュレーションおよび実機実験により提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have investigated control theory for nonlinear systems, especially for underactuated systems. The goal is to design control schemes to achieve dynamic motion which cannot be yielded by simple stabilization techniques. The achievement of desired motion with small energy consumption is also the goal of this work. We have first considered three kinds of characteristic motion of underactuated systems: (1) quick motion generated by unstabilized motion, (2) motion with small energy consumption, and (3) motion effectively utilizing the gravity effect. Then, we have dealt with actual mechanical systems for these kinds of motion and proposed control laws based on the investigation of the motion characteristics. Moreover, we have given convergence/performance analysis and demonstrated the validity of the present schemes via numerical simulations and experiments.

研究分野：工学

キーワード：制御工学 機械力学・制御 劣駆動系 非安定化

### 1. 研究開始当初の背景

これまでの多くの制御問題では、プラントの定常運転や人口衛星の姿勢制御、産業用ロボットアームの位置姿勢制御のように、システムの安定化を目指している。これに対して、今後解決が求められる制御問題として、従来から考えられている安定化という目的だけでなく、安定状態へ収束するまでの過渡状態の制御や、ダイナミックで素早い運動の生成、省エネルギーな運動の実現などがあると考えられる。

特に後者2つに関しては、運動の自由度に対してアクチュエータの数が少ない劣駆動システムを対象とすることで、制御することが困難であるという反面、アクチュエータが少ない分軽量にできるという利点や、非駆動関節の運動に対してアクチュエータによる制約がないため機敏性に優れ、省エネルギーの観点からも優れた運動を実現することができると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、研究代表者らがこれまで明らかにしてきた非線形システムの制御理論を発展させ、劣駆動システムの解析および単純な安定化では実現できないダイナミックな運動や省エネルギーな運動を実現する制御系の設計を目的とする。ここで、劣駆動システムは非駆動自由度を持つため、一般のマニピュレータとは異なり従来の意味での軌道追従制御が不可能なシステムである。このような劣駆動システムに対して、相対次数構造や劣駆動度という観点から非線形制御理論の枠組みで制御系の解析・設計を行い、さらにその有効性を数値シミュレーションや実機実験により検証することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、まず劣駆動システムの特徴的な運動として以下の3つを考慮する。

- (1) 非安定化運動生成に基づく素早い運動
- (2) 省エネルギー性を考慮した運動
- (3) 重力場を陽に考慮した運動

つぎに、それぞれの運動の特徴に基づく制御手法を提案し、収束性解析や運動性能解析を行う。さらに、数値シミュレーションや実機を用いた実験検証により、提案手法の有効性を示す。なお、(3)については当初の計画では想定していなかったが、研究が比較的順調に進捗したために新たに取り組んでいる。以降、運動(1)-(3)について詳細に述べる。

#### 【運動(1)：4リンクロボットの跳躍運動】

代表者らは、図1に示す人間を模擬した4リンク3アクチュエータモデルを考案しており、この跳躍運動におけるダイナミックな動

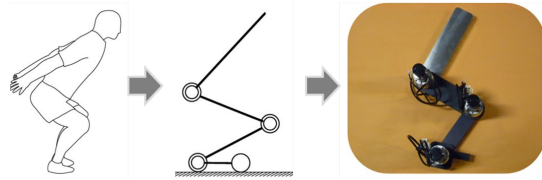


図1：4リンクロボット（4つのリンクは胴体，上腿，下腿，足を模擬し，つま先部分是非駆動関節）

きにはあるパラメータの非安定化が用いられているのではないかと考えている。したがって、本研究では垂直跳躍を実現するために、重心の回転運動および水平方向の並進運動を抑制（安定化）し、垂直方向の運動を発散（不安定化）させる制御手法を提案する。

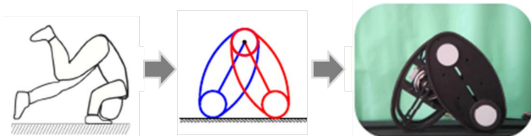


図2：2リンクロボット（2つのリンクは上半身，下半身を模擬し，腰部分のみが駆動関節）

#### 【運動(2)：2リンクロボットの転がり運動】

代表者らは、人間の転がり運動を模擬するために2リンク1アクチュエータモデルを考案しており（図2），前転に基づく連続転がり運動制御手法を既に提案している。ここで、前転運動では地面との衝突が生じ、これが大きなエネルギー消費を引き起こし、印可する入力エネルギーの増加や連続的な転がり運動の実現の妨げの原因になっているのではないかと考えている。したがって、本研究では衝突を生じさせない回転運動手法を新たに提案する。また、制御手法の設計の際に、入力エネルギーを最小にするという意味で最適な転がり手法を模索する。さらに、実機を用いた検証実験により提案手法の有効性を示す。

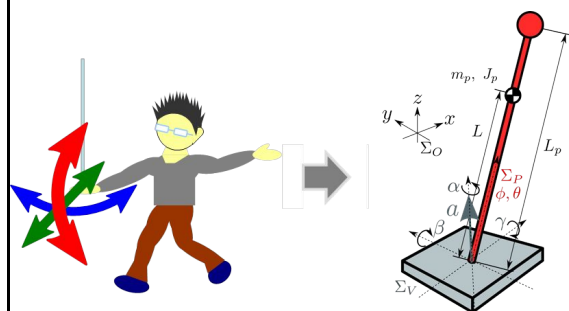


図3：クアドロータによる3次元倒立振子モデル

#### 【運動(3)：3次元倒立振子安定化】

制御分野における典型的な問題として、人間が手の平の上で棒を直立安定化させる運動を模擬した倒立振子安定化問題がある。これに対して従来の制御手法を用いると、水平方向の運動のみで振子を安定化させる挙動が見られるが、代表者らは人間が効率良く安

定化させる際に鉛直方向の運動も適切に用いていることに着目している(図3). したがって, 本研究ではこの鉛直運動を重力場に基づいて取り入れたより効率の良い制御手法を提案し, 収束性解析および実機を用いた検証実験によりその有効性を示す. なお, ここでは実験検証のための手の平に代わる移動体のモデルとして, その有用性により現在最も注目を集めている3次元飛行体であるクアドロータを新たに導入する.

#### 4. 研究成果

##### 【運動(1): 4リンクロボットの跳躍運動】

本研究では, リンク間のある非駆動関節を拘束することによって他の関節角が動き出すことを新たに発見し, それに基づく新規の跳躍制御手法を提案した. 具体的には, 非駆動関節であるつま先を固定するように制御することで不安定な挙動が生じることに基づき, これによる他の関節角の動き出しを利用して跳躍を実現した. さらに, リンクの各関節角を同期させるように制御し, 得られた不安定な挙動をオフラインで解析することで, 所望の動き出しを達成するための制御パラメータの設計指針を与えた. また, 数値シミュレーションにより提案制御則の有効性を確認した(図4).

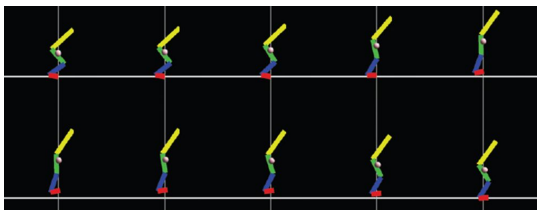


図4: 跳躍運動シミュレーション

また, 本研究は比較的順調に進捗したため, 跳躍運動手法へのしゃがみ込み運動の導入や, 跳躍後の着地制御手法の提案も行い, これらについてもシミュレーションにより有効性確認を行った.

##### 【運動(2): 2リンクロボットの転がり運動】

本研究では, 曲率を有する2リンクロボットの連続転がり制御問題に対して, 従来の転がり運動時の衝突によるエネルギー消費を考慮し, 衝突を避ける制御則を新たに提案した. 具体的には, 体操のワームという運動に着想を得て, 図5に示すように直立時にあえて後屈運動を取り入れることで衝突を回避する運動を考案した.

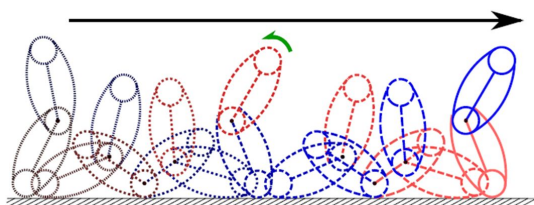


図5: 後屈を取り入れた回転運動

提案手法では, 直接制御可能なリンク間の相対角度をあらかじめ設計された転がり角に滑らかに同期させる制御則を用いた. ここで設計する転がり角の経路は, 2リンクロボットの詳細なダイナミクスを用いた数値シミュレーションの結果に基づき, ロボットに印可する入力エネルギーを最小にするように設計した. さらに, 図2に示す実機を用いて実際に転がり運動を実現した.

##### 【運動(3): 3次元倒立振り安定化】

本研究では, クアドロータ上に振子を倒立させたモデルを新たに考慮し, 重力場に基づく鉛直方向の運動を効果的に取り入れ, 振子を安定化させつつクアドロータを所望の位置に制御する手法を提案した. 具体的には, このモデルに対して従来手法であるテイラー展開の1次近似に基づく線形近似手法を用いると鉛直方向運動が無視されてしまうことに着目し, 2次近似に基づくより詳細なモデルを考慮した制御系設計により重力場の影響を陽に取り扱うことを考えた.

この2次近似モデルに対して, 解析により振子が倒立状態にあるか否かで可制御性が異なるシステムであることがわかり, また双線形システムと呼ばれるクラスに分類されるように入力変換を行った. これにより, 望ましい挙動を示すように制御則を設計することが可能な最適制御手法の一種を適用でき, 実際に安定化が達成されることを数学的に示した. また, 鉛直方向の運動を取り入れることにより, 従来手法と比較してより多くの状況で安定化できることを示した.

さらに, 本研究期間では図6に示す実験システムを新たに構築し, 実際にクアドロータを用いた振子の安定化を達成した.

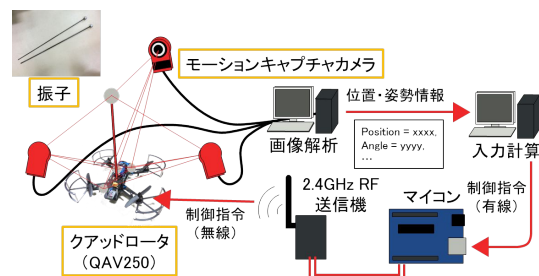


図6: 3次元倒立振り実験システム

##### 【その他の成果】

上記3つの主要課題に対して比較的順調な成果が得られたため, 本研究期間では6つのロータを適切に配置した全駆動ヘキサロータシステムの開発に新たに取り組んだ. これは, 3次元空間上には位置3自由度, 姿勢3自由度の計6自由度が存在することに着目し, 6つのアクチュエータを持つシステムを構築することで任意の方向に移動・回転が可能となる全駆動システムの開発を目的とした研究である.

具体的には, 6つのロータから成るヘキサ



ロータに対して、ロータを傾けて配置することで全駆動性を保証する新たなヘキサロータシステムを提案した。ここでは、ロータの位置や姿勢の決定において、任意の方向への運動性能の指標である動的可操作度、および重力に抗する飛行を意識した1方向への最大並進加速度に基づく最適化手法を適用した(図7)。さらに、ここで提案した全駆動ヘキサロータに対して、新たに動的可操作度に基づく位置・姿勢制御則を提案し、収束性解析および数値シミュレーションによりその有効性を検証した。また、現在は実機製作に取り組んでいる。

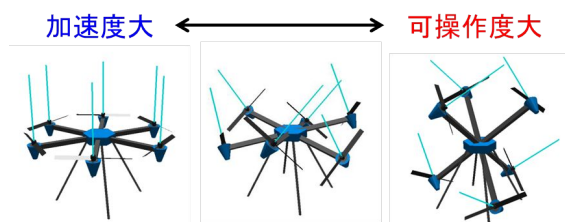


図7: 様々なヘキサロータの構造

以上、本研究の成果がさらに発展することで、ロボットに劣駆動系を組み込むことによる省重量・省エネルギー・省スペースの面での社会的・産業的貢献が期待される。また、本研究はすべての課題に対してその有効性を示すために実機の製作や実験検証を行っていることから、これらの成果を広く公開することで社会や産業に大きなインパクトを与えることができると考えている。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計5件)

鈴木洋史, 関口和真, 三平満司, 多入力非線形システムに対する位相面における幾何学的考察に基づく非線形制御とその応用, 計測自動制御学会論文誌, 査読有, Vol. 51, No. 6, 2015, pp. 430-439  
DOI: <http://doi.org/10.9746/sicetr.51.430>

勝山裕輝, 関口和真, 三平満司, 時間軸状態制御形を用いた2ホイール衛星の姿勢制御, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 27, No. 5, 2014, pp. 193-199  
DOI: <http://doi.org/10.5687/iscie.27.193>

T. Shoji, S. Katsumata, S. Nakaura and M. Sampei, Throwing Motion Control of the Springed Pendubot, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 査読有, Vol. 21, No. 3, 2013, pp. 950-957  
DOI: 10.1109/TCST.2012.2192121

鈴木洋史, 関口和真, 三平満司, 1入力非線形システムに対する位相面における幾何学的考察に基づく非線形コントローラの設計, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 49, No. 10, 2013, pp. 944-951

DOI: <http://doi.org/10.9746/sicetr.49.944>

関口和真, 三平満司, 部分線形化に基づく制御器の切り替え設計, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 26, No. 7, 2013, pp. 8-18

DOI: <http://doi.org/10.5687/iscie.26.232>

### 〔学会発表〕(計35件)

S. Kimura, H. Nakamura, T. Ibuki and M. Sampei, Input Transformation with Coordinate Transformation for Nonlinear Systems subject to State Constraints, The 54th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 18th, 2015, Osaka International Convention Center (Osaka)

Y. Katsuyama, T. Ibuki and M. Sampei, Attitude Controllability Analysis of an Underactuated Satellite with 2 Reaction Wheels and Its Control, The 54th IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 16th, 2015, Osaka International Convention Center (Osaka)

D. Kato, K. Sekiguchi and M. Sampei, Controllability Measure for Nonlinear Systems in Complex Region, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 12th, 2013, Florence (Italy)

Y. Kataoka, K. Sekiguchi and M. Sampei, Circle Motion Control of Trirotor UAV via Discrete Output Zeroing, The 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Dec. 10th, 2013, Florence (Italy)

D. Kato, K. Sekiguchi and M. Sampei, Multi-step Procedure for Orbital Feedback Linearization of Multi-input Control Affine Systems, The 2013 American Control Conference, Jun. 17th, 2013, Washington, D.C. (USA)

### 〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sc.ctrl.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三平 満司 (SAMPEI, Mitsuji)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00196338

### (2) 研究分担者

中浦 茂樹 (NAKAURA, Shigeki)  
佐世保工業高等専門学校・その他部局等・  
准教授  
研究者番号：20323793

伊吹 竜也 (IBUKI, Tatsuya)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：30725023

関口 和真 (SEKIGUCHI, Kazuma)  
東京都市大学・工学部・講師  
研究者番号：80593558