

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02110

研究課題名(和文)高バックドライバビリティを備えた変形制御に基づくレオロジーロボティクス

研究課題名(英文)Rheology Robotics Based on Deformation Control with High Backdrivability

研究代表者

妹尾 拓 (Senoo, Taku)

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：10512113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットハンドの柔軟性を機構的・制御的に実現することで、対象との接触応答をリアルタイムに調整可能なフィジカルインタラクションを実現した。ハードウェアとして、磁石歯車による非接触伝達機構から成る低摩擦アクチュエータを用いて、バックドライバビリティの高いロボットグリッパを開発した。制御則として、インタラクションによって生じるロボットの位置姿勢変化を変形モデルベースの力制御則で再現し、衝撃吸収や跳ね返り抑制が可能な可塑的動作を基軸とした多様な柔軟特性を実現した。これらの技術を統合することで、高速移動しながら対象を低衝撃で弾かずに掴むマニピュレーションを実現し、柔軟性と高速性の両立を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インタラクションによって生じるロボットの運動を“変形”という概念で再定義し、ロボット制御手法を体系化する点が学術的な意義である。柔軟性を実現するシステム設計のアプローチとして、ソフトロボティクスのような弾性材料を組み込む手法とは異なり、関節やリンクを剛体メカニズムで構成しながら物理的摩擦を極限まで低減することで、高バックドライバビリティと制御性の両立を達成する点が独創的である。制御/ハードウェアの両面からロボットインタラクションに関する理論的・技術的基盤を刷新し、積極的に非停止状態を利用しながら衝撃緩和により高速マニピュレーションを実現可能にした点は社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：By mechanically and controllably realizing the flexibility of the robot hand, we have realized a physical interaction system that enables real-time adjustment of the contact response with the object. As hardware, we developed a robot gripper with high backdrivability using a low-friction actuator consisting of a non-contact transmission mechanism with magnet gears. As a control law, a deformation model-based force control law reproduced the position and posture changes of the robot caused by the interaction, and realized various flexible characteristics based on plastic motion that can absorb shocks and suppress bounces. By integrating these techniques, we realized a manipulation system that can grasp an object with low impact and without bouncing while moving at high speed, demonstrating both flexibility and high speed.

研究分野：知能ロボティクス

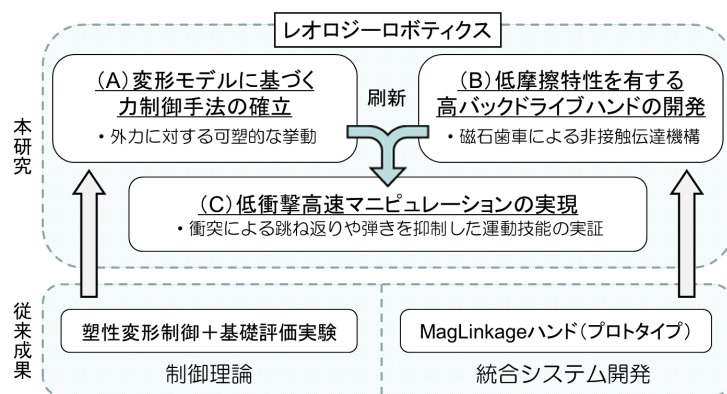
キーワード：知能ロボティクス 機械力学 感覚行動システム 力制御 ロボットマニピュレーション

1. 研究開始当初の背景

汎用ロボットハンドを用いたマニピュレーションの研究は古くから行われているが、実用的なレベルへはまだ至っていない。その原因の一つは、接触作業においてロボットの機構・運動に柔軟性の調整力がなく、物理的インタラクションの不安定性・不確実性、つまり接触状態の不連続性が頻繁に生じるためである。また、一般的なロボットは固くて重い高剛性かつ高減速比の構造を基本とした位置精度重視の設計であり、従来型の力制御では関節の固さに起因して外力に対する接触応答の制御遅延が大きい。一方、近年ではソフトロボティクスの分野が注目を集めており、人間の筋肉や皮膚のように弾性要素を含んだ構造を参考にして、ロボットにも柔らかい材料・デバイスを積極的に用いる研究が行われている。ロボット自体が柔らかいために、外力に反応して緩衝挙動が受動的に生成されるため応答性の高いバックドライバビリティが実現できる。しかし、ハードウェア固有の柔軟性を利用するアプローチでは、ロボットの柔らかさが機構に大きく依存することになるため、柔軟性の調整は困難である。汎用ロボットハンドにとっては、柔らかい動きだけでなく強固な把持や精密な位置決めなど、単一作業においてもフェーズに応じて要求事項が多岐にわたるため、広帯域をカバーする柔軟性調整力が必要となっている。

2. 研究の目的

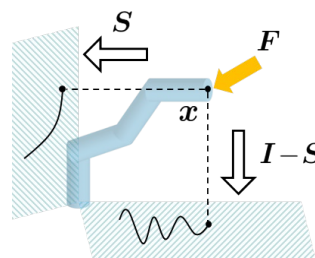
研究代表者はこれまでに、緩衝材・食品・柔軟体などで観測される“可塑性”に着目することで、衝撃吸収に起因してロボットがバックドライブする動きを「ロボットの塑性変形」と捉えるコンセプトを提案し、塑性変形モデルを導入した新たな制御手法を開発してきた。並行して、ダイレクトドライブモータ・磁石歯車・低減速比の遊星減速機から成るアクチュエータを開発しており、磁石による非接触のトルク伝達により物理的摩擦を無くすことで、バックドライバビリティの非常に高い動作が可能である。本研究では、これまでの研究代表者の研究成果を発展させ、バックドライバビリティの高いロボットハンドと変形モデルベースの力制御手法を統合することで、柔軟で安定したフィジカルインタラクションが可能なレオロジーロボティクスの確立を目的とする。関節やリンクに剛体メカニズムを用いて柔らかい動きを実現するアプローチであるため、外力に対して違和感のない自然な応答を極限まで追求し、柔軟性をリアルタイムに調整可能なプラットフォームの開発を目指す。これにより、サーボ制御の応答よりも高速な時間スケールで進行する接触瞬間の衝撃に対して、ハードウェアの高バックドライバビリティにより跳ね返りを抑制して接触時間を長く確保することで、連続的に接触挙動へ遷移するマニピュレーションを実証していく。よって本研究では以下の3つの課題、(A)変形モデルに基づく力制御手法の確立、(B)低摩擦特性を有する高バックドライブハンドの開発、(C)低衝撃高速マニピュレーションの実現、を設定する。



3. 研究の方法

(A) 変形モデルに基づく力制御手法の確立

塑性変形制御のコンセプトを拡張し、塑性だけでなくインタラクションによって生じるロボットの位置姿勢変化を「ロボットの変形」と捉え、物質の変形を扱うレオロジー分野の変形モデルを導入することで、外力によってバックドライブするロボットの柔軟な運動を変形制御として定式化することを目指す。塑性ベースと従来手法の弾性ベースを融合することで、柔らかい接触と強固な把持を時間的/空間的に切り替え可能な制御則を導出する。



(B) 低摩擦特性を有する高バックドライブハンドの開発

摩擦低減と出力トルク向上を極限まで追求する方針に基づき、機構的・制御的に広帯域の柔軟性を実現可能な磁石歯車ベースのロボットハンドを開発する。運動抵抗となる摩擦やコギングは非線形性が強く、これらを低減することはアクチュエータ応答のリニアリティを高めてトルク補償をせずとも所望の応答特性を実現しやすいため、制御性の観点からも優位な設計方針である。ハンド機構としては、入出力軸の配置設計に焦点を合わせることでスリム化・軽量化をおこなない、作業性を向上した高バックドライブハンドの開発を目指す。

(C) 低衝撃高速マニピュレーションの実現

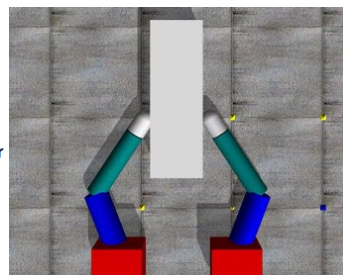
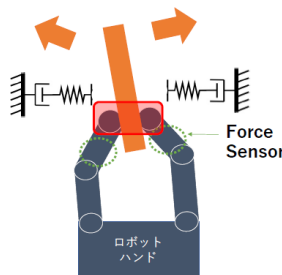
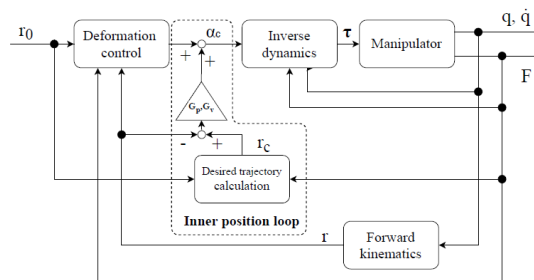
高バックドライブハンドをアームに搭載し、アームで高速に移動しながら対象/環境に対して

ハンドで衝撃吸収をおこなうことにより、跳ね返りや弾きを抑制しながら把持操りへ移行する柔軟な動作を実現する。固定環境や把持対象に対して積極的に指を叩きつけるように物体をつかみ取る突き指グラスピングを実現する。

4. 研究成果

(A) 変形モデルに基づく力制御手法の確立

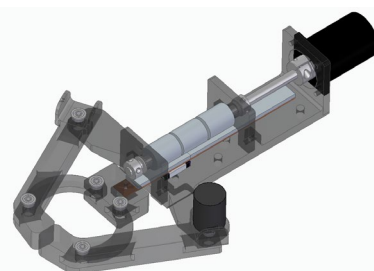
ロボットハンドのように慣性が小さく関節摩擦が相対的に大きい機構に対してモデルベースの力制御手法を適用すると、パラメータ誤差の影響により挙動が不安定になる。この問題を解消するため、変形モデルから導出される目標位置を陽に計算し、力フィードバック制御系の内部に位置制御系を組み込んだ二重構造制御系を提案した。これにより、塑性変形に基づく受動的な緩衝軌道を生成すると同時に、パラメータ誤差に起因する振動の抑制が可能となった。力センサは一般的にノイズが多く、かつ指モジュールに対してサイズが無視できるほど小さくはないため取り付けが困難な場合が多い。また、接触点推定も同時に行う必要があるため力推定の精度が不十分となることが多い。これらの問題を回避するため、イナーシャペニングをせずに、力センサレスで実行可能な変形制御則を導出した。塑性変形制御を2本指での物体把持へ拡張した。把持物体に働く外力に対して、把持物体とその両側の仮想バネから構成される拘束条件を設定することで、外力と反対方向の指に引っ張り力が発生して把持物体との接触維持が可能となり、把持状態の平衡点を受動的に調整できる理論的枠組みを整備した。シミュレーションにより、両指で把持した物体に外力を作用した条件において、把持状態を保ちながら外力に従って塑性的な挙動が生成できることを検証した。



シミュレーションにより、両指で把持した物体に外力を作用した条件において、把持状態を保ちながら外力に従って塑性的な挙動が生成できることを検証した。

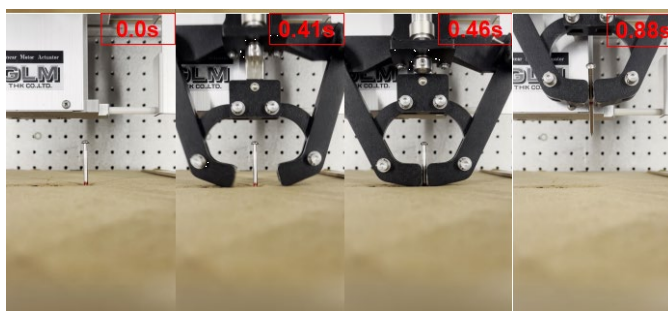
(B) 低摩擦特性を有する高バックドライブハンドの開発

磁石歯車を利用したグリップを開発した。磁石による非接触のトルク伝達により物理的摩擦を無くすことで、出力軸側に負荷が加わった際にわずかなトルクで逆回転し、従来のロボットに比べてバックドライブバビリティの高い柔軟な動作が可能である。機構全体を剛体で構成しているため制御が容易で高精度な位置決めも実行しやすい。指先側面あるいは掌に対して負荷が生じたときに受動的に両指が内側へスライドする機構を設計し、衝撃から把持動作への移行を効率的に実行できる構造となっている。



(C) 低衝撃高速マニピュレーションの実現

ロボットハンドの指モジュールに対して二重構造制御系を実装することで、ヒトがロボットを押したときに滑らかに動作するインタラクションタスクを実現した。提案した制御系に関する比較実験をおこない、安定した外力緩衝が可能であることを実証した。把持物体として、厚みのある木片と薄いコイン状のプラスチックに対して実験をおこない、衝撃力を関節で吸収しながら両指を受動的に閉じる動作を積極的に利用することで、衝撃緩衝と高速把持の両立が可能となった。板に刺さった釘に対して、グリップを減速せずに敢えて打ち付ける形で高速に釘を引き抜く突き指マニピュレーションを実現した。外力に対してバックドライブしながら両指を受動的に閉じる機構を積極的に利用することで、衝撃力を関節で吸収しながら閉じた指で把持した物体を引き抜く力へ変換し、柔軟性と高速性の両立が可能となった。把持前・把持瞬間・把持後において、統一された変形制御則でリアルタイムに柔軟性を調整しながら、一連の動作をシームレスに遷移可能な運動技能を実現した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Taku Senoo, Atsushi Konno, Yunzhuo Wang, Masahiro Hirano, Norimasa Kishi, and Masatoshi Ishikawa | 4. 巻 Vol. 34, No. 5 |
| 2. 論文標題 Tracking of Overlapped Vehicles with Spatio-Temporal Shared Filter for High-Speed Stereo Vision | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics | 6. 最初と最後の頁 1033-1042 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p1033 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 川原大宙, 妹尾拓, 石井抱, 平野正浩, 岸則政, 石川正俊 | 4. 巻 vol. 58, no. 1 |
| 2. 論文標題 輪郭情報に基づくテンプレートマッチングを用いた重畳車両の高速トラッキング | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集 | 6. 最初と最後の頁 21-30 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.58.21 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Kenichi Murakami, Koki Ishimoto, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa | 4. 巻 Vol. 9, No. 3 |
| 2. 論文標題 Human Robot Hand Interaction with Plastic Deformation Control | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Robotics | 6. 最初と最後の頁 1-15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/robotics9030073 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 妹尾拓 | 4. 巻 Vol. 38, No. 4 |
| 2. 論文標題 野球ロボットシステム -高速ビジョンによる走攻守- | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本ロボット学会誌 | 6. 最初と最後の頁 313-317 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.38.313 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件）

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 妹尾拓 |
| 2. 発表標題 高速応答可能な野球ロボットシステム |
| 3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiromichi Kawahara, Taku Senoo, Idaku Ishii |
| 2. 発表標題 Grasping complex shapes with the integration of high-speed vision and machine learning in a dynamic situation |
| 3. 学会等名 IEEE International Conference On Mechatronics 2023（国際学会） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Taku Senoo, Atsushi Konno, Yunzhuo Wang, Masahiro Hirano, Norimasa Kishi, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 Automotive Tracking with High-speed Stereo Vision Based on a Spatiotemporal Shared Filter |
| 3. 学会等名 26th International Conference on System Theory, Control and Computing（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 妹尾拓, 川原大宙, 石井抱, 籾内健人, 平野正浩, 岸則政, 石川正俊 |
| 2. 発表標題 高周波点滅パターン抽出に基づく矢印信号機認識 |
| 3. 学会等名 第23回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 竹内聖登, 小水内俊介, 妹尾拓, 近野敦 |
| 2. 発表標題 赤紫蘇農場におけるYOLOv7を用いた雑草識別 |
| 3. 学会等名 第23回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大坪隼人, 妹尾拓, 石井抱 |
| 2. 発表標題 高速ロボットハンドによる振り上げ動作を用いたインハンドマニピュレーション |
| 3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 大坪隼人, 妹尾拓, 石井抱 |
| 2. 発表標題 ロボットハンドによる摩擦差を利用した用紙分離 |
| 3. 学会等名 第40回日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Taku Senoo and Idaku Ishii |
| 2. 発表標題 Baseball Robots Based on Sensory-Motor Integration |
| 3. 学会等名 2021 International Conference on Control, Automation and Systems (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Taku Senoo |
| 2. 発表標題 Dynamic Robot Manipulation using High-speed Cognitive Behavior System |
| 3. 学会等名 Robotics and Computer Science World Forum 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiromichi Kawahara, Taku Senoo, Idaku Ishii, Masahiro Hirano, Norimasa Kishi and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 High-speed tracking for overlapped vehicles using instance segmentation and contour deformation |
| 3. 学会等名 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 池ヶ谷健太, 妹尾拓, 石井抱 |
| 2. 発表標題 高速回転機構に基づく分身ロボットの提案と二次元シミュレーション評価 |
| 3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 立石侑也, 島崎航平, 妹尾拓, 石井抱 |
| 2. 発表標題 ロボットハンドを使用した加振によるねじ緩み判別 |
| 3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川原大宙, 妹尾拓, 石井抱 |
| 2. 発表標題 高速ロボットハンドを用いた動的環境における複雑形状物体把持 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi Tanaka, Keisuke Koyama, Taku Senoo, Makoto Shimojo, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 High-speed Hitting Grasping with Magripper, a Highly Backdrivable Gripper Using Magnetic Gear and Plastic Deformation Control |
| 3. 学会等名 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ryosuke Higo, Taku Senoo, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 Dynamic In-Hand Regrasping Using a High-Speed Robot Hand and a High-Speed Vision |
| 3. 学会等名 1st Virtual IFAC World Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Fumiya Shimada, Taku Senoo, Kenichi Murakami, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 Bolt Loosening Detection Using Multi-purpose Robot Hand |
| 3. 学会等名 2020 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenichi Murakami, Koki Ishimoto, Taku Senoo, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 Robot Hand Interaction Using Plastic Deformation Control with Inner Position Loop |
| 3. 学会等名 2020 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Satoshi Tanaka, Keisuke Koyama, Taku Senoo, and Masatoshi Ishikawa |
| 2. 発表標題 Adaptive Visual Shock Absorber with Visual-based Maxwell Model Using Magnetic Gear |
| 3. 学会等名 2020 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 島田史也, 村上健一, 妹尾拓, 石川正俊 |
| 2. 発表標題 6軸力センサを搭載したロボットハンドを用いた加振によるボトル内の液体判別 |
| 3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 漆原昂, 村上健一, 妹尾拓, 石川正俊 |
| 2. 発表標題 弾塑性変形制御を用いたヒューマンロボットインタラクション |
| 3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ

<https://scc.ist.hokudai.ac.jp/~senoo/index-j.html>

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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|