

高時間分解能な脳情報デコーディングのための グラフ多次元配列信号処理の構築

Graph multilinear signal processing for brain decoding with high time-resolution

2151030



研究代表者

豊橋技術科学大学

助教

東 広 志

[研究の目的]

脳活動の計測は、認知科学、病気診断、ブレインコンピュータインターフェイス (BCI) の分野に大きく貢献している。得られた科学的な知見、および工学的な応用への可能性は、感性・直感・認知・意思などの脳の特性に準じた次世代情報技術の礎になると期待される。本課題は、これらの技術を支える脳情報デコーディングにおいて、新しい枠組みを提案する。特に、脳波の高い時間分解能に着目し、処理に対して様々な事前情報を組み込むことで、脳波から得られる情報を飛躍的に増加させる。これにより、これまで、脳波の低 SN 比が障壁となっていた、認知状態の遷移や BCI など、高時間分解能な解析が必須である分野で有効な信号処理を開発する。

[研究の内容, 成果]

1. グラフ多次元配列信号処理

本研究は、構造を持つ多次元配列として観測される脳波信号を効率的に処理するための新しい信号処理の枠組みである「グラフ多次元配列信号処理」の開発を目標とした。具体的には、チャンネル×時間の行列として観測される脳波に対して、チャンネルの軸に対して空間的な構造（チャンネル電極間の距離情報など）を、時

間の軸に対して時間的な相関構造を仮定する。例えば、電極間の3次元座標を計測して、それらの相対距離をグラフで表したものが、図1である。これらの構造をグラフとして表現すると、あるチャンネル・ある時間に観測される脳波信号は、グラフ上の信号として表すことができる。

このようなグラフ信号を処理するために、部分空間制約を用いた信号処理手法を提案した。部分空間制約は、抽出したい特徴成分や設計したいフィルタが、ある特定の空間内に存在することを制約する。ここで、ある特定の空間を、グラフから求めることで、グラフ構造を特徴抽出やフィルタ設計の過程に組み込むことが可能である。このように求めたい対象をある空間に制限する方法は、機械学習の分野では、正規化と呼ばれる。しかし、一般に用いられるノルム正規化と比べて、本研究で提案した部分空間制約は次の特徴を持つ：1) グラフで表される信号構造を処理に組み込むことができる、2) 多次元配列に対して容易に適応可能である、3)

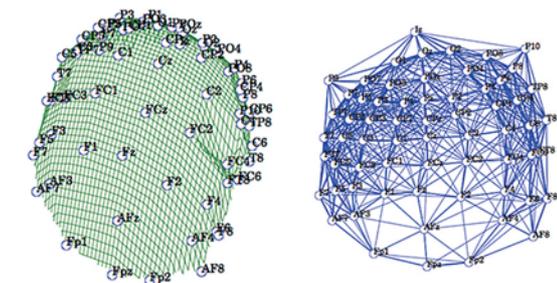


図1 電極の3次元座標とその相対距離から求めたグラフ

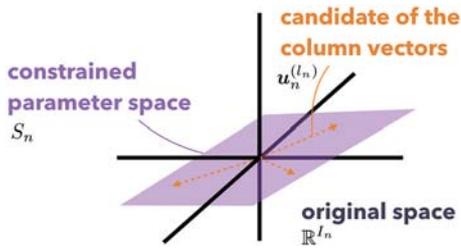


図2 部分空間制約の概要。グラフから求まるグラフフーリエ基底を部分空間とする。

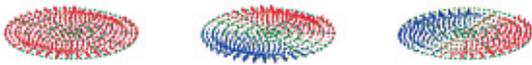


図3 グラフフーリエ基底の例。

正規化係数を決める必要がない。この枠組みは、正規化項を追加するようなパラメータ制約と異なり、前処理として、部分空間に射影することで、様々な制約を実現できる（図2）。射影後の信号に対しては、特別な処理は必要とせず、一般的な信号処理手法を用いることができるため、非常に容易に実装することができる（詳しくは解説記事（業績 [4]）を参照）。

グラフから部分空間を求めるためには、グラフからグラフラプラシアン行列を計算する。グラフラプラシアン行列の固有値分解には以下の特徴がある：小さい固有値に対応する固有ベクトルはグラフ上でなめらかに振動；大きい固有値に対応する固有ベクトルは激しく振動する。図3に小さい固有値に対応する固有ベクトルを示す。フーリエ基底のようになめらかな成分を観測することができる。この特徴から、これらの固有ベクトルはグラフフーリエ基底と呼ばれる。このなめらかな基底が張る部分空間を用いることで、グラフ構造を信号に埋め込むことができる。

2. BCI 識別による性能評価

提案するグラフ多次元配列信号処理の性能を、3つのBCI（運動野活動を用いたもの、定常的視覚誘発電位を用いたもの、事象関連電位を用いたもの）を用いて評価を行った。

まず、運動野活動を用いたBCIでは、電極

配置の幾何的な構造に着目した。神経科学においては、頭皮上の電極に観測される電位（頭皮上脳波）は、数千のニューロンの電気的な活動の総和であると考えられている。この知見より、「隣接する脳波電極は同じニューロンの電気活動を観測する可能性が高い、すなわち、関連の高い信号を観測する」と仮定できる。つまり、電極配置という幾何的な構造を、そのままグラフとして使用できると考えた。この電極配置グラフを用いて次の成果を得た。まず、運動想像時の脳波識別（どの部位（例えば、右手か左手）の運動を想像しているかを脳波から識別する）における特徴抽出において、少ないサンプルで識別器を学習しても、高い識別精度を達成できること示した。これによって、BCIの精度、及びBCIを設計する際の学習効率を高めることができる（業績 [10]）。

同様に、定常的視覚誘発電位を用いたBCIにおいても、電極配置グラフの有効性が示された。定常的視覚誘発電位は点滅刺激注視時に発生する脳波成分である。誘発される電位は点滅周波数と同じ周波数成分を持つ。そのため、複数の点滅刺激を提示し、周波数成分の増幅を検波することで、どの刺激に注意を向けているかを判別することができる。この特徴抽出においては正準相関分析がよく用いられるが、短時間で観測された信号を用いて識別しようとすると、一種の過学習の状態に陥り、大きく抽出精度が低下することが問題であった。過学習は学習サンプル数に比べてパラメータ空間が広大であることで発生する。そこで、グラフ多次元配列信号処理によってパラメータ空間を制約し、正準相関分析を行った。これによって、BCIの応答速度を1.5倍程度改善できることを示した（業績 [6][7]）。

事象関連電位を用いたBCIにおける評価では、実験対象者以外の被験者から観測された脳波を用いてグラフ設計を行った。ここで、着目するのは、脳の機能的接続性である。機能的接続性は脳活動の同期を表している。例えば、運

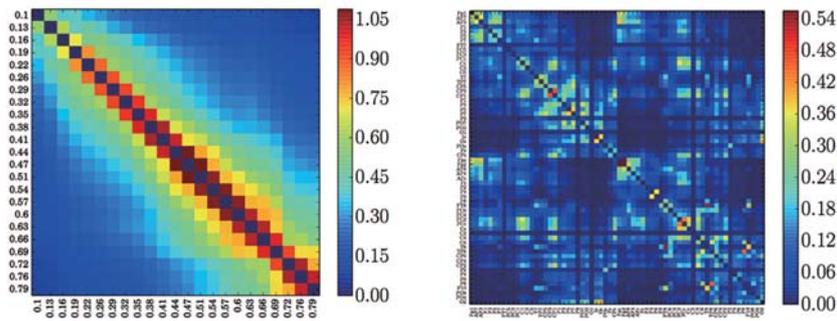


図4 空間領域と時間領域における機能的接続性を表す近接行列

動想像時には運動野と感覚運動野が同期する。機能的接続性は信号の機能的な構造を表していると言える。これをグラフとして使用できると考えた。また、他の被験者から求めた機能的接続性を流用することも、本研究の特筆すべき点である。図4に空間領域と時間領域における機能的接続性を示す。この機能的グラフを用いた信号処理をP300-speller BCI (ランダムに現れる文字刺激を利用して、文字入力を行うBCI)に適用して、識別精度の向上を示した(業績[5][8])。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、新しい脳波処理の枠組みとして、グラフ多次元配列信号処理を提案し、複数のBCIにおいてその性能を評価した。この手法は「どのような処理を行いたいのか」によってグラフを変更することができる。言い換えると、グラフの設計によって様々な情報を信号に組み込むことができる。したがって、グラフ設計方法として他の計測機器の信号(例えば、脳波に時間分解能の面に劣るfMRIやfNIRSなど)から、グラフを設計する方法が考えられる。このようなマルチモーダル計測を効率的に処理する方法としてグラフ多次元配列信号処理の発展が期待出来る。

また、今回はBCIによって性能評価を行ったが、認知タスクにおける脳波解析にも今後は応用したい。

[成果の発表, 論文など]

- [1] H. Higashi, T. Minami, and S. Nakauchi, "Variation in event-related potentials by state transitions," *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 11, p. 75 (11 pages), 2017.
- [2] H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Smoothing of xDAWN spatial filters for robust extraction of event-related potentials," in *Proceedings of The 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016)*, pp. 1-5, 2016.
- [3] 東広志, "チャンネル間の連結度を利用した脳波アーチファクト除去," 電子情報通信学会第31回信号処理シンポジウム, pp. 103-104, 2016年.
- [4] 東広志, 田中聡久, "信号構造を利用する脳波処理," *計測と制御*, vol. 55, no. 11, pp. 960-965, 2016.
- [5] H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Multilinear discriminant analysis with subspace constraints for single-trial classification of event-related potentials," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 7, pp. 1295-1305, 2016.
- [6] S. Ryu, H. Higashi, T. Tanaka, S. Nakauchi, and T. Minami, "Spatial smoothing of canonical correlation analysis for steady state evoked potential based brain computer interfaces," in *Proceedings of 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2016)*, pp. 1516-1519, 2016.
- [7] 龍進吾, 東広志, 中内茂樹, 南哲人, "電極配置情報を利用した正準相関分析による定常状態視覚誘発電位の識別," 第39回日本神経科学大会, 神奈川, 2016年.
- [8] H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Subspace-constrained multilinear discriminant analysis for ERP-based brain computer interface classification," in *Proceedings of The 2015*

- Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015), pp.934-940, Hong Kong, China, Dec. 2015.
- [9] 東広志, Tomasz M. Rutkowski, 田中聡久, 田中雄一, “部分空間制約を用いた多次元線形判別法による単一試行事象関連電位の識別,” 電子情報通信学会第30回信号処理シンポジウム, pp.396-397, 福島, 2015年.
- [10] 東広志, 田中聡久, 田中雄一, “グラフスペクトルを用いた制約付き脳波処理,” 第54回生体医工学会, 名古屋, 2015年.