

Application of Deep Residual Convolutional Neural Network
to Brain-Computer Interfaces
and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex

July 2023

Yosuke Fujiwara

報告番号	㊦ 乙 第	号	氏 名	藤原 洋介
主論文題名： Application of Deep Residual Convolutional Neural Network to Brain-Computer Interfaces and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex (深層残差畳み込みニューラルネットワークのブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの応用と高次運動野の神経活動解析)				
(内容の要旨)				
<p>深層学習の発展により、脳波をデコーディングし、外部機器を操作する Brain-Computer Interface (BCI) の技術が急速に発展している。BCI のプロトタイピングでは、被験者の脳活動状態の推定精度を向上させるために、頭皮に生じる脳波の時間や空間情報などを畳み込む Convolutional Neural Network (CNN) が導入されつつある。特に、身体運動中の脳活動状態を識別する BCI は脳卒中片麻痺の機能回復を誘導する技術として医療分野への応用が期待されているが、汎化モデルの構築によって精度や治療効果が未知の被験者に対しても向上できるかが問題となっている。</p> <p>一方、基礎神経科学では身体運動中の脳活動特性について古くから研究されており、体性感覚運動野 (SM1) を中心に、補足運動野 (SMA) または運動前野 (PMc) といわれる高次運動野 (非一次運動野) が運動に関与していると考えられている。脳内における随意運動の生成過程で、非一次運動野は感覚入力などの修飾も受けながら、視床や大脳基底核と関連して、一次運動野での最終的な出力の前段階で賦活し、重要な役割を担っている。しかし、非一次運動野における神経活動は自発脳波を用いて計測を行うことが困難で、BCI の汎化モデル構築に貢献できるかも定かではない。そのため、現状の BCI は最下流の一次運動野の神経活動によって制御される設計で、その上流過程の神経活動信号を活用できていないものが一般的である。非一次運動野由来の信号を利用した BCI を構築することができれば、上記の BCI の問題の解決につながる可能性がある。そこで本論文では、将来的な治療効果向上への貢献のために、運動中の非一次運動野の活動が自発脳波に反映されているかを検証すること、および非一次運動野の脳波を活用することで精度の点で汎化性のある BCI を開発することを目的とした。</p> <p>第1章では、ヒトの運動中の脳活動について、SM1 近傍の頭皮上に出現する ERD と呼ばれる脳波の振幅変化や体性感覚誘発電位 (SEP) が運動中に減衰する現象であるゲーティング効果について概説した。また、CNN や BCI に用いられる深層学習の関連技術を概説した。</p>				

第2章では、ERDと関連があるSEPs成分を同定した。運動実行および運動イメージ中のERDとSEPsのN30成分のゲーティングが被験者間の比較において有意な相関があることを認めた。これにより、N30成分の起源である非一次運動野がSM1のERDに参与していることを明らかにした。

また、第2章では追加研究として、低頻度刺激の反復経頭蓋磁気刺激法(rTMS)を用いて大脳皮質の興奮性を一時的に抑制したときの、運動に関連した脳活動の指標の変化を調べた。刺激部位は第2章より運動タスク中にERDとSEPsのゲーティングとの相関に関連が深いと考えられた非一次運動野のPMcに行った。その結果、ERDだけでなく、SEPsのN30のゲーティング、およびSMAからPMcやSM1への時系列的な因果関係を示すGranger因果により評価した大脳皮質間の自発脳波の因果変化が、rTMSの直後に有意に低下することを明らかにした。

第3章では、非一次運動野の脳波も入力とし、汎化性のあるBCIモデルを開発した。健常者109名のデータセットを用い、被験者間でモデルを学習させ、交差検証を行った。モデルはCNNをベースとしたEEGNetに残差ネットワークを挿入して多層化した。検証の結果、従来モデルよりも高い汎化性能を得たことを確認した。また、Grad-CAMを用いたモデルの可視化により、汎化性能向上には非一次運動野が大きく貢献していることを確認した。

また、第3章では追加研究として、運動実行の場合より多層化したモデルを用いて運動イメージにおいても、未知の被験者に対して高い汎化性能が獲得できていることを確認した。さらに運動イメージでは一般的に運動実行の識別より精度が低くなるため、学習を2段階構成で行うものとした。その中で、第1段階の学習で汎化性能の高いモデルを構築した後、第2段階で追加の学習を行い、精度を高める手法を考案した。ここでは、医療応用などを想定して、安静時の脳波のみで被験者ごとのキャリブレーションを行うことが推奨される場合を想定し、誤差関数にバイナリクロスエントロピー関数を用いて学習を行った。第2段階の学習でも運動イメージの識別に性能向上がみられることを確認した。なお、2段階構成の学習を用いた最終的なモデルを可視化した結果も、非一次運動野が大きく貢献していることが確認できた。

第4章では結論として、本研究の成果を総括し、研究の意義と重要性を述べた。

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. *Office use only	Name	Yosuke Fujiwara
Thesis Title Application of Deep Residual Convolutional Neural Network to Brain-Computer Interfaces and Analysis of Neural Activity in Higher-Order Motor Cortex			
Thesis Summary <p>Concomitant with the development of deep learning, Brain-Computer Interface (BCI) for decoding Electroencephalogram (EEG) and manipulating external devices has been rapidly evolving. Convolutional Neural Networks (CNNs) which convolve temporal and spatial information and other information from EEG generated on the scalp are beginning to be introduced in BCI prototypes, in order to improve the decoding accuracy of a participant's brain activity. In particular, BCI which classifies brain activity during movement is expected to be applied to the medical field as a technology to induce functional recovery of hemiplegia caused by stroke. It remains a problem whether the accuracy and therapeutic effect can be improved for unknown participants by building a generalized model.</p> <p>On the other hand, basic neuroscience has long investigated the characteristics of brain activity during movement. The primary sensorimotor cortex (SM1) and higher-order motor cortex (non-primary motor cortex) known as the supplementary motor area (SMA) or premotor cortex (PMc) are thought to be associated with movement. In the process of generating voluntary movements in the brain, the non-primary motor areas play an important role by activating in the preliminary stage of the final output from the primary motor area, in association with the thalamus and basal ganglia, while also receiving sensory input and other modifications. However, it is difficult to measure neural activity in non-primary motor areas with spontaneous EEG, and it has not yet been shown that they may contribute to the construction of a generalized model of BCI. Therefore, the conventional BCI is designed to be controlled by the neural activity of the most downstream, primary motor area, and generally cannot utilize the neural signals from its upstream processes. If it is possible to construct a BCI that utilizes signals derived from non-primary motor areas, it may lead to a solution to the problem of BCI described above. Therefore, the purpose of this dissertation was to verify whether the activity in non-primary motor areas during movement is reflected in the spontaneous EEG, and to develop a generalizable BCI in terms of accuracy by using the EEG around non-primary motor areas, in order to contribute to improving therapeutic effect in the future.</p> <p>In Chapter 1, the methods for measuring human brain activity during movement were outlined, including changes in the amplitude of the EEG called ERD that appears on the scalp near SM1 and the gating effect of somatosensory evoked potentials (SEPs) attenuated during</p>			

movement. CNN and deep learning related techniques used for BCI were also outlined.

In Chapter 2, it was identified which SEPs components were associated with ERD. A significant correlation was found between ERD and the gating of the N30 component of SEPs during motor execution and imagery. This revealed that the non-primary motor areas, the origin of the N30 component, are involved in ERD around SM1.

In addition, an additional study of Chapter 2, the indices change of motor related brain activity were investigated by modulating the cortical excitability with repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS). Low frequency rTMS is known as an application that cortical excitability is suppressed after the stimulation. The area of stimulation was PMc in the non-primary motor areas which were closely associated with the correlation between ERD and the gating of SEPs during movement in Chapter 2. After rTMS, not only ERD, but also the gating of SEPs N30 and cortico-cortical spontaneous EEG changes evaluated by Granger causality which meant time varying causal relationship from SMA to PMc or/and SM1 was significantly attenuated.

In Chapter 3, a generalizable BCI model was developed by also taking the EEG around non-primary motor areas as input. The model was trained and cross-validated using a dataset of 109 healthy participants in a cross-subject. The model was multilayered by inserting a residual network into EEGNet based on CNN. The results of the validation confirmed that the generalization performance of the model was higher than that of the conventional model. In addition, model visualization using Grad-CAM confirmed that the non-primary motor areas contributed significantly to the improvement of generalization performance.

As an additional study in Chapter 3, it was confirmed that high generalization performance was obtained for unknown participants in motor imagery using a model that was more multilayered than motor execution. Furthermore, since the accuracy of motor imagery is generally lower than that of motor execution classification, the learning process was structured in two stages. The method was devised to improve the accuracy by constructing a model with high generalization performance in the first stage of training and then performing additional training in the second stage. Here, binary cross-entropy function was applied as a loss function, assuming the case that it is recommended to calibrate each participant using only the EEG during rest task, for example, for medical applications. It was confirmed that the second stage learning also showed performance improvement in classifying motor imagery. The visualization of the final model with the two stages learning also confirmed the significant contribution of the non-primary motor areas.

In Chapter 4, as a conclusion, the results of this dissertation are summarized, and the significance and importance of this dissertation are described.