

A Multi-DoF Exoskeleton Haptic Device for the Grasping of a Compliant Object Adapting to a User's Motion Using Jamming Transitions

Ryohei Michikawa, Takahiro Endo, and Fumitoshi Matsuno

概要

本研究では、近年急速に発展しているバーチャルリアリティにおいて今だ未解決の課題である、仮想的な把持感覚の実現に取り組んだものである。特に、自然な動作と自然な感覚提示に着目し、VR ユーザーが無意識的に期待する把持感覚を提示するための新しい触覚デバイスを開発した (Fig. 1)。このデバイスは、指の動きを制限し、指全体に制動力を加えることができるグローブ状の外骨格と、幅広い剛性を再現するための柔軟なパッドからなる。約 300 g という軽量を実現しながら、指の各部位に対して 4.0 N から 11 N の力を提示することが可能であり、また、約 60 倍の柔軟性・剛性の異なる物体を提示することが可能である。本デバイスは、これまでのデバイスでは不可能であった握力把持や中間把持などの把持感覚を提示することが可能であり、その応用先として、VR アプリケーションやロボット遠隔操作をより自然に行うためのインターフェースとして期待される。

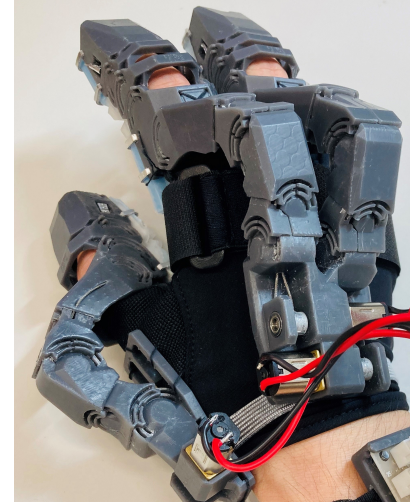


Fig. 1: Developed prototype device

背景と課題：バーチャルリアリティにおける触覚提示

ロボット手術や VR スキルトレーニングにおいて、触覚情報をヒトにフィードバックすることで、現実の物体操作に近い経験を提供し、作業効率向上や VR への没入感向上が期待されている (Fig. 2)。特に、普遍かつ根源的な動作である**把持感覚の提示**が実現すれば、様々な VR アプリケーションやロボット遠隔操作において、広い応用が可能である。しかし、**軽量な装着型デバイス**によって、ユーザーの自然な動作に合わせた把持感覚を提示するためにはいくつかの課題がある。

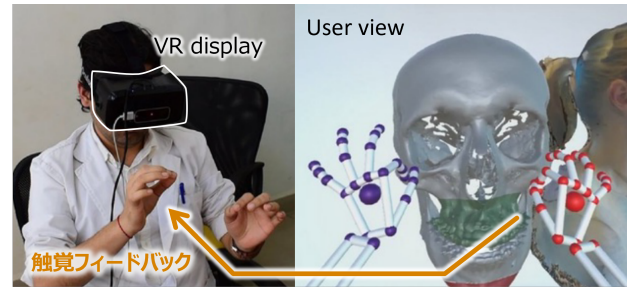


Fig. 2: Example of haptic feedback in VR surgery training.

把持動作は、対象に応じて**様々な把持形式**が無意識的に選択されることが分かっており (Fig. 3)、よりリアリティのある把持感覚の提示のために、これらの形式に適した感覚を提示することが1つの課題である。また同時に、**物体の力学的特性** (主に柔軟性/剛性) を提示することも課題の一つである。これは、視覚に頼らない触覚による物体の識別や、把持動作における適切な力加減を行うために、柔軟性の情報が不可欠であるためである。

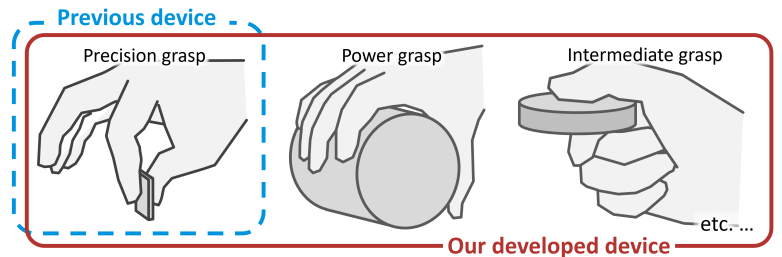


Fig. 3: Presentable grasping states; the illustrations show representative grasps for each state.

提案手法：指動作の制動と可変剛性素材による把持感覚提示

本研究では、制動力による受動的な力覚フィードバックと、連続的に剛性変化が可能なパッドによる触覚提示を組み合わせることで、ユーザーの自然な動作に合わせた把持感覚を提示するデバイスを提案する。提案デバイスは、既存の触覚提示デバイスが満たすことができなかつた以下の3つの特徴を持つ。

- **装着性と軽量さ**：1指当たり1つの小型アクチュエータで駆動するため、5指デバイスでも300gと軽量である。
- **多様な把持形式への対応**：ユーザー動作の制動力によって感覚提示を行う受動的力覚フィードバックを採用することで、ユーザーの意図に従った把持形式の提示が可能である。
- **物理特性の提示**：剛性を連続的に制御可能なパッドによって、硬い物体から柔らかい物体まで幅広い物体を提示できる。

こうした3つの特徴を実現するため、提案デバイスは任意タイミングで制動力を提示できるグローブと剛性を連続的に制御可能なパッドから構成される (Fig. 4).

一般に、ヒトが実際の物体を把持する際には、把持対象物の形状に合わせて指を事前に形成する (Pre-shaping) 動作を行う。そこで我々は、グローブ状の外骨格で指を覆い、Pre-shaping 後に全体の形状を固定することで、ユーザの指の動きや力の込め方に応じて指全体に制動力の分布 (反力分布) を提示することが可能であると考えた (例えば、精密把持を意図した場合、反力分布は末端部で最大になり、握力把持を意図した場合、反力分布は一様になると予想できる)。すなわち我々は、こうした指全体への制動力フィードバックによって、ユーザが無意識に期待する反力分布を半自動的に再現するという新しいアプローチを提案する。

しかし、制動力による受動的な力覚フィードバックでは、物体の硬軟感を提示することは難しい。そこで我々は、剛性を連続的に制御可能なパッドを指腹側に取り付けることで、物体の剛性を再現する方法を提案する。

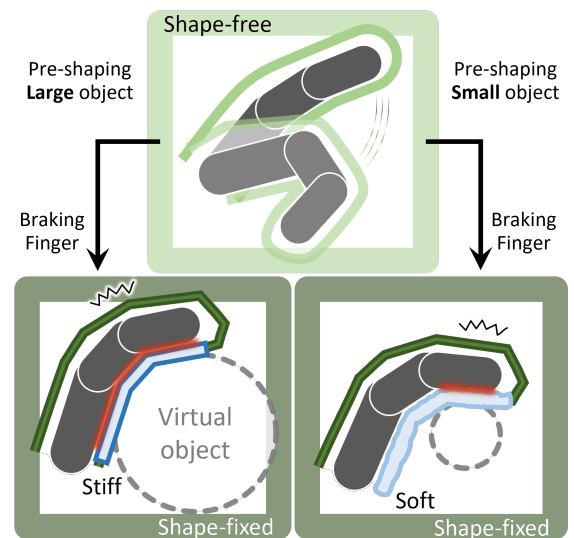


Fig. 4: Conceptual model of the proposed device. Green: glove to present braking force, Blue: continuously variable-stiffness pad.

開発デバイス：ジャミング転移現象を利用した軽量な外骨格と可変剛性パッド

提案手法を実現するため、以下の2つの機構を開発した (Fig. 5).

1) Joint fixable Exoskeleton:

「線ジャミング機構」(数珠状機構、中心を貫通するワイヤを引っ張ることで全体の形状が固定される)を応用することで開発したグローブ状の多自由度外骨格である。指の複雑な動作 (屈曲/伸展、内転/外転) に追従できるほどの自由度を持ちながら、1つの軽量アクチュエータで全自由度を固定し、指全体に制動力を加えることができる。

2) Variable stiffness pad:

「ジャミング素材」(紙束やコーヒー豆など、圧縮することで剛性が高まる多体系素材)をベースに、様々な素材の組み合わせを検討することで開発した、内部の空気圧を変化させることで剛性を制御可能なパッドである。

以上の2つの機構を組み合わせることで開発したプロトタイプデバイスは、重量約 300g (1指当たり 60g) と、市販されている触覚提示デバイスの Dexmo や CyberGrasp と同程度の重量に抑えることができた。

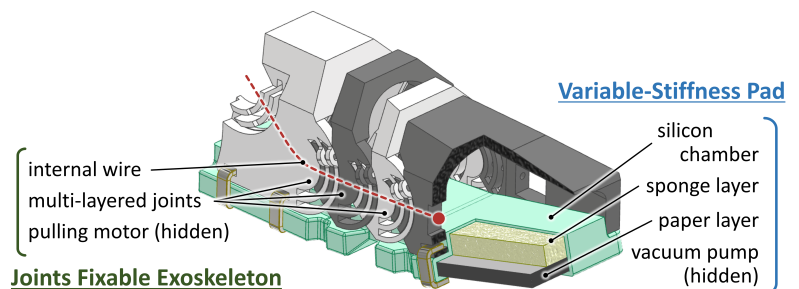


Fig. 5: Partial cross-sectional view of the implemented exoskeleton and variable-stiffness pad.

評価実験：デバイスの基本性能の評価試験

開発したプロトタイプデバイスの性能を評価するための実験を行った。実験1では、外骨格の関節固定速度と剛性可変パッドの作動速度が、それぞれ 0.32s と 0.25~0.73s であることを示した。実験2より、外骨格は指表面に十分な力分布 (指腹で 8.0~11N、指側面で 4.0~6.0N) を提示する能力があることがわかった。実験3では、可変剛性パッドはシリコンチャンバー内の内部圧力 0kPa から -50kPa までの変化で 56.9 の剛性変化を達成した。

まとめと今後の展望

本研究では、ユーザの自然な動作に合わせた把持感覚を提示するための新しい触覚デバイスを開発した。提案デバイスは、装着性と軽量さ、多様な把持形式への対応、物理特性の提示という3つの特徴を持ち、これまでのデバイスでは不可能であった握力把持や中間把持などの把持感覚を提示することが可能であることを示した。

今後の展望として、このデバイスを VR 用の触覚提示可能なコントローラとして統合することが挙げられる。具体的には、手の甲の位置を取得する位置センサー (モーションキャプチャーシステム等) や指の詳細な形状を取得するセンサー (データグローブ等) との統合が必要である。