

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 (共通)

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 2 年 6 月 2 9 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01992

研究課題名(和文) 長期間にわたって繰り返し利用可能なブレイン・マシン・インタフェースの開発

研究課題名(英文) Development of Brain-Machine Interface for repetitive use over a long period

研究代表者

森重 健一 (Morishige, Ken-ichi)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：30433197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000 円

研究成果の概要(和文)：異なる日に同じ人の脳波を記録する際、毎日まったく同じ位置にヘッドキャップを被ることはできないため、脳波電極の位置ずれを避けることは困難である。そのため、これまでのBMIでは、脳波電極を頭に取り付けるたびに、脳活動とノイズを分離し直したり、解読器を用意し直したりすることで、脳波データから脳情報を解読していた。これらの計算には長い時間を要するため、日常生活の中でインタフェースとして毎日使い続けるには大きな障害であった。本研究課題では、電極の位置ずれがある脳波データであっても、アーチファクトを分離して、短時間で精度よく脳電流を推定でき、その時系列データを長期間にわたって繰り返し再構成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来は、脳波を計測際に電極に位置ずれがあると脳活動を正しく解読できなかったが、研究代表者らが開発した手法を活かすことで、それを可能にした点に意義がある。具体的には、長い計算時間をかけて脳活動とノイズに変換したり解読器を用意しても、電極の位置が異なると、逆フィルタや解読器を最初から計算し直す必要があった。しかし、本提案手法を用いることで、電極の位置ずれがあっても短時間で脳活動のみを取り出し、時々刻々と変化する脳情報を解読できるようになった。さらに、長期にわたって繰り返し計測した脳波データであっても、脳情報を解読できるようになった。

研究成果の概要(英文)：EEG sensor position errors inevitably exist when EEG data are recorded from the same subject on different days. These errors pose a need for recalculation of the inverse filter that is converted from the acquired EEG data to cortical and extra-brain source currents. To complicate matters, the high computational costs for the estimation of the inverse filter require a large amount of time. For building a brain machine interface using the cortical currents, we must quickly prepare an inverse filter regardless of the existence of sensor position errors. We measured the EEG data on different days of identical subjects during the same experimental task. Our proposed method removed the effect of eye artifacts and precisely estimated the cortical currents in a short time from a contaminated EEG data set recorded on different days. Additionally, our method is able to reconstruct the time series of attentional directions over a long time period.

研究分野：認知神経科学

キーワード：ブレインマシンインタフェース アーチファクト除去 脳情報解読 脳波 視覚的注意 眼球運動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1 . 研究開始当初の背景

異なる日に同じ人の脳波を記録する際、毎日まったく同じ位置にヘッドキャップを被ることはできないため、脳波電極の位置ずれを避けることは困難である。そのため、これまでのB M I では、脳波電極を頭に取り付けるたびに、脳活動とノイズを分離し直したり、解読器を用意し直したりすることで、脳波データから脳情報を解読していた。これらの計算には長い時間を要するため、日常生活の中でインタフェースとして毎日使い続けるには大きな障害であった。脳波を利用したB M I を構築するためには、電極の位置ずれがあってもヘッドキャップを被ればすぐに脳活動を抽出でき、しかも精度良くユーザーの脳情報を解読できることが必要である。

研究代表者らは、脳波・脳磁図データを皮質電流と複数ノイズ源電流に一度に変換する方法を見だし、眼球運動や心拍ノイズに乱されたデータであっても、ノイズを分離し皮質電流のみを抽出する技術の開発をこれまでにやってきた。

さらに、研究代表者らは、電極の位置ずれがある脳波データであっても、ノイズの影響を分離し、短時間で精度良く皮質電流のみを抽出する方法を見出した。異なる日に同一のタスクを行っているときの脳波を記録する際、電極を貼付ける位置はわずかに異なるが、脳活動そのものは同じであることが期待される。そのため、脳とノイズ源と電極の位置関係(リードフィールド行列)のみを計算し直すことで、脳波データを皮質電流と複数のノイズ源の電流に一度に短時間で変換することを可能にした。

今まで、電極の位置ずれがある脳波データから、短時間で精度良く脳活動を抽出することは困難だったが、研究代表者らが見出した2種類の方法を組み合わせることで、実現可能とした。被験者から異なる日に脳波を計測し、抽出した脳電流から短時間で脳情報を解読し、その情報に基づいたインタフェースを開発するため、本研究を進めるに至った。

2 . 研究の目的

本研究では、電極の位置ずれがあっても、長期間にわたって繰り返し脳活動を解読可能なB M I のための研究基盤を確立することが目的である。具体的には以下の3点について研究を行った。

電極の位置ずれが無い脳波データを皮質電流と複数のノイズ電流に変換し、皮質電流のみを取り出す。得られた皮質電流から、タスクに関連した脳情報を解読する。

電極の位置ずれがある脳波データを皮質電流と複数のノイズ電流に変換する。研究代表者らの手法を用いて、得られた皮質電流が と一致することを確認する。さらに、得られた皮質電流から、脳情報を解読し、 と一致することを確認する。

実際に計測した脳波データは、計測日ごとにデータの振幅が異なっていたり、学習によって脳活動が変化したりする。それらの影響を明らかにするとともに、長期間にわたって、脳波から脳電流を繰り返し推定し、 の方法で脳情報を解読可能にする。

3 . 研究の方法

正常な視覚を有する健常男性8名がfMRIと脳波計測実験の両方に参加した。fMRI計測にはSiemens社製3TのMRIスキャナ(3T MAGNETOM Prisma fit)を用いた。脳波データにはBioSemi製のActiveTwo Systemを用いて記録した。64個の脳波電極は拡張国際10/20法に基づいて頭皮表面上に配置された。

実験課題として、被験者は目の前に呈示された白い点に視覚的注意を向けるように指示された。具体的には、被験者は以下の流れで課題を遂行した。

被験者は準備ができれば試行開始のボタンを押す。

白い点が画面中央に現れる。

その後、白い点が水平方向にゆっくりと動き始める。被験者は白い点に視覚的注意を向けて、追従する。

白い点は消え、被験者は休憩する。

からの流れを1試行とし、15試行を1セッションとして、被験者は合計で8セッションほど課題を遂行した。異なる日に同一の実験課題を行うことが脳波に及ぼす影響を調べるため、同一の被験者が、一週間程度の時間間隔を空けて、同一の実験課題を異なる3つの実験日に遂行し、そのときの脳波を計測した。さらに、長期の時間間隔が脳活動の解読に及ぼす影響を調べるために、約1〜2年後にも同一の被験者に参加してもらい、同一の実験課題を行っているときの脳波を計測した。

計測した被験者のMRI構造画像をもとに、3層の頭部モデルを作成した。大脳皮質表面には、皮質内側を正となるように垂直方向のダイポールを皮質表面に等間隔に配置した。

本実験課題では、水平方向に動き続ける視標に視覚的注意を向けて滑らかに追従するタスクを想定している。そのため、主なアーチファクト源は、左右の眼球中心である。その眼球中心の位置は、MRI構造画像から眼球中心を探して決めた。眼球の3次元的回転運動によって発生する電気的な変化を表すために、左右それぞれの眼球中心にx-y-z軸方向を表す3方向のダイポールを配置した。

ヒトの頭部は電気伝導率の異なる層（脳脊髄液、頭蓋骨、皮膚）から構成されている。そのことを考慮した頭部モデルとして、3-shell boundary-element method (BEM) model を用いた。その際の導電率は、脳脊髄液、頭蓋骨、皮膚でそれぞれ 0.3、0.06、0.3 S/m とした (Molins et al., 2008)。

階層ベイズ推定を用いて脳波データから電流推定を行った (Sato et al., 2004; Yoshioka et al., 2008)。その際、アーチファクト源の信号強度、fMRI 活動強度情報への倍率を表す値、事前分布の信頼度のパラメータが未知であるため、それらを表すハイパーパラメータの値を決定する必要がある。そこで、MEG データから階層ベイズ推定を用いて電流推定を行う場合と同様に、(a)統計モデルの妥当性と(b)fMRI と推定電流の信号強度情報との相関の二つの基準に従ってハイパーパラメータを決定し、電流推定を行った。

4. 研究成果

(1)電極の位置ずれが無い脳波データからの脳情報の解読

拡張ダイポール法を用いて、被験者が様々な方向に視覚的注意を向けているときの脳波データの解析を行なった。fMRI 活動強度情報を事前知識として用いることで、被験者から計測した脳波データを皮質電流と複数のノイズ電流に変換し、皮質電流のみを取り出した。推定された皮質電流は前頭眼野、補足眼野、頭頂眼野、MT/V5 といった視覚的注意および眼球運動に関連した皮質領域で大きな電流が推定された。

もしも推定された皮質電流がタスクに関連した脳活動を反映しているならば、得られた皮質電流から被験者が視覚的注意を向けている方向を再構成できるはずである。そこで、スパース推定を用いて、皮質電流から注意を向けている方向を解読した結果、ある程度再構成することができた。またその再構成に使われた電流源は視覚的注意に関係のある皮質領域が選ばれており、妥当な電流源を用いて視覚的注意の方向の再構成が行われていることがわかった。

ヒトの頭部は電気伝導率の異なる層（脳、髄液、頭蓋骨、頭皮）から構成されているため、MEG での解析に比べ、脳波を用いた解析はより複雑である。しかし、それらを考慮した精密なモデルを利用することで、研究代表者らがこれまで MEG データで提案してきた手法を用いて同様に脳情報を再構成できることがわかった。

(2)位置ずれがある脳波データからの脳情報の解読

視覚的注意を様々な方向に向けているときの脳波データを 9 人の被験者から計測した。被験者は異なる 3 日間に渡って実験に参加し、同一の実験課題を異なる 3 日間行なった。そうすることで、電極の位置ずれがある脳波データセットを取得した。得られた脳波データを皮質電流と複数のノイズ源の電流に変換したところ、異なる日の脳波データであっても、視覚的注意および眼球運動に関連した皮質領域で大きな電流が推定され、その電流の大きさのオーダーは一致した。

計測した脳波データを皮質電流とノイズ源の電流に変換する際に「脳のどこが、どれぐらい活動しているか」（電流分散）という値を求めるが、その際に多くの計算時間を要する。研究代表者等は、一度計算した電流分散は 2 日目以降も使い回し、電極と脳の位置関係のみを再計算することで、少ない計算コストで変換できることを人工データの解析で明らかにしてきた。実際に計測した脳波データを用いて検討したところ、脳波電極の位置にずれが無い場合に比べて、ずれがある場合はノイズ源で推定された電流、および脳電流の誤差が大きかった。またその誤差の大きさは脳波電極の位置ずれが大きいほど大きかった。それに対して提案手法を用いた場合、誤差は位置ずれがない場合と同じレベルであり、計測日の違いによる影響は小さかった。

得られた皮質電流から、改良版の Sparse linear regression を用いて実験課題に関係する電流源のみを選び、時系列情報を再構成した。真の値との相関係数を計算したところ、相関係数は大きく、時系列波形の特徴をよく再現できた。また、決定係数も大きかったことから、時系列波形の特徴だけでなく振幅の大きさもよく再構成できた。つまり、被験者が「いつ、どこに視覚的注意を向けているか」という脳内時系列情報を精度よく解読できた。

(3)長期間にわたって繰り返し計測した脳波データからの情報の解読

これまでに実験に協力してきた被験者のうちの一部の方々には約 1 年後や 2 年後にも同一の実験課題に参加してもらい、そのときの脳波データセットを取得した。得られた脳波データは、計測日が異なることに起因する電極の位置ずれや、学習による脳活動の変化など、実環境下でブレイン・マシン・インタフェースを継続的に利用する際に起こりうる脳波データの違いを含んでいる。そのような違いを含んだ脳波データであっても、視覚的注意および眼球運動に関連した皮質領域で大きな電流が推定され、その電流の大きさのオーダーは概ね一致した。

推定した皮質電流から、スパース推定法を用いて、視覚的注意を向けている方向を再構成した。その結果、同じ日のデータをテストとトレーニングに用いる場合については、被験者の視覚的注意の方向の時系列データをよく再構成することができた。トレーニングとテストで異なる日のデータを用いた場合については、時系列データの特徴はよく再現できるが、その波形の振幅は再現できない場合があった。その理由は、異なる日のデータを用いることで、推定電流の大きさが異なっていたためだと考えられる。異なる日によって推定電流の大きさがわず

かに異なることを考慮した上で値を補正することによって、長期間にわたって繰り返し計測した脳波データであっても、ある程度の再構成ができるようになった。

(4)まとめ

先行研究において、脳波電極に位置ずれがあると脳活動を正しく解読できなかったが、研究代表者らが開発した手法を活かすことで、それを可能にした点に意義がある。具体的には、長い計算時間をかけて脳活動とノイズに変換(逆フィルタ)したり解読器を用意しても、電極の位置が異なると、逆フィルタや解読器を最初から計算し直す必要があった。しかし、本提案手法を用いることで、電極の位置ずれがあっても短時間で脳活動のみを取り出し、時々刻々と変化する脳情報を解読できるようになった。さらに、長期にわたって繰り返し計測した脳波データであっても、脳情報を解読できるようになった。

また、これまでのBMIでは、「目を動かすな」「身体を動かすな」といった多くの特殊な拘束条件をユーザーに課さなければ、出現するノイズのせいで利用できなかった。それに対して、本提案手法では、目や身体の動きがあっても皮質電流のみを抽出できるため、日常生活に近い環境下でも利用可能である。このように、関連する従来の研究とは明瞭な一線を画すとともに、実用的なBMIを開発する上で実効性のある研究成果である。

<引用文献>

- Molins, S.M. Stufflebeam, E.N. Brown, and M.S. Hamalainen. Quantification of the benefit from integrating MEG and EEG data in minimum l2-norm estimation. *NeuroImage*, vol. 42, pp.1069-77, 2008.
- M. Sato, T. Yoshioka, S. Kajihara, K. Toyama, N. Goda, K. Doya, and M. Kawato. Hierarchical Bayesian estimation for MEG inverse problem. *NeuroImage*, vol. 23, pp.806-826, 2004.
- T. Yoshioka, K. Toyama, M. Kawato, O. Yamashita, S. Nishina, N. Yamagishi, M. Sato. Evaluation of hierarchical Bayesian method through retinotopic brain activities reconstruction from fMRI and MEG signals. *NeuroImage*, vol. 42, pp.1397-1413, 2008.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yudai Gamano, Yuki Saito, Koyoe Takamori, Ken-ichi Morishige
2. 発表標題 Effects of EEG electrode positional deviations for classification accuracy on different days
3. 学会等名 The 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yudai Gamano, Ken-ichi Morishige
2. 発表標題 Classification of working memory contents using EEG cortical currents during Sternberg task
3. 学会等名 第41回日本神経科学大会 (Neuroscience2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 蒲野雄大, 麻野井千尋, 梅野克身, 森重健一
2. 発表標題 ワーキングメモリ課題遂行中の脳波のデコーディング
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティックス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ken-ichi Morishige, Tomoki Ishikawa
2. 発表標題 Reconstructing two-dimensional circular motions from EEG cortical currents during overt/covert visual pursuit tasks
3. 学会等名 47th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2017年

1．発表者名 坂内亮太，蒲野雄大，森重健一
2．発表標題 EEGを用いたニューロフィードバックトレーニングシステムの構築およびトレーニング効果の検証
3．学会等名 平成29年度北陸地区学生による研究発表会
4．発表年 2018年

1．発表者名 Ken-ichi Morishige, Yudai Gamano, Hironobu Takano, Keisuke Ido
2．発表標題 Classification of working memory contents using estimated cortical currents from EEG signals during N-back task
3．学会等名 49th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4．発表年 2019年

1．発表者名 長谷川隆成，森重健一
2．発表標題 MRI 構造画像を用いたMEG アーチファクト源の位置決定方法の開発
3．学会等名 令和元年度北陸地区学生による研究発表会
4．発表年 2020年

1．発表者名 森重健一
2．発表標題 ノイズに歪められたMEG/EEGデータからの電流推定と時系列信号の再構成
3．学会等名 研究会：最新のEEG/MEG研究と電流源推定法の現在地
4．発表年 2019年

1. 発表者名 坂内亮太, 蒲野雄大, 高野博史, 井戸啓介, 森重健一
2. 発表標題 脳波アーチファクト除去手法を用いた皮質電流からの作業記憶内容の識別
3. 学会等名 第29回インテリジェント・システム・シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 脳情報取得用キャップ、および脳情報取得用キャップの生産方法	発明者 森重 健一, 大洞 裕	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2018-174962	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Morishige Lab https://sites.google.com/mrsglab.org/jpn/
--

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	川人 光男 (Kawato Mitsuo)		
研究協力者	佐藤 雅昭 (Sato Masa-aki)		