

京都大学	博士 (工学)	氏名	FARHAD SHABANI
論文題目	Design and Realization of Wearable Haptic Devices for Improved Human-Machine Interaction in Neurofeedback and Robot-Assisted Surgery (ニューロフィードバックとロボット外科手術におけるインタフェース改善のための装着型触力覚提示装置の設計と実現)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、医療応用に焦点を当て、触力覚情報をユーザーにフィードバックすることにより、機械と人間の相互作用のパフォーマンスを向上させることを目的としている。ユーザーへの触力覚情報のフィードバックは、人間と機械のインタフェース改善のために有用であることが示されているものの、その適用は限定的で、ほとんどの場合、視覚と聴覚へのフィードバックのみに留まっている。一般に、触力覚情報のユーザーへのフィードバックを実現するためには、ユーザーに機械的な力を加える必要があるため、視覚や聴覚のフィードバックに比べると、装置設計の複雑化、装置の肥大化、個々のユーザーへのカスタマイズの必要性、安全性の悪化など多くの課題がある。本論文では、医療応用としてニューロフィードバックによる脳トレーニングとロボットによる外科手術を対象として、これらの課題を解決するために、装着型の触力覚提示装置を開発し、触力覚フィードバックの有効性を被験者実験により明らかにした。</p> <p>本論文は5章からなり、各章の要旨は以下の通りである。</p> <p>第1章は序論であり、一般的な人間と機械の相互作用におけるインタフェースの現状と問題点について述べている。また、これらの問題の解決に触力覚情報のユーザーへのフィードバックがどのように貢献するかを説明し、それを実現するための課題を指摘している。特に、医療応用としてニューロフィードバックによる脳トレーニングとロボットによる外科手術を対象として、触力覚フィードバックを適用するための問題点を議論している。それぞれの医療応用に対して、本論文での解決策を紹介し、それらがどのように効果的であるかについて説明している。さらに、本論文の構成について述べている。</p> <p>第2章では、ニューロフィードバックによる脳トレーニングに焦点を当てている。まず、ニューロフィードバックによる脳トレーニングの概念を紹介している。次に、ニューロフィードバックを用いた脳トレーニングについて、ユーザーの視覚を利用してトレーニングを行う現在の方法を概説している。また、この手法の問題点を指摘し、触覚情報のユーザーへのフィードバックがこの問題を解決するために有効であることを説明している。ニューロフィードバックの代替手段として、振動を用いた直感的な触覚フィードバックを提案し、ユーザーの首に振動を与える小型の装着型触覚（振動触覚）フィードバック装置を開発した。開発した装着型触覚提示装置を用いて、集中力の向上を目的とした被験者実験を実施し、触覚フィードバックを用いた場合の方が視覚のみを用いた場合に比べて、集中力の向上とタスク達成時間に有意な差があることを確認した。さらに、ユーザーへのアンケート調査を実施し、触覚フィードバックが視覚フィードバックと同程度に直感的であるとの評価結果を得た。これらの結果より、提案する触覚情報のユーザーへのフィードバックが脳トレーニングに有効であることが明らかになった。</p> <p>第3章からは、2つ目の医療応用であるロボットによる外科手術におけるユーザーへの触力覚フィードバックを実現する装着型触力覚提示装置の設計と性能評価について述べている。提案装置はユーザーの指先に、屈曲-伸展、外転-内転、指軸方向の3次元の力を提示することが可能である。目標の指先力を提示するための3本のワイヤーの目標張力を力学モデルに基づいて算出し、モータの電流制御に</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	FARHAD SHABANI
<p>より力制御を実現するシステム構築した。張力制御による 3 次元の指先力の提示性能に関する評価実験を実施し、開発した装置がロボットによる外科手術支援装置としての最低条件を満たしていることを確認した。</p> <p>第 4 章は、ロボットによる外科手術支援としてユーザーに力情報をフィードバックする場合の安全性に着目している。現在実用化されている商用外科手術用ロボットでは、安全性の問題から力覚フィードバックは実装されていない。これはリーダー・フォロワー型遠隔操作における力フィードバックによるシステムの不安定現象に起因している。既存の手法では力フィードバックがリーダー装置に実装されているため、ユーザーへの力情報の提示とユーザーによる目標とする力情報の入力を同時に同じ装置で実施しなければならず、システムの時間遅れにより制御系が不安定になる。本章では、力情報のフィードバックをリーダー・フォロワー型遠隔操作から切り離してユーザーに提示することで、力情報の提示制御とリーダー・フォロワー制御の分離を実現している。提案方法と現在実用化されている方法との安定性を理論的に解析し比較することで、提案する分離手法の有効性を明らかにした。第 3 章で開発した装置に直動機構を導入する改良を施した新たな装着型力覚提示装置を開発し、外科手術の基本的なタスクである穿刺タスクを仮想環境で行う被験者実験を実施し、提案手法と開発した装置の有用性を明らかにした。</p> <p>第 5 章は結論であり、本論文のまとめと、今後の課題について述べている。</p>			

氏名	FARHAD SHABANI
----	----------------

本論文は、医療応用に焦点を当て、機械と人間の相互作用のパフォーマンスを向上させるために、柔軟な触力覚フィードバックを実現する装着型触力覚提示装置を設計・開発し、ニューロフィードバックとロボットによる外科手術を対象として、シミュレーションおよび被験者実験により、その有効性を検証したものであり、主な成果は以下の通りである。

1. 近年、発達障害や行動障害の治療にニューロフィードバックが注目を集めている。従来のニューロフィードバックによるトレーニングでは、ユーザーの視覚のみが利用されてきた。視覚を用いる場合、ユーザーは対象に対して常に視線を合わせる必要があるため、精神的な疲労によりパフォーマンスの低下を招くことが指摘されている。本研究では、この課題を解決するために、触覚フィードバックの導入を提案し、ユーザーの首に振動触覚フィードバックを与える新しい小型の装着型触覚提示装置を開発した。被験者実験により、集中力向上に対する触覚フィードバックの有用性を明らかにした。また、触覚フィードバックが視覚フィードバックと同程度に直感的であるとのユーザー評価を得た。
2. ユーザーの指先に屈曲-伸展、外転-内転、指軸方向の3次元の力提示を可能とする、装着型力覚提示装置を開発した。目標の指先力を提示するための3本のワイヤーの目標張力を力学モデルに基づいて算出し、モータの電流制御により力制御を実現した。また、評価実験により開発した装置がロボットによる外科手術支援装置としての最低条件を満たしていることを確認した。
3. 外科手術ロボットとしてリーダー・フォロワー型の遠隔操作システムが実用化されているが、その適用範囲はそれほど広がっていない。これは、リーダー装置を介したユーザーへの力フィードバックが、人間を含めた遠隔操作システム全体の安定性を悪化させ、外科手術の安全性が保障されないという問題に起因していた。本論文では、力覚提示制御とリーダー・フォロワー制御を分離し、リーダー装置を介さずに、ユーザーに力覚を提示する手法を提案した。遅れ時間をもつ遠隔操作システム全体の安定性を理論的に解析し、提案した分離手法がより広い安定領域をもつことを示した。さらに、力覚フィードバックをリーダー装置から分離するための装着型力覚提示装置を開発し、仮想的な外科手術環境を構築し、被験者実験を実施して、提案分離手法と開発した装着型力覚提示装置の有効性を明らかにした。

以上要するに本論文は、機械と人間の相互作用のパフォーマンスの改善に対するユーザーへの触力覚フィードバックの有効性について有用な知見を与えたものであり、その成果は学術上、實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5年2月21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。