

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：94301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03516

研究課題名（和文）マルチモーダル脳イメージングデータのための自己教師あり特徴量構築法

研究課題名（英文）Self-supervised feature construction methods for multi-modal neuroimaging data

研究代表者

川鍋 一晃（KAWANABE, Motoaki）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長

研究者番号：30272389

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：異なる被験者やセッションで脳イメージングデータの統計的性質が大きく異なるという課題に対処するため、このドメイン間差を校正する脳情報転移学習法TSMNetを開発した。また、EEGとfMRIのマルチモーダルデータに共通する情報表現を抽出するために、深層学習を利用した非線形フィルタリングと、脳イメージングデータの統計的性質に則した幾何学的アプローチを組み合わせ、自己教師あり特徴量構築法DeepGeoCCAを開発した。ATRのEEG-fMRI同時計測データの認知負荷度判別問題に適用したところ、EEGモデルにTSMNetを組み込むことにより、異なる被験者でも高い汎化性を持つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発されたDeepGeoCCAに基づくマルチモーダルデータの自己教師あり学習法は、ATRが実施中のプロジェクトで活用されており、メンタルヘルスや認知機能の維持・向上に資するブレイン・マシン・インタフェースの研究を通じて社会への貢献が期待される。また、脳イメージングデータのみならず、ScanQAのように、様々な状況が考えうる複雑な実環境データに対して、深層学習の性能向上などの波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to address the issue that the statistical properties of neuroimaging data vary substantially between different subjects and sessions, we developed a transfer learning method for brain information inference named TSMNet which can calibrate these inter-domain differences. Then, in order to extract information representations shared by multimodal data acquired from EEG and fMRI, we developed a self-supervised representation learning method named DeepGeoCCA, by combining nonlinear filtering using deep learning with a geometric approach that matches the statistical properties of neuroimaging data. We applied to the classification problem of cognitive load on ATR's EEG-fMRI simultaneous recording data, and showed that it has high generalizability across different subjects by incorporating TSMNet into its EEG model.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：人間情報学 マルチモーダル脳イメージング 自己教師あり学習 転移学習 脳活動ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

(1) fMRI 脳機能結合から個人特性や様々な精神疾患の度を推測できるようになったが、大型装置である fMRI では幅広い社会展開は難しいため、簡易的に計測可能な脳波計を用いて、この脳機能ネットワークの活動状態を推測することが求められている。しかし、脳波からの情報解読の精度が十分でなく、結果の安定性に欠けるという課題が指摘されている。

(2) 深層学習を脳波データに適用する試みは存在するが、教師ラベル付きのサンプル数が限られているため、従来法と同程度にとどまっている。一方、自然言語処理などでは、大規模なラベルなしデータが存在し、これに適切に名目ラベルを設定することで事前の表現学習を行う自己教師あり学習法を用いて、従来法の性能を大きく改善することが示されている。

2. 研究の目的

(1) fMRI で観察されている脳機能ネットワークの活動状態を脳波から推測する脳情報解読技術の確立を目指して、マルチモーダル脳イメージングデータに対する自己教師あり学習法に関する研究開発を実施し、深層学習を大幅に改良することができる脳情報特徴量を構築する。

(2) 脳波データに被験者間での統計的性質の大きな違いが存在するため、多人数データを有効活用できていないという課題に対処するため、この被験者間差を較正する脳情報転移学習法を開発し、自己教師あり学習法と融合する。

3. 研究の方法

(1) マルチモーダル脳イメージングデータに対する自己教師あり学習法を段階的に構築する。まず、脳波および fMRI のそれぞれに対して、自己教師あり学習の適切な名目タスクを設計し、これを統合して、EEG-fMRI 同時計測データに対する脳情報解読法を開発し、効率の良い計算アルゴリズムを構築する。また、得られた脳情報特徴量を既知の脳活動ダイナミクス指標と比較し、神経科学的な解釈を検討する。

(2) 脳イメージングデータの被験者間差が大きいことも、他人のデータを有効活用する自己教師あり学習法の課題になる。被験者間の違いを較正する転移学習法を開発し、自己教師あり学習法と融合する。また、他人のデータを活用することによる脳情報解読精度の改善効果を検証する。

4. 研究成果

(1) 異なる被験者やセッションなど、脳波データの課題であるドメイン間差を較正するため、脳情報転移学習法 TSMNet を開発した (Kobler et al., NeurIPS2022)。脳波データはブレイン・コンピュータ・インタフェースなどに利用される情報が共分散行列に含まれており、データに内在する不変性の活用により、高い外れ値頑健性を有するリーマン幾何学的手法が有用である。TSMNet は、end-to-end 学習により、多くの応用問題で最高のパフォーマンスを達成している深層ニューラルネットワークと、この幾何学的手法を組み合わせることで、双方の利点をあわせ持つアプローチである。また、TSMNet には、共分散行列がなす対称正定値 (SPD) 多様体上のバッチ正規化のアイデアに基づいて、未知のドメイン (日・被験者) でのアノテーションデータを必要としない新たなドメイン適応フレームワークを提案し、実装した。さらに、従来の深層ニューラルネットワークのようなブラックボックスではなく、学習結果の神経生理学的解釈を追求するための可視化手法も提供した。実際に、提案手法を複数の脳波ブレイン・コンピュータ・インタフェース公開データに適用したところ、より難しい被験者間転移問題に対して、TSMNet が深層学習や幾何学的手法単体の従来法を有意に改善することを示した。この結果から、TSMNet を本研究における転移学習法として採用することにした。ここでは、脳波ブレイン・コンピュータ・インタフェースデータのみを解析したが、本手法は fMRI 脳機能結合ダイナミクスなど、多様な多変量時系列の解析にも適用できる。本研究により、ヒト計測データを始めとするヘテロデータベースの活用が促進され、データ駆動科学や人工知能応用への幅広い貢献が期待される。

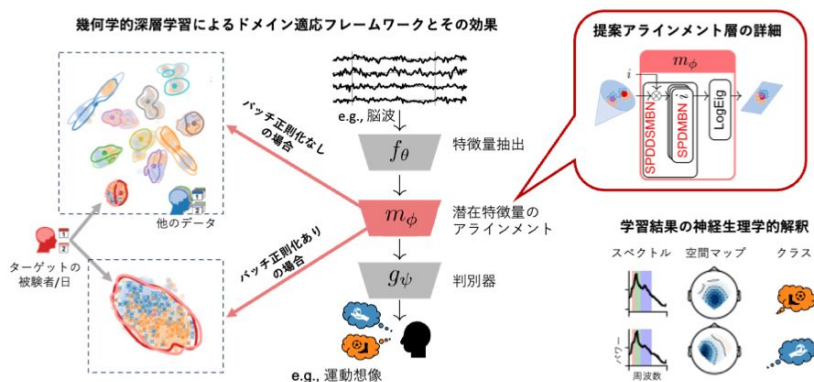


図 1: 提案手法 TSMNet の概要 (Kobler et al., NeurIPS2022)

(2) ヒトの全脳ダイナミクスを理解し、臨床現場での診断を向上させるためには、時間分解能の高い EEG と空間分解能の高い fMRI のように、特性の異なるマルチモーダル脳イメージングデータを組み合わせることが必要である。EEG と fMRI に共通して表現されている情報を抽出することを目指して、EEG-fMRI 同時計測データの時間的対応関係を利用した自己教師あり学習を行う DeepGeoCCA という機械学習法を開発した (Kobler et al., ICLR2024)。この手法は、深層学習を利用した非線形フィルタリングと、脳イメージングデータの統計的性質に則した幾何学的アプローチを組み合わせることにより、正準相関分析 (CCA) を拡張したものである。具体的には、正準相関分析 (CCA) で用いられている相関を、正定対称行列の多様体上に拡張した測地線相関を最大化することで、マルチモーダル脳イメージングデータの共通情報表現を構築する。EEG-fMRI 同時計測データへの応用においては、異なる被験者やセッションでのドメイン間差を較正するために、(1)で開発した脳情報転移学習法 TSMNet を EEG モデルに選んだ。一方、fMRI モデルとして、複数の大規模データベースから学習した Transformer エンコーダ (文献 ) を用いた。アーキテクチャの概要を図 2 に示す。DeepGeoCCA を作業記憶課題中の EEG-fMRI 同時計測の、同一被験者・セッションのデータに適用したところ、高い相関を持つ共通特徴量が得られ、認知負荷度の判別問題で高い精度を達成した。さらに、異なるセッションや被験者に対しても、我々のアプローチは汎化性を持つことを示した (Kobler et al., OHBM2024)。

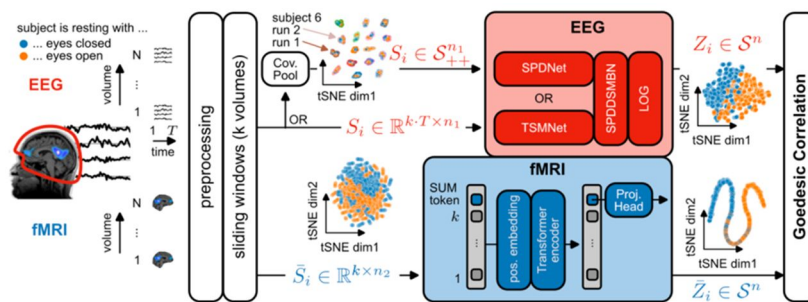


図 2 : EEG-fMRI 同時計測データ解析のための DeepGeoCCA アーキテクチャ (Kobler et al., ICLR2024)

(3) 脳波データの個人差や非正常性を較正するため、個人間較正変換 (文献 ) と敵対的ドメイン適応を組み合わせた脳情報解読法を開発した。本手法を空間的注意課題時の脳波の公開データベースの一部に適用したところ、個人間較正変換と敵対的ドメイン適応を併用することで、クラス間差が大きく、個人差が小さい特徴量を構築することができた。また、一部の被験者では判別精度が従来法に比べて向上した。

(4) 複数領域の脳活動信号間の因果関係を課題や刺激ごとに要因分解できる dSCA (文献③) に Neural Network を組み合わせて、これまで発見できなかった非線形な効果も発見することができる Neural dSCA を開発した (Takagi et al., 2021)。Neural dSCA は映画視聴時の fMRI データに適用したところ、Neural dSCA はいくつかの脳領域の間で、顔およびセリフの言葉に関連する非線形な情報共有を発見した。この手法を他の脳イメージングデータに適用することで、脳の様々な非線形因果関係の理解が進むことが期待される。

(5) マルチモーダル時系列データの情報統合を行う機械学習法として、マルチストリーム 3 次元畳み込みニューラルネットワークを開発した (宮西他, 2021)。これをテストするために、大規模データが利用可能な実環境映像データに本手法を応用することとした。映像に含まれる外観・動作・音声情報というマルチモーダル時系列データを同時に利用して、映像に対する質問に回答するため、マルチストリーム 3 次元畳み込みニューラルネットワークを実装した。公開されている音声トラック付きの映像質問応答データに本手法を適用したところ、マルチモーダル情報を有効活用することにより、最先端の手法よりも優れたパフォーマンスを達成した。今後、大規模な EEG-fMRI データが公開されるようになれば、本手法が適用可能である。

(6) fMRI は 3 次元データの系列、EEG は長い多次元時系列データというように各モダリティの特性が大きく異なる。このようなマルチモーダルデータを情報統合するための手法として、それぞれの自己教師あり学習済の特徴量構築モジュールを組み込んだ深層ネットワークアーキテクチャ ScanQA モデルを提案した。その評価のために、3 次元シーンの物体とアノテーションが与えられている ScanRefer データをベースに ScanQA データセットを構築し、提案手法の 3 次元質問応答のパフォーマンスが従来法を改善することを示した (Azuma et al., CVPR2022)。

< 引用文献 >

Thomas, A. et al. Self-supervised learning of brain dynamics from broad neuroimaging data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35:21255-21269, 2022.  
Morioka, H. et al. Learning a common dictionary for subject-transfer decoding with resting calibration. *Neuroimage*, 111:167-178, 2015.  
Takagi, Y. et al. Demixed shared component analysis of neural population from multiple brain areas. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33:6235-6244, 2020.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Azuma, D., Miyanishi, T., Kurita, S., Kawanabe, M.	4. 巻 -
2. 論文標題 ScanQA: 3D Question Answering for Spatial Scene Understanding	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition	6. 最初と最後の頁 19129-19139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/CVPR52688.2022.01854	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 Kobler, R., Hirayama, J., Zhao, Q., Kawanabe, M.	4. 巻 35
2. 論文標題 SPD domain-specific batch normalization to crack interpretable unsupervised domain adaptation in EEG	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 6219-6235
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 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 Takagi, Y., Hunt, L.T., Ohata, R., Imamizu, H., Hirayama, J.	4. 巻 2106
2. 論文標題 Neural dSCA: demixing multimodal interaction among brain areas during naturalistic experiments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 2948
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2106.02948	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 該当する
1. 著者名 Miyanishi, T., Kitamori, F., Kurita, S., Lee, J., Kawanabe, M., Inoue, N.	4. 巻 36
2. 論文標題 Cityrefer: geography-aware 3D visual grounding dataset on city-scale point cloud data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems 36 (NeurIPS 2023)	6. 最初と最後の頁 77758-77770
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 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 Ju, C., Kobler, R.J., Tang, L., Guan, C., Kawanabe, M.	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep Geodesic Canonical Correlation Analysis for Covariance-Based Neuroimaging Data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR2024)	6. 最初と最後の頁 accepted
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 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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 東 大地, 宮西 大樹, 栗田 修平, 川鍋 一晃
2. 発表標題 屋内環境の意味的理解に向けた3次元質問応答
3. 学会等名 第25回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2022) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kobler, R., Hirayama, J., Zhao, Q., Kawanabe, M.
2. 発表標題 SPD domain-specific batch normalization to crack interpretable unsupervised domain adaptation in EEG
3. 学会等名 Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮西大樹, 川鍋一晃
2. 発表標題 マルチストリーム3次元畳み込みネットワークによる外観・動作・音声情報を統合した映像質問応答
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 (第35回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Miyanishi, T., Kitamori, F., Kurita, S., Lee, J., Kawanabe, M., Inoue, N.
2. 発表標題 Cityrefer: geography-aware 3D visual grounding dataset on city-scale point cloud data
3. 学会等名 The Thirty-seventh Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ju, C., Kobler, R.J., Tang, L., Guan, C., Kawanabe, M.
2. 発表標題 Deep Geodesic Canonical Correlation Analysis for Covariance-Based Neuroimaging Data
3. 学会等名 The Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kobler, R., Kuroda, T., Ogawa, T., Ju, C., Kawanabe, M.
2. 発表標題 Learning latent representations from simultaneous EEG-fMRI
3. 学会等名 the OHBM 2024 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kobler, R., Hirayama, J., Zhao, Q., Kawanabe, M.
2. 発表標題 TSMNet for BMI: inter-subject and session transfer and online, unsupervised adaptation
3. 学会等名 第10回日本BMI研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堤 聖月, 黒田 敏数, 小川 剛史, 岸 朋彦, Kobler Reinmar, 川鍋 一晃
2. 発表標題 異なるシーケンスにおける課題中のfMRIデータの比較
3. 学会等名 第10回日本BMI研究会
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
研究分担者	宮西 大樹  (MIYANISHI Taiki)  (10737521)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究員   (94301)	
研究分担者	平山 淳一郎  (HIRAYAMA Jun-ichiro)  (80512269)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員   (82626)	

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			
英国	University of Oxford			
シンガポール	Nanyang Technological University			
オーストラリア	University of Sydney			