

令和 6 年 6 月 1 9 日現在

機関番号：14201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19887

研究課題名（和文）頭皮脳波の力学的性質に関する研究

研究課題名（英文）Study on the dynamical properties of EEG

研究代表者

小野島 隆之（Onojima, Takayuki）

滋賀大学・データサイエンス学系・助教

研究者番号：00824757

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では脳波から周期的な信号を抽出するためにカルマンフィルタと自己回帰モデルを組み合わせた手法の構築と、深層学習を用いた解析信号の予測手法を提案した。脳波の実データを用いて手法の検証を行い、これらの手法は従来のリアルタイムの予測手法より高い精度で脳波の状態を予測することを確認した。これにより高い精度での脳波のclosed-loop実験を行える可能性がある。今後この脳波の状態予測手法を拡張し、脳波を非線形振動子と看做したうえでの状態推定と、入力に対する応答関数を推定する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では脳波から周期的な信号をリアルタイムで抽出する手法を提案しており、この手法は脳波を用いたclosed-loop実験に用いることが可能である。これにより周期的な脳活動と認知機能との因果関係をより詳細に検証できる可能性がある。また、深層学習を用いた脳波の状態推定の枠組みは脳活動の解析やBrain Machine Interface (BMI) 等の開発にも流用することが可能であり、脳神経科学における新たな実験手法の開発に貢献できると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this project, we developed two methods that combine Kalman filters and autoregressive models to extract periodic signals from EEG data, and a prediction method for analytic signals using deep neural networks. These methods have been validated with real EEG data and have demonstrated higher accuracy than conventional real-time prediction methods, enabling more precise EEG closed-loop experiments. We plan to extend these EEG state prediction methods by regarding the EEG as a nonlinear oscillator to estimate its state and predict the response function to inputs in future work.

研究分野：脳神経科学

キーワード：脳波 非線形振動子 位相応答曲線 深層学習 カルマンフィルタ

1. 研究開始当初の背景

近年、脳波の同期現象が様々な認知機能を実現するメカニズムとして注目を集めている。この脳波は認知課題に依存して、それぞれ異なる頭皮上の電極で固有の周波数の波形が観測される。また、外部刺激を受けた時の脳波位相の状態に依存して知覚成績が変化することが報告されており、脳波として観測される周期的な脳活動が認知機能を実現するうえで重要な要素となっていると考えられている。近年、経頭蓋磁気刺激法(TMS)や、経頭蓋交流電気刺激(tACS)などの非侵襲的な脳刺激法を脳波計測と同時に用いて、脳波と脳機能の関係を明らかにする試みが行われてきている。このような直接的な脳刺激を脳波の活動に依存して影響を与えることで、より詳細な脳機能と脳波の因果関係を明らかにできる可能性がある。

しかしながら、このような脳波を用いた研究がされているなか、脳波そのものの力学的な性質についてはほとんどわかっていない。特に、外部からの刺激に対する脳波の応答に関しても未だに不明瞭な点が多い。この刺激に対する性質を明らかにすることで、刺激により望んだ脳活動を引き起こす手法を構築できる可能性がある。

さらに本質的な問いとして、頭皮上に脳波を生み出している活動をどのように解釈するのかという問題もある。この問題は、脳波が脳内の膨大な神経活動により生じる電位変化を頭皮上でマクロな活動として計測していることに起因する。そのため単一ニューロンの活動のように明確な素子の定義が困難であり、脳波の解釈を難しくしている。他の脳活動の計測手法のように、人間の脳が機能局在しているという観点から、脳領域ごとに信号を分離したいところであるが、脳波は空間的解像度が低く脳領域ごとに信号を分離することも難しい。さらに、異なる脳領域間の活動が同期することで、頭皮上で周期的な活動が観測されている可能性もあり、脳領域ごとに分離してよいのか判断ができない。この問題を解決するためには、マクロな活動として観測される脳波のダイナミクスを明らかにし、脳波を適切な単位に分け解釈する必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、脳波の力学的な性質の解明を目指し次の2つの目標の達成を目指し研究を遂行した。

- (1) 神経・脳波モデルによる脳波位相の応答に関する性質の解明
- (2) 脳波データから振動子成分を抽出する手法の確立

3. 研究の方法

(1) 非線形振動子モデルを用いた脳波信号の解釈

脳波の外部刺激に対する応答の性質を明らかにするために、脳波データから刺激の応答を再現するようにモデルを学習させる。この脳波位相を位相振動子モデルと見做し解析する方法が提案されている。このモデルは、脳波のモデルとして知られているニューラルマスモデルのような多自由度のリミットサイクル振動子から、位相縮約という手法を用いることにより導出され、位相変数のみを自由度としてもつモデルである。このモデルでは位相応答関数と呼ばれるものが外部刺激による位相の変化を表現している。そこで、脳波データからこのリミットサイクル振動子のモデルにしたがう信号を抽出する手法を構築する。これによりそのモデルに対応した位相応答関数を計算することが可能であり、この関数を検証することで、刺激に対する脳波の応答を議論する。

(2) 脳波データから振動子としての成分を抽出する手法の確立

この研究では脳波データから、振動子としての成分を抽出する方法を模索する。脳波データは非常に大きなノイズが重畳しており、計測した直後のデータから検証すべき周期的な信号を議論することが難しい。通常の脳波解析ではバンドパスフィルタなどを用いて、指定した周期的な成分の抽出を行い、脳機能との関連を議論するが刺激を与えた前後などの脳波が大きく変化している部分では、その変化が均されてしまい、刺激に対する変化を捉えることが難しくなってしまう。また、近年試みられている脳刺激と脳波の closed-loop 手法などではリアルタイムで脳波の周期的な成分を抽出する必要があり、過去の脳波データから現在の周期的な活動としての脳活動の状態を予測する必要がある。そこでカルマンフィルタと、深層学習を用いて脳波の手記的な活動の抽出を試みる。

4．研究成果

まず、非線形モデルを用いた脳波信号の解釈に関する研究に関しては、脳波モデルを基に生成した人工的な脳波信号にノイズを足し合わせ人工的な脳波データを作成し、このデータに対して非線形振動子モデルを用いたパラメータ推定を実施し、脳波のモデルの応答を非線形振動子モデルで検出可能か検証した．数値シミュレーションでの検証に関してはほぼ完了

している．しかしながら、実データに関しては、複数電極で計測された脳波データから対象とする周波数帯域などを抽出する方法を考える必要があり、手法の改良を進める必要がある．

振動子としての成分を抽出する手法に関してはリアルタイムでの駆動を想定し、カルマンフィルタと自己回帰モデルを用いた脳波位相の予測手法[1]と深層ニューラルネットワークを用いた特定の脳波の解析信号を直接推定する手法[2]を提案した．カルマンフィルタを用いたアプローチは脳波の電極や周波数を指定する必要があるが、事前にモデルの学習を必要とせず、指定した脳波信号の位相をリアルタイムで予測することが可能である．深層学習を用いたアプローチでは、事前に抽出したい信号を学習する必要があるが、それさえ用意してしまえば、周波数や電極などの脳波の選択を必要とせず、計測直後の脳波データから、直接脳波の解析信号を予測することが可能である．どちらの手法もリアルタイムでの駆動を想定しており、過去のデータのみから周期的な脳波の瞬時的状態を抽出することが可能である．今後はこれらの手法と振動子モデルを組み合わせることで、周期的な脳活動から、振動子モデルに相当する活動の抽出を試みる予定である．

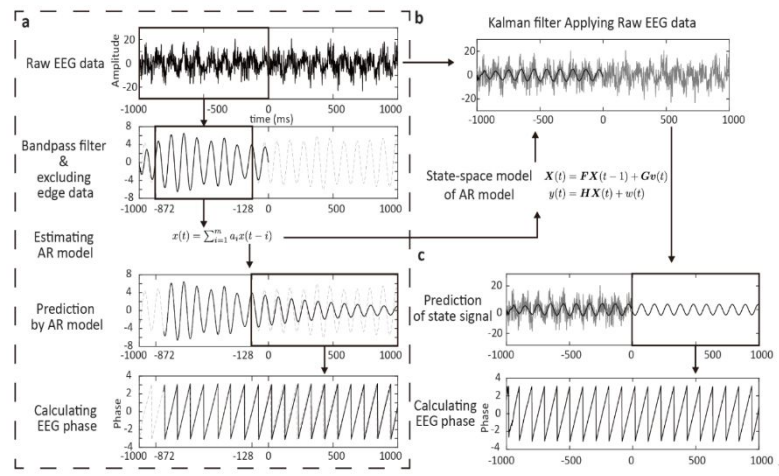


図 1：カルマンフィルタを用いた脳波位相の推定[1]

<引用文献>

- [1] Onojima, Takayuki, and Keiichi Kitajo. "A state-informed stimulation approach with real-time estimation of the instantaneous phase of neural oscillations by a Kalman filter." *Journal of Neural Engineering* 18.6 (2021): 066001.
- [2] Onojima, Takayuki, and Takashi Imai. "Deep Neural Network for Direct Prediction of Analytic Signals from Neural Oscillations." *bioRxiv* (2024): 2024-05.

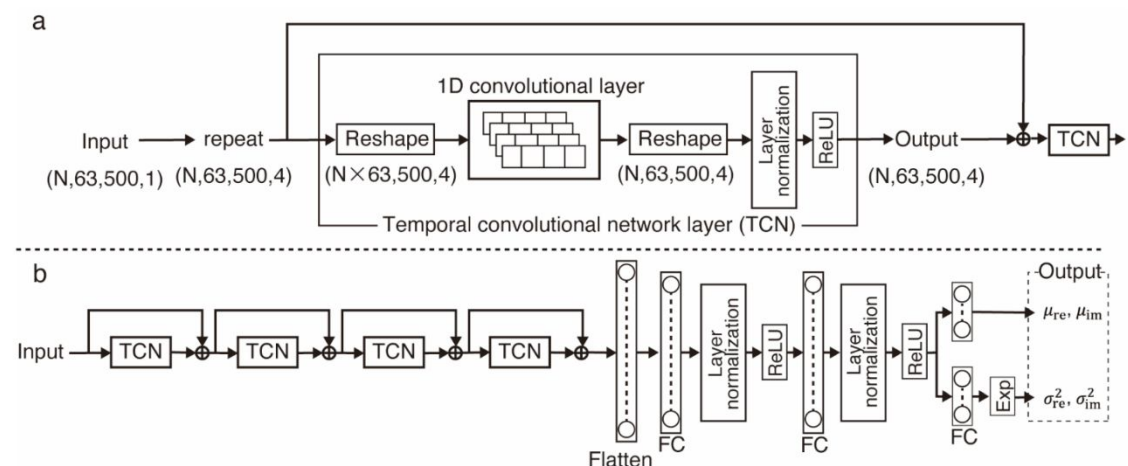


図 2：深層ニューラルネットワークを用いた解析信号の予測[2]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Onojima Takayuki、Imai Takashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep Neural Network for Direct Prediction of Analytic Signals from Neural Oscillations	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2024.05.13.593119	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 小野島隆之、今井貴史	4. 巻 2024-HCI-207
2. 論文標題 深層学習を用いた脳波の解析信号の予測	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-6
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 -
1. 著者名 小野島隆之、今井貴史	4. 巻 2023-HCI-202(46)
2. 論文標題 グラフ深層学習による脳波状態の推定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 情報処理学会研究報告	6. 最初と最後の頁 1-7
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 -
1. 著者名 Onojima Takayuki、Kitajo Keiichi	4. 巻 18
2. 論文標題 A state-informed stimulation approach with real-time estimation of the instantaneous phase of neural oscillations by a Kalman filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Neural Engineering	6. 最初と最後の頁 066001 ~ 066001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-2552/ac2f7b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1．著者名 Onojima Takayuki、Kitajo Keiichi	4．巻 -
2．論文標題 A closed-loop stimulation approach with real-time estimation of the instantaneous phase of neural oscillations by a Kalman filter	5．発行年 2021年
3．雑誌名 bioRxiv	6．最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2021.04.25.441309	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1．発表者名 小野島隆之，今井貴史
2．発表標題 深層学習を用いた脳波の解析信号の予測
3．学会等名 情報処理学会 ヒューマンコンピュータインタラクション研究会
4．発表年 2024年

1．発表者名 小野島隆之，今井貴史
2．発表標題 グラフ深層学習による脳波状態の推定
3．学会等名 情報処理学会 ヒューマンコンピュータインタラクション研究会
4．発表年 2023年

1．発表者名 小野島隆之，北城圭一
2．発表標題 視覚刺激を用いた閉ループ手法のためのカルマンフィルタを用いた脳波位相依存刺激
3．学会等名 第44回日本神経科学大会 CJK第1回国際会議 2021年7月30日（国際学会）
4．発表年 2021年

1. 発表者名 小野島隆之, 北城圭一
2. 発表標題 カルマンフィルタによる脳波瞬時位相の予測
3. 学会等名 生理学研究所研究会 第2回 力学系の視点からの脳・神経回路の理解
4. 発表年 2020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
---------	---------