

京都大学	博士（工学）	氏名	道川稜平
論文題目	Development of Haptic Feedback Methods for Grasping Objects in Virtual Reality (仮想現実における物体把持の触覚フィードバック手法の開発)		
(論文内容の要旨)			
本論文では、仮想的な物体把持感覚を提示するための装着型デバイスを用いた新しい手法の提案と具現化および実機による有効性の検証を行ったものであって、5章から構成されている。 第1章は序論であり、まず背景として、仮想現実（VR）技術の普及に伴い仮想物体の把持感覚提示技術の重要性が高まっていることを述べている。次に、ヘッドマウントディスプレイを用いた没入型仮想現実技術と融合するために必要なハプティックデバイスの特性として、装着性の重要性を論じている。さらに、本論文で着目する触覚情報である把持感覚について、把持対象との力学的相互作用を内力と外力の二つの側面から捉えて説明している。 把持における内力の感覚に関しては、提示する物体の形状や柔軟性などの特性だけでなく、人間が無意識に選択する把持形式に対応したデバイスの開発が必要であることを述べている。その解決策として、指をグローブ状に覆い、制動力を提示するというデバイスコンセプトを提案している。また、把持における外力の感覚に関しては、電気刺激を用いて外力を錯覚させる手法を紹介し、先行研究が抱える課題について述べている。こうした課題への解決策として、本論文で提案する人体の生体力学モデルを用いた電気刺激強度分布算出アルゴリズムについて説明している。最後に、本論文の目的をまとめ、各章の概要を示している。 第2章は、内力を提示するための提案デバイスを実現するための基礎技術として、高い保持トルクを発揮する線ジャミング機構の開発について述べている。提案デバイスは制動力提示型ハプティックデバイスに属し、その実現には多自由度変形と形状固定を両立する可変剛性機構が必要である。これらの要素を備え、かつ軽量の可変剛性機構を開発するため、本論文では線ジャミング機構に着目し、保持トルク特性を向上させた新たな線ジャミング機構を提案している。 まず、新たに提案する Spherical-layer 型ユニットの設計を行い、その幾何特性を比較分析するとともに、既存の多層型線ジャミング機構に対する保持トルクの実験評価を実施した。評価の結果、軽量の力覚提示装置の構築には Radial-layer 型ユニットがより適していることが示唆された。次に、多層構造に対する複数の改良要素を提案し、それらが保持トルクに及ぼす影響を評価した。その結果、スリットやギャップ要素を導入することで、薄肉円筒部の剛性を低減し、摩擦面接触を促進することが特に有効であり、保持トルクを大幅に向上させることが分かった。これらの結果をもとに、ハプティックデバイスに適したジャミング機構の設計指針を示している。 第3章は、把持における内力、すなわち把持物体からの反力と柔軟性を提示するための、関節固定可能な外骨格と可変剛性パッドを組み合わせたハプティックデバイスの開発について述べている。開発において把持動作の初期段階では、物体形状へ手の形をなじませる “pre-shaping” 動作が行われることを前提としている。本論文では、			

この動作を制動することで物体からの反力を提示するとともに、制動面の剛性を制御することで物体の柔軟性を提示するというデバイスコンセプトを提案し、その機能を次のように具現化した。

人間の手指は 4 自由度の複雑な動作が可能であり、多様な把持形式へ対応するには指動作に追従可能なリンク機構が必要となるだけでなく、ユーザの体格差に自動的に適応する必要がある。そこで、冗長性によって体格差を吸収可能な 8 自由度の外骨格リンクを構成した。さらに、第 2 章で開発した高い形状保持能力を持つ線ジャミング機構を外骨格リンクに組み込むことで、任意のタイミングで関節を固定し、制動力を提示する外骨格を開発した。また、柔軟な状態から硬い状態へ連続的に制御可能な可変剛性パッドをこの外骨格と統合することで、多様な把持形式や物体の柔軟性に対応し、把持物体の反力と柔軟性を提示可能なデバイスを実現した。駆動速度、提示可能な制動力の分布、および提示可能な柔軟性の範囲の三つの項目について、デバイスの有効性を評価している。

第 4 章は、把持における外力、すなわち重量感を装着型デバイスによって提示する手法を提案している。まず、重さ感覚の知覚に関する先行研究に基づき、重さ知覚には客観的な力の大きさではなく、主観的な筋収縮の度合いが支配的であるという仮説を提唱している。すなわち、適切な電気刺激による強制的な（非自発的な）筋収縮によって、力や重さの感覚を錯覚させることが可能であると仮定している。

主観的な筋収縮度合いは脳から筋肉への運動指令によって生じていること、さらに提唱した仮説に基づき、重さ感覚を運動指令強度分布として定量化している。さらに、人体の神経筋骨格モデルを用いて、外部からの電気刺激によって生じる重さ感覚との関係を理論的にモデル化している。このモデルを用いることで、仮想重量感を知覚させるために、ユーザの姿勢と提示したい重量を考慮した電気刺激の分布と強度を算出するアルゴリズムを構築した。シミュレーションによる検証に加えて、被験者実験を実施し、重さ感覚に関する仮説の妥当性とアルゴリズムの有効性を評価している。

第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。本研究に関連した今後の展望や、残った課題点についても述べている。特に今後の展望としては、提案したハプティックデバイスを VR への入力デバイスとして利用するための、センサとの統合や、ユーザインタフェースの設計についての研究を挙げている。さらに、電気刺激を用いた重量感提示技術を簡便に利用するためのデバイス化や、実環境での利用に向けた安全性や応用範囲の拡大についての検討も重要であることを述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、装着型デバイスによって仮想的な物体把持感覚を提示するための手法の提案と具現化および実機による有効性の検証を行ったものである。提示する感覚を、把持における内力の感覚と外力の感覚に分けて、前者に対しては線ジャミング機構と可変柔軟パッドを用いたデバイスを提案し、後者には電氣的筋刺激を利用した手法を提案した。提案した手法に基づき実機を開発し、計測によるデバイスの評価実験と被験者実験の結果をまとめている。主な成果は以下のとおりである。

1. 把持における内力の感覚を提示するためのグローブ型デバイスに要求される、指姿勢を制動する機構として、高い形状保持能力を持つ線ジャミング機構の提案を行った。新たな線ジャミング機構の開発と、既存機構を含めた横断的な比較により、ハプティックデバイスに適した線ジャミング機構の設計指針を提案した。
2. 内力を提示するために、剛性可変機能を有するパッドと関節固定可能な外骨格を組み合わせたハプティックデバイスを提案した。剛性可変なパッドを用いて物体の柔軟性や剛性を連続的に再現することに加え、高い形状保持能力を有する線ジャミング機構を活用した関節固定可能な外骨格によって、ユーザの複雑な指の動作に対応した把持力提示を実現した。開発したプロトタイプデバイスを用いて、駆動速度、制動力分布、柔軟性提示範囲について評価を行い、その有効性を確認した。
3. 把持における外力の感覚として特に物体の重量感に着目し、電氣的筋刺激を利用して感覚を提示する手法を提案した。具体的には、重量感提示のための理論モデルを、重量感覚に関する仮説と生体力学モデルを組み合わせることで導出し、提示したい重量と腕の姿勢に応じて、適切な筋肉への適切な電気刺激強度を算出するアルゴリズムを構築した。結果として、電気刺激によって、腕の様々な固定姿勢において任意の重量感の提示が可能となった。シミュレーションおよび被験者実験を通じて、提案手法の妥当性と有効性を検証した。

本論文では、把持における内力および外力という二面の感覚提示を実現するため、装着型ハプティックデバイスの新規設計手法を提案するとともに具現化し、その有効性を実証した。その過程で、より形状保持能力の高い線ジャミング機構を開発した。さらに、重量感知覚における仮説の提唱と電氣的筋刺激を用いた仮想重量感提示のための理論の提案、そして実験による有効性の検証を行った。本論文は、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 7 年 2 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。