

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25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360169

研究課題名（和文） 相対次数構造に着目した劣駆動システムの解析と制御

研究課題名（英文） Analysis and Control of Underactuated Systems based on Relative Degree Structure

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

研究成果の概要（和文）：

本応募研究課題では、従来研究で得られた非線形システムに対する理論を発展させることで、非駆動自由度を持つ劣駆動系の運動解析と運動を生成する制御系の設計を行うことを目的としている。劣駆動系として特徴的な運動の制御問題を（1）発散する素早い動きの生成（2）リミットサイクルの生成（3）可制御性構造が変化するシステムの効率的な制御という3つに分類・整理した。その結果、（1）と（2）の運動は相対次数構造による解析に基づく部分線形化を用いた制御器を、設計・適用することで、サブシステムを安定化するという簡単な制御によって実現できることを、具体的な機械システムを通して示した。また、（3）については、特異点においても制御系が破綻しないコントローラ的设计法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we have investigated characteristic motions of underactuated mechanical systems on the basis of the theory introduced in our previous work, and discussed a controller design to realize the characteristic motions. We have categorized the control problems of underactuated systems into three problems: (1) generating quick motion caused by divergent, (2) generating limit cycles, and (3) effective control of an underactuated system that has singularity of controllability at the origin. We have showed that the motions of (1) and (2) have been achieved by the controller designed based on the analysis using our previous work. In terms of (3), we have presented the conditions for designing a well-defined controller even at the singular point.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			0
年度			0
総計	10,700,000	3,210,000	13,910,000

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：制御理論

1. 研究開始当初の背景

劣駆動系は運動の自由度に対してアクチュエータの数が少ないシステムであり、制御するの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を持つ。さらに、非駆動関節の運動は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がおこなえるという性質から、研究開始当初、劣駆動系に対する運動制御が注目されていた。我々は先行研究において、劣駆動系の運動として、人間の技能的動作に着目し、直感的に制御系を構成することで劣駆動系の特性を活かした運動が生成できることを示していた。本プロジェクトでは先行研究の結果を受け、劣駆動系の運動制御問題を整理し、より体系的な制御系設計手法の確立を目指した。

2. 研究の目的

本研究は劣駆動系に対してこれまでおこなわれてきた、劣駆動性を活かした運動を実現する制御問題を分類・整理し、それぞれの制御問題に対して非線形制御理論の枠組みで解析・制御系設計することを目的としたものである。また、理論的な研究だけでなく、それぞれの制御問題に対応した劣駆動機械システムを設計・制作し、実験における理論の検証までを目的として取り組んだ。

具体的に取り組んだ研究課題を以下に示す。

(i) 劣駆動系の運動の分類と制御問題の整理

(ii) 理論の展開・構築

(iii) 実験による検証

3. 研究の方法

● 課題(i)に関して

劣駆動系の特性を活かした運動として制御問題を以下の3つに分類することを提案する。それぞれについて具体的な運動制御問題を設定し解析・制御系設計法を研究する。

(1) 発散する素早い動きの生成

：投球運動、跳躍運動

(2) リミットサイクルの生成

：2足走行、でんぐり返し

(3) 可制御構造が変化するシステムの効率的な制御

：上下左右の自由度を有する台座に支えられた自由振子の倒立運動

● 課題(ii)に関して

劣駆動系の制御で用いられている入出力線形化という、仮想出力を構成することで制御系を設計する手法において、仮想出力の体系的な構成方法を我々の先行研究で得られた相対次数構造に基づくシステム解析を進展させると共に、仮想出力のパラメタライズ手法を発展させ、実際のシステムに応用する。

また、前述の劣駆動系の制御問題(3)については、具体的なシステムに対する逆最適制御の設計を通じた解析や平衡点における可制御構造の変化に対応する制御理論の確立を目的とする。

● 課題(iii)に関して

制御問題の分類に基づいた運動をおこなう劣駆動機械システムを提案・制作し、シミュレーション・実験を通して、構築した制御理論の有効性を検証する。

4. 研究成果

● 課題(i), (iii)に関して

(1) 発散する素早い動きの生成

① 投球運動：人間は投球動作において肘のトルクを利用していないという知見から、肩にあたる関節にのみアクチュエータを持つ2リンクロボットを人間の腕モデルとして利用した。投球という素早い動きを実現するため「爆発不安定性」という急激な発散性を示す動特性に着目し、投球動作に応用するための解析をおこなった。その結果、爆発不安定性を示す条件を明らかにし、爆発不安定性を利用した投球運動を実現する制御器を導出、数値シミュレーションによりその有効性を示した。

また、人間のような効率的な投球

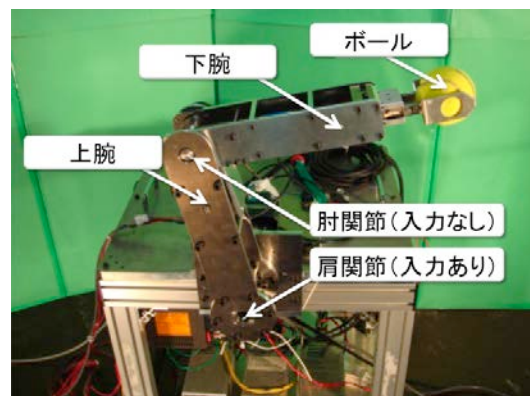


図1：投球動作をおこなう実験装置

運動を実現するため、ベジェ曲線を用いた手先経路を設計し

Nelder-Mead Method という最適化関数の微分を必要としない最適化手法を用いることで速度について最適化をおこなった。得られた最適軌道を用いた制御器を、図1に示す実験機に適用し、従来手法よりも大幅な速度改善を実現した。

- ② 跳躍運動：人間の垂直跳躍運動を4リンク3アクチュエータロボットとして可変拘束を持つ劣駆動システムとしてモデル化・解析をおこなった。その結果、角運動量と重心位置に同期構造を作り出すことで、空中での不必要な回転を抑えた垂直跳躍が可能になることを明らかにし、実現する制御器を提案した。この制御器を適用することでシミュレーションを通して人間のようなスムーズな跳躍運動が実現できることを確認した。さらに、図2に示す4リンクロボットを作成し、垂直跳躍を実現。実験を通して制御器の有効性を検証した。

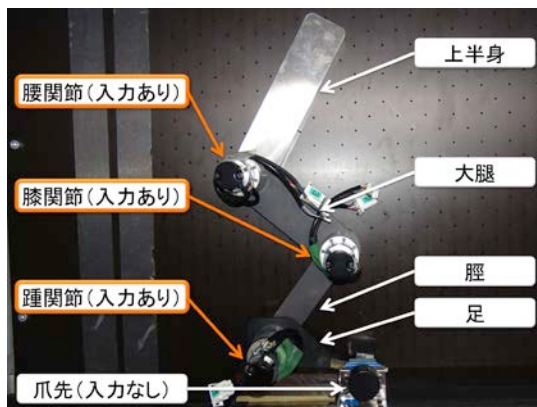


図2：跳躍動作をおこなう実験装置

- (2) リミットサイクルの生成
- ① 2足走行という動きに対し足先回りの角運動量に着目した各リンクの同期構造を構成し、同期パラメータをポアンカレマップ的に離散制御することで安定なリミットサイクルを生成することに成功し、不整地での走行や加減速といったダイナミックな走行動作が実現できりことを数値シミュレーションで示した。
- ② でんぐり返しという人間の転がり運動は安定なリミットサイクルを生成することで連続的に繰り返すことができるという点に着目し、この運動をおこなう人間のモデルとしてリンク形状に曲率を有する2リンクロボットを提案し、図3に示す Denguribot

と名付けた実験機を製作した。曲率を活かした周期的な転がりとして Prof. Anton Shiriaev (Umea University, Sweden) との共同研究を経て得られた安定なリミットサイクルを生成する制御則を構築した。

また、転がり角にリンク間の角度をなめらかに同期させる制御器を構築することで衝突を伴う連続的な転がり運動が実現できることを数値シミュレーション・実機実験を通して検証した。さらに周期的にエネルギーを励起させる制御則を提案し、連続的な転がり運動の結果と合わせることで、エネルギー的に安定な状態からの起き上がり運動、連続回転運動安定化を実験によって実現した。

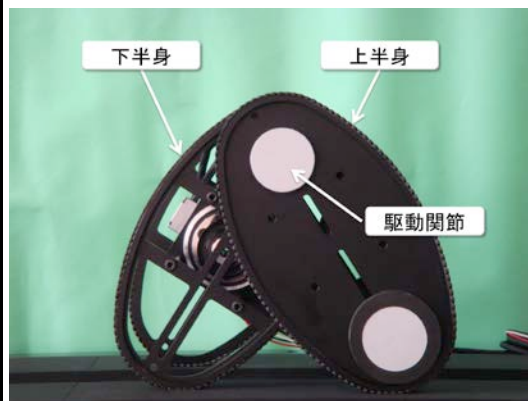


図3：Denguribot

でんぐり返しをおこなう実験装置

Denguribot は静止状態ではアクロボットと呼ばれる2リンクシステムと等価であることに着目し、アクロボットに対して設計した時間軸変換を用いた厳密な線形化手法を Denguribot の倒立安定化に適用し、転がり運動の初動作としての倒立姿勢を実現した。さらに、倒立状態のエネルギー値に着目したエネルギー励起制御器を設計し、地面に置かれた状態から倒立状態へ起き上がり安定化するという一連の運動を数値シミュレーションで実現した。

- ③ 3入力しか持たない無人飛行システム (UAV) を提案・解析し、ホバリング運動ができないシステムであることを明らかにした。そのようなシステムに対する制御問題として高さ、向きを周期的に既定のものにする運動を定義し、擬似ホバリングと名付けた。提案する3入力UAVに対し擬似ホバリングを安定に実現する制御器を構築し、数値シミュレーションでその有効

性を明らかにした。

(3) 可制御構造が変化するシステムの効率的な制御

- ① 先行研究では上下左右に自由度を有する台座に支えられた自由回転をする振り子システムが、原点に可制御性の特異点を持つことを示し、逆最適制御系を設計することで振り子の倒立安定化が実現できることを示していた。この結果を図4に示す実験機を用いて検証した。その結果、提案した双線形システムに対する逆最適制御則を用いることで振り子を倒立安定化する実験に成功した。さらに逆最適な評価関数に解釈を加えることで、上下方向を使いやすい制御系や左右方向を使いやすい制御系など制御目標に合わせて応答性能を変える評価関数を生成することができるようになった。

また、Dynamic Extensionを用いた厳密な線形化手法を利用した制御系が構成できることを示し、得られた拡大系に対して最適となる制御器を適用することで、原点の特異点においても破綻することなく倒立安定化が実現できることを実験によって示した。

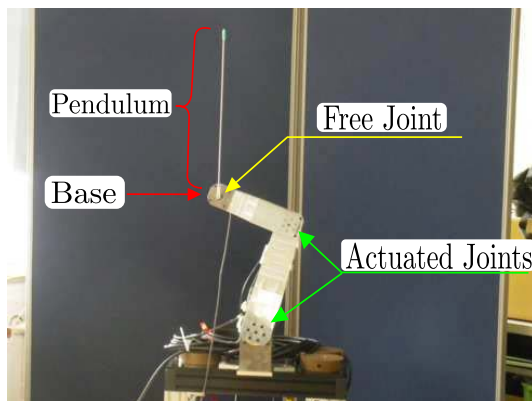


図4：可制御構造が振り子倒立状態で変化する実験装置

● 課題(ii)に関して

- ① 入力自由度よりも一次低い一般の機械系システムに対しゼロダイナミクスが爆発不安定になる十分条件を明らかにし、投球運動に適用した。
- ② 相対次数構造に基づくシステム解析とその発展として以下の結果を得た。
1 入力システムに対して得られていた、ゼロダイナミクスの次数を指定した仮想出力のパラメトリゼーションを多入力システムへ拡張し、一般システムに対するゼロダイナミクス設計のための劣駆動システムの可安定平衡点のよう

に、相対次数構造が特異的に変化するという現象に着目し、そのような点においても制御系が特異にならない仮想出力の設計法を導出し、台車倒立振り子システムに適用し安定化を数値シミュレーションで実現した。

相対次数構造に基づく解析を時間軸変換や入力に積分器を入れるといった変換と組み合わせることでゼロダイナミクスが残らないように変換(厳密な線形化)することができるシステムが存在することを示した。アクロボットや可制御構造が変化する倒立振り子系にこの手法が適用できることを明らかにし、上述の結果を得た。

線形化出力を時変に設計する新しい手法を提案し、仮想出力の繋ぎ目に応用することでDenguribotの連続転がり運動などを実現した。

- ③ 位相面上の挙動に着目し、規範となる挙動に近づくような非線形フィードバックを施す制御手法を提案し、多入力高次の一般システムに対し、位相面上での挙動を最も近づける非線形フィードバックの設計法を導出し、台車振り子システムに適用することで安定化可能領域が広がることを数値シミュレーションで確認した。

さらに、近似線形化にフィードバックを施した閉ループ系やリアプノフの最急降下法など、複数の規範となる位相面上の挙動にシステムのダイナミクスが近づくように非線形フィードバックの設計法を拡張し、単車両系に適用することで、安定性を損なうことなく応答が改善できることを数値シミュレーションで確認した。

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2件)

① K. Sekiguchi, M. Sampei, S. Nakaura, “Exact Linearization of Two-Input Affine Systems via the Dynamic Extension Based on the Relative Degree Structure”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, No. 2, pp. 153-162, 2011.
(DOI: <http://dx.doi.org/10.9746/jcmsi.4.153>)

② K. Sekiguchi, M. Sampei, S. Nakaura, “Parameterization of the Output with respect to the Relative Degree”, SICE Journal of Control, Measurement, and

System Integration, 査読有, Vol.3, No. 2, pp. 137-143, 2010.
(DOI:http://dx.doi.org/10.9746/jcmsi.3.137)

[学会発表] (計 44 件)

- ① K. Sekiguchi, M. Sampei, “Change of controller based on partial feedback linearization with time-varying function”, Proc. of the 51th IEEE Conference on Decision and Control 2012, pp. 3557-3563, Hawaii, USA, Dec 10, 2012.
- ② T. Shoji, K. Sekiguchi, M. Sampei, “Throwing Motion Control of the Pendubot and Instability Analysis of the Zero Dynamics”, Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference 2011, pp. 2849-2855, Florida, USA, Dec 13, 2011.
- ③ K. Tahara, M. Kanazawa, K. Sekiguchi, M. Sampei, “Experiments of Inverse Optimal Control Problem for Inverted Pendulum with Horizontal and Vertical Inputs”, Proc. of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference 2011, pp. 284-289, Florida, USA, Dec 12, 2011.
- ④ T. Shoji, K. Sekiguchi, M. Sampei, “Throwing Motion Control of the Pendubot via Explosively Unstable Zero Dynamics”, Proc. of the 18th IFAC World Congress, pp. 14602-14607, Sep 2, 2011, Milano, Italia.
- ⑤ Y. Kataoka, K. Sekiguchi, M. Sampei, “Nonlinear Control and Model Analysis of Trirotor UAV Model”, Proc. of the 18th IFAC World Congress, pp. 10391-10396, Sep 1, 2011, Milano, Italia.
- ⑥ K. Sekiguchi, M. Sampei, “Output parameterization based on invariant relative degree”, Proc. of the 18th IFAC World Congress, IFAC, pp. 11080-11085, Sep 1, 2011, Milano, Italia.
- ⑦ A. Saito, K. Sekiguchi, M. Sampei, “Exact Linearization by Time Scale Transformation Based on Relative Degree Structure of Single-Input Nonlinear Systems”, Proc. of the 49th

IEEE Conference on Decision and Control 2010, pp. 5408-5413, Atlanta, USA, Dec 17 2010.

⑧ K. Sekiguchi, M. Sampei, “Series Expression of the System for Linear Approximation Based on Relative Degree Structure-Stabilization of the Cart Pendulum System”, Proc. of the IEEE Multi-Conference on Systems and Control 2010, pp. 1427-1432, Yokohama, Japan, Sep 9, 2010.

⑨ K. Sekiguchi, K. Tahara, M. Sampei, “Experimental Study of Stabilization of the Inverted Pendulum with Horizontal and Vertical Movement Via Exact Linearization Based on the Dynamic Extension”, Proc. of the IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2010, pp. 1433-1438, Yokohama, Japan, Sep 9, 2010.

⑩ T. Shoji, S. Nakaura, M. Sampei, “Throwing Motion Control of the Springed Pendubot Via Unstable Zero Dynamics”, Proc. of the IEEE Multi-Conference on Systems and Control 2010, pp. 1602-1607, Yokohama, Japan, Sep 9, 2010.

⑪ K. Nakamura, S. Nakaura, M. Sampei, “Control of Bipedal Running by the Angular-Momentum-Based Synchronization Structure”, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010, pp. 3310-3315, Alaska, USA, May 6, 2010.

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

関口 和真 (SEKIGUCHI KAZUMA)
東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号：80593558

(3) 連携研究者

なし