

[研究助成 (A)]

脳梗塞後の筋張力制御に対する効果的な リハビリテーション支援システムの開発

Development of effective rehabilitation support system for accurate control of muscle tension

2181025



研究代表者	獨協医科大学 医学部	講師	藤木 聡一郎
共同研究者	茨城県立医療大学 保健医療学部	准教授	四津 有人

[研究の目的]

脳梗塞などによる運動失調から回復するためには、リハビリテーション（以下、リハビリ）等の運動訓練が重要となる。これは失われた運動機能を再獲得するための運動学習であると捉えることができる。限られた設備や時間の中で行われるリハビリにおいて効率化を促す方法が求められるが、獲得したい運動の学習を促進させる神経生理学的なメカニズムは未だ明らかにされていない点が多い。運動学習に関する神経生理学的メカニズムの解明とそれに基づく方法の確立が必要であると考えられる。

運動学習において重要な要素は運動誤差の知覚である (Shadmehr et al., 2010)。目的とする運動イメージと実際の運動との差を検出し、評価し、改善するという過程が欠かせない。必要となる誤差情報を効果的に提示することができれば、運動学習（運動機能の再獲得）が促進されるのではないかと期待される。感覚の取得に関連して、リハビリの認知運動療法では患者に対し能動的な感覚経験を積ませることを行わせる。この手法に基づく研究として、健常者と高齢者に対して足の裏で硬さの異なるスポンジを触らせて、硬さの違いを答えさせるようにすると、立位姿勢の揺れの低減に効果があったと報告されている (Morioka et al., 2009)。この

ように、運動自体のトレーニングではなく、体性感覚の判別させることで、運動機能改善の効果が期待される。また、体性感覚情報に加えて、プリズム適応や Virtual reality 技術のように視覚情報は差異の認知が容易で、運動の修正に対して強く影響を与えると考えられる。本研究では体性感覚経験と共に与える誤差情報の視覚提示の仕方に着目し、筋緊張制御に関する運動学習を促進させるシステム開発を目指した。

[研究の内容, 成果]

1. 被験者

本研究は獨協医科大学の倫理審査委員会の承認を得て実施した。被験者は健常者 30 名で、2.2 節で説明するように、課す条件に応じて 30 名をランダムに 10 名ずつの 3 群に分けた（条件 1 年齢 21.7 ± 1.4 ；条件 2 年齢 21.7 ± 1.6 ；条件 3 年齢 22.2 ± 1.5 ）。

2. 実験条件

2.1 イメージする力発揮量と実際の誤差評価

頭の中でイメージする力発揮量と実際に発揮された力の誤差を得るためには、頭の中でイメージしている力発揮量を定量化する必要がある。本研究では被験者に基準となる力の感覚を体験させ、その感覚を目標とする力発揮量とし

感覚を記憶 → 想起と力発揮

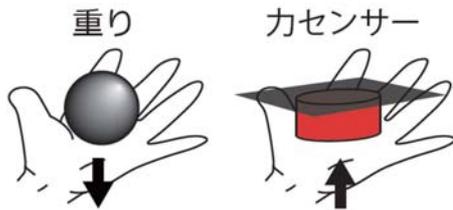


図1 感覚の記憶に基づく力発揮

た。具体的には、非利き手の手のひらに置いた重りの重さの感覚を記憶してもらった後で、その時の感覚を思い出しつつセンサーを同等と感じる力で押させた(図1)。被験者が目標値に到達したと判断したときにボタンを押させ、その時の値を実際の力発揮量とした。目標とする力の大きさは100 g, 200 g, 300 g, 400 g, 500 g (0.98 N, 1.96 N, 2.94 N, 3.92 N, 4.90 N) の5段階とした。5段階の順番はランダムとし、各段階で3回ずつ計測した。

2.2 リアルタイムな力の誤差の視覚的提示に基づく学習

視覚的に誤差を提示しながら体験したことによって、運動イメージと実際の誤差にどのような変化が表れるのかを調べた。モニター上に力センサーへの入力に応じて大きさの変わる円を表示させ、目標値(0.98 N, 1.96 N, 2.94 N, 3.92 N, 4.90 N)となる円の大きさを教示することで誤差情報ありの条件とした。被験者には非利き手でセンサーを押して基準値に円の大きさを近づけるように教示し、20秒間その動作を行ってもらった。20秒が終了すると手をセンサーから離し、モニターの表示が消えた状態で、記憶した力のイメージを発揮させた(図2)。5段階の順番はランダムとし、各段階で3回ずつ計測した。

視覚による誤差情報の提示の仕方によって記憶後の力発揮の精度に影響があるのかを調べるために、センサー入力に対する視覚提示(円の直径)について3条件を設定した(図2)。目標値を中心として、条件1では線形な応答を、条件2ではシグモイド関数のような応答を、条

モニターを見つつ 感覚を記憶 → 想起と力発揮

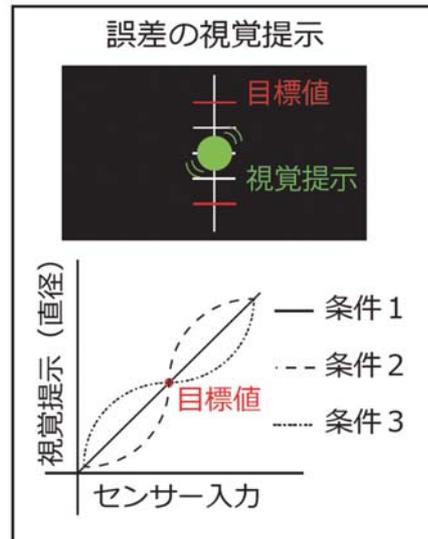
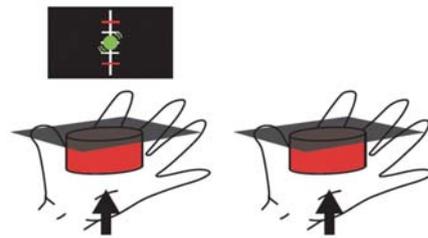


図2 力誤差の視覚提示を加えた感覚の記憶

件3では3次関数のような応答を返すように設計した。3条件を被験者の3集団にそれぞれに割り当てた。

3. 計測結果

目標値を想起しながら発揮される実際の力に対して、3条件に分けた被験者の視覚提示の有無による影響を調べた(図3, 4, 5)。視覚提示なしの課題では全ての被験者が同一の課題を行ったので、視覚提示なしの時に3つの集団間に差があるのかを調べるために有意水準5%で一元分散分析を行うと、5段階全ての目標値に対して有意な差が見られなかった(1段階目 $p=0.985$, 2段階目 $p=0.595$, 3段階目 $p=0.871$, 4段階目 $p=0.706$, 5段階目 $p=0.348$)。このことから、視覚提示なしの場合において被験者集団間で結果にほとんど違いがなかったと考えられる。

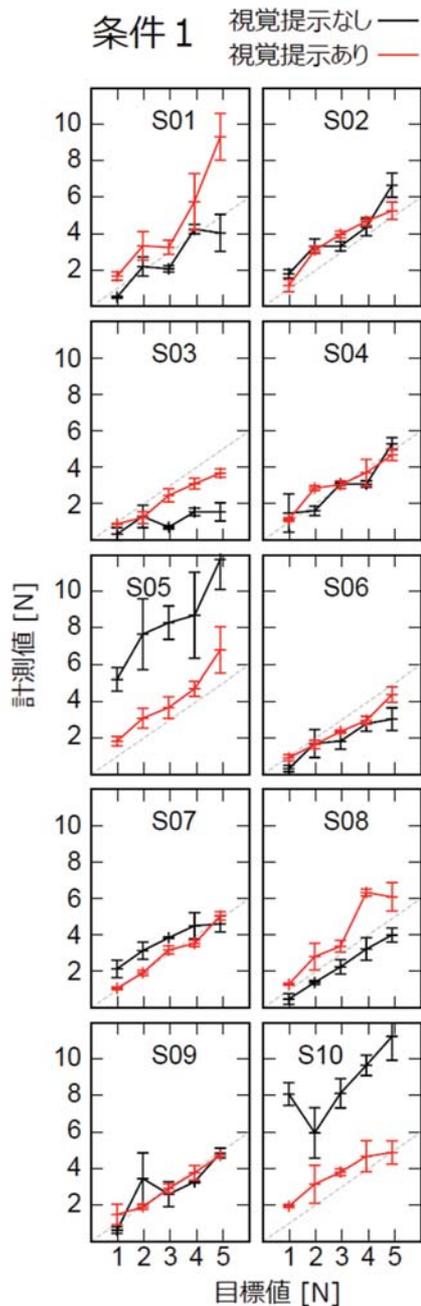


図3 条件1の被験者 (S01~S10) の結果

次に、各条件において視覚提示の有無の効果を調べるために、被験者間と視覚提示有無に関して繰り返し計測あり二元分散分析（有意水準5%）を行った。視覚提示有無に関して結果を述べると、条件1では1, 2, 3段階目では有意な差が見られたが（1段階目 $p=2.972 \times 10^{-7}$, 2段階目 $p=0.009$, 3段階目 $p=0.003$ ）、4と5段階目では有意な差が見られなかった（4段階目 $p=0.374$, 5段階目 $p=0.376$ ）。一方で、条件2

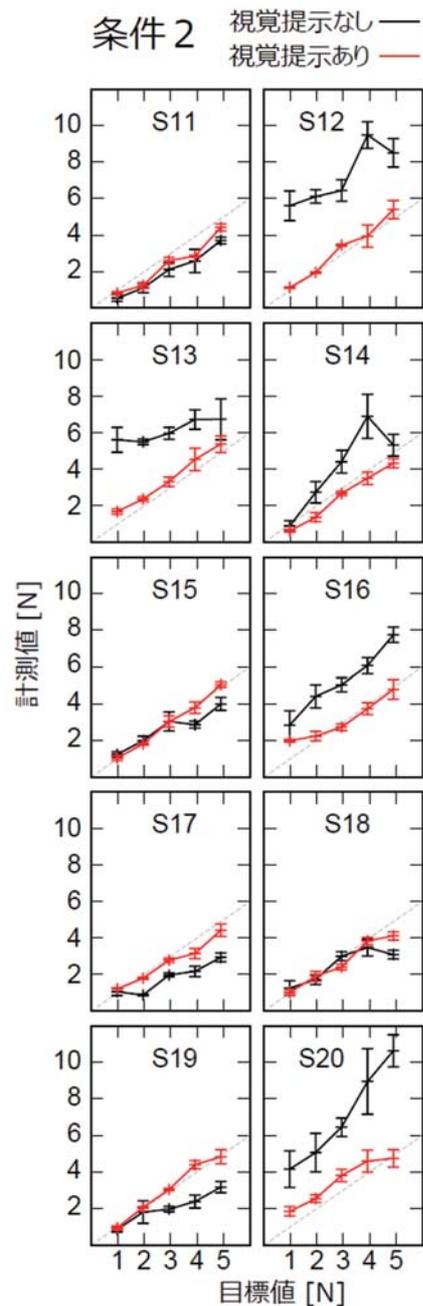


図4 条件2の被験者 (S11~S20) の結果

と条件3では全ての段階で有意な差が見られた（条件2; 1段階目 $p=1.966 \times 10^{-11}$, 2段階目 $p=1.671 \times 10^{-12}$, 3段階目 $p=1.028 \times 10^{-12}$, 4段階目 $p=7.383 \times 10^{-8}$, 5段階目 $p=4.387 \times 10^{-6}$ ）（条件3; 1段階目 $p=1.444 \times 10^{-13}$, 2段階目 $p=5.858 \times 10^{-12}$, 3段階目 $p=2.815 \times 10^{-6}$, 4段階目 $p=8.335 \times 10^{-10}$, 5段階目 $p=1.538 \times 10^{-5}$ ）。各条件において、視覚提示がない場合とある場合に関して繰り返し計測あり二元分散分析が有

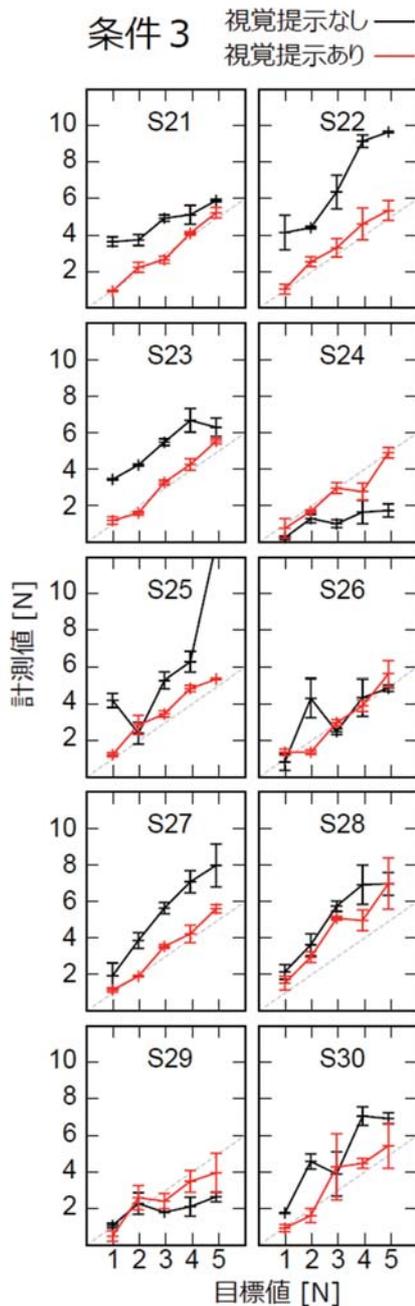


図5 条件3の被験者 (S21~S30) の結果

意な差を示した全て段階について、事後検定として対応のある両側 T 検定 (有意水準 5%) を行った。その結果、条件1では全ての段階で有意な差が見られなかったが (1段階目 $p=0.081$, 2段階目 $p=0.096$, 3段階目 $p=0.327$)、条件2では1から4段階目で有意な差が見られ (1段階目 $p=0.001$, 2段階目 $p=7.659 \times 10^{-4}$, 3段階目 $p=0.001$, 4段階目 $p=0.011$, 5段階目 $p=0.078$)、条件3では全ての段階で有意な差が見

られた (1段階目 $p=2.508 \times 10^{-5}$, 2段階目 $p=2.313 \times 10^{-5}$, 3段階目 $p=0.009$, 4段階目 $p=2.116 \times 10^{-4}$, 5段階目 $p=0.046$)。これらの結果から、条件2と条件3では視覚提示の有無によって結果が影響されることが示唆される。特に、視覚提示ありの場合の方が目標値へと近づく傾向にあったため、視覚提示の仕方によっては力発揮の精度の向上に効果があることが示唆される。本実験では特に、誤差量を非線形な変換を介して出力することが力制御の改善に効果がある結果となった。

[今後の研究の方向, 課題]

本実験では誤差量を非線形な変換を介して視覚的に提示することで、力制御の精度が向上したが、その神経生理学的なメカニズムは明らかではない。本実験で見られた現象のメカニズムが明らかとなることでより効率の良いシステム開発につながると期待される。運動の精度や学習は注意向けに影響されると報告されているが (Song, 2019)、本課題においても非線形な変換によって被験者の予測と異なる動きをしたことで同様の効果を生じた可能性がある。そこで、例えば注意向けなど被験者の意識の影響を検証することで、メカニズムの解明につながると期待される。

また、本実験は数時間程度の課題であったので長期的に効果をもたらすのかの調査が不十分であった。数週間や数ヶ月継続的にわたって継続的に課題を行った場合の力制御の精度の変化に関する調査に加え、脳活動や脳画像の変化も合わせて調べることで効果を実証するための多角的なデータを得られると期待される。

[参考文献]

- Shadmehr, R., Smith, M. A., & Krakauer, J. W. (2010). Error Correction, Sensory Prediction, and Adaptation in Motor Control. *Annu. Rev. Neurosci.* 33: 89-108.

- Song, J. H. (2019). The role of attention in motor control and learning. *Curr. Opin. Psych.* 29 : 261-265.
- Morioka, S., Hiyamizu, M., Fukumoto, T., Kataoka, Y., & Yagi, F. (2009). Effects of plantar hardness discrimination training on standing postural balance in the elderly : a randomized controlled trial. *Clin. Rehabil.* 23(6) : 483-491.