

**多自由度・実時間制御機構を有する
ブレイン・コンピュータインタフェースの研究開発（062108001）**
A study of real time brain computer interface with multiple degrees of freedom

研究代表者

水原啓暁 京都大学大学院情報学研究科
Hiroaki Mizuhara Graduate School of Informatics, Kyoto University

研究期間 平成 18 年度～平成 20 年度

概要

脳からの運動指令伝達の代替手段としてブレイン・コンピュータインタフェースの構築を目的として、感覚運動皮質に関連する頭皮脳波の電位分布を同定する技術を構築した。本研究では頭皮脳波を用いることで非侵襲型の手法を目指す。頭皮脳波で計測される信号は電気的な活動であるために時間解像度が高く、かつ簡便に計測可能であるという利点があるものの、導電率の異なる脳・硬膜・脳脊髄液・頭蓋骨・皮膚などを通して観察するため空間分解能の低下が発生する。そこで頭皮脳波と機能的磁気共鳴画像の同時計測を実施し、皮質活動と頭皮脳波活動の時系列変化を比較することにより、感覚運動指令関連の脳波電位分布をテンプレート化する技術を構築した。

Abstract

In order to develop the brain computer interface as a neural prosthesis, here I proposed a method to identify the topography for the scalp electroencephalogram (EEG) which correlated with the neuronal activities in the sensorimotor cortices. In the current study, I aimed to develop the non-invasive brain computer interface by using the scalp EEG. Spatial resolution limits of the scalp EEG prevent to identify the cortical activities, while it has an advantage of the high temporal resolution and the convenience of the measurements. To overcome this limitation, I used the simultaneous recording of fMRI and EEG, and developed a method to identify the EEG template for the sensorimotor cortical activity by comparing the temporal fluctuation of the EEG power and fMRI BOLD time series.

1. まえがき

近年、ブレイン・コンピュータインタフェースが注目されている。ブレイン・コンピュータインタフェースは、さまざまな認知処理に伴う脳活動を頭皮、脳皮質表面または脳皮質内において検出し、ユーザの意思をコンピュータに伝達する装置である。したがってブレイン・コンピュータインタフェースが確立されれば、筋萎縮性側索硬化症などの神経・筋疾患患者においても、脳からの信号による外部機器の操作により疾患前と同様な円滑なコミュニケーション方法の獲得に有効になる。

しかしながら、ブレイン・コンピュータインタフェース技術の構築には数々の技術的な課題が存在する。神経活動の集団電位に関連した頭皮脳波(EEG)を用いた非侵襲的ブレイン・コンピュータインタフェースは、神経活動の一次信号を取得しているため時間的な遅れがないとともに、頭皮上に電極を装着するため医学的リスクはないといった利点が挙げられる。一方、局所脳部位での活動電位を頭皮上で計測するため、信号対雑音比が悪く、また導電率の異なる脳・硬膜・脳脊髄液・頭蓋骨・皮膚などを通して観察するため、局所脳部位に対する十分な空間解像度が得られない。

神経・筋疾患患者の喪失されたコミュニケーション機能の代替・補助を目的とする場合、ロボットアームや人工補助具などの外部機器の多自由度制御が必要となるため、多自由度の運動をリアルタイムで制御可能な技術を非侵襲ブレイン・コンピュータインタフェースとして確立することが必要不可欠である。また、ブレイン・コンピュータインタフェースの、より自然な操作を実現するためには、通常の運動にともなう皮質活動に関連した脳波を用いて、運動指令信号を生成する必要がある。そこで本研究では、頭皮脳波を用いて多自由度かつ実時間制御を実現可能な非侵襲的ブレイン・コンピュータインタフェースを開発する

ための基礎研究を行う。非侵襲的ブレイン・コンピュータインタフェースを開発するためには、運動皮質活動に対応した脳波活動の詳細なテンプレートを生成する必要がある。そこで、特定の皮質活動(運動皮質)に対応する脳波電位の頭皮上の分布を特定するために、空間分解能に優れる機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を導入することで、この問題を解決する。本研究では、最新の脳機能イメージング技術である EEG と fMRI の同時計測手法を用いて、運動皮質の活動に関連する頭皮脳波の電位分布テンプレートを作成する技術の構築をおこなった。

2. 研究内容及び成果

構築したシステムにおける脳波テンプレート作成のための手順を図 1 に示す。構築したシステムにおいては、fMRI 測定中において EEG を同時に測定する。fMRI と同時に測定した EEG には、MRI の高磁場環境に由来するアーチファクトが重畳するために、これを除去する必要がある(Artifact Correction)。さらに従来の研究において、異なる周波数の脳波活動が異なる機能を有していることが指摘されているため、運動指令に関連した頭皮脳波を同定する際に、周波数情報が重要な因子となる。そこで、アーチファクトを除去した EEG をウェーブレット解析することにより時間・周波数成分に変換する(Wavelet Analysis)。

一方、fMRI の解析においては、通常の fMRI 解析において用いられている統計解析ソフトウェア SPM を用いることにより、運動に関連した皮質部位を同定する(GLM Analysis (SPM5))。この fMRI 解析結果により、運動に関連する皮質部位の詳細な空間位置を得るとともに、その皮質部位を特定するために実施した課題中に活動した他の皮質部位についてもその空間位置情報を得る。これは、他の皮質活動からの電位の伝播も考慮したうえで、運動皮質活動に関連した頭皮上の脳波電位分布を同定する必要がある。

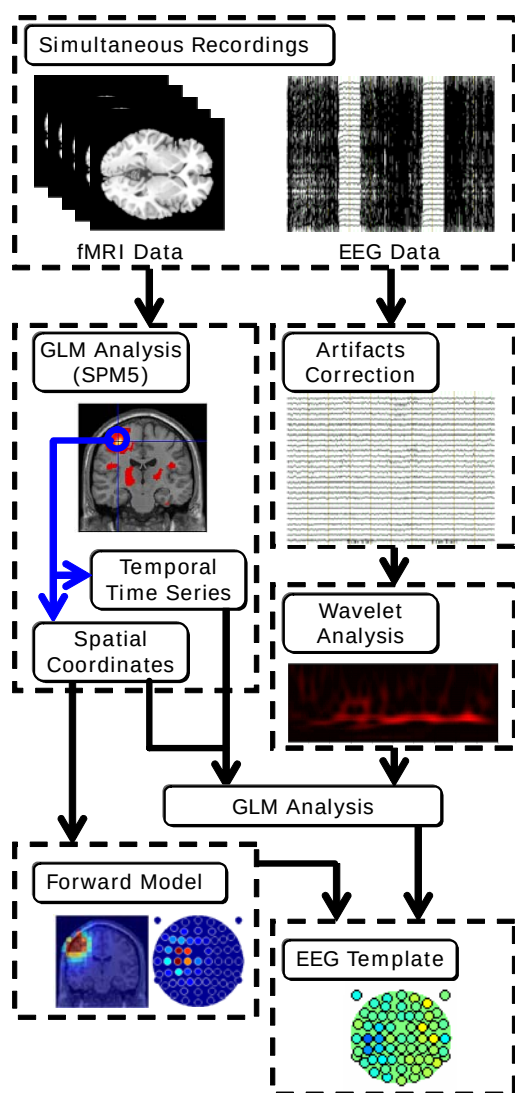


図 1 皮質活動に関連した頭皮脳波分布を同定するための解析フローチャート

あるためである。この運動皮質の空間位置情報を用いて、頭蓋内組織の伝導率の差異を考慮した電位分布の順モデルを導出することで、運動皮質活動に対応する頭皮上での脳波の電位分布推定をする(Forward Model)。

さらに、fMRI 解析結果と EEG 解析結果の統合として下記の処理を行なう。fMRI で計測した血流活動と EEG で計測した電気活動の間には、血流反応動態関数(HRF)で定義される時間遅れが存在する。そこで、Wavelet 変換した EEG の各周波数の脳波パワーに対して、HRF を重畳積分して fMRI 信号の時間遅れを考慮した時系列データを作成する。次に、この HRF を重畳した脳波パワーと、運動皮質内における fMRI データの時系列との比較を重回帰解析によりおこなうことで、運動皮質の活動に対応する頭皮脳波分布と周波数を同定する。さらに、上述した電位分布推定結果と比較することで、運動皮質に対応した脳波電位分布を決定する。この同定した周波数成分の頭皮脳波電位分布を脳波テンプレートとして用意し、脳波テンプレートと計測する脳波との実時間のパターンマッチングをおこなうことで、パワーアシストシステムなどの制御信号を生成することが可能となる。

図 2 に、fMRI で同定した各皮質部位に対応する頭皮脳波電位分布の同定結果を示す。この結果では、BOLD 信号と脳波パワーの時系列データとの重回帰分析にもとづ

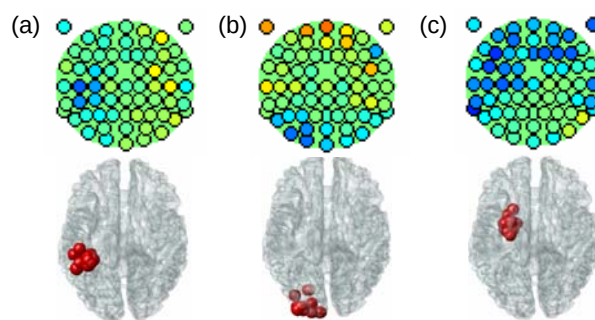


図 2 fMRI BOLD に関連した頭皮脳波分布の同定結果。(a) 左側感覚運動皮質 (b) 左側視覚皮質 (c) 左側被殻。図の上段は同定した頭皮脳波分布、下段は頭皮脳波分布を同定する際に用いた皮質部位を示している。頭皮脳波分布は、上方が前額面であり、頭部を俯瞰した図として表示している。

く偏回帰係数について、被験者間のランダム効果の解析結果を脳波トポグラフで示している。図 2 に示すとおり、右手把持運動に関連した左側運動皮質の活動に対応して、11.8Hz の脳波パワーが、左側中心部付近の電極において負の相関を示している(図 2a)。さらに、左側視覚皮質の活動に対応して左後頭付近(図 2b)に、左側被殻の活動に対応して左前頭(図 2c)において、それぞれ 9.5Hz の脳波活動が負の相関を示す傾向にあることが明らかになった。

3. むすび

本研究で開発した手法により、感覚運動皮質に関連した頭皮脳波のみでなく、補足運動野や視覚皮質や被殻などの他の皮質部位に関しても、それぞれの皮質に対応する脳波を分離同定することに成功した。この技術は、神経の一次信号である電気信号を直接用いるブレイン・コンピュータインタフェースを開発するための基幹技術となる。今後、本研究開発結果を発展させることにより、多自由度かつ実時間制御を実現可能な非侵襲的ブレイン・コンピュータインタフェースの実現を目指す。

【誌上発表リスト】

- [1] Hiroaki Mizuhara, Etsuji Yonehara, Akio Gofuku, "Parallel Factor Analysis can decompose human EEG during a finger movement task", *Proceeding of International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*, pp1945-1950 (2007 年 9 月 17 日)
- [2] 田旭新・水原啓暁・五福明夫、“自発的な手指運動に関連した脳波活動の同定：ブレイン・コンピュータインタフェースのための基礎研究”、日本機械学会中国四国支部第 45 期総会・講演会(徳島市)(2007 年 3 月 7 日)
- [3] 米原悦司・水原啓暁・五福明夫、“PARAFAC を用いた自発的な手指運動課題時の脳波信号の分離”、日本機械学会中国四国支部第 45 期総会・講演会(徳島市)(2007 年 3 月 7 日)

【申請特許リスト】

- [1] 水原啓暁・五福明夫、脳波一運動指令変換装置、日本、2007 年 2 月 20 日

【受賞リスト】

- [1] Hiroaki Mizuhara, SICE Annual Conference Young Author's Award, "Parallel Factor Analysis can decompose human EEG during a finger movement task", 2007 年 9 月 20 日