

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360201

研究課題名（和文） 人間の技巧的動作実現のためのゼロダイナミクス制御

研究課題名（英文） Zero Dynamics Control for Human Dexterous Motions

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：

ゼロダイナミクスとは、系の自由度に対し入力の数が少ない劣駆動系において、設定した系の出力を零化した際に残る不可観測な非線形性に基づく内部動特性のことである。本研究課題では、様々な人間の技巧的動作を劣駆動系として表現し、人間の運動を観察することで出力関数を設定し、出力零化により現れるゼロダイナミクスを上手く活用することで所望の運動が実現できることを、制御理論的・制御実験的に明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	8,700,000	2,610,000	11,310,000

研究分野：制御理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：ゼロダイナミクス，出力零化制御，非線形制御，技巧的運動，劣駆動マニピュレータ，デビルスティック，Acrobot，Pendubot

1. 研究開始当初の背景

1980年代から1990年代にかけてロボットの力学や制御に関する様々な研究が精力的に行われた結果、いわゆる産業用ロボットマニピュレータが実用レベルに到達し、自動車の生産ラインにおけるスポット溶接を皮切りに、組み立てや部品のハンドリングを行うなど広く普及するに至った。しかしここで実現されている動作は、ロボットマニピュレータの手先位置に関する位置制御や速度制御といった基本的な動作の組み合わせであり、2000年代

に入り作業環境に自律的に適応させる試みや、高度技能を有する作業への投入が検討され始めているが、実用という意味では十分な成果が得られていない。

時を同じくして2000年代になってからは、いわゆるヒューマノイドロボットに関する研究が急速に発展し、動的な2足歩行や走行を始め、転倒状態からの起き上がりや転倒時の衝撃緩和動作、さらには人間との協調作業さえ、実機において実現されるようになった。しかし、これらの人間の動作に近い技巧的な

運動の実現においては、ヒューマノイドロボットに対する関節目標軌道をあらかじめ生成し、線形なフィードバック制御によりロボット全体の安定化・運動の実現を図る手法が一般的である。よって、結果として実現される動作は、人間のような自然な運動とは言い難く、非常にぎこちないものとなっている。

2. 研究の目的

ゼロダイナミクスとは、システムの自由度に対し入力の数が少ない場合に、あらかじめ設定したシステムの出力を零化した際に残る非線形性に基づく内部動特性のことである。システムの自由度よりもアクチュエータの数が少ない劣駆動系と呼ばれるメカニカルシステムにおいては、このゼロダイナミクスの挙動を無視することはできない。一方、人間が行う様々な運動の中でもダイナミックな動きを伴う技巧的動作をメカニカルシステムとして実現することを考える場合、複雑な動きのすべてを制御することは非常に困難であるため、その中から運動の本質となる必要最小限の運動を抽出することが動作実現のために重要であり、また、実験機による実装においても、装置を軽量化することは動作実現のためには有効である。結果として、人間の技巧的動作を実現するシステムは、劣駆動系として表現されることとなる。

劣駆動系全体の安定性を考える場合に、これまではゼロダイナミクスを安定化するような制御系設計が試みられてきた。しかし、人間の技巧的動作の本質とゼロダイナミクスは密接に関係していると考えられるため、あえてゼロダイナミクスを不安定にしたり、周期的なふるまいとなるようにゼロダイナミクスを陽に考慮することで、ダイナミックな動作で表現される人間の技巧的動作を自然な運動として実現可能になると思われる。そこで本研究課題においては、所望の動作実現の為に必要な出力関数の設定、零化を行うことで現れるゼロダイナミクスを解析、不安定化することでその動作実現を目指し、様々な人間の技巧的な動作を取り上げていく中で、技巧的な運動の本質とゼロダイナミクスとの関連を制御論的に明らかにしていくことを研究の目的とする。

3. 研究の方法

人間の技巧的動作として

- (1) デビルスティックの持続回転運動
- (2) しなりのある鉄棒での振り上げ運動
- (3) 人間型ロボットの走行運動
- (4) 投球における技巧的運動
- (5) 幅跳びにおける技巧的運動

の運動を取り上げ、それぞれ個別に運動の実

現を試みる。

その実現方法としては、以下のような手順によるものとなる。

- ・実際に人間の運動を観察することにより出力関数の設定を行う
- ・出力零化制御を行った後のゼロダイナミクスを解析的・数値的に検証する
- ・数値シミュレーションにより、所望の動作が実現できるか確認する
- ・実験機を設計・製作し、実機により所望の動作が実現できるか検証する

4. 研究成果

(1) デビルスティックの持続回転運動

デビルスティックとは曲芸の一種であり、手にした1本のハンドスティックを操作することで、空中に浮いたもう1本のセンタースティックを落下させずに持続的に回転させ続ける技巧的な運動である。研究代表者および研究分担者により平成16年度から18年度にかけて行った科学研究費補助金による研究課題「重力場におけるノンホロミックシステムの制御」において、人間がスティックを操作する際の挙動を観察することで得られた出力関数に対し、出力零化を行うことでスティックの回転運動が引き起こされることを示した。また、出力零化後に残るゼロダイナミクスが不安定であるため、持続的な回転運動とはならないが、ゼロダイナミクスを解析することで安定な回転運動となるためのスティックの物理的条件などを導出し、数値シミュレーションにより十分な持続回転運動が実現できることを確認した。しかし、汎用マニピュレータを用いた実験では、センタースティックの回転周期が早まる傾向を確認していた。

そこで、本研究課題において、ゼロダイナミクスの解析を再度行った結果、2本のスティックの接触点に依存して、回転周期が変化することがわかった。そこでセンタースティックの回転速度に応じてこの接触点の位置を動的に変化させることでほぼ一定の回転周期を保持したまま持続回転運動が実現できることを示し、軽量化を主とした改良を行った実



図1 デビルスティックの検証実験装置

験装置 (図 1) により、これまでの数回転から最大 37 回転の持続回転運動が実現できることがわかった。

この研究成果に関しては、雑誌論文④および図書①として発表を行った。

(2) しなりのある鉄棒での振り上げ運動

しなりのある鉄棒での振り上げ運動とは、体操選手が使用するようなしなりを有する鉄棒において、そのしなりを効果的に活用した振り上げ運動の実現を目指すものである。研究代表者および研究分担者により平成 16 年度から 18 年度にかけて行った科学研究費補助金による研究課題「重力場におけるノンホロノミックシステムの制御」において、1 リンクロボットと鉄棒のしなりが有する全力的エネルギーを増加させることで振り上げ運動が実現できることを数値シミュレーションならびに検証実験装置により確認した。

そこで、本研究課題において、より人間の動作を模擬できるようにしてしなりの効果を利用しやすくするため、Acrobot モデルに対し検討を行った。この Acrobot とは、2 つのリンクで構成され、第 1 関節は自由関節、第 2 関節が駆動関節であるリンクロボットで、劣駆動系となるものである。この Acrobot を対象に、鉄棒のしなりのエネルギーとロボットのエネルギーに注目した運動解析を詳細に行った結果、両者の間にエネルギーの相互作用が存在することが明らかになった。そこでその相互作用を適切に制御することで、より効果的に鉄棒のしなりを利用して振り上げ運動が実現できることを数値シミュレーションにより示した。また、線形バネで支持することでしなりを表現した鉄棒にぶら下げた Acrobot を用いた検証実験 (図 2) でもその有効性を確認した。

この研究成果に関しては、雑誌論文⑧、⑨および学会発表⑦、⑧として発表を行った。



図 2 しなりのある鉄棒の検証実験装置

(3) 人間型ロボットの走行運動

人間型ロボットの走行運動に関する研究は急速に発展し、実機における走行の実現が報告されている。しかし、これらのロボットの

多くは、転倒回避のために足裏を地面と平行にして走行しているため、走行運動に対し足首関節をうまく利用できておらず、高速かつ高効率な走行運動を実現しているとはいえない。そのため、実際の人間が走る動きと比べ、やや不自然な走行運動となっている。

そこで、本研究課題においては、腰・膝・足首に可動限界を有する回転関節をもち、上半身・腿・脛・脚の甲で構成された回転型 7 リンクモデルを対象に、実際の人間の運動に近い自然な走行の実現を目指した。まず、人間が実際に走行する様子を観察し、安定な走行運動を行うために必要となる本質的な動作要素を検討した結果、地面に対する腰位置の軌道や上体を前後傾させる運動、浮遊状態からの着地姿勢などが重要であることを発見した。そこで、これらの目標運動を出力関数として設定し出力零化制御を行うことで、人間型ロボットの各関節に対する目標軌道をあらかじめ設定することなく、出力零化後のゼロダイナミクスが発散することをうまく活用することで、自然な走行運動を実現できることを数値シミュレーションにより確認した。また、設定した出力関数中のパラメータを強化学習の 1 手法である Q 学習により最適化することで、人間型ロボットの物理パラメータ変動に対してロバストに安定した走行運動を実現できるだけでなく、勾配が緩やかにランダム変化するような不整地面においても走行運動を実現できることを数値シミュレーション (図 3) により確認した。

この研究成果に関しては、雑誌論文⑦、⑩、⑫および学会発表⑥、⑨として発表を行った。

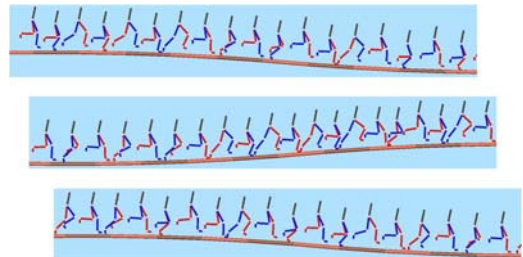


図 3 不整地走行シミュレーション結果

(4) 投球における技巧的運動

人間は様々なスポーツの中で技巧的な動きを利用していると考えられており、その中で投球運動については熟練した者と素人の動作には運動に大きな違いが見受けられる。一般的な投球運動は 3 次元の運動でその全てを解析することは困難であるため、本研究課題では平面モデルを用いて目標方向への投球運動制御を行ない、技巧的な特徴を実現することでエネルギー的に効率の良い投球運動を行うことを試みた。

まず、熟練された投球運動における技巧的な特徴を考察すると、身体の関節をタイミング良く動かすことで手先のボールをエネルギー

一的に効率よく加速させている点がある。また、肘関節には回転軸が一つしか存在しないため、上腕の運動する向きによっては拘束された状態が存在する。この拘束状態を利用した肩関節回りの回転が行なわれている点や、肘関節の伸展トルクがあまり利用されていない点も特徴といえる。

そこで、これらの技巧的な特徴を実現可能な簡易モデルとして、上腕と前腕を模した平面2リンクのPendubot型劣駆動マニピュレータを用いることとした。このモデルでは、肘関節に相当する第2関節が受動関節となっており、肘の拘束状態を実現したり、伸展トルクを利用しない運動が可能となる。さらに、この第2関節に腕の剛性を模したバネを有するものと、完全な物理拘束のみを有する二つのモデルを提案した。バネモデルではボールを持つ手先の位置を制御する出力零化制御を行なうことで、手先をボール投射方向の直線軌道にのせ、その軌道上を加速していくようなゼロダイナミクスにより、目標方向への投射が実現できることを数値シミュレーション及び検証実験装置(図4)により確認した。一方、物理拘束モデルでは、入力トルクやパワーを制限した状態でバンバン制御を行なうことで、単なる1リンクのモデルで同様な投球動作を行なう場合に比べてエネルギー的に有効であることを数値シミュレーションにより示した。

この研究成果に関しては、雑誌論文①および学会発表②、⑤として発表を行った。

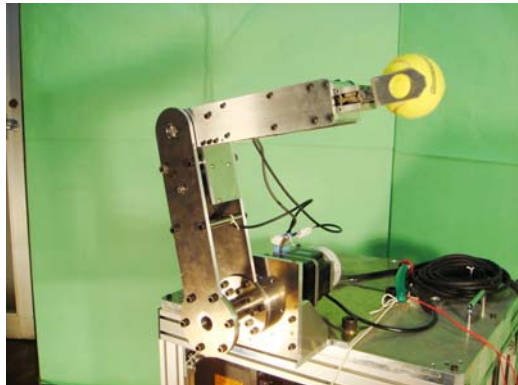


図4 技巧的投球運動の検証実験装置

(5) 幅跳びにおける技巧的運動

動物や人間の歩行や走行の一形態である跳躍歩容は、脚が接地している状態と離れている状態が連続して切り替わるため、可変拘束システムとなり制御が非常に難しいものとなる。そこで、跳躍歩容の最もシンプルな構成要素として人間の幅跳びのような1回の跳躍のみを考え、跳躍動作の本質を見極めるため、人間の上半身と下半身を模擬するAcrobot型の劣駆動システムを対象とした。

このAcrobotにおいて上手く跳躍するためには、接地時のバランスを失うことなく2つ

のリンクの動きをうまく協調させながら重心位置を滑らかに移動させる必要があるが、劣駆動系であるため自由に2つのリンクを制御することはできない。そこで、まず接地時においては、Acrobotの重心位置と姿勢に関する関数を出力関数として設定し、その出力関数を零化した際に残るゼロダイナミクスが安定になることを利用してAcrobotのバランスを維持する。次に離陸時においては、Acrobotの重心位置を目標とする離陸方向となる直線上に乗るような出力関数を設定し、その出力関数を零化した際に残るゼロダイナミクスが不安定になることを利用してAcrobotの跳躍を実現する。数値シミュレーションにより提案手法の有効性の検証を行った結果、所望の運動が実現できることを確認した。また、重力と摩擦を軽減するために製作したエアータブル上で自由に運動することができるAcrobotの実験機(図5)を製作し、検証実験を行った結果、ある程度所望の運動が実現できることを確認できた。

この研究成果に関しては、学会発表①として発表を行った。

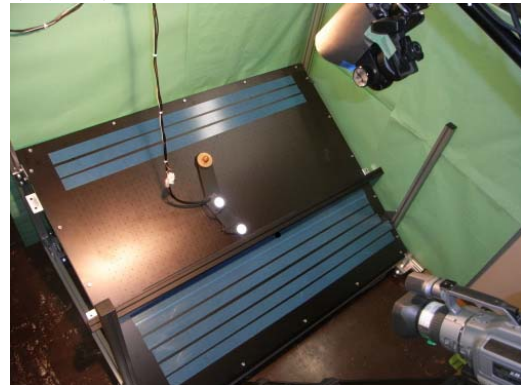


図5 技巧的幅跳び運動の検証実験装置

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12件)

①Shunsuke Katsumata, Shigenori Ichinose, Takuya Shoji, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Throwing Motion Control Based on Output Zeroing Utilizing 2-Link Underactuated Arm”, Proc. of the 2009 American Control Conf., pp. 3057-3064, 2009, 査読有

②相模毅, 伊藤然一, 中浦茂樹, 三平満司, “時間軸変換を用いたChained Systemの不連続制御—入力制限への対処と吸収領域の解析を利用した応答改善—”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, pp. 743-750, 2008, 査読有

③Shimpei Isobe, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Continuous Rolling Motion Control for the Acrobot Composed of Rounded Links”, Proc. of the 47th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.4992-4997, 2008, 査読有

④ Keisuke Nakamura, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Enduring Rotary Motion Experiment of Devil Stick by General-Purpose Manipulator”, Proc. of the 9th Intl. Conf. on Motion and Vibration Control, 1202, 2008, 査読有

⑤相模毅, 中浦茂樹, 三平満司, “入力を陽に含む座標変換による Igenerator 高階非ホロノミックシステムの制御”, 計測自動制御学会論文集, Vol.43, pp.1144-1150, 2007, 査読有

⑥Norikazu Ito, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Discontinuous Controller Designs for Chained System by Considering Time Scale Transformation”, Proc. of the 46th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.74-79, 2007, 査読有

⑦Kohei Suseki, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “The Running Control of Humanoid Robot utilizing Q-learning and Output Zeroing”, Proc. of the 46th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.5131-5137, 2007, 査読有

⑧Ryuichi Anami, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Swing Up Control for the Acrobot Considering Compliance of High Bar and Energy Interaction with Each Component”, Proc. of the 46th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.1929-1936, 2007, 査読有

⑨Ryuichi Anami, Masao Kanazawa, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Swing up Control for Acrobot with Compliance of High Bar Focused on Energy Interaction with Each Component”, Proc. of the 2007 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3334-3341, 2007, 査読有

⑩ Toshikazu Shimizu, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “The Control of a Bipedal Running Robot based on Output Zeroing considered Rotation of the Ankle Joint”, Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control”, pp.6456-6461, 2006, 査読有

⑪Tsuyoshi Sagami, Mitsuji Sampei, Shigeki

Nakaura, “Discontinuous Controller Design of the Chained Form System Via Time State Control Form”, Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control, pp.3277-3282, 2006, 査読有

⑫Ryusuke Ohata, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “A Synthesis of Bipedal Runner by Output Zeroing”, Proc. of the 2006 IEEE Intl. Conf. on Control Applications, pp.2166-2171, 2006, 査読有

[学会発表] (計 9 件)

①片岡泰之, 中浦茂樹, 三平満司, “ゼロダイナミクスを利用した Acrobot の跳躍着地運動の制御”, 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小路拓也, 中浦茂樹, 三平満司, “ゼロダイナミクス解析に基づく Pendubot 型劣駆動アームにおける技巧的投球運動の実現”, 計測自動制御学会 第9回制御部門大会, 2009年3月4日, 広島

③Shimpei Isobe, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “A Rolling Motion Control for Acrobot Composed of Rounded Links”, SICE Annual Conference 2008, 2008年8月22日, 東京

④ Kazuma Sekiguchi, Mitsuji Sampei, Shigeki Nakaura, “Parameterization of Output Function for SISO Systems”, SICE Annual Conference 2008, 2008年8月22日, 東京

⑤Shigenori Ichinose, Shunsuke Katsumata, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Throwing Motion Control Experiment utilizing 2-Link Arm with Passive Joint”, SICE Annual Conference 2008, 2008年8月22日, 東京

⑥ Yasuhiro Amagata, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “The Running of Humanoid Robot on Uneven Terrain utilizing Output Zeroing”, SICE Annual Conference 2008, 2008年8月22日, 東京

⑦Masao Kanazawa, Ryuichi Anami, Shigeki Nakaura, Mitsuji Sampei, “Swing up Control Experiment aimed at Energy Interaction between the Acrobot and Compliance”, SICE Annual Conference 2007, 2007年9月19日, 香川

⑧西内哲郎, Danilo de Santana Chui, 中浦

茂樹, 三平満司, “鉄棒のしなりと Acrobot
のあふりを利用した振り上げ制御実験”, 計
測自動制御学会 第6回制御部門大会, 2006
年6月1日, 愛知

⑨清水寿一, 中浦茂樹, 三平満司, “足首関
節の効果を利用した出力零化制御による人間
型ロボットの走行に関する研究”, 計測自動
制御学会 第6回制御部門大会, 2006年6月1
日, 愛知

[図書] (計 1 件)

① Keisuke Nakamura, Shigeki Nakaura,
Mitsuji Sampei, Springer-Verlag, “Motion
and Vibration Control: Selected Papers
from MOVIC 2008”, 2008, pp.241-251

[その他]

ホームページ

<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)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20323793

(3) 連携研究者

なし