



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Unraveling motor area plasticity : investigating the effects of neurofeedback and tDCS on motor learning [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	楊, 宇翔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(人間科学)
Dissertation Number	甲第15692号
Issue Date	2023-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91187
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuxiang_Yang_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称：博士（人間科学）

氏名： 楊 宇翔

学位論文題名

Unraveling motor area plasticity: investigating the effects of neurofeedback and tDCS on motor learning.

（運動野の可塑性を解明する：ニューロフィードバックと tDCS が運動学習に及ぼす影響）

・本論文の観点と方法

ヒトは多様な運動学習の能力を持っているが、その学習能力は柔軟な脳の可塑性によって支えられている。運動能力を向上させるには、実際に身体運動を用いた訓練を行うことが重要であることは間違いないが、一方で内的な運動イメージやニューロフィードバックトレーニングなど、身体の直接的な運動なしに運動パフォーマンスを向上させる方法や、経頭蓋直流電気刺激 (transcranial direct current stimulation: tDCS) の様に外部から脳に電気あるいは磁気刺激を与えて運動学習を促進する方法等も存在する。本研究では、実際の身体練習を繰り返すことに基づく従来の運動学習とは異なる、運動イメージ、デコードット・ニューロフィードバック (Decoded Neurofeedback: DecNef)、tDCS という 3 つのアプローチをまず紹介した後に、それらのアプローチを用いて運動学習と脳の可塑性との関連を検討した。

・本論文の内容

本研究は、第 1 章「序論」、第 2 章「運動イメージと運動実行の神経表象」、第 3 章「運動実行を用いた DecNef」、第 4 章「tDCS が一次運動野の再活性化に対する影響」、第 5 章「総合考察」から構成されている。

第 1 章はまず脳の可塑性から始まり、学習の神経基盤としての皮質可塑性、さらにこれまでの運動学習による運動皮質における機能的再構築の先行研究を紹介した。次に方法論として、脳の活動値の差を探る従来の機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) の分析法と比較し、脳活動パターンの空間的パターンを分析するマルチボクセルパターン分析 (Multi-voxel pattern analysis: MVPA) について紹介した。次に、実際の身体運動に基づく従来の運動学習とは異なる、運動イメージ、ニューロフィードバックの一種である DecNef、脳刺激法の一種である tDCS という 3 つのアプローチを紹介した。さらに、運動学習後の記憶固定の神経基盤としての海馬や運動皮質における再生(replay)、または再活性化(reactivation)について紹介した。上述の 3 つのアプローチと運動皮質の可塑性についての先行研究を整理し、本論文で扱う問題点を明確にした。

第 2 章では、第 1 章で指摘した運動実行と運動イメージに対応する運動皮質における活動パターンについての実験的な検討を行った。具体的には、右手を使った異なる方向 (左 vs. 右) への運動に対応する運動関連野の神経表象が、運動実行とイメージで共有されるかどうかを調べた。実験参加者 (N = 17) は、fMRI で脳活動を撮像しながら、右手を使ってジョイスティックで画面のカーソルを左右方向に動かすか、あるいは同じ動きを実行せずにイメージした。分析では、運動実行とイメージの神経表象の一致性を調べるため、MVPA のデコーディング分析と表象類似度分析 (Representational similarity analysis: RSA) を行った。その結果、運動実行とイメージが前補足運動野 (pre-supplementary motor area: pre-SMA) における脳活動が関連するものの、両者の活動パターンは異なるであることが示唆された。そして、MVPA の RSA の結果も、異なる手の運動方向の運動実行とイメージが pre-SMA における神経表象が異なっていることが示唆された。

第 3 章では、第 1 章で指摘した、DecNef を用いて運動皮質の可塑的変化を検討した。実験では、まず手の異なる運動方向 (左 vs. 右) に対応する運動前野腹側部 (ventral premotor cortex: PMv)

における活動により、MVPA を用いて識別器をトレーニングした。プラセボ効果を排除するため二重盲検手法により参加者は無作為に 2 つのグループに分類し、リアルタイムで脳活動を解読する識別器からフィードバックを与えた。そして一方のグループは正しいフィードバックを受け (CG、N = 17)、もう一方は逆のフィードバックを受けた (RG、N = 18)。教示として参加者には「できるだけ、フィードバックの成績をより良くしてください」と指示した。その結果、CG の相対識別精度が RG より、有意に高かった、しかし、DecNef セッションの主効果は見られなかった。故に、DecNef は参加者の PMv における活動パターンに影響を与えたが、訓練を重ねても変化しないことが示唆された。

第 4 章では、第 1 章で指摘した、tDCS の脳内メカニズムを解明するため、二重盲検法を用いて、tDCS が運動学習を促進するかどうかを調べ、さらに運動学習中の脳活動と運動学習前後の安静時における脳活動を fMRI で撮像した。参加者は無作為に実験群である tDCS 群 (N = 24) と偽刺激を受ける sham 群 (N = 21) に分けられた。2 群とも、陽極を左一次運動野 (primary motor cortex: M1)、陰極を右 M1 に置き、tDCS (1 mA) または偽刺激 (最初の 10 秒と最後 10 秒のみしか刺激しない) を 10 分間受けた後、fMRI スキャナーの中に本実験を行った。本実験は、まず 1 つの安静セッション (pre-RS)、次は 3 つの運動学習セッション (TS 1-3)、そして 1 つの安静セッション (post-RS)、最後に 1 つの運動学習セッション (TS 4) の順番で実施した。運動学習課題として、実験参加者が右手でジョイスティックを用いて、画面にランダムに動いているターゲットを追いかける課題を用いた。1 つの運動学習セッションは、運動学習課題を行う課題ブロックと直前の運動学習課題のカーソル軌跡を観察だけの安静ブロックの 2 種類があり、それぞれ 10 回ずつ繰り返して構成された。安静セッションでは、参加者の課題はなく静止した状態で、画面中央に提示された固視点を 6 分間観察した。分析では時空間 MVPA を用い、TS 1-3 の課題ブロックと安静ブロックの脳活動をトレーニングデータとして、識別器を訓練した。そして pre-RS と post-RS のデータをテストデータとして、安静時における類課題脳活動パターンの活性化頻度を調べた。その結果、tDCS 群が post-RS で左 M1 における類課題脳活動パターンの増加が見られ、sham 群よりも類課題脳活動パターンの再活性化頻度が高かった。すなわち tDCS 訓練が運動学習後の安静時再活性化を増強することにより、tDCS が運動学習後の記憶固定を促進することが示唆された。

第 5 章では、上述した第 2 章から第 4 章の実験結果を整理した上で、運動イメージ、DecNef のそして tDCS それぞれと運動皮質可塑性との関連性を述べた。また、運動実行とイメージの神経表象を検討する時の注意点、第 3 章で述べた DecNef 実験と従来の DecNef 実験の違い、そして tDCS が運動学習を促進する内的メカニズムを述べた。さらに、残された課題、当該研究領域における研究成果の位置づけや、今後の研究課題に対して考察を行った。