

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26462382

研究課題名(和文) 三次元プリンターで難治性疼痛肢を再現したロボットアーム鏡治療の鎮痛効果の検証

研究課題名(英文) Mirror visual feedback therapy with 3D printer reproducing robotic arm and its analgesic effect on patients with chronic intractable pain

研究代表者

佐藤 健治 (sato, kenji)

岡山大学・医歯薬学総合研究科・准教授

研究者番号：70359884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：当該研究では、我々が開発したバーチャルリアリティ(VR)鏡治療システムをインターネットに接続可能なシステムに発展させることで、薬物療法にも抵抗性で有効な治療法がなく世界中で苦しんでいる難治性疼痛患者にとって独創的で画期的な治療方法となる可能性を示唆した。また、VR鏡治療の治療効果に大きな影響を及ぼすと考えられる運動主体感(sense of agency)は、運動のロボットハンド動作までの遅延時間が大きくなるにつれ減少するものの、その遅延時間による減少率は身体保持感や動作の予期によって減少する傾向を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We had developed virtual reality mirror visual feedback therapy (VR-MVF). In the present study we developed it into the system which can be connected to internet. It enables patients with intractable pain in the world to get the benefit of VR-MVF. It has been speculated that VR-MVF providing analgesic effect depends on the sense of agency. We conducted another study using robotic hand to clarify the factors that are important to feel sense of agency. The result showed sense of agency diminished as delay of action increased.

研究分野：麻酔学 ペインクリニック

キーワード：認知科学 バーチャルリアリティ 医療・福祉

## 1. 研究開始当初の背景

複合性局所疼痛症候群 (Complex Regional Pain Syndrome; CRPS) や幻肢痛は薬物療法にも抵抗性で有効な治療法がなく難治性疼痛と呼ばれる。難治性疼痛患者では、脳内の可塑性変化により障害部位が治癒したあとも痛みが慢性的に維持されることが示唆されているが、鏡面像を用いた視覚的な四肢疑似運動で健常状態に復帰することで疼痛が軽減する。これは Mirror Visual Feedback 治療 (鏡治療) と呼ばれる。我々は平成 17/18 年度科学研究費 (萌芽研究) でバーチャルリアリティ (VR) 鏡治療を開発した。

しかしシステムが大掛かりなため岡山大学病院に固定設置され、患者の治療機会が制限された。平成 20-22 年度科学研究費 (基盤研究 C) では病院外でも VR 鏡治療の効果が継続する方法を開発した。更に平成 23 - 25 年度科学研究費 (基盤研究 C) では、在宅で加療が可能なモバイル型 VR 鏡治療システムを開発した。VR 鏡治療はニューロリハビリテーションの一種と考えられ、タスクを繰り返すことが重要であり、その意味でシステムの固定設置による治療機会の制限は大きなデメリットであり、問題の解決が必要であった。

一方、我々のシステムでは、仮想空間内のバーチャルハンドの外観は個々の患者で変化しない。しかも既存の VR 鏡治療システムでは、コンピューターグラフィックスの描出力に限界があり、患者本人の手や腕と認識しづらい。我々は VR 鏡治療の効果はバーチャル空間の上肢や手を自分が動かしているという感覚；運動主体感 (sense of agency) が重要と考えており、自分の手や腕だという感覚；身体保持感 (sense of ownership) も sense of agency に影響する。自分の手や腕により近似させることで治療効果が高まる可能性があるが、未解明であった。

## 2. 研究の目的

これまで我々が取り組んできた研究成果を当該研究へ発展させる目的は2つある。

レディメイド医療としてのオンデマンド VR 鏡治療

CRPS や幻肢痛などの難治性疼痛患者は世界中に存在する。その患者に VR 鏡治療を提供するにはインターネット上に治療の場を設けることが最も有効である。我々の PC に接続可能な簡易型治療システムをより洗練されたインターフェイスに開発することで提案研究を実現する。

そのためには、患者が在宅で自発的・継続的な治療を行うことを容易にする仕掛けが必要である。患者は適切でない手順や内容で治療タスクを行ってしまう可能性もある。日常的な痛みや治療に対する不安を抱える患者が在宅での治療意欲を維持させる「動機づけ」には、ユーザに対して行動変容を促すようにいつでも働きかける続けることができる、コンピューターによる説得の概念である Captology を導入する。一方、難治性疼痛の発生機序や鏡治療の治療効果の機序

は未解明である。患者の治療に関する情報を遠隔で収集・共有可能な環境を構築することで、実際の治療状況に応じた適切な医療従事者による指示の根拠となる。また、蓄積されたデータを解析することで難治性疼痛患者に特徴的な傾向の解明や治療効果との関連性を解明することが可能となる。

オーダーメイド医療としてのロボットアーム鏡治療

3D プリンター技術を用いて患者自身の患側肢を忠実に再現して電動義手に装着するオーダーメイド医療を目指す。3D プリンター技術を用いて作成した患者の手や腕にそっくりなラバー製の複製品電動義手に装着してする。当該研究では、3D プリンター技術を用いて、自分の手や腕により近似させることが、身体保持感 (sense of ownership) や運動主体感 (sense of agency) にどのように影響するかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

レディメイド医療としてのオンデマンド VR 鏡治療

我々の PC に接続可能な簡易型治療システムをより洗練されたインターフェイスに開発することで提案研究を実現させる。具体的には、遠隔情報共有機能の検討、Captology を援用した患者治療意欲の動機付けの検討を行い、構成したシステムを患者の在宅治療へ導入する。そして開発した患者動作データ収集システムを検証する。最終的には、インターネット上での治療中の大量の患者データを蓄積し、統計学的解析により難治性疼痛患者に特徴的パターンを検出することで新たな治療法への発展を試みる。

オーダーメイド医療としてのロボットアーム鏡治療

提案研究の最終段階では、3D プリンターで作成した患者本人の複製品と全く別人の複製品とを電動義手に装着した場合において、患者の身体保持感 (sense of ownership) や運動主体感 (sense of agency) への影響と治療効果への影響を検証する。前段階の研究としてまず健常者を研究対象者として、電動義手にグローブを脱着させることで、人の手の外見にどれほど近いかという度合いである外見再現度と、研究対象者の意図する動作を再現する度合いである把持動作再現度を変化させ、研究対象者の運動主体感の感じ方に変化があるかを調査する

## 4. 研究成果

本研究課題の レディメイド医療としてのオンデマンド VR 鏡治療と オーダーメイド医療としてのロボットアーム鏡治療は、薬物療法にも抵抗性で有効な治療法がなく世界中で苦しんでいる難治性疼痛患者にとって独創的で画期的な治療方法となる可能性が示唆された。医師の指導の下で遠隔で VR 鏡治療を行うシステムは完成したが、インター

ネットのセキュリティ上の問題から、本研究期間中にインターネット上に公開することは見合わせた。今後の展望としては、インターネット上で公開する上での個人情報の取り扱いを含めた様々な問題を解決し、世界中の難治性疼痛患者へ提供することを目指す。一方、オーダーメイド医療としてのロボットアーム鏡治療で行った、「外見再現度や把持動作の再現度の高低が運動主体感に及ぼす影響」の研究結果から、VR鏡治療の治療効果に大きな影響を及ぼすと考えられる運動主体感(sense of agency)は、運動のロボットハンド動作までの遅延時間が大きくなるにつれ減少するものの、その遅延時間による減少率は身体保持感や動作の予期によって減少する傾向が見られた。この知見をもとに、更に有効なVR鏡治療システムの構築が期待される。

#### レディメイド医療としてのオンデマンドVR鏡治療

##### 1) 遠隔情報共有機能の検討

VR鏡治療の治療家庭で記録され、医療従事者と共有されるべき痛みに関する情報および運動に関する情報収集システムを実装し、患者からデータを収集した。具体的には、9種類の調査票(痛みに関するvisual analog scale(vas),簡易版マクギル疼痛質問票、sense of agencyに関するアンケート、簡易疼痛調査票(BPI-J)、SF-36、EuroQoL 5 Dimension日本語版、Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS)、疼痛生活障害評価尺度(PDAS)、痛み破局化スケール(PCS))がコンピューター上で実施可能となるように電子化し、グラフィカルユーザーインターフェイス(GUI)として実装した。更にVR鏡治療中の治療タスク実施中の患者の運動に関する情報の記録機能を実装し、各種情報を管理するデータベースサーバーを構築して在宅用システムからデータベースサーバーへデータを転送する機能を実装した。

##### 2) Captologyを援用した患者治療意欲の動機付け

まず、患者の治療意欲を阻害する要因を整理し、それらの要因に対してコンピューターによる説得概念のCaptologyを援用した解決策を検討した。本研究では治療意欲を阻害する要因を治療プロセス上の患者の負担が大きいこと、患者が治療効果を実感しづらいこと、痛みによる気分的な落ち込みや自らの状態を受け入れられないことに設定した。これら3つの阻害要因に対してCaptologyの概念で定義されている各種説得原理を援用した。具体的には、GUIによって治療手順を誘導し、患者が操作手順を把握せずに、画面上の指示にそうすることで治療が開始できるようになった。また痛み

の評価スケールであるVAS値をグラフとして表示するなど治療に関する情報を提示し、更に称賛のメッセージも提示するようにした。

##### 3) 構成したシステムの治療への使用

左手の複合性局所疼痛症候群(CRPS)の40歳代の女性に対し、システムの導入を行った。10か月間患者自宅に設置し、その期間にデータベースに収集された情報を整理し、設置期間中の治療回数、治療の時間帯、治療タスクの実行時間および痛みの程度の変化を調べた。

#### オーダーメイド医療としてのロボットアーム鏡治療

まず、第一段階として、電動義手を動かす入力-動作間の遅延時間を操作して、電動義手の動作に対する運動主体感の発生の違いを検討した。結果として、運動主体感は意図した動作が始まるまでの遷延時間が長くなるほど減少し、外見再現度の高い電動義手の操作において運動主体感を得られる遷延時間は短くなる傾向が見られた。しかし動作が運動主体感に与える影響については考慮されていなかったため、第二段階として、外見再現度や把持動作の再現度の高低が運動主体感に及ぼす影響を調査するため、各再現度の高低の異なる電動義手を作成し、入力-動作間の遅延時間を設けることで運動主体感の発生の変化を比較した。その結果、外見再現度の評価に差は現れなかったが、手袋の有無によってもたらされる身体保持感と把持動作再現度の高低により、運動主体感の発生は変化した。運動主体感が最も得られるのは身体保持感を得られ、かつ把持動作再現度が高い電動義手であった。運動主体感は入力から動作までの遅延時間が大きくなるにつれ減少するものの、その減少は身体保持感や予想した動作が達成されたかといった要因によってある程度抑えることができると考えられる。今後の展望として、幻肢痛患者やCRPS患者に対し、同様の実験を行い、鎮痛効果が得られる運動主体感許容遅延時間を検討することが必要と考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

2016

1) Fukumori, S., Miyake, K., Gofuku, A., Sato, K. Assessment of Motor Function in Complex Regional Pain Syndrome With Virtual Reality-based Mirror Visual Feedback: A Pilot Case Study  
Neuroscience and Biomedical Engineering, 4(1), p.43-49 2016 査読有

2) 福森 聡, 五福 明夫, 佐藤 健治, 丸尾

智子、谷野 雅昭. 鏡療法使用時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関わる認知機能の解明 Cognitive Studies, 23(4), 321-336. (Dec. 2016) 査読有

2015

3) Miyake, K., Sugihara, T., Gofuku, A.: Emotional Assistance Using Captology for Continuous Rehabilitation of Patients with Chronic Pain, Proc. of Healthy Aging Tech mashup service, data and people 2015 (HAT-MASH 2015), LNCS, 2015, 査読有

4) 三宅貫太郎、福森聡、杉原太郎、五福明夫、佐藤健治: Captology 諸原理を応用した慢性疼痛患者の治療意欲を維持するための外装的機能の検討 人工知能学会誌 2015 30(1) 148-151, 査読有

5) 三宅貫太郎、五福明夫、福森聡、杉原太郎、佐藤健治: 遠隔情報共有機能を持つ在宅バーチャルリアリティ鏡療法システムの構築, 遠隔医療学会誌, 2015 11(2) 64-70, 査読有

6) 諫武賢志、福森聡、五福明夫、佐藤健治: 慢性疼痛患者のためのカメラ画像による身体動作認識デバイスを利用した簡易型 VR 鏡治療システムの開発 ヒューマンインタフェース学会誌 63-72 2015 17(1), 査読有

2014

7) 三宅貫太郎、杉原太郎、五福明夫、佐藤健治: VR 鏡療法における患者の治療意欲を維持するための仕掛けの検討, 2014 年度人工知能学会全国大会 (第 28 回) 論文集, 2G4-0S-21b-7, 2014

8) 三宅貫太郎、福森聡、杉原太郎、五福明夫、佐藤健治

慢性疼痛患者の行動変容に向けた Captology における諸原理の応用可能性の検討, 第 4 回 ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会予稿集, pp.1-6, 2014 (5月25日)

9) Satoshi Fukumori, Kenji Isatake, Akio Gofuku, Kenji Sato

Mirror therapy system based virtual reality for chronic pain in home use, Proc. of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p.4034-4039, 2014 査読有

[学会発表](計 9 件)

2016

発表者: 北原 亮宏, 五福明夫, 佐藤健治, 杉原 太郎, 三宅 貫太郎

発表表題: 慢性疼痛における増悪因子特定のための記録活動支援システム要件に関する検討

学会等名: ヒューマンインタフェースシンポジウム 2016

発表年月日: 2016 年 9 月 8 日

発表場所: 東京農工大学 小金井キャンパス (東京都小金井市)

( 参 考 : [https://www.his.gr.jp/\\_event/his2016\\_program.html](https://www.his.gr.jp/_event/his2016_program.html) )

発表者: 三宅貫太郎, 杉原太郎, 北原亮宏, 五福明夫, 佐藤健治

発表表題: 適切な治療継続のための情緒的支援を行うインタフェースの考察

学会等名: 第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会

発表年月日: 2016 年 5 月 26 日

発表場所: 京都テルサ (京都府京都市)

( 参 考 : <https://sci16.iscie.or.jp/confprog/#/sessions> )

発表者: 廣田 遼平, 五福明夫, 杉原 太郎, 佐藤健治, 三宅 貫太郎, 北原 亮宏

発表表題: 電動義手の外見再現度が運動主体感に及ぼす影響の検討

学会等名: 中国四国支部第 54 期総会・講演会

発表年月日: 2016 年 3 月 9 日

発表場所: 愛媛大学工学部 (愛媛県松山市)

( 参 考 : <http://www.jsme.or.jp/conference/csconf16/doc/program.html> )

2015

発表者: K. Miyake, T. Sugihara, A. Gofuku

発表表題: Emotional Assistance Using Captology for Continuous Rehabilitation of Patients with Chronic Pain

学会等名: Healthy Aging Tech mashup service, data and people (HAT-MASH 2015 (as part of JSAI-isAI2015) )

発表年月日: November 17, 2015 (2015 年 11 月 17 日)

発表場所: Sosokan at Yagami Campus in Keio University (慶應義塾大学矢上キャンパス創想館) (神奈川県横浜市)

( 参 考 : <https://sites.google.com/site/hatmash2015/home/program-information> )

発表者: S. Fukumori, K. Miyake, A. Gofuku, K. Sato

発表表題: Changes in movement of upper limb on Complex Regional Pain Syndrome with Virtual Reality based Mirror Visual Feedback: pilot case study

学会等名: The 9th ICME International Conference on Complex Medical

Engineering (CME 2015)  
発表年月日: June 19, 2015 (2015年6月17日)  
発表場所: Okayama Convention Center (岡山県岡山市)

発表者: S. Fukumori, A. Gofuku, K. Sato  
発表表題: Perception consistency between prediction with motor imagery and visual feedback in using Virtual Reality based Mirror Visual Feedback  
学会等名: The 9th ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2015)  
発表年月日: June 19, 2015 (2015年6月17日)  
発表場所: Okayama Convention Center (岡山県岡山市)

2014

発表者: Satoshi Fukumori, Kenji Isatake, Akio Gofuku, Kenji Sato  
発表表題: Mirror therapy system based virtual reality for chronic pain in home use  
学会等名: The 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society  
発表年月日: Nov. 1, 2014 (2014年11月1日)  
発表場所: Sheraton Dallas Hotel (Dallas, TX, USA)  
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=7049106>

発表者: 三宅貴太郎, 杉原太郎, 五福明夫, 佐藤健治  
発表表題: VR 鏡療法における患者の治療意欲を維持するための仕掛けの検討  
学会等名: 2014年度人工知能学会全国大会  
発表年月日: 2014年5月13日  
発表場所: ひめぎんホール (愛媛県松山市)  
<https://kaigi.org/jsai/webprogram/2014/paper-172.html>

発表者: 三宅貴太郎, 福森聡, 杉原太郎, 五福明夫, 佐藤健治  
発表表題: 慢性疼痛患者の行動変容に向けた Captology における諸原理の応用可能性の検討  
学会等名: 第4回 ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会予稿集  
発表年月日: 2014年5月24日  
発表場所: 隠岐開発総合センター (島根

県隠岐郡)  
<http://www.sigwi2.org/cfano4>

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 健治 (SATO, Kenji)  
岡山大学・医歯薬学総合研究科・准教授  
研究者番号: 70359884

(2) 研究分担者

五福 明夫 (GOFUKU, Akio)  
岡山大学・自然科学研究科・教授  
研究者番号: 20170475

(3)

西江 宏行 (NISHIE, Hiroyuki)  
川崎医科大学・医学部・講師  
研究者番号: 20379788