

学位論文の要旨

Abstract of Thesis

研究科 School	自然科学研究科
専攻 Division	産業創成工学専攻
学生番号 Student No.	51422208
氏名 Name	福森 聡

学位論文題目 Title of Thesis (学位論文題目が英語の場合は和訳を付記)

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

学位論文の要旨 Abstract of Thesis

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。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。

鏡療法は幻肢と呼ばれる四肢切断患者のいわゆる麻痺した幻肢を動かすことを目的として考案された。この鏡療法により麻痺した幻肢が動くようになったことに加え、幻肢に伴う痛みが改善したことが報告された。この鏡療法による運動機能の回復が注目され、鏡療は広くリハビリテーションのために使われてきた。鏡療法による脳卒中後の運動機能障害の回復は、中枢神経損傷後の運動機能の回復の典型的な例である。さらに、鏡療法は明確な中枢神経の損傷がない症状に対しても有効なことが報告されている。複合性局所疼痛症候群(Complex Regional Pain Syndrome: CRPS)と呼ばれる慢性疼痛の運動機能の回復の報告はその一つと言える。

CRPSは疼痛だけでなく、運動機能の障害を伴うことが多い。さらに、その発症機序はまだ十分明らかにされていないため、有効な手段が確立されておらず治療にも困難が付きまとう。例えば、薬剤の使用はCRPSの鎮痛のための最も有効な手段の一つであるが、薬剤への耐性が進むことでその効果が減退するケースがある。この治療の困難さは鏡療法の場合も例外ではなく、長期化した疼痛に対しては十分な効果が見られなかったり、使用の中断に伴って疼痛が再発したり、疼痛が高まったりすることが報告されている。

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。それは直接身体を動かすことなしに、運動機能が回復するという点である。しかも、障害を受けた部位を動かす必要がない。現在では、鏡療法特有の視覚的なフィードバックがこのような回復に重要な役割を担っていると考えられている。工学の発展により生まれたVirtual Reality (VR) 技術は、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もので、鏡療法のもたらす錯覚を再現できる可能性がある。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タスクの設計が可能なことや、計測された定量的なデータに基づいた、患者の状態の把握が可能なのは非常に将来性が高い。

そこで、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 (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 によって仮想空間が作りだされディスプレイに表示された。次に、データグローブにより指の動き計測し、磁気センサにより上肢の実空間での動作を計測した。これら計測された動きが仮想空間内の仮想の手で再現された。そして、患者は治療タスクとして仮想空間内で物体を掴んだり移動させたりした。そして、VR-MVF の治療効果を 5 例の患者に対して確認したところ、4 例で継続的な鎮痛効果が得られたことを確認した。残りの 1 例についても疼痛の増加などは認められなかった。

VR-MVF は鏡療法と同様に治療効果が少ないケースや、疼痛が再び高まったりするケースがあった。そこで、治療システムの発展を目指して 2 つのアプローチを取った。その際、特に、CRPS 患者は運動野の機能が低下しており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し、かつ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。そこではじめに、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 名の疼痛の変化は、鎮痛効果が得られたことを示唆した。

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。22 名の健常者が実験に参加した。質問紙を用いて鏡療法中の参加者の内観を調査し、さらに、その時の参加者の脳活動を fMRI により計測した。実験の結果、鏡療法の鏡像と運動イメージによる視覚的変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。ただし、この仮想の手側の運動イメージと視覚情報を一致させるというタスクは、必ずしも達成されないことが示され、しかも、16 人の内の 3 人の参加者だけが達成できない傾向にあった。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。

