

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：22401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K13094

研究課題名(和文) 運動イメージと腱振動刺激による運動錯覚の複合感覚上肢機能練習プログラムの開発

研究課題名(英文) Upper limb training combining motor imagery and kinesthetic illusion

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：運動を実行する際には、視覚と固有覚からのフィードバック情報を運動指令に適切に変換し続ける必要がある。近年では、運動の観察のみで大脳皮質が賦活することが示されており、これを活用したリハビリテーションが期待されている。本研究では、映像を用いた運動観察をより効果的に実施するため、腱の振動刺激で引き起こされる関節運動の錯覚を組み合わせ、それが皮質脊髄興奮性にどのような変化を与えるのかについて検討した。視覚と固有覚の入力をコントロールすることにより、選択的に皮質脊髄興奮性を変化させる可能性が示唆された。この結果が運動の学習にどのような影響を及ぼすのかは今後検証を重ねて明らかにしていく必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リハビリテーションの方法は日々進歩しているが、実施に苦痛を伴わない運動イメージや運動錯覚は、新たなリハビリテーションの方法としての可能性を含んでいる。本研究によって得られた、大脳皮質の興奮性が刺激のコントロールにより選択的に変化させられる可能性は、今後のリハビリテーションの方法を考えていく上での基礎的で有用な情報の一つではないかと考える。

研究成果の概要(英文)：For accurate human movement, proprioceptive and visual feedback informations have to be integrated and transformed into an appropriate motor command. Recent studies suggest that observation of movement activates the corticospinal tract related to the movement and that could be beneficial in the rehabilitation. In addition, the proprioceptive inputs by tendon vibration lead to corticospinal activities related to the kinesthetic illusion of joint movement. This study investigated the corticospinal excitability during tasks involving multisensory difference between proprioceptive and visual inputs. We found that proprioceptive and visual information differentially altered the corticospinal excitability of reciprocal muscles. To clarify the relation between corticospinal excitability related to multisensory information and motor learning, future studies should consider performing examinations using transcranial magnetic stimulation, peripheral nerve stimulation, and brain imaging methods.

研究分野：リハビリテーション

キーワード：運動学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

上肢の骨折に対するリハビリテーションでは、術式の進歩等により固定期間が短縮されてきているものの、重症度、疼痛、腫脹等の程度によって早期の運動が制限されることが少なくない。また、対象者自身が、受傷した関節を運動させることや疼痛への不安や恐怖を感じ、適切な強度の運動を実施できないことも多い。このような長期間にわたる過度の安静によって対象者の脳が「使えない手」を学習してしまう学習性不使用によって、運動制限が解除された後になっても思うように手を動かさないことがある。

そのような現状の中、運動の映像を観察すると同時にその運動を実施しているイメージを行うことによって、実際の運動を伴わなくても運動実行時に賦活する脳部位と同様の部位が活動することが報告されている (Wright, 2016)。運動イメージを用いた報告には、複合性局所疼痛症候群の患者を対象としたもの (Priganc, 2011) などがあり、疼痛の軽減等の効果が示されているが、一方で運動イメージの鮮明性は個人差があるという指摘もあり、議論の最中である。また、実際にヒトが運動を実行する際には、視覚と固有覚からのフィードバック情報を運動指令に適切に変換し続ける必要がある (Reichenbach, 2014)。しかし、映像を用いた運動観察や運動イメージでは固有感覚の入力がないため、実際の運動を行った時と比較すると入力される感覚情報量が少ないという問題がある。

以前より、腱に 80 Hz 程度の振動刺激を行うことで、実際の運動を伴わずに運動をしたかのような運動錯覚が生じることが知られている (Goodwin, 1972)。腱の振動刺激による固有覚入力、脊髄の Ia-ループを賦活すると同時に運動錯覚に関連する補足運動野 (SMA)、運動前野 (PM)、後頭頂皮質、一次運動野 (M1) を賦活することが知られている (Gandevia, 2001; Casini, 2006)。このことは、運動観察による運動イメージ惹起に、腱の振動刺激による運動錯覚を組み合わせることで、運動観察およびイメージのみでは不足している固有感覚の入力を補完し、より大きな脳賦活効果が得られる可能性を示唆している。

ただし、人工的に視覚と固有覚の入力を作り出すときに、刺激のタイミングや刺激量のギャップを制御する必要がある。運動前野と後頭頂皮質が視覚と固有覚の統合処理に関与することが示されているが (Ehrsson, 2004)、腱への振動刺激によって刺激筋に投射する皮質脊髄興奮性が増加するという報告 (Mancheva, 2014) と変化しないという報告 (Lapole, 2015) があり、視覚と固有覚の刺激を組み合わせ提示をした時の皮質脊髄興奮性の変化について検証する必要がある。視覚と固有覚による組み合わせ刺激が皮質脊髄興奮性に及ぼす影響を明らかにすることができれば、上肢骨折によって運動が制限されている時期から感覚入力を用いた介入的トレーニングを開始でき、リハビリテーションの効果を促進できる可能性がある。

2. 研究の目的

研究 1 では、腱に対する振動刺激によって誘発される運動錯覚の程度 (関節運動角度と角速度) を明らかにすることを目的とした。

研究 2 では、視覚と固有覚の組み合わせ刺激が皮質脊髄神経の興奮性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

研究 3 では、研究 1 および 2 の実験結果を踏まえ、橈骨遠位端骨折患者を対象として介入プログラムの効果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 20 名 (平均年齢 21.2 歳) を対象とした。腱に対する振動刺激によって誘発される運動錯覚の程度について調査した。調査項目は、振動刺激によって生じる運動錯覚の最終到達関節角度および関節運動の角速度とした。

対象者は安楽座位で机の上に右前腕中間位をとり、サポーターを用いて安静を保持した。対象者が自身の右前腕を見ることができないように上肢を覆うとともに、閉眼した状態で右橈側手根伸筋 (Extensor carpi radialis; ECR) 腱に 10 秒間の振動刺激を行った。その後、手関節が 0°、15°、30°、45° に屈曲した静止画をランダムに提示し、それぞれについて自身が感じた運動錯覚の最大到達角度の一致度を 5 段階の Likert スケールにて判定させた。

また、静止画において最も一致度の高かった最終到達関節角度に至るまでの関節運動角速度について、1.5°/s と 3.0°/s の動画を提示して、自身が錯覚として感じた運動角速度の一致度を 5 段階の Likert スケールで判定させた。

(2) 研究 2

研究 1 の対象者と同じ右利きの健常成人 20 名 (平均年齢 21.2 歳) を対象とした。視覚と固有覚の組み合わせ刺激が皮質脊髄興奮性にもたらす影響を検証するため、経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation; TMS) を用い、ECR と橈側手根屈筋 (Flexor carpi radialis; FCR) から運動誘発電位 (motor evoked potential; MEP) を記録した。条件は、安静条件 (黒色画像の観察のみ、振動刺激なし)、対照条件 (モザイク画像 (無意味画像)、振動刺激あり)、静止画観察条件 (前腕の静止画像 (前腕中間位)、振動刺激あり)、動画観察条件 (手関節掌屈運動の動画、振動刺激あり) の 4 条件とした。各条件を連続で 20 試行を実施し、条件の実施順はランダムとした。また前に実施した条件による運動錯覚の持ち越し効果をウォッシュ

アウトするため、各条件の間に6分間の休憩を設けた(Kito, 2006)。対象者は安楽座位をとり、右前腕を中間位に机の上に置いてサポーターで安静保持させた。対象者の前腕が見えないように覆うとともに前腕の位置と一致させて視覚刺激提示用のモニターを設置した。腱の振動刺激は、対象者の右 ECR 腱に対し、4 秒間実施した。ECR 腱の振動刺激中、対象者はモニターを観察した。また、動画観察条件では、研究 1 で確認した各対象者の運動錯覚に最も一致する関節角度と角速度の映像を用いた。

TMS には、MagStim200² (Magstim, Whitkand, UK) と直径 70 mm の 8 の字コイルを用い、右 ECR と右 FCR から MEP を記録した。刺激部位は、頭皮上の 25 か所の刺激により作成した ECR と FCR の運動野マップの CoG の中点とした(Suzuki, 2012, 2017)。刺激強度は、安静時運動閾値の 120% とし、刺激は single-pulse で、刺激のタイミングは 4 秒の振動刺激の終了直後とした。

(3) 研究 3

橈骨遠位端骨折患者を、通常のリハビリテーションプログラム実施群(対照群)14名と、映像観察プログラム群(以下映像観察群)13名に割りつけた。映像観察には、Oculus Rift DK2 を用いた。映像観察の内容は、手関節の背屈と掌屈、前腕の回内と回外、手指の屈曲と伸展で、映像に合わせて自身の無理のない範囲で運動を計 10 分間行った。対象者が観察している運動は、全可動域を運動している動画であった。対照群は、映像観察を行わずに、同様の運動を 10 分間、無理のない範囲で行った。実施頻度は両群ともに 1 回/週で、実施期間は受傷後 0 週 ~ 12 週とした。

リハビリテーション開始時と 2 か月後の関節可動域と Patient Related Wrist Evaluation (PRWE) による困難度の結果(困難であるほど高得点)を比較した。

4. 研究成果

(1) 研究 1

20 名の対象者全員が振動刺激に対して運動錯覚を自覚した。運動錯覚の鮮明さは最終到達角度 15 度および 30 度が有意に高かった ($p < 0.001$) (図 1)。運動錯覚の角速度は、1.5°/s と 3.0°/s に有意差を認めなかった(図 2)。

研究 1 の結果から、振動による関節運動錯覚には、最終到達角度には個人差があると考えられ、これらの結果をもとに、研究 2 で用いる視覚刺激の関節可動域の最終到達角度と角速度を個々の対象者に合わせて決定した。

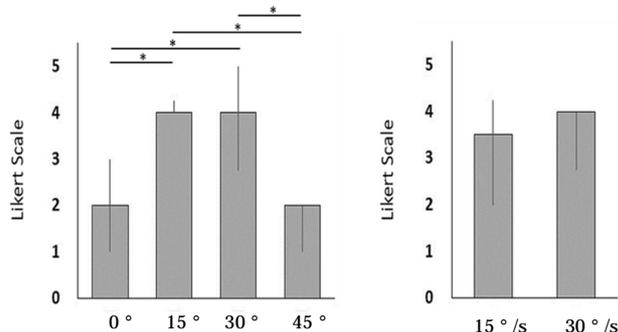


図 1 運動錯覚の関節運動最終到達角度の鮮明度

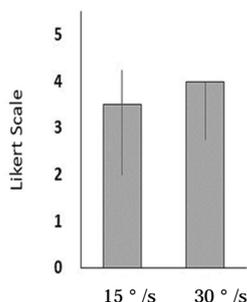


図 2 運動錯覚の関節運動の角速度における鮮明度

(2) 研究 2

20 名の対象者全員が全てのプロトコルを終了することができた。安静条件と対照条件における ECR と FCR の MEP の比較では、ECR で有意に高い値となった ($p < 0.0001$)。FCR では安静条件と対照条件において有意差を認めなかった ($p = 0.176$) (図 3)。

ECR に関する結果は過去の報告と一致しており (Eklund, 1996; Hagbarth, 1980), ECR 腱への振動刺激による Ia 線維と運動ニューロンのループの興奮によるものと考えられた。FCR において、安静条件と対照条件間で有意差を認めなかった(図 3) ことについて、Ia 抑制介在性ニューロンは細く分岐が少ない (Jankowska, 1972) ことから、拮抗筋 (FCR) の運動ニューロンを抑制するための刺激としての強度が不足していたのではないかと考えられた。

次に、静止画観察条件と動画観察条件を比較するため、MEP 振幅を振動刺激のみを実施した対照条件の値で除して正規化した。その結果、ECR の正規化 MEP 振幅は、動画観察条件と比較して静止画条件の方が有意に高かった ($p < 0.0001$)。一方、FCR の正規化 MEP 振幅は、静止画像観察条件と比較して動画観察条件の方が有意に高かった ($p < 0.0001$) (図 4)。つまり、静止画観察条件(視覚と固有覚の不一致があるとき)では ECR の MEP 振幅が増加した。固有覚情報と視覚情報が競合した状態で一次運動野に感覚情報が到達した場合、視覚情報優位に情報処理が行われることが知られており (Hagura, 2007)、今回の結果は、脳内にお

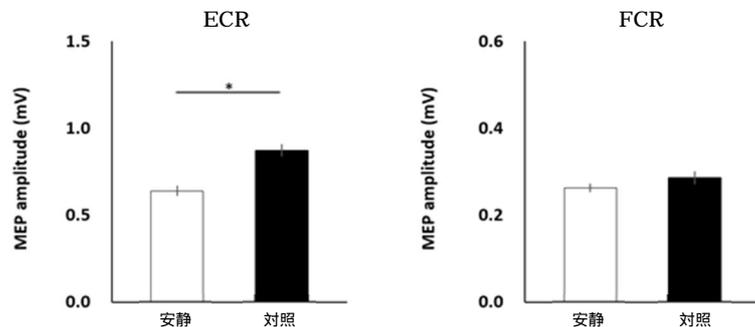


図 3 安静条件と対照条件における ECR と FCR の MEP 振幅

る情報の不一致を減らすための調整が行われた結果ではないかと考えられた。

動画観察条件（視覚と固有覚が一致した状態）において FCR の MEP 振幅が増加したことについては、運動観察による一次運動野の賦活（Fadiga, 2005; Wright, 2016）による影響ではないかと考えた。以上の結果より、視

覚入力と固有覚入力の差異が生じると、それに関連して皮質脊髄興奮性が変化することが示唆された。視覚と固有覚の入力を人為的に操作することで、皮質脊髄興奮性を選択的に増加させることができる可能性があると考えた（Suzuki, 2019）。

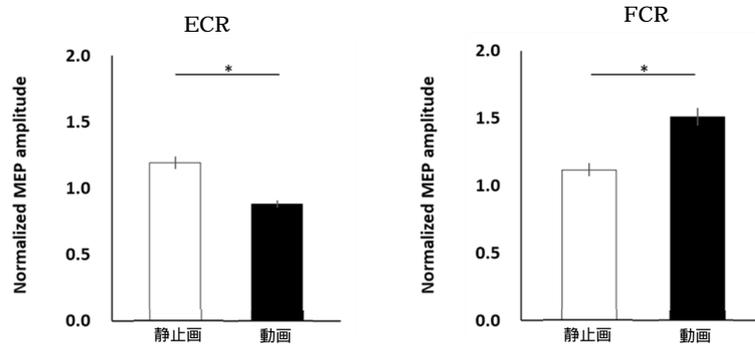


図4 静止画観察条件と動画観察条件における ECR と FDR の MEP 振幅

(3) 研究3

研究1および2において視覚刺激と振動刺激の組み合わせによって皮質脊髄興奮性が変化することが確認できた。ただし、固有覚と視覚の情報が競合した場合には視覚情報処理の優位性を反映した皮質脊髄興奮性の変化が生じることが示唆された。そこで、研究2において優位性をもって賦活されていた視覚刺激を用いて臨床における介入プログラムを策定することとした。

映像観察プログラム群は、10名が解析対象となり、リハビリテーション開始時と2か月目における関節可動域の変化量を映像観察群（視覚刺激提示）と対照群（通常のリハビリテーションプログラムを実施）で比較した。その結果、掌屈は映像観察群で有意な改善を認めた（ $p=0.027$ ）。しかし、背屈、回内、回外では両群に有意差を認めなかった（図5）。また PRWE の変化量の比較では、合計点と特定動作の項目得点において有意に映像観察群が対照群よりも改善した（ $p=0.012$, $p=0.002$ ）（図6）。

PRWE の特定動作は、ドアの取っ手を回すことやナイフで肉を切る、ワイシャツのボタンをかける、手を使って椅子から立ち上がる、5kgの物を運ぶ、トイレトペーパーを使うといった項目で構成されている。これらの項目は手関節部の力を必要とするため、骨折患者にとって、不安や恐怖を感じやすい項目であると考えられる。この項目に有意差が生じた理由として、映像観察条件において正常の可動範囲を動かしている動画を観察することによって、動けない手のイメージが軽減した可能性を想定している。関節可動域については、掌屈のみに有意差が見られた。手関節の掌屈のような回旋を伴わない運動の方が恐怖感を伴わずに実施でき、2か月の時点でも改善が見られやすいのではないかと予想するが、これを検証するためには、2か月以降の経過の観察や回復スロープの検証、またその他の事項について評価を行う必要がある。

本研究において、振動刺激と視覚刺激を人為的にコントロールすることによって、皮質脊髄興奮性を選択的に変化させることができる可能性が示唆されたが、これにより生じる皮質脊髄興奮性の変化が、運動学習または運動の再学習においてどのような影響を与えるのかについては、

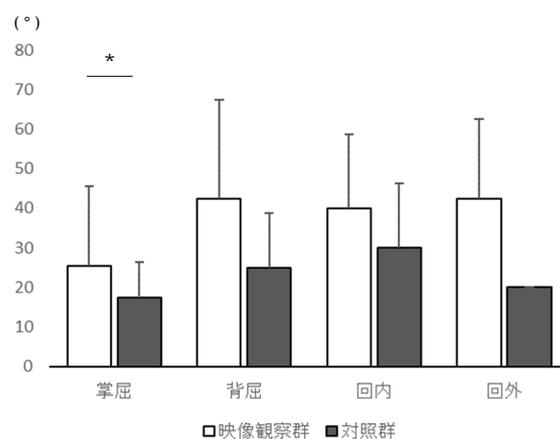


図5 関節可動域の比較（初回と2か月後の差分）

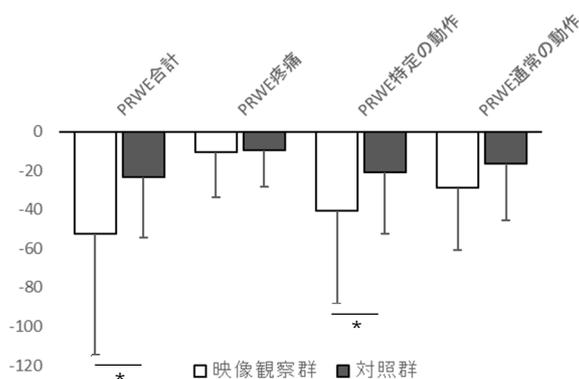


図6 PRWEの結果の比較（初回と2か月後の差分）

健常者を対象としてより詳細な検証を行う必要がある。

<引用文献>

- Casini, L., et al., (2006). Cortical correlates of illusory hand movement perception in humans: a MEG study. *Brain Res.* 1121, 200-206.
- Ehrsson, H. H., et al. (2004). That 's my hand! Activity in premotor cortex reflects feeling of ownership of a limb. *Science* 305, 875-877.
- Eklund, G., and Hagbarth, K. E. (1966). Normal variability of tonic vibration reflexes in man. *Exp. Neurol.* 16, 80-92.
- Fadiga, L., et al., (2005). Human motor cortex excitability during the perception of others' action. *Curr. Opin. Neurobiol.* 15, 213-218.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol. Rev.* 81, 1725-1789.
- Goodwin GM., et al., (1972). Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception? *Science* 175(4028), 1382-4
- Hagbarth, K. E., et al.. (1980). Segmentation of human spindle and EMG responses to sudden muscle stretch. *Neurosci. Lett.* 19, 213-217.
- Hagura, N., et al. (2007). Activity in the posterior parietal cortex mediates visual dominance over kinesthesia. *J. Neurosci.* 27, 7047-7053.
- Jankowska, E., and Lindström, S. (1972). Morphology of interneurons mediating Ia reciprocal inhibition of motoneurons in the spinal cord of the cat. *J. Physiol.* 226, 805-823.
- Kito, T., et al., (2006). Sensory processing during kinesthetic aftereffect following illusory hand movement elicited by tendon vibration. *Brain Res.* 1114, 75-84.
- Lapole, T., et al., (2015). Modulation of soleus corticospinal excitability during Achilles tendon vibration. *Exp. Brain Res.* 233, 2655-2662.
- Mancheva, K., et al., (2014). The effect of muscle vibration on short latency intracortical inhibition in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 114, 2073-2080.
- Priganc VW., et al., (2011). Graded motor imagery. *Journal of hand therapy.*24(2);164-8
- Reichenbach, A., et al., (2014). A key region in the human parietal cortex for processing proprioceptive hand feedback during reaching movements. *Neuroimage* 84, 615-625.
- Suzuki, M., et al., (2012). Reciprocal changes in input-output curves of motor evoked potentials while learning motor skills. *Brain Res.* 1473, 114-123.
- Suzuki, M., et al., (2017). Nonequivalent modulation of corticospinal excitability by positive and negative outcomes. *Brain Behav.* 8:e00862.
- Suzuki.T., et al., (2019). Differential Effect of Visual and Proprioceptive Stimulation on Corticospinal Output for Reciprocal Muscles. *Frontiers in integrative neuroscience.*13(63).
- Wright D.J., et al., (2016). Viewing instructions accompanying action observation modulate corticospinal excitability. *Front. Hum. Neurosci.* 10:17.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Takako, Suzuki Makoto, Kanemura Naohiko, Hamaguchi Toyohiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Differential Effect of Visual and Proprioceptive Stimulation on Corticospinal Output for Reciprocal Muscles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Integrative Neuroscience	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnint.2019.00063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木貴子
2. 発表標題 相反筋に投射する皮質脊髄興奮性に対する視覚固有覚刺激の影響
3. 学会等名 第24回日本基礎理学療法学会学術集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	薄木 健吾 (USUKI Kengo)	北里大学メディカルセンター・作業療法士	
連携研究者	鈴木 誠 (SUZUKI Makoto) (80554302)	東京家政大学・健康科学部・教授 (32647)	
連携研究者	濱口 豊太 (HAMAGUCHI Toyohiro) (80296186)	埼玉県立大学・保険医療福祉学部・教授 (22401)	