

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11913

研究課題名（和文）外力・応力情報を用いたベイズ推定による脳波アーチファクト除去の高精度化

研究課題名（英文）Bayesian estimation using external force/stress information for accurate EEG artifact removal

研究代表者

梅原 広明 (Umehara, Hiroaki)

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報工学研究室・研究マネージャー

研究者番号：60358942

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：装着容易性・快適性を保つばね型ドライ電極を用いて、実環境下による身体運動が伴う脳波計測技術を確立させるため、速度が変動する状況下における歩行中聴覚課題に対する脳波及び電極にかかる加速度の同時計測から、脳波計が動くことによって引き起こされるアーチファクトを低減する推定法を完成させた。本手法の特長は推定精度を上げるために推定モデルに人為的かつ不可避的に導入したハイパーパラメータをもベイズ推定の枠組みで最尤推定させられることである。歩行しながら聴覚オドボール課題を課した際の脳波計測実験において、聴覚オドボール課題で出現する脳波成分を残したまま運動アーチファクトを低減させられることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

効果的なりハビリや英語学習等につなげる等の生活の質の向上につながる脳波計測技術が確立され始めている。それに応じて、実験室ではなく生活する環境下でも脳波計測ができるよう、装着が容易で束縛の少ない脳波計も開発されている。しかし、簡単に快適に装着できるようにするため電極等が柔軟構造になっているため、計測時は依然として身体固定を課している。本研究では、身体運動が伴うような状況下で発生してしまう大きなノイズを低減させて、脳波計測の精度を上げる確率モデルを組み確実に推定するという学術的意義の高い手法を確立させ、生活環境下における脳波計測の実現に近づけ、生活の質を高めることに資するという社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In order to establish an EEG measurement technique involving physical movement in real-world environments using spring-type dry electrodes that are easy and comfortable to wear, we have developed an estimation method that reduces artifacts caused by the movement of the electrodes by simultaneously measuring the EEG and the accelerations applied to the electrodes. The advantage of this method is that hyperparameters, which are artificially and unavoidably introduced into the estimation model to improve estimation accuracy, can also be estimated by maximum likelihood within the framework of Bayesian estimation. In an EEG measurement experiment during an auditory oddball task while walking, it was shown that the motion artifact can be reduced while retaining the EEG component that appears in the task.

研究分野：ベイズ推定

キーワード：脳波計測 時系列解析 ベイズ推定 ハイパーパラメータ推定

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

効果的なりハビリや英語学習等につなげる等の生活の質の向上につながる脳波計測技術が確立され始めている。それに応じて、実験室ではなく生活する環境下でも脳波計測ができるよう、装着が容易で束縛の少ない脳波計も開発されている。しかし、簡単に快適に装着できるようにするため電極等が柔軟構造になっている。したがって、計測時は依然として身体固定を課している。ドライ電極等を取り入れたウェアラブル脳波計では、実環境計測中の身体運動に伴い、頭皮に対する電極の接触状態が変動することによって発生してしまう大きなノイズ(「運動アーチファクト」と呼ばれる)を除去する技術が必要となる。そのため、電極と頭皮との接触状態の変動に近いと考えられる電極の加速度ベクトルも脳波とともに同時に計測して運動アーチファクトを推定し低減する研究が行われている。先行研究では適応型フィルタが推定モデルに使われたが、推定の際に人為的に導入せざるをえないハイパーパラメータを推定する方法が確立されていない問題があった(Kilicarslan and Contreras-Vidal, 2019)。特に、推定モデル式の上では電極揺動の残響も考慮して運動アーチファクトを推定することができるものの計算負荷が高いため短時間の残響のみを仮定した推定に留まっていた。

2. 研究の目的

本研究では、連続指摘に対する脳波の応答を推定する多変量時間応答関数(mTRF)前方モデルを応用した。音声等の時間変化する刺激に対するインパルス応答を想定し、応答関数が刺激に対する事象関連電位に相当する脳波成分とみなすことができることを示した。(Di Liberto et al., 2015; Ihara et al., 2021)。本研究では、電極揺動(加速度)の応答関数が運動アーチファクトであるとみなし、残差が運動アーチファクトを除去した脳波成分であるとみなした。本推定モデルは線形、つまり、正則化最小二乗法による行列演算で残響を考慮した応答関数を求めることができる利点がある。しかし、ハイパーパラメータを体系的に定める課題が残っている。

3. 研究の方法

本研究では、mTRF 前方モデルをベイズ推定における事後確率最大化モデルとして記述することができることに着目した。ベイズ推定に基づく確率分布モデルに書き下した場合には、脳波位相及び振幅を推定するための確率場モデル(Naruse et al., 2010)や位相アンラップの高精度化(Umehara et al., 2018)等でなされたように、ベイズ推定原理に基づく周辺尤度を目的関数に定めてハイパーパラメータを最尤推定することができる。ハイパーパラメータを定めなければ真値関数である正則化最小二乗解を求めることができないが、ベイズ公式等を活用すると、真値がなんであれ、最尤となるハイパーパラメータを探すことができる。その指標が真値を周辺化させた周辺尤度である。なお、mTRF 前方モデルにおけるハイパーパラメータは残差の分散値と応答関数の滑らかさを仮定する分散値である。

しかし、導出した周辺尤度でハイパーパラメータを最尤推定させるためには、応答関数の残響時間長(窓長)を先に定める必要があった。そこで、ハイパーパラメータが何であれ最尤となる窓長を先に求めるにあたり、周辺尤度をさらにハイパーパラメータで周辺化させた指標(以下「第二周辺尤度」と呼ぶ)で最尤の窓長を定めた。そして、その最尤窓長で周辺尤度を最大とするハイパーパラメータを定め、それらのハイパーパラメータを用いて正則化最小二乗となる応答関数を求めた。

本研究では、脳波電極の動き(3軸加速度ベクトル)に対する応答関数の3軸の和が運動アーチファクトである、と仮定した。ばね型アクティドライ電極(ユニークメディカル製)に加速度センサ(ADXL335)を貼り付けた。その際に、脳波計ヘッドギアの電極支持帯に1軸が平行になる向きで貼り付けた。8チャンネル無線脳波計測システム Polymate Mini AP108 及びエクスターナルユニット(いずれもミユキ技研製)にBluetoothによる無線時刻同期技術を実装したシステムを用い、同期信号を発するコンピュータのCPU時刻に対して両者の計測系を、それぞれ、1ms オーダーの時刻精度で同期させた。ばね型アクティドライ電極は伸縮性と可撓性とを併せ持つ金属ばね部の自由端に球状先端部を備え、個人差がある様々な頭部形状に対しても、頭髪をかき分け頭皮接触を保つ仕様になっているため、装着容易性も装着快適性も備える。しかし、ばねであるため身体運動に伴う電極揺動による運動アーチファクトが大きくなってしまふ。実験では、運動アーチファクトが少なく真値に近いであろう脳波信号を同時に取得するため、ドライ電極と導通しないように注意を払いながら、近い場所に皿電極を導電性ペーストで頭皮に付着させ同時計測に含めた。また、眼電位も同時計測に含めた。基準電位電極及びグランド電極を耳の後ろにある乳様突起上に設置した。

被験者は着席しながら又は歩行しながら、それぞれのセッションで聴覚オドボール課題を行った。歩行セッションでは、1分間ごとに1.7~4.3km/hの間で変速するトレッドミル上を歩くことを課した。

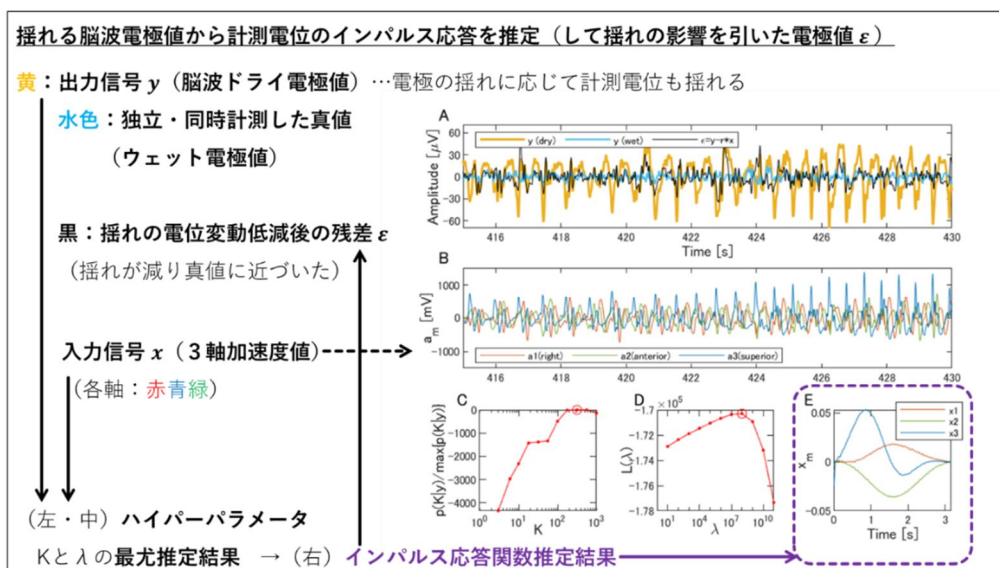
4. 研究成果

本研究手法による運動アーチファクト低減推定結果の典型例は以下のとおりとなった。被験

者 1 名の結果を下図に示す．取得データはトレッドミル歩行中に聴覚オドボール課題遂行中のドライバね型電極加速度及び脳波時系列データである．456 秒間，500Hz の時系列データから [1 - 20]Hz バンドパスフィルタをかけ 100Hz にダウンサンプリングを施している．加速度時系列データ（図中 B の赤色，青色，緑色の実線 3 本）を入力信号に，脳波計測データ（図中 A の黄色実線）を出力信号とする．なお，図 A の水色実線が，導電性ペーストを用いた皿電極で取得し，眼電位の混入を線形回帰により低減させた脳波データである．なお，図 A 及び B では，15 秒間のみの時系列データを切り出して示しているが解析したデータは取得した全区間である．まず，窓長 K を対数等間隔に仮定し各 K に対する第二周辺尤度値を求めた結果が図 C である．実際に，最大点（最尤値）があることが分かった．なお，確率の対数値であるため，実際の最大点は急峻なピーク状になって最尤の $K=316$ （3.16 秒）がベイズ推定されたことを付記する．次に最尤窓長を用いて，ハイパーパラメータのうち的一方に対する周辺尤度値を求めた結果が図 D であり最尤ハイパーパラメータを求めることができた．なお，推定モデルの特質により一方のハイパーパラメータを定めればもう一方のハイパーパラメータも決まる．そのハイパーパラメータで求めた応答関数が図 E であり，その応答関数を用いて求めた残差が図 A の黒色実線である．計測された脳波データ（黄色）から電極揺動によるアーチファクトがある程度除去された結果である黒色実線は値の変動が少なくなり，アーチファクト混入が少ないとされるウェット電極値（水色実線）にある程度近づく結果，すなわち，アーチファクトがある程度低減されたと思われる結果となった．

本研究手法による運動アーチファクトの低減度合いを適応型フィルタによる先行研究と比較するためには，低減精度を表す評価指標を定める必要がある．また，先行研究手法におけるハイパーパラメータ導出法を決めなければならない．そこで，先行研究手法では歩行聴覚オドボール実験の信号品質を評価する先行研究で定義されていた指標の一つである「P300 信号ノイズ比」（以下「SN 比」と略記）を用いた（Oliveira et al., 2016）．ただし，先行研究手法では窓長を長くすると計算量爆発を起こしてしまうため，先行研究と同様に 4 ステップ（40ms）に限定させた．それに対して，本研究手法では窓長も最尤推定した．低減精度の評価指標としては同論文で用いられたその他の指標である「閾値下残存率」（以下「残存率」と略記）と「真値波形との相関係数」を用いた．ただし，真値信号が不明であるため，導電性ペーストを用いた電極による同時計測データその相関係数（以下「歩行相関」と略記）及び着席での聴覚オドボールで取得した波形（以下「着席相関」と略記）を用いた．10 名の被験者データから運動アーチファクト低減前，先行研究手法による運動アーチファクト低減後及び本研究手法による運動アーチファクト低減後の 3 種類の時系列データを統計解析した．いずれの定義域も一部分の実数値に限られ正規性が保証されていないため，SN 比及び残存率に関しては符号検定を，相関係数に関しては Fisher の Z 変換で正規化した上で Wilcoxon 符号順位検定を用いた．有意差は Bonferroni 補正による 0.05/3 で判定した．

SN 比に関しては，先行研究手法による運動アーチファクト低減後が運動アーチファクト低減前に比べ有意に高い値となった．他の間では有意差が認められなかった．先行研究手法は SN 比を最大とするハイパーパラメータを用いていることによる結果であると考えられ，過剰適合となっている恐れがある．実際，残存率では，本研究手法による低減後が低減前に比べ，さらに，先行研究手法による低減後と比べても有意に高い値となった．他の間では有意差が認められなかった．先行研究手法が本研究手法より有意に低いことは，先行研究手法では，SN 比が偶然高い試行区間のみを残存させた結果であると考えられる．歩行相関及び着席相関も，それぞれ，本研究手法による低減後が低減前に比べ，さらに，先行研究手法による低減後と比べても有意に高い値となった．したがって，本研究手法が過剰適合を起こすことなく運動アーチファクトを的確に低減させたことを示す結果となった（梅原等，2022）．



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 梅原広明, 横田悠右, 岡田真人, 成瀬康	4. 巻 vol.122, no.66
2. 論文標題 加速度信号の多変量時間応答関数法を用いた脳波計測データの運動アーチファクト低減	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術研究報告	6. 最初と最後の頁 123-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 梅原広明, 横田悠右, 岡田真人, 成瀬康
2. 発表標題 加速度信号の多変量時間応答関数法を用いた脳波計測データの運動アーチファクト低減
3. 学会等名 電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------