

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 4 日現在

機関番号：22401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26750226

研究課題名(和文)筋電図バイオフィードバックと運動イメージを用いた上肢機能練習プログラムの開発

研究課題名(英文)Development of virtual reality system for upper limb training with electromyogram biofeedback and motor imagery

研究代表者

鈴木 貴子(SUZUKI, Takako)

埼玉県立大学・保健医療福祉学部・助教

研究者番号：60549343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：骨折側の運動イメージや関節可動域は、日常生活における手の使用に影響を及ぼす。本研究では、骨折後の運動イメージを改善するためのバーチャルリアリティシステム(VR)を開発し、映像観察時の皮質脊髄興奮性の変化を検証するとともに、VRを用いた運動練習が運動イメージ、関節可動域、日常生活における手の使用の回復過程に及ぼす影響を検証した。本研究により、VRを用いた運動練習によって皮質脊髄興奮性が増加すること、運動イメージが関節可動域および日常生活における手の使用に先立って回復することが明らかになった。今後はより応用的な運動練習に対応できるような運動練習プログラムの開発が必要と考えられた。

研究成果の概要(英文)：Self-estimated and actual range of motions (ROMs) have been identified as an important risk factor for an inability to perform upper extremity functional tasks in patients with wrist fractures. The purpose of this study was to develop the virtual reality (VR) training system, which facilitates the motor imagery for fractured hand, to investigate facilitation of corticospinal excitability during the VR training, and to identify the time course of changes in self-estimated and actual ROMs and upper extremity functions associated with the VR training. The results of this study implied that corticospinal excitability was increased during VR training, that the self-estimated and actual ROMs and upper extremity functions changed over the course of training period and reached a plateau that fitted an exponential function, and that the improvement of self-estimated ROM occurred earlier than actual ROM and upper extremity functions during VR training.

研究分野：身体機能作業療法，運動学習

キーワード：運動学習 運動イメージ

1. 研究開始当初の背景

上肢骨折後のリハビリテーションでは、術後早期から関節可動域練習を開始する必要があるが、重症度等によっては関節可動域練習の開始が遅れ、不動の期間を生じることがある。また、関節可動域練習開始後も、浮腫や腫脹、疼痛、筋緊張の異常、恐怖や不安などから、対象者自身が手の使用を控えてしまうこともある。このような不動および不使用の経験から、対象者の脳は「使えない手」を学習してしまい(学習性不使用)、これによってその後のリハビリテーションの進行や日常生活における手の使用が妨げられる。

学習性不使用をつくりださないためのリハビリテーションとして、フィードバック療法(Marinacciら, 1960)や運動イメージ惹起法などがある。フィードバック療法は、筋収縮や関節可動域の程度を患者が知覚しやすい筋電図や視覚信号に変換して提示しながら関節可動域練習を行う方法である。これにより、筋および関節の動きを意識的に制御し、手の使用を促進することができるとされている。

運動イメージ惹起法は、脳内でその運動を実施していることをイメージするものである。運動イメージ惹起の最中には、実際の運動を伴わなくても、脳内でイメージした運動に対応する脳の再現領域が活動することから(Gallese, 1996, Gazzola, 2009), 手の使用に関連した脳活動を促進することが可能であると考えられている。これまで、パーキンソン病(Abbruzzese, 2015)や複合性局所疼痛症候群(Priganc, 2011)を発症した患者に対する運動イメージ惹起法の上肢機能改善効果が示唆されている。運動イメージ惹起法の中でも、映像観察による運動観察法の有効性が知られている。Ertelt(2007)は脳卒中患者が運動を行っている映像を観察した後に練習を行うと、上肢機能に改善があったと報告している。しかし、骨折患者に対する運動イメージ惹起法の有効性は明らかではない。

フィードバック法と運動イメージ惹起法は、いずれも対象者に対して非侵襲的で苦痛を強いることがほとんどなく、より早期の関節可動域の再獲得や日常生活動作の再獲得を導く可能性がある。上肢骨折を発症した患者に対するより効果的なリハビリテーション方法を生み出すためには、両者を用いた複合的な上肢運動練習のプログラムの開発が必要がある。

2. 研究の目的

研究1では、フィードバック法と運動イメージ惹起法を組み合わせ提示するためのバーチャルリアリティシステムを開発し、システムにおける映像(視差映像を用いた立体3D画像)観察時の皮質脊髄興奮性と運動イメージ鮮明度を検証することを目的とした。これにより、バーチャルリアリティシステムに

おける視覚的なフィードバックが運動イメージを惹起し得るかを明らかにした。なお、機器開発の際に、筋電図と関節運動を同時にフィードバックした場合、被験者に対する情報量が過多になることが想定されたため、研究1では関節運動のみを視覚的にフィードバックするシステムを用いた。

研究2では、橈骨遠位端骨折患者を対象とし、バーチャルリアリティシステムを用いた運動イメージの惹起が骨折部位の主観的関節運動イメージ、実測の関節可動域、日常生活における手の使用の回復過程に及ぼす影響を検証することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 研究1

右利きの健常成人9名(21-30歳)を対象とした。バーチャルリアリティシステムを用いて右手の母指と示指の対立動作の3D画像を観察したときの皮質脊髄興奮性を経頭蓋磁気刺激(transcranial magnetic stimulation: TMS)による運動誘発電位(motor evoked potential: MEP)およびVisual Analogue Scale(VAS)にて検証した。

バーチャルリアリティシステムにおける画像教示は、ヘッドマウントディスプレイOculus Rift DK2(Oculus社, Oculus)を用いた。Oculusは両眼に独立した小型ディスプレイをレンズで投影できる。両眼カメラを用いて右手の母指と示指の対立動作を撮影し、教示用動画を作成した。次に、左右の目に視差映像を提示して立体視させ、3D画像を構築した。

実験では、被験者に3D画像を観察させ、映像に合わせて自身の母指と示指を映像と同様に動かすことをイメージさせた。被験者は椅子座位で、右前腕を大腿上で安静保持させた。教示画像は母指と示指の対立と伸展(各2秒)を10回反復する画像を3セット提示し、セット間にはマスク画像を提示した。Control条件では黒色画像を提示した。TMSにはMagproX100(Magventure社)と8の字コイルを用いた。教示画像の提示中に母指と示指が対立するタイミングに同期させて(4秒に1回)、左一次運動野の第一背側骨間筋(first dorsal interosseous: FDI)のhotspotを刺激し、同筋よりMEPを導出した。刺激強度は安静時運動閾値の1.1倍とした。

また、被験者には各映像を観察させた直後にイメージの鮮明度について、筋感覚的運動イメージと視覚的運動イメージについて、回答させた。

解析は、各条件で得られた10個のMEPのうち最大振幅と最少振幅を示した波形を除いた8個を加算平均し、黒色画像と3D画像の視聴時における振幅を比較した。統計解析にはt検定を用いた。研究は研究者所属機関の倫理委員会の承認を得て実施した(承認番号: 26069, 27102)。

(2)研究2

橈骨遠位端骨折患者 15 名を、通常のリハビリテーションプログラムに加えて、映像観察を実施する群（バーチャルリアリティ群）6 名と、通常のリハビリテーションプログラムのみを実施する群（対照群）9 名に割り付けた。

バーチャルリアリティにおける映像観察には Oculus Rift DK2 を用いた。バーチャルリアリティ群は、あらかじめ作成した関節運動の映像を観察しながら、映像に合わせて対象者自身の手指（伸展/屈曲）、手関節（背屈/掌屈）、前腕（回内/回外）の自動運動を計 10 分間行った。対象群は、バーチャルリアリティ群と同様の関節自動運動を計 10 分間行った。両群とも、通常のリハビリテーション終了後に運動を行い、自動運動の範囲は医師の許可に基づき、治療過程に応じた無理のない範囲とした。実施頻度は 1 回/週で、実施期間は受傷後 0 週から 12 週とした。

リハビリテーション開始時、1 か月後、2 か月後、3 か月後に、関節可動域、運動イメージ、日常生活における手の使用を評価した。運動イメージの評価には、関節可動域の実測値と患者の主観的な予測値との差を用いた。実測値と患者予測値との差は、非骨折手の自動関節可動域を対象者に伝えた後、骨折手の関節可動域が非骨折手の何%に相当するかを回答させることによって算出した。日常生活における手の使用の評価には、Disability Arm Shoulder and Hand (DASH) と Patient Related Wrist Evaluation (PRWE) を用いた。

バーチャルリアリティシステムを用いた運動イメージの惹起が骨折部位の主観的関節運動イメージ、実測の関節可動域、日常生活における手の使用の回復過程に及ぼす影響を検証するため、各指標の値を最小二乗法により指数関数に近似させ、プラトーに達するまでの期間を時定数によって評価した。これにより、バーチャルリアリティシステムが骨折後の関節運動イメージの生成を早め、実測の関節可動域および日常生活における手の使用の回復が促進されるか否かを検証した。研究は研究者所属機関の倫理委員会の承認（承認番号：27107）および、研究協力機関の倫理委員会の承認（受付番号 26-3）を得て実施した。

4. 研究成果

(1)研究1

バーチャルリアリティシステムにおける 3D 画像視聴時の MEP 振幅は、黒色画像視聴時よりも有意に大きかった ($p=0.006$) (図 1)。また、3D 画像視聴時におけるイメージの鮮明度は、視覚的運動イメージ、筋感覚的運動イメージともに 9 名中 8 名の被験者において高い値を示した (図 2)。

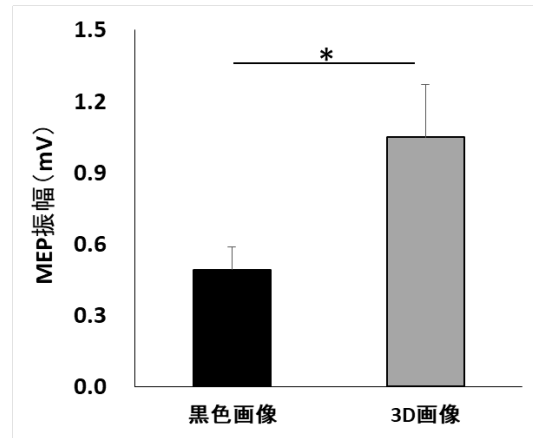


図 1 3D 画像と黒色画像における MEP 振幅

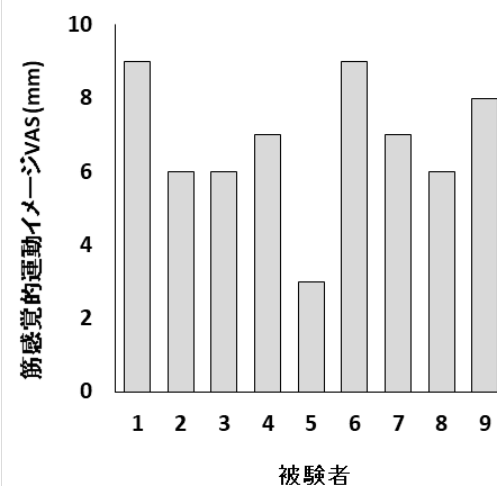
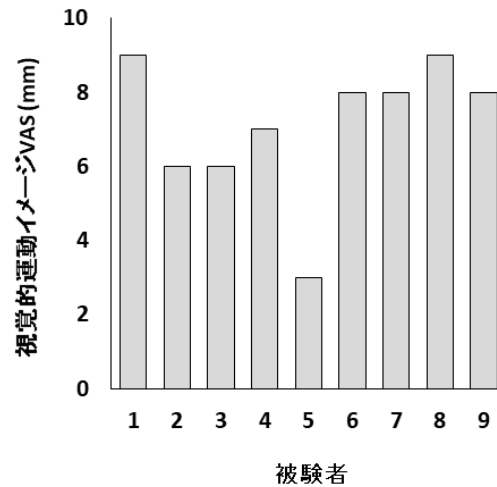


図 2 3D 画像視聴中の運動イメージ鮮明度

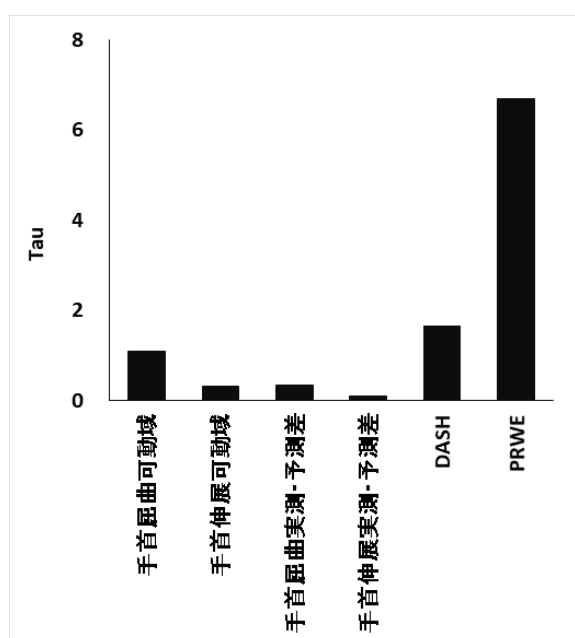
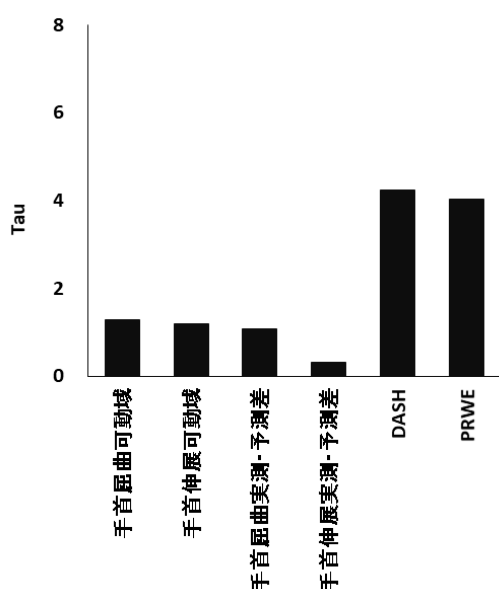
研究 1 の結果から、バーチャルリアリティシステムにおける 3D 画像視聴時に、MEP 振幅が増加することが示唆された。この MEP 振幅の増加は、運動イメージ惹起に伴う皮質脊髄興奮性の増加を反映しているものと考えられた。また、3D 画像視聴中の運動イメージ鮮明度も高かったことから、バーチャルリアリティシステムにおける視覚的なフィードバ

ックが運動イメージを惹起し得ると考えられた。

(2)研究2

バーチャルリアリティ群と対照群ともに、関節可動域、運動イメージ、日常生活における手の使用に関する全ての指標が受傷後早期に改善率が大きく、その後にプラトーに近づくという指数関数に近似した回復様式を示した(バーチャルリアリティ群 $r^2=0.68 - 0.98$, $p < 0.05$, 対照群 $r^2=0.59 - 0.98$, $p < 0.05$)。また指数関数の時定数は、関節可動域実測値と患者予測値との差、関節可動域の実測値, ADL 関連指標の順に大きく、この順序で回復することが示唆された(図3)。しかし時定数の値に両群間の差は認めなかった。

A. バーチャルリアリティ群



B. 対照群

図3 バーチャルリアリティ群と対照群に

おける時定数

研究2の結果から、現状のバーチャルリアリティシステムを用いた練習では、通常の練習と同程度の練習効果を示すものの、関節可動域に対するイメージの変容や日常生活に関連する多様な手の使用の回復を促進することは難しいと考えられた。この背景として、研究1および2で用いたバーチャルリアリティシステムでは、被験者に応じて右眼用と左眼用の画像の距離を調整する必要があり、調整の誤差によって臨床応用の際に立体感の程度が患者によって異なっていたことが一因と考えられた。

そこで研究2の後に、バーチャルリアリティシステムを改良した。新たな映像観察システムでは、head mount displayでCG画像に変換された自らの手を観察でき、小型モーションキャプチャによって取得した手の位置情報から画像を再現することができるシステムとした。この仕組みは日常生活の手指関節運動練習への対応が可能である。さらに、モデル画像を撮像し、モデル画像と実際の手を比較し、色調を変化させて運動範囲をフィードバックできる機能と、実画像の再生における時間的遅延と空間的遅延を生じさせる機能を追加した。これにより、筋電図を用いたフィードバック療法と類似の信号フィードバックを視覚的に患者に提示することが可能である。今後は、本システムを使用して、より応用的な仮想現実内の運動練習方法を検証する。

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0件)

〔学会発表〕(計1件)

運動イメージ惹起のための映像教示装置作製の試み 2D映像と3D映像の比較
鈴木貴子, 原元彦, 小池祐士, 石岡俊之, 瀧口豊太. 第50回日本作業療法学会, 札幌, 2016年9月

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 上肢運動学習装置
発明者: 瀧口豊太, 鈴木貴子
権利者: 公立大学法人埼玉県立大学
種類: 特許
番号: 特願 2016-046229
出願年月日: 2016年4月26日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木貴子 (SUZUKI, Takako)
埼玉県立大学・保健医療福祉学部・助教
研究者番号: 60549343

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

濱口 豊太 (HAMAGUCHI, Toyohiro)
埼玉県立大学・保健医療福祉学部・教授
研究者番号：80296186

(4)研究協力者

鈴木 誠 (SUZUKI, Makoto)
東京家政大学・健康科学部・教授
研究者番号：80554302

薄木 健吾 (USUKI, Kengo)
北里大学メディカルセンター・作業療法士