

氏名	福森 聡		
授与した学位	博士		
専攻分野の名称	工学		
学位授与番号	博甲第5151号		
学位授与の日付	平成27年 3月25日		
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第5条第1項該当)		
学位論文の題目	Virtual Reality 技術を基礎とした鏡療法による上肢慢性疼痛治療システムに関する研究		
論文審査委員	教授 五福 明夫	教授 渡邊 桂吾	教授 呉 景龍

### 学位論文内容の要旨

鏡療法によるリハビリテーションは複合性局所疼痛症候群と呼ばれる慢性疼痛に伴う運動機能の回復や鎮痛が報告されている。このような慢性的な疼痛は患者の社会生活に支障をきたすだけでなく、就労困難や介護費用などによる社会経済の損失が大きい。このことから、痛みへの取り組みは患者の社会生活の改善のみならず、社会経済にも大きく関わる重要なテーマである。リハビリテーションへ Virtual Reality (VR) 技術を取り入れることは、定量的なデータに基づいた診断や、患者に合わせた柔軟なタスク設計が期待され非常に将来性が高い。鏡療法による治療効果の報告は、重要な事実を私達に気づかせる。それは患部を含む身体部位を動かすことなしに、運動機能の回復が起こるという点である。しかも、障害を受けた部位を動かす必要がない。そして、鏡療法は視覚的なフィードバックがこのよう治療効果に重要な役割を担っていると考えられている。

本研究では VR 技術を基礎とした鏡療法による慢性疼痛治療システムに関する研究に取り組んだ。工学が発展させた Computer Graphics (CG) やセンシング技術によって人工的な現実感を作り出す VR 技術は、鏡療法のもたらす錯覚を再現可能である。さらに、VR 技術を取り入れることにより患者に合わせた柔軟な運動タスクの設計が可能なことや、計測された定量的データに基づいて患者の状態を把握できる点は、将来性が高い。そこで VR 技術を取り入れることにより、鏡療法を行える治療システム(以下、Virtual Reality based Mirror Visual Feedback: VR-MVF と呼ぶ)を開発した。まず、鏡療法のような視覚情報を提示するために CG により仮想空間が作られディスプレイに表示された。さらに、指の曲げの動きと上肢の実空間での動作を計測した。そして、これら計測された動きが、仮想空間内の仮想の手の動きとして再現された。これを利用し、治療タスクとして患者は仮想空間内で物体を掴んだり移動させたりした。VR-MVF の治療効果を 5 人の患者に対して確認したところ、4 人に鎮痛効果を確認した。

VR-MVF の発展を目指して 2 つのアプローチを取った。その際、特に、慢性疼痛患者が物体へのアプローチと握り動作が苦手であるとの報告に着目した。1 つ目は 3D ディスプレイを用いて奥行き感の把握を補助することによって、物体へのリーチング動作を容易にするとともに、臨場感の増加を目指すものである。操作性と臨場感の向上のために偏光眼鏡と 3D ディスプレイによる立体視システムを導入した。瞳孔間距離と視距離を考慮することにより、現実空間での距離感覚に一致した VR 表示としている。拡張したシステムは臨場感を測定する PQ テストにより操作性の向上を確認した。2 つ目のアプローチは家庭向けの治療システムの構築である。はじめに、カメラを使った上肢動作の計測により VR-MVF を行うことが可能かその検証を行った。結果、物体にアプローチして掴むタスクを行うことができることを確認した。治療適応可能性が確認されたことにより、簡易型治療システムを発展させた。家庭向けの VR-MVF に必要な動作に関する要件に加えて、医療従事者や病院に通院する患者から得た必要要件を基に、モーションキャプチャ装置の Kinect とマウスを用いてシステムを実装した。そして、上肢の動きの計測から仮想上肢表示までの遅延時間の計測や、健常者に対するいくつかの操作実験により操作性を評価し良好な結果を得た。また、家庭向けの VR-MVF を CRPS 患者宅や医療施設に設置して実際に運用し、正常に動作することを確認するとともに、患者の治療機会が増える可能性が示唆された。また、試用期間中に記録された患者 1 名の疼痛の変化から我々の開発した治療システムにより鎮痛効果を得られる可能性が示唆された。

さらに、本論文では治療メカニズムの解明にも取り組んだ。とくに鏡療法における運動イメージによる予測と視覚情報の不一致に着目し、認知活動を明らかにした。結果鏡療法の鏡像と運動イメージによる視覚的变化の予測が一致しない時、予測誤差が認識されていることが明らかとなった。この結果は、今後の鏡療法の治療メカニズムの解明に寄与すると考えられる。

## 論文審査結果の要旨

本研究では、鏡療法により運動機能の回復や鎮痛が報告されている複合性局所疼痛症候群（CRPS）と呼ばれる慢性疼痛を対象としている。鏡療法では患部を含む身体部位を動かすことなしに治療効果が得られていることから、視覚的なフィードバックが治療効果に重要な役割を担っていると考えられている。

そこで、鏡療法における重要な要素である錯覚を起こすために、人工的な現実感を作り出す仮想現実感技術を基礎として、上肢を対象とした治療システム（Virtual Reality based Mirror Visual Feedback: VR-MVF）を開発している。仮想現実感技術の応用により、患者に合わせた柔軟な運動タスクの設計が可能となり、身体の動きを計測した定量的データに基づいて患者の状態を把握できる。VR-MVFでは、まず、鏡療法のような視覚情報の提示のために、コンピュータグラフィクスにより仮想空間がディスプレイに表示される。同時に、指の曲げの動きと上肢の実空間での動作が計測される。そして、計測された動作は、仮想空間内の仮想の手や腕の動きとして再現される。また、仮想空間内の物体を掴んだり移動させたりする治療タスクを開発している。VR-MVFを5人の患者に適用し、4人に対して鎮痛効果を確認している。

また、CRPS患者が物体へのリーチング動作と握り動作が苦手であるとの報告に着目して、2種類のVR-MVFの拡張を行っている。まず、3Dディスプレイを用いて奥行き感の把握を補助することにより、物体へのリーチング動作を容易にするとともに臨場感の増加を目指した。そして、拡張したシステムの操作性の向上を確認している。また、家庭向けのVR-MVFに必要な動作に関する要件と、医療従事者や病院に通院する患者から得た必要要件を考慮して、非接触のモーションキャプチャ装置Kinectとマウスを用いた家庭向けの治療システムを構築している。そして、上肢の動きの計測から仮想上肢表示までの遅延時間の評価や、健常者に対するいくつかの操作実験による操作性の評価から、良好な結果を得ている。また、CRPS患者宅や医療施設で実際に試験運用した結果、患者の治療機会が増える可能性が示唆された。

さらに、鏡療法における運動イメージによる予測と視覚情報の不一致に着目して、認知心理実験により治療メカニズムの解明にも取り組んでいる。そして、鏡療法の鏡像と運動イメージによる視覚的变化の予測が一致しない時、予測誤差が認識されていることを明らかにしている。この結果は、今後の鏡療法の治療メカニズムの解明に寄与すると考えられる。

以上のように、本研究ではCRPSを治療するための新規なVR-MVFシステムを開発し、実験および試験的運用によりその有効性を検証していることから、学位授与に値すると判断される。