

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年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：2016～2018

課題番号：16K06166

研究課題名(和文)衝突の離散事象を伴う技巧的動作における非ホロノミック系に基づいた相互作用の創発

研究課題名(英文) Realization of Nonholonomic Interaction in Dexterous Motions with Collisions as Discrete Events

研究代表者

中島 明 (Nakashima, Akira)

南山大学・理工学部・准教授

研究者番号：70377836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1)接触・非接触のモデリング、(2)転がり接触の非ホロノミック系を利用した運動計画法、(3)劣駆動系における非線形最適制御を柱として研究を進めた。課題(1)では、紙めくり作業を双腕多指ハンドロボットにより実現を通して、離散事象である相互作用の適切なモデリングを達成した。課題(2)では、相互作用の可操作性を向上させる非ホロノミック性を利用するため、把持・操り系における転がり接触を用いた運動計画法、および球体移動ロボットの運動制御を実現した。課題(3)では、動的技巧的動作の好例である劣駆動系アクロバットにおいて、非線形最適制御により系に内在する平衡点の遷移制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間は移動では歩行動作、道具を扱う際には把握・操り、素早い正確な動作では投げ・捕獲、協調的動作ではジャグリングといった様々な運動を行うことができ、人間の巧みさを表すものとして技巧的動作と呼ばれている。詳しくは、身体(神経系、筋肉系)、脳(知覚情報処理系)と環境力学系が結合され、ある種の安定なダイナミクスを有する相互作用が確立されることにより、身体各部位とその間に形成された秩序が技巧的動作とされている。このような相互作用の創発メカニズムを解明することで人間の技巧的動作を明らかにすると共に、工学的実現手法を開発することで、未知環境で活動するロボットの実現に大きく近づく。

研究成果の概要(英文)：This research dealt with the three topics: (1) Modeling of the contact transition; (2) Motion planning based on the nonholonomy of the rolling contact; (3) Nonlinear optimal control of an acrobot. In the 1st topic, the contact transition was modeled based on a probabilistic one in the paper flipping task by a dual-armed robot system. In the 2nd topic, a motion planning based on the rolling contact in a grasp and manipulation system and control of spherical robot were proposed. In 3rd topic, the transition control among equilibria in an acrobot based on nonlinear optimal controls was proposed.

研究分野：制御工学、ロボット工学

キーワード：多指ハンドロボット 非ホロノミック系 拘束の切り替え 劣駆動 球体ロボット 転がり拘束 非線形最適制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

人間は移動では歩行動作、道具を扱う際には把握・操り、素早い正確な動作では投げ・捕獲、協調的動作ではジャグリングといった様々な運動を行うことができ、人間の巧みさを表すものとして技巧的動作と呼ばれている。詳しくは、身体(神経系、筋肉系)、脳(知覚情報処理系)と環境力学系が結合され、ある種の安定なダイナミクスを有する相互作用が確立されることにより、身体各部位とそこに形成された秩序が技巧的動作とされている。このような相互作用の創発メカニズムを解明することで人間の技巧的動作を明らかにすると共に、工学的実現手法を開発することで、未知環境で活動するロボットの実現に大きく近づくこととされている。

### 2. 研究の目的

技巧的動作の解析では人間の動作の生理学的知見に基づいたものが主流であり、数理モデルベースの研究は少ない。さらに、技巧的動作に必ず現れる相互作用である衝突は本質的に離散事象を含むハイブリッドシステムとなる。本研究では、技巧的動作をハイブリッドシステムとして捉え、系全体を安定とする運動制御手法を導出することで、相互作用が創発される仕組みを明らかにすることを目指す。また、様々な相互作用において技巧的動作の本質を支えている非ホロノミック系を扱い、非線形最適制御に基づいた制御系構築を行っていく。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)接触・非接触のモデリング、(2)転がり接触の非ホロノミック系を利用した運動計画法、(3)劣駆動系における非線形最適制御を柱として研究を進める。課題(1)では、離散事象である相互作用を適切にモデリングすることを目指し、柔軟物の一種である紙めくり作業を双腕多指ハンドロボットにより実現することを目指す。課題(2)では、相互作用において可操作性を向上させる非ホロノミック性を積極的に利用するため、把持・操り系における転がり接触を用いた運動計画法、および、球体移動ロボットの運動制御を取り扱う。課題(3)では、動的技巧的動作の代表例である劣駆動系のアクロボットにおいて、非線形最適制御により、系に内在する平衡点の遷移を実現する運動制御を目指す。

### 4. 研究成果

#### 【課題(1)双腕多指ハンドロボットによる紙めくり動作における接触遷移モデリング】

双腕型多指ハンドロボットによる人間の動作解析に基づいた折り紙における紙のめくり上げ動作の実現を行なった(図1)。人間の技巧的動作の一つである折り紙においては、接触・非接触(衝突)による運動拘束の遷移が多数発生する。この拘束の遷移を計測することで(図2)、人間の技巧的動作を双腕多指ハンドロボットシステムに移植可能な方法論を確立することで、ロボットの動作計画の簡便性の向上を目指す。

具体的には、計測された人間の指先動作に2つの異なるウェーブレット解析を行うことで接触遷移の特徴量を抽出し、さらに確率モデルの一種である隠れマルコフモデルとしてモデリングすることで、指先位置の軌道データに遷移情報を埋め込む手法を開発した。

またその情報に基づき、ロボットと人間の異構造性を考慮した非線形計画法により目標軌道を算出した。最後に、軌道に基づいた位置制御・力制御の切り替え制御則を導出し、実験においてめくり上げ動作を実現した。



図1: 双腕多指ハンド

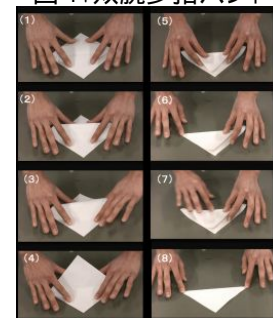


図2: 紙めくりの計測

#### 【課題(2) 転がり接触の非ホロノミック系を利用した運動計画法】

(2-1)多指ハンドによる転がり拘束の非ホロノミック性を用いた把持物体の操り制御方法において、多指ハンドにおける配位座標の制限を考慮した運動計画法を導出した。多指ハンドは多関節マニピュレータの一種であり、関節構造によりその可動範囲は異なる。その構造を一般化した表現として接触座標の制限として取り込むことで、統一的な運動計画法を考案した。具体例として、図3のように、片側が6軸マニピュレータ、もう一方が0軸の球体指先の操り系を考え、把持対象物を無限に回転させることが可能な動作の実現に成功した。これはどのようなマニピュレータの関節構造と多数のロボットを要しても不可能な動作であり、人間をも超える技巧的動作を達成している。

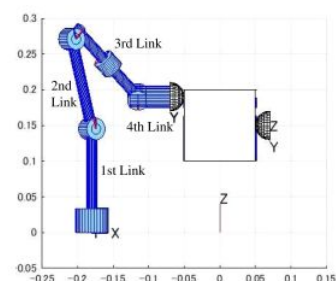


図3: 転がり接触による操り

さらに、運動計画法において数値計算により求める必要がある転がり運動のパラメータに関して、関節構造による計算精度の改善、および求解速度の向上を達成した。

(2-2) 内部に駆動源として二輪車両を有する球体移動ロボット(図4)を考案および制御則の構築と検証を行った。具体的には、まず、2次元平面内において、二輪車両の車輪・支持点

と球体内部の接触点に関する転がり接触条件，および球体外部と地面の接触点における転がり接触条件を表現する拘束式を導出し，内部車両と球体の運動を拘束力による連成項を持つラグランジュ運動方程式としてモデル化した．次に，得られたモデルを，拘束された配位空間に属するように制御変数を選択肢，拘束力を消去することで低次元化モデルへの変換を行った．この低次元化モデルに関して平衡点近傍における線形化モデルを導出し，目標点への状態フィードバック則を導出した．得られた制御則について，シミュレーションと実験（口頭発表時）による検証を行い，内部の二輪車両の安定化を行いつつ外殻の球体をすばやく目標点へと移動させることが可能であることを実証した．従来の内部車両駆動形の球体ロボットでは，球体に対して車両の相対位置を変えることで，偏心した重心による重力効果により移動する，非常に緩慢な動きしか行うことができなかった．一方本研究では，内部車両が車輪で球体内部を直接的に駆動することに得られる推進力を積極的に利用しており，かつ内部車両の安定性も実現することで，迅速な移動を可能としたものである．



図 4:球体ロボット

### 【課題(3) 劣駆動系アクロロボットにおける非線形最適制御を用いた平衡点の遷移制御】

関節構造の一部が非駆動である，いわゆる劣駆動機械系の一種であるアクロロボット（図 5）に関して，異なる平衡状態の間を統一的に遷移する制御手法を導出した．アクロロボットは体操選手の鉄棒競技をモデル化したものであり，鉄棒を掴む手が非駆動関節，腰の動きが駆動関節に対応している．制御問題で扱われる 2 重倒立振子の一種であるが，非駆動関節が根元側にあるため，非常に制御が難しく，4 つの異なる平衡状態を持ち，平衡点近傍において動的に異なる振る舞いと可制御性を有する．本研究では，それらモードの切り替えである遷移制御を実現するため，非線形最適制御により統一的なコントローラを導出することにより実現した．さらに，得られた結果を実験機に適用することにより，パラメータ誤差，外乱によるロバスト性の実証も行った．



図 5:アクロロボット

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 中島明, 配位座標の制限を伴う 2 指ハンドによる転がり接触の非ホロノミック性に基づく把持対象物の操り制御, 計測自動制御学会論文集, vol. 54, no. 3, pp. 320-330, 2018 (査読あり)

〔学会発表〕(計 6 件)

1. 鈴木達郎, Anh Tuan Tran, 坂本登, 中島明, PIO 現象を抑制した横系航空機モデルに対する非線形最適制御器設計, 第 61 回自動制御連合講演会, CD-ROM, pp. 1693-1700, 2018 (査読なし)
2. Akira Nakashima, Sotaro Maruo, Ryoma Nagai and Noboru Sakamoto, “2-Dimensional Dynamical Modeling and Control of Spherical Robot Driven by Inner Car,” IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1846-1851, 2018 (査読あり)
3. 小塚健太, 坂本登, 中島明, 鈴木達郎, 米川翔太, 西田裕貴, 宮野峻, 安定多様体法を用いたアクロボットの平衡姿勢間遷移制御 - 制御系設計と検証実験 -, 第 5 回制御部門マルチシンポジウム, CD-ROM, Sa53-3, 2018 (査読なし)
4. Akira Nakashima, “A motion planning for grasp and manipulation system based on rolling motion,” IEEE Conference on Control Technology and Applications, pp. 167-174, 2017 (査読あり)
5. 中島明, 把持・操り系における転がり運動を用いた運動計画の一手法, 計測自動制御学会第 4 回制御部門マルチシンポジウム, CD-ROM, 1C2-4, 2017 (査読なし)
6. Akira Nakashima, Yoshihiro Iwanaga, Yoshikazu Hayakawa, “A Motion Planning of Dual Arm-Hand Manipulators for Origami-Folding Based on a Probabilistic Model of Constraint Transitions within Human Behavior,” IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.562-569, 2016 (査読あり)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<https://portal.nanzan-u.ac.jp/research/view?l=ja&u=103140>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：坂本登

ローマ字氏名：Sakamoto, Noboru

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。