

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：33917

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04370

研究課題名(和文) 運動・力触覚モデルによる非拘束マニピュレーションの最適操り運動プリミティブの獲得

研究課題名(英文) Optimal Primitives Acquisition for Nonprehensile Manipulation via Composite Model of Motion and Tactile Force

研究代表者

中島 明 (Nakashima, Akira)

南山大学・理工学部・教授

研究者番号：70377836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では非拘束マニピュレーションの基本要素である運動プリミティブの獲得を目指したものであり、大別して4つの研究成果を得た：(1)不完全拘束下での物体搬送を想定したボール・プレートシステムの安定化と周期運動の制御；(2)打撃などの不連続作用による物体の操りを想定したボール打ち上げシステムでの安定化制御；(3)物体運動のダイナミクスを間接的に活用することを想定した劣駆動系の最適制御；(4)物体との接触に起因する不連続状態遷移を含むバックラッシュ系の安定化制御。得られた成果は非拘束での操り作業の本質を成すタスクを高精度に制御するものであり、非拘束マニピュレーションの実現に大きく寄与するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非拘束マニピュレーションとして扱う操り運動は、不完全な拘束状態、衝突による連続・離散現象の複合現象、劣駆動機構を持つ劣駆動系、および間隙を伴う接触による不連続現象といった、物理的に本質で頻出する現象でありながら有効な制御手法が確立されていないものである。本研究はそれらに対して高精度な制御法を提供するものであり、学術的に寄与するところ大である。また、これらの操り運動は、そのまま人間が日常生活において行う一般的な各種の操り作業に対応している。そのため、本研究成果はロボットが日常生活において人間の作業の介助・代替を大きく押し進めるものである。

研究成果の概要(英文)：This paper dealt with the motion primitives for the nonprehensile manipulation and obtained the four research results: (1) Stabilization and cycle motion control for the ball-plate system; (2) Stabilization control for the composite discrete/continuous system of the ball-hitting task; (3) Optimal control for the underactuated systems; (4) Stabilization control for the backlash mechanical system with the discontinuous state transition. These results make the high precise control for the essential motion primitives in the nonprehensile manipulation, which would yield the practical implementation of the whole-raged manipulation in the robotic research area.

研究分野：ロボット工学

キーワード：マニピュレーション 非拘束マニピュレーション 最適制御 劣駆動 衝突現象 不連続システム 離散システム

1. 研究開始当初の背景

人間とロボットの共生・協働を目指し World Robot Summit が開催されるなどロボット技術は大きな注目を集めている。特に物体マニピュレーションは重要課題であり、物体運動を完全に拘束する Prehensile 形態(Pick-and-Place など)と、完全には拘束せず相互作用やダイナミクスを積極的に利用する Nonprehensile 形態(以降、非拘束マニピュレーションと呼称)がある。非拘束マニピュレーションは Throwing(投擲)、Catching(捕獲)、Hitting/Batting(打撃)、Pushing(押し搬送)、Sliding(滑り操作)、Rolling(転がり操作)、Balancing(重力下でのバランス操作)の基礎要素に分類される。これらを表現するプリミティブ(以降、操り運動プリミティブと呼称)の相互結合により大域的マニピュレーションが構成され、例えば、工場の自動搬送(Pushing + Balancing)や物品の受け渡し(Sliding/ Rolling + Throwing)など、広範囲な表現能力を持つ。このような所望のマニピュレーションを実現するためには、操り運動プリミティブを結合する運動計画法および操り運動プリミティブの表現方法の開発が必要である。

2. 研究の目的

実世界での非拘束マニピュレーションでは接触・衝突において力触覚と運動空間の相互連成が発生していることが予想される。機械学習では力触覚と運動の相関は統計的性質に基づいており物理的に明確なメカニズムは見い出せておらず、一方、物理的数理モデルの多くは剛体運動の仮定により力触覚と運動の空間が直和となるため、力触覚を陽に扱うことができない。したがって、力触覚を扱う適切なモデリング手法、および、それに基づいた操り運動プリミティブの表現能力の獲得のため、以下の学問的問いに取り組んだ：

- (1)非拘束マニピュレーションにおいて、運動空間と力触覚が統合され、かつ、操り運動プリミティブの生成に適した物理的数理モデルとはどのようなものか？
- (2)相互結合に適した操り運動プリミティブを獲得する工学的手法はどのようなものか？
- (3)操り運動プリミティブを大域的に結合する工学的手法はどのようなものか？

3. 研究の方法

研究代表者は、これまでに力触覚と運動の連成モデルとして(a)滑り・転がり運動と連成した摩擦モデル、(b)ラケットラバーの弾性エネルギーと運動の連成による衝突モデルを開発しており、また、これらに基づいたマニピュレーションの制御則開発も行っている。これらは把持・操り系における接触状態の遷移(滑り、転がり)や卓球の打ち返しにおける速度の跳躍現象(衝突)に関して、運動との連成を繰り返し制御系設計との親和性を考慮した物理的数理モデルである。本研究では[問い(1)]に対する解答として、これらのモデルを基に非拘束マニピュレーションにおけるより一般的な力触覚と運動の連成現象を導出することにより、力触覚を陽に活用可能な連成モデルを得ることを目指した。具体的には、非拘束マニピュレーションに頻出する次の連成現象を取り扱った：

- (A) 運動と連成した接触面の大変位を伴う粘弾性摩擦(連成モデル(a)の拡張)
- (B) 力積の相互交換を伴う弾性と運動の連成による衝突現象(連成モデル(b)の拡張)
- (C) 力積の相互交換と接触面の大変位による粘弾性摩擦を伴う衝突現象((A) , (B) の統合)

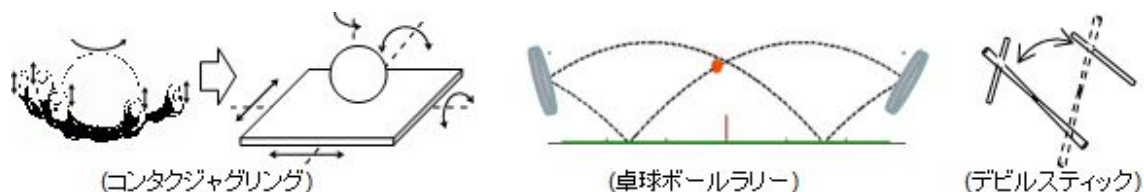


図 1: 想定する非拘束マニピュレーションのタスク

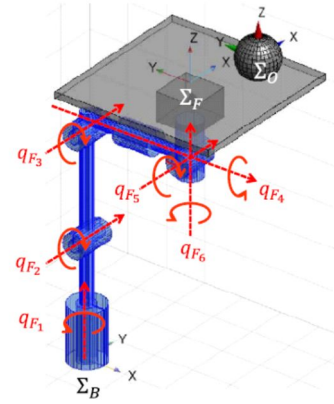
また、[問い(2)]と[問い(3)]に対する解答として、上記のモデルを用いた非拘束マニピュレーションの運動プリミティブとなり得る制御手法の開発を行った。詳細は研究成果の項目で述べる。

4. 研究成果

非拘束マニピュレーションの基本要素である運動プリミティブの獲得を目指し、大別して4つの研究成果を得た：(1)不完全拘束下での物体搬送を想定したボール・プレートシステムの安定化と周期運動の制御；(2)打撃などの不連続作用による物体の操りを想定したボール打ち上げシステムでの安定化制御；(3)物体運動のダイナミクスを間接的に活用することを想定した劣駆動系の最適制御；(4)物体との接触に起因する不連続状態遷移を含むバックラッシュ系の安定化制御。以降ではそれぞれの成果を紹介していく。

【(1)不完全拘束下での物体搬送を想定したボール・プレートシステムの制御】

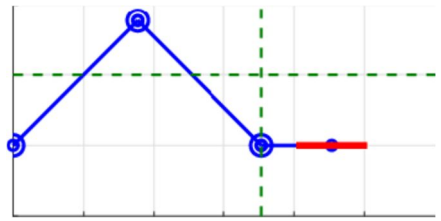
本課題では、手の平に物体を不完全拘束状態で設置した状況での搬送タスクを想定している。手の平をプレート、物体を球体と見なし、本質的に不安定である物体について、プレート上での局所的な安定化と空間内での大域的位置の制御を同時に達成する制御手法を開発した。その際、人間の腕に対応するロボットマニピュレータの運動制御系、およびボール・プレートシステムの安定化制御系の階層構造、いわゆるカスケード制御系を用いたシステム全体の安定化を発生した。



さらに手法を拡張して、人間の技巧的動作であるコンタクトジャグリングとして周期運動を行うパームサークルのタスクを実現する制御系を開発した。そこでは、周期運動の参照軌道を内部モデルに持っており、実際の人間の動作においても運動モデルを内在することを示唆する結果となった。

【(2)打撃などの不連続作用による物体の操りを想定したボール打ち上げシステムの制御】

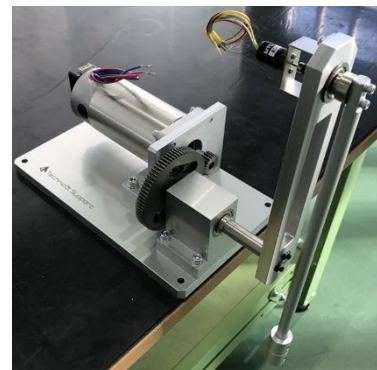
本課題では、物体を押ししたり衝撃を加えたりするような離散的入力のみが利用できる状況を想定し、卓球ロボットによるボールの打ち上げタスクの安定化制御を行った。具体的には、マニピュレータの運動制御を行う連続時間制御系、およびボール状態(位置,高さ)を打撃により整定する離散時間制御系を開発した。本手法についてもカスケード制御系を構成しており、特に、連続と離散が混在するハイブリッド制御系となっている。



さらには、マニピュレータの制御系において生じる軌道追従の誤差を考慮して、ラケットとボールの離散系に対する誤差の影響の解析を行った。得られた解析結果をもとにサーボ制御系を構成することでボール位置に生じる外乱を除去することに成功し、人間の技巧動作においても実際に行う修正動作のメカニズムに関する示唆が得られた。

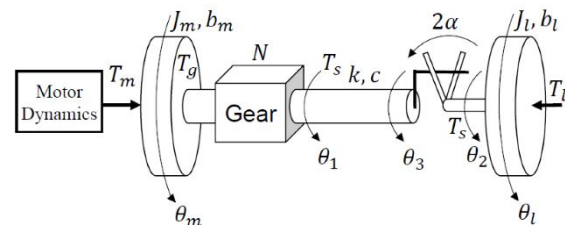
【(3)物体運動のダイナミクスを間接的に活用することを想定した劣駆動系の最適制御】

この課題では、マニピュレータの関節の一部が非駆動(意図的に駆動しない)場合、もしくは手先と物体の接触箇所のように能動的に動かせない状況を想定して、右図のように倒立振子の一種である PenduBot の制御に取り組んだ。本システムは重力の影響下にあるため、垂れ下がった状態から倒立状態に制御するためには、対象のダイナミクスを積極的に利用する必要がある。ここでは非線形最適制御において効率的に最適解が得られる安定多様体法を用いて、単一のフィードバック制御により振り上げ安定化を達成した。さらに、安定多様体上に内在している最適軌道群を発見することで、1回振り上げ、2回振り上げ、・・・,といった様々な振り上げ回数による安定化が可能な示唆を得た。



【(4)物体との接触に起因する不連続状態遷移を含むバックラッシュ系の安定化制御】

この課題では、非拘束マニピュレーションにおいて、マニピュレータ手先と物体の接触面に生じる現象のうち、バックラッシュ(いわゆるガタ)を扱うことを目的として、2慣性系の伝達機構にバックラッシュを持つ系の安定化制御を行った。バックラッシュ系では接触伝達力と状態に不連続な振る舞いが発生する。そのため、その挙動を抑える分数階微分に基づくPID制御器の適応を行い、接触力と角速度の振動抑制とレギュレーションの同時制御を達成した。また、実際の挙動解析と制御手法の検証のため、バックラッシュの間隙の調整が可能な実験機の開発と作成を行った。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akira Nakashima, Taiga Ishiguro, Noboru Sakamoto
2. 発表標題 A Palm Circle Task Controller of Contact Juggling for Ball-and-Plate System with 6-DOF Manipulator
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島明, 牧大裕, 笹山泰生, 坂本登
2. 発表標題 ボール打ち上げタスクにおける離散時間システムに基づいた制御系設計
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 椎野功大, 磯村真也, 坂本登, 中島明
2. 発表標題 バックラッシュを含む駆動系への非整数次PID制御系の適用
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松元大輝, 坂本登, 中島明
2. 発表標題 安定多様体法による並列回転型倒立振子の振り上げ安定化制御
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Nakashima
2. 発表標題 A Control Method for Palm Circle Task on Contact Juggling of a Ball by a 3-DOF Manipulator
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Nishida, Kenya Takeda, Noboru Sakamoto, Akira Nakashima
2. 発表標題 A numerical study on fractional PID control of three-inertia system using exact backlash model
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenya Takeda, Noboru Sakamoto, Akira Nakashima
2. 発表標題 Experimental verification of Acrobot transitions between unstable equilibrium attitudes via stable manifold method
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akira Nakashima, Daisuke Maki, Taiki Sasayama and Noboru Sakamoto
2. 発表標題 A Control Design for Paddle Juggling based on Discrete System with Racket Tracking Errors
3. 学会等名 2022 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mohanad Samadouny, 坂本 登, 中島 明
2. 発表標題 Power Train Controller with Backlash Using Disturbance Observer Based Control
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯村 真也, 坂本 登, 中島 明
2. 発表標題 メカニカルシステムにおけるVDSEオブザーバの評価 -Pendubotを用いたケーススタディー-
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川司, 中島明, 坂本登
2. 発表標題 筋電位からの関節角度推定におけるNARXモデルの回帰ベクトル構成に関する実験的考察
3. 学会等名 第10回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mohannad Samadouny, Noboru Sakamoto, Akira Nakashima, Shinya Isomura
2. 発表標題 Torque control experimental investigation for a flexible shaft with backlash
3. 学会等名 第10回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 磯村真也, 坂本登, 中島明
2. 発表標題 Pendubotの非線形最適制御による振り上げ安定化制御
3. 学会等名 第10回 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂本 登 (Sakamoto Noboru) (00283416)	南山大学・理工学部・教授 (33917)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------