

## 審査の結果の要旨

氏 名 佐野 佑子

本論文では、「人の感覚運動統合メカニズムを考慮した幻肢痛緩和 VR リハビリシステムの開発」と題し、幻肢痛の従来の治療法である鏡療法から着想を得て、バーチャルリアリティ(VR)技術を用いてより効果的に失われた感覚情報を提示することで、幻肢痛を緩和させるリハビリシステムを開発している。基本システムの開発から、段階的にフィードバックの種類や条件を付加した実験を行い、脳計測や運動計測を援用することで、幻肢痛とその緩和の基盤となる感覚運動統合のメカニズムを解明しつつ、これに基づき幻肢痛緩和効果を向上させている。論文は9章で構成されている。

1章では、本研究の対象疾患である幻肢痛を紹介し、従来の治療法よりも幻肢痛緩和効果の高いリハビリシステムの開発を本研究の第一の目的とし、その実現のために、人の感覚運動統合メカニズムの解明を第二の目的とすることを述べている。そして、第二の目的を達成するために、従来から提唱されてきた解析的アプローチや構成論的アプローチとは異なる第三のアプローチとして、「補完構成アプローチ」を提唱している。

2章では、幻肢痛に関する従来の知見を紹介した。一定の幻肢痛緩和効果が示されてきた治療法として鏡療法を紹介し、鏡療法の幻肢痛緩和効果を説明する幻肢痛発生メカニズムの仮説として感覚運動ループ理論を紹介している。さらに、鏡療法を参考にして開発されたVR技術による幻肢痛緩和リハビリシステムの先行研究を紹介している。

3章では、本研究の基本的なVRリハビリシステムを開発し、幻肢痛緩和に対する有効性を示している。具体的には、幻肢痛患者の健肢の運動を計測し、この健肢を左右反転させたバーチャルの患肢を仮想環境中に視覚的に提示することで、幻肢痛患者に患肢を自らの意思で動かしているかのように錯覚させている。本システムを使って仮想環境の物体へリーチングさせるタスクを5分間行わせると、幻肢痛は平均50.2%減少した。この減少率は従来の治療法よりも高く、また、リハビリ実施時間が従来研究と比較して大幅に短縮されていることから、本結果の医工学的な価値は大きいと論じている。

4章では、3章のシステムに触覚フィードバック(FB)を追加することで幻肢痛緩和効果が高まることを示している。さらに、触覚FBを与える最適な身体部位を探索した結果、患側の頬に与えた場合に幻肢痛減少率が最も高くなった結果を示している。

5章では、VR技術により人工的に運動と視覚FBに時間的乖離を与え、運動主体感や所有感に関するアンケート評価、および、NIRSによる脳計測を行うことで、運動と感覚情報の同時性の必要性を評価している。その結果、視覚FBを遅延させるとバーチャルの左腕に対する所有感と運動主体感はともに低下した。また、NIRS計測では視覚FBを遅延させない場合のみで、運動主体感を司る前補足運動野が含まれるチャンネルが活性化していたことを示している。これらの結果から、運動と感覚FBの同時性によっ

て、前補足運動野が活性化し、運動主体感が向上したと推定している。

6章では、幻肢痛緩和において感覚運動の両側性が重要であることを、運動計測や脳波計測によって示している。具体的には、VRリハビリの前後で **Bimanual circles-lines coordination (BCT)** タスクを行わせて両腕共通の運動表象を評価したところ、VRリハビリによって幻肢痛が減少し、それと共に両腕共通の運動表象が増大したことを示している。また、VRリハビリ中の両腕運動が相関することを、両腕の肘角度の時系列データの相互相関関数を算出することで示している。また、脳波計測により、VRリハビリ中は両側の感覚運動野のコヒーレンスと幻肢痛減少率との間に相関がある傾向にあったことも示している。以上の一連の結果から、本章では、幻肢痛緩和には両腕共通の運動表象が重要であると論じている。さらに、6章では、補足運動野は幻肢痛患者の鏡療法中に活性化し、また、同領野は両側の協調運動を司ることから、両腕協調させるリーチングを行わせることで、補足運動野の活動が強化されて、幻肢痛緩和効果が向上する可能性を検討している。

7章では、上述の実験結果と従来の脳科学の知見を総合することで、幻肢痛緩和の脳メカニズムのモデルを提案している。具体的には、NIRS計測によって活動が示された前補足運動野(運動主体感)、補足運動野(両側性・両側協調性)、背外側前頭前野(痛みの調節)、および、脳波計測によって活動が示された両側の感覚運動野を含めて、幻肢痛発生の脳メカニズムを提案している。

8章では、上述の実験結果と提案モデルに基づいて、持続的な幻肢痛緩和効果を評価している。具体的には、視覚・聴覚・触覚フィードバックを提示可能で、かつ、在宅での使用が容易なポータブルVRリハビリシステムを開発している。そして、患者が本システムを使って在宅で毎日VRリハビリを継続することで、VRリハビリ直後の即時的効果だけでなく、日常生活における持続的な幻肢痛緩和効果が得られた結果を示している。

9章では、上記の結果をまとめて結論を述べている。本研究の第一の目的に対しては、VR技術の特長を生かし、物体とのインタラクションに基づく複数感覚FBを実現したことで、鏡療法の幻肢痛緩和効果よりも高い幻肢痛緩和効果を得られ、また、在宅用機器により治療効果を持続可能であることを示している。第二の目的に対しては、幻肢痛緩和には、複数感覚FB、感覚運動の同時性、運動の両側性の必要性を提示し、この結果から幻肢痛緩和の脳メカニズムを提案している。そして、このメカニズムに基づきVRリハビリの長期試験で有効性を提示している。

以上の内容より、本論文は、VR技術を用いた幻肢痛緩和リハビリシステムの開発を通じて、幻肢痛緩和という医工学な価値と、人の感覚運動統合メカニズムの解明という科学的な価値の両面に貢献したと考えられる。

以上の理由から、本論文は情報理工学上重要な貢献と見なされる。よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。