

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K15623

研究課題名（和文）皮質脳波の非線形ダイナミクスを用いたリアルタイム脳情報解読

研究課題名（英文）Real-time brain information decoding using non-linear dynamics of cortical EEG.

研究代表者

福岡 良平（Fukuma, Ryohei）

大阪大学・大学院医学系研究科・特任講師（常勤）

研究者番号：20564884

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：多数の計測点で観察された時空間信号から事前知識無しに、信号を生成するモデルを構築する方法としてDynamic mode (DM)分解が着目されている。我々は頭蓋内脳波から得られたDMに数式処理を行うことでsDM特徴量に変換し、この特徴量を用いることで高速・高精度に上肢運動内容を推定(分類)できる事を明らかにしていた。本研究ではsDM特徴量の一部成分がパワーより安定的な特徴量として振る舞うことを示した。さらに、他タスク時の頭蓋内脳波や回帰課題においても有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に、脳活動は時空間信号として計測される。Dynamic mode (DM)分解は、この信号に含まれる時空間パターンを抽出する方法である。我々の先行研究でDMから得られるsDM特徴量が頭蓋内脳波からの高速・高精度の運動種別分類に有用であることが示されていた。本研究では、sDM特徴量の一部成分が試行間でより安定的なパワー特徴量としての挙動を示すことを明らかにした。また、本手法の有用性は他のタスク時(例：動画視聴覚タスク)の頭蓋内脳波や、他の識別手法(回帰)においても示された。任意の時空間信号に適応可能な方法であるため、他モダリティの信号についても有用であることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Dynamic mode (DM) decomposition has attracted attention as a method for constructing a model for generating signals from spatiotemporal signals observed at many measurement points without prior knowledge. We have shown that the DMs obtained from intracranial EEG can be converted into sDM features by mathematical processing and that these features can be used to estimate (classify) the types of upper limb movement with high speed and accuracy. In this study, we showed that some components of the sDM features behave similarly to power features, but with higher reproducibility between trials. Furthermore, the method was shown to be useful in intracranial EEG during other tasks and in regression.

研究分野：脳神経科学

キーワード：非線形ダイナミクス 皮質脳波

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、多数の計測点で観察された非線形ダイナミクスから事前知識なくモデルを構築する方法として Dynamic mode decomposition (DMD) が着目されている。我々の先行研究において、頭蓋内に留置された多数の電極で計測された頭蓋内脳波に DMD を適用し、その特徴を用いて脳情報解読を行う技術を開発した (Shiraishi, Y. et al. Neural decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition. J Neural Eng, (2020).)。同方法は、周波数帯域ごとのパワーを特徴量とした場合と比較して、高い精度で上肢運動内容を推定できるが、推定に時間がかかる欠点があった。我々は数式変形を行うことで、トライアルごとに独立な特徴量を得ることで、計算時間を短縮し、正則化の適用を可能とした (特許出願中)。その結果、Brain-Computer Interface (BCI) など実時間で脳情報解読が必要な状況でも適用でき、その推定精度もさらに改善することが示された。興味深いことに、このベクトル表現は電極ごとに一つずつ得られる特徴量である。つまり、DMD を用いることで、新たな局所的脳波特徴量 (spatial DM 特徴量: sDM 特徴量) を得ることができた。

2. 研究の目的

本研究では、我々の先行研究において得た sDM 特徴量の神経科学的性質を明らかにすることを目的とする。また、申請時には sDM 特徴量を用いた BCI の実現も目的としていたが、sDM 特徴量が高モダリティの神経活動信号の解読にも有用であることが明らかになったため、sDM 特徴量の性質を、頭蓋内脳波だけでなく色々なモダリティの信号を通して明らかにすることとした。

3. 研究の方法

まず、我々の先行研究で使用した上肢運動時頭蓋内脳波データセットについて、sDM 特徴量とパワー特徴量を計算し、運動種別推定精度と特徴量自身を比較した。また、sDM 特徴量が色々な課題下での頭蓋内脳波の識別に有用であることをしめすために、動画視聴時の頭蓋内脳波データセットや、インターネット上で公開されている頭蓋内脳波データセットについても識別精度を比較した。

4. 研究成果

計算された DM 特徴量は観測点(頭蓋内脳波の場合はチャンネル) × 観測点の形となる。上肢運動時頭蓋内脳波データセットの Patient 1 が 3 種類の運動(手を握る・開く・つまむ)を行った際の運動開始 cue から 500 ms の頭蓋内脳波をもとに計算した sDM 特徴量の各運動種別でのトライアル間平均を図 1a に示す。また、運動種別間での F 統計量を図 1b にしめす。対角にある成分 DM 特徴量 (spatial node DM 特徴量: snDM 特徴量) が特に運動種別の違いに鋭敏であることが明らかになった。

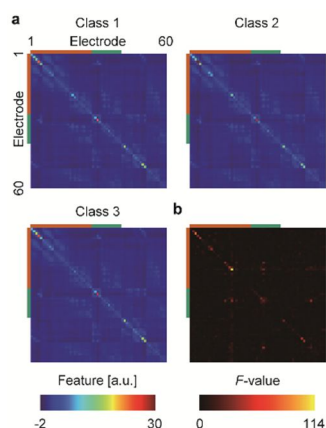


図 1. Patient 1 の sDM 特徴量の可視化

図 1 で用いたのと同じ頭蓋内脳波に Fast Fourier Transform (FFT) を適応して得られた角周波数でのパワーと snDM 特徴量との相関を図 2a に示す。snDM 特徴量は 80 ~ 200 Hz の周波数間でパワーと高い相関を示した。面白いことに、この帯域は頭蓋内脳波識別において情報が多いことが知られる high- γ 帯域 (80 ~ 150 Hz) を含んでいた。一方で、同じ運動を繰り返し行った際の特徴量再現性を、各トライアル間で特徴量同士の相関を取ることで求め、各帯域のパワー特徴量と snDM 特徴量で比較した。図 2b にあるように、snDM 特徴量が最も高い特徴量再現性を示した。こ

これらのことから, snDM 特徴量の対角成分は高い再現性を持つパワーのような挙動を示すことが明らかになった。

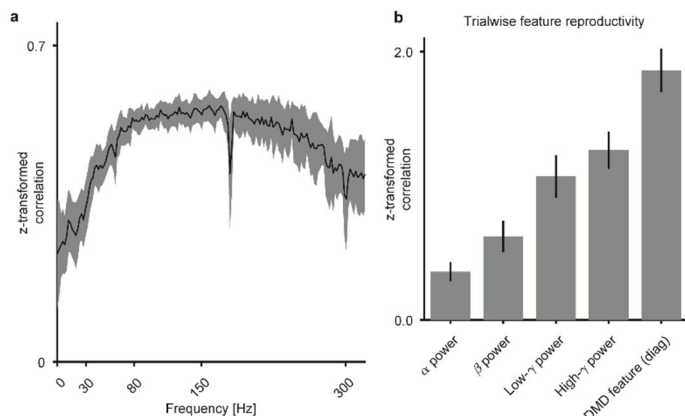


図 2. snDM 特徴量のパワーとの相関と試行間再現性

上肢運動時頭蓋内脳波データセット, 動画視聴時頭蓋内脳波データセット, 3つの公開頭蓋内脳波データセットにおいて, snDM 特徴量と high- γ パワー特徴量を用いた場合の頭蓋内脳波識別精度を表 1 に示す. すべてのデータセットにおいて snDM 特徴量を用いた場合の精度は, high- γ パワー特徴量を用いたときに比べて, 同等か少し上昇していた. また, snDM 特徴量は分類・回帰の違いによらず有用であることも明らかになった.

表 1. 各頭蓋内脳波データセットにおける脳波識別精度

	High- γ パワー特徴量	snDM 特徴量
分類		
上肢運動課題	71.40%	81.33%
舌 vs 口運動課題	92.94%	92.66%
家 vs 顔視覚課題	92.54%	97.49%
回帰		
動画視聴覚課題	0.0815	0.1386
指運動課題	0.3642	0.4698

これらの結果は Fukuma et al. Fast, accurate, and interpretable decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition, Communication Biology, 2024 として発表済みである.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Ryohei Fukuma, Kei Majima, Yoshinobu Kawahara, Okito Yamashita, Yoshiyuki Shiraishi, Haruhiko Kishima, Takufumi Yanagisawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Fast, accurate, and interpretable decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Communications Biology	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） 10.1038/s42003-024-06294-3	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 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryohei Fukuma, Kei Majima, Yoshinobu Kawahara, Okito Yamashita, Yoshiyuki Shiraishi, Haruhiko Kishima, Takufumi Yanagisawa
2. 発表標題 Fast, accurate, and interpretable decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition
3. 学会等名 Sfn2023（国際学会）
4. 発表年 2023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
---------	---------