

報告番号	甲 第 13619 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **Embodiment Based Sensory Feedback for Human Control Over Robotic Systems**
(身体化に基づいた感覚フィードバックによるロボット操作)

氏 名 朱 曜南

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、拡張ロボット義肢及び遠隔操作ロボットを人間が操作する際の身体化を促進するために、ロボット身体化の促進に必要とされる感覚フィードバックを増強するための手法を提案・立証したものである。

近年、ロボット技術の急速な発展につれ、ロボットを用いた作業の支援、身体能力の拡張をすることによって人間の生活を豊かにする研究がこれまで以上に期待されている。これらの研究は、強化外骨格 (Powered Exoskeleton)、ロボット義肢 (Robotic Prosthesis)、拡張ロボット肢 (Extra Robotic Limbs) などの装着型ロボット (Wearable Robot) に関する研究、またはロボットの遠隔操作技術 (Robotic Teleoperation) の研究によって代表されている。このような人を中心としたロボット技術による効果的な人間の作業支援、身体能力の拡張を実現するためには、人間の直感的な操作インプットが必要不可欠である。そして、人間中心のロボットシステムの操作性を高めるための研究は依然として大きなチャレンジである。

本研究ではロボットの身体化を促進することがこの課題の解決に繋がると考える。また、ロボットの身体化は人間がロボットを操作する際の最も理想的な状態であると考え、その実現のためには、技術が進歩 (システムが良くなる) すること、人間が技術に適応していくことの二つの要素が重要である。ロボットの身体化を引き起こすためには、身体のみならずロボット肢を含む身体表象への更新が必要であり、それには、身体が持つ深部感覚などの感覚フィードバックが重要である。ロボットの身体化は3つの重要な要素、(1) 自己位置感覚、(2) 自己所有感、及び (3) 自己主体感から構成される。自己位置感覚とは身体部位の位

置の感覚である。本研究における拡張ロボット指の身体化に関する研究では、操作者がタスクを遂行する際の操作性を向上させることを最終目的としており、主にタスクを行う際に最も必要と考えられる自己位置感覚について検討する。ロボットの身体化が引き起こされることにより、操作者はあたかもロボットを自分の体を制御するように制御できるようになり、タスクの効率が向上することが期待できる。

遠隔操作システムにおける身体化において、感覚フィードバックの質は一般的に、通信の時間遅延のために低下する。従来の研究では制御工学の視点から、遠隔操作システムの時間遅延によって低下した力覚フィードバックの質を補う多くのアルゴリズムが提案されてきたが、安定性と透明性のトレードオフは依然として解決できない問題である。そのため、遠隔操作システムの身体化を促進するために、本研究では身体化の観点から出発し、力覚フィードバックとしてオノマトペを使用することを提案する。オノマトペは経験した体性感覚を臨場のかつ感覚的に表現することができ、過去に人が経験した力覚を視覚呈示によって想起することができる。それにより、遠隔地における力覚状態を視覚的でありながら直感的に操作者が把握可能となることを意味し、力覚フィードバックの質を向上させることが可能であると考えられる。

本論文では、拡張ロボット指と遠隔操作システムの身体化を促進するために必要な感覚情報を増強することを実現するため、(1)拡張ロボット指における自己位置感覚を向上させる要因として手指からの体性感覚フィードバックが重要であると仮説を立て、その検証をした、(2)遠隔操作システムにおいて、時間遅延によって低下した力覚フィードバックの質を向上させるためにオノマトペによる力覚フィードバックを提案し、その有効性を検証した。

第1章では、本研究の研究背景と提案アプローチについて述べ、また関連研究についても紹介する。ここ数十年におけるロボット技術の飛躍的な進歩に伴い、ロボット技術と人間を融合することによって人間の生活を豊かにし、21世紀における少子高齢化などの社会問題の解決策となることがこれまで以上に期待されている。ロボット工学の研究開発は一般的には自動化、ロボットの認知、及びロボットの知能化に向けられているが、人間の役割は無視することができない。特に装着型ロボットやロボット遠隔操作の研究分野では、人間の能力を高めることを目的としており、人間をロボットシステムの制御ループ内に保つことが尚更重要である。本研究では、人間を中心としたロボットシステム、特に拡張ロボット肢とロボット遠隔操作における直感的操作を実現するためにロボットの身体化を促進することに焦点をあて、身体化の促進のために必要な自己位置感覚と力覚を増強するためのフィードバック手法を提案・立証することを目的とする。身体化に必要とされる感覚情報の増強は、(1)体性感覚フィードバック、及び(2)オノマトペによる力覚フィードバックを通じて本来人間に備わっている感覚を誘発することによって達成される。

第2章では、本研究において使用したロボットプラットフォームについて述べる。本研究では拡張ロボット指 (Extra Robotic Thumb) と遠隔操作システムを使用している。拡張ロ

ロボット指には、ロボット指とその制御インターフェース、触覚情報を提示する電気刺激装置が含まれている。ロボット指は人間の親指の形状とサイズを模倣して設計されており、制御インターフェースは、右手の親指でロボットの指を制御するように設計されている。本研究で構築した遠隔操作システムでは、スレーブ側は2台のUniversal Robot (UR5e, UR3e)で構成されており、マスター側は1台のハプティックインターフェース (Omega 7, Force Dimension) によって操作者に力覚フィードバックを提供する。また、UR3eに取り付けられているステレオカメラ (Ovrvision Pro) によって視覚情報を取得し、画像を Head Mount Display または LCD スクリーンに表示することによって視覚フィードバックを提供することが可能である。

第3章では、操作者が体性感覚を使用して拡張ロボット指を操作した場合に、ロボット指の身体化への影響を評価することを試みた。拡張ロボット指を使用した後に身体表像がどのように更新されるのかを検証した。その結果、リーチングタスクにおいて被験者が視覚情報によってロボット指の位置を確認せずに体性感覚のみによって操作した場合、自己受容感覚ドリフトと操作性の増加が確認された。また、拡張ロボット指を用いた把持タスクにおいて、ロボット指使用前後の被験者の腕の軌道の変化を確認することができた。これは、身体表像の更新を示唆しており、体性感覚による操作が拡張ロボット指の身体化を誘発していることを示している。

第4章では、拡張ロボット指の身体化を促進するための主要なフィードバック要因を解明することを目的とする。身体化とは、一般的には非身体を自分の身体に取り込むことを指すがその定義は曖昧である。そこで我々は、身体化とは、脳内の身体表像を現状に合わせて適切に更新することであると定義する。拡張ロボット指の身体化において、身体表像の更新により、操作者は拡張ロボット指の位置（自己位置感覚）をより精確に知覚できると考えられ、操作性の向上が期待される。第3章では、体性感覚による拡張ロボット指の操作が自己位置感覚の更新を誘発していることが確認できたが、自己位置感覚を向上させるフィードバック要因については本章で解明する。そこで、手指からの体性感覚フィードバックが自己位置感覚の向上にとって重要な要因となる仮説を立て、実験を通して検証した。実験は、3つの別々に与えられた感覚フィードバックの下で拡張ロボット指を操作し、リーチングタスクのパフォーマンスを比較した。感覚フィードバックのうち2つは、体性感覚フィードバックであり、(1) 指先からの体性感覚フィードバック、及び(2) 顔からの体性感覚フィードバックである。また、非体性感覚フィードバックとして(3) 音の高低差による聴覚フィードバックを用意した。実験の結果、指先からの体性感覚フィードバックが自己位置感覚の向上に大きく貢献していることを確認した。

第5章では、ロボット遠隔操作のためのオノマトペによる力覚フィードバックの増強について述べる。ロボット遠隔操作では、通信による時間遅延は避けられない問題であり、時間遅延が遠隔操作システムの通信ネットワークに導入されることによって、透明性が大幅に低下することが報告されている。特にバイラテラル制御における透明性の低下は、主に力

覚フィードバックの質の低下のことである。これまでに制御システムの最適化について多く研究されて来たが、透明性とシステムの安定性は矛盾するものであり、そのどちらかを優先する必要がある。この章では、通信遅れによって低下した透明性を増強するためにオノマトペに基づいたアプローチを提案する。我々のアプローチは、身体化の視点から出発し、オノマトペを視覚的に呈示することによって、操作者が過去に経験した力覚を想起させ、システムの安定性を保つと同時に、低下した透明性の改善をすることである。スレーブ側で検出された接触力の大きさに応じて4種類のオノマトペ（「ゴン」、「コン」、「フワッ」、「グー」）を表示することで力覚を想起させることにより力覚フィードバックを改善する。オノマトペによる力覚フィードバックの有効性は、一定のラウンドトリップ時間遅延（0 ms, 500 ms, 及び 1000 ms）の下で硬さ判断タスクを実行することによって評価した。その結果、被験者は従来の受動性に基づいた力逆送型バイラテラル制御と比較して、オノマトペを用いた力覚フィードバックを使用することによって、遠隔物の硬さをより正確に分類できることができ、オノマトペによる透明性の改善が確認できた。

第6章では、実世界データ循環学リーダー養成プログラム（RWDC Program）の概念と本研究との関連性について述べる。RWDC プログラムは、名古屋大学における大学院リーディングプログラムである。実世界データ循環は、データの取得、分析、および実装から構成される。本論文は実世界データ循環の3つの部分をカバーしていると見なすことができる。先ず、本論文では、実世界の問題を解決するためにロボットシステムを実装した。次に、実装されたロボットシステムを用いて実世界のデータを取得した。そして最後に、取得したデータを分析することによって将来的に人間によるロボットシステムの操作を改善するための提案をした。

最後に、第7章では、本論文のまとめと、将来の展望について述べる。