

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：94301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2018～2021

課題番号：18KK0284

研究課題名（和文）複数モダリティ脳イメージングに基づく集中時脳状態の解読技術とその応用

研究課題名（英文）Decoding of brain states during time of concentration based on multi-modal brain imaging

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） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：運動イメージトレーニングなど集中が必要な課題時、および安静時の脳波およびfMRIデータを収集した。これを活用することで、2つの国際共同研究を進め、さまざまな脳情報解読法を開発した。まず、共同研究者のHyvarinen教授（ヘルシンキ大）らと、local space-contrastive learning (LSCL)などの非線形独立成分分析法を開発した。また、Hunt教授（オックスフォード大）らと、demixed shared component analysis (dSCA)などの複数脳領域活動の因果関係抽出法を開発した。これらの成果に基づいて、集中時脳状態の可視化システムを実装した。

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LSCLやIIAなどの非線形独立成分分析法は、データを生成している真の統計モデルの識別可能性が数学的に証明されており、このような保証を持たない深層ニューラルネットワークが主流の機械学習コミュニティでも注目されている。この成果やdSCAなどの手法を様々な脳イメージングデータに適用することで、脳活動の時間ダイナミクス構造や複数領域間の情報の流れを解明することができれば、ヒト神経科学の進展に大きく寄与する。これらの脳情報解析法は、ATRが実施中のプロジェクトで今後も活用され、メンタルヘルスの維持に資するブレイン・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。

研究成果の概要（英文）：We collected EEG and fMRI data during resting and tasks that required concentration, such as motor imagery training. By utilizing these data, we conducted two international joint researches and developed various analysis and decoding methods for neuroimaging data. First, we constructed nonlinear independent component analysis methods such as local space-contrastive learning (LSCL) and independent innovation analysis (IIA) with our collaborator Professor Hyvarinen (University of Helsinki). Second, with Professor Hunt (University of Oxford) and others, we have developed machine learning methods for extracting causal relationships among multiple brain region activities such as demixed shared component analysis (dSCA) and Neural dSCA. Based on these results, we implemented a visualization system for the brain states during concentration training.

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 脳イメージング 集中時脳状態 脳波情報解析法 転移学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 空間分解能の高い機能的 MRI (fMRI) データを用いて、安静状態の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ことが明らかになっている。しかし、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、fMRI で観察されている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。

(2) 過去の体験や未来の計画などに思いを巡らせるマインドワンダリング状態に陥ることは、スポーツや仕事において大幅なパフォーマンス低下を招く。これを防ぐため、「今この瞬間、目の前の状況のみに意識を集中する」メンタルトレーニングが近年注目されている。その効果を示すメタ分析や脳イメージング研究が行われているが、高空間解像度の fMRI と高時間解像度の脳波を合わせた解析はなく、脳内基盤や個人差についても十分解明されていない。

2. 研究の目的

(1) 簡易的に計測可能な脳波から、集中状態などに関わる脳機能ネットワークの活動を推測する機械学習法を開発する。事情関連電位や周波数帯パワーなどを用いる従来法と異なり、脳波-fMRI 同時計測データなどを活用して、fMRI を用いた脳機能ネットワーク研究の知見を基礎とする脳波情報解読技術の構築を目指す。

(2) 上記の機械学習法による脳状態推定結果を、フィードバック情報として呈示システムを構築し、メンタルトレーニングなどへの応用可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) 脳情報転移解読法の開発、および脳波情報解析法の評価に利用するため、20 名程度から集中が必要な課題時と安静時の脳波データを収集する。

(2) 脳波-fMRI 同時計測データなどを活用し、集中時に変化が生じるデフォルト・モード・ネットワーク (DMN) 内の脳活動や脳機能結合などの状態を推測するための脳波情報解析法の研究開発を行う。独立成分分析 (ICA) を階層化した特徴量抽出法である SPLICE (引用文献) をさらに高度化する。また、脳活動パターンの個人間変動を校正する機械学習法を構築し、新しい利用者に対して、他人のデータから学習した脳波情報解読器のパフォーマンスを評価する。

(3) ATR が保有する脳波フィードバックシステムを活用して、上記の脳波情報解読法を基に、集中脳状態を可視化するシステムを構築し、その検証を行う。

4. 研究成果

(1) 脳波から脳のマジュール構造や、その間の相互作用を抽出するための階層的ネットワークモデル SPLICE (引用文献) を拡張し、時間方向の畳み込み演算とプーリングによって、時間方向のずれに対してロバストな時間特徴量を抽出できるようにした。ATR が保有する脳波-fMRI 同時計測データに適用したところ、特に第一層の特徴量が、従来の SPLICE 法より fMRI との相関が高くなることがわかった。また、このモデルの学習の不安定さの解消や局所解への対応のために、SGD、Adam、自然勾配法など、複数の最適化アルゴリズムを比較するとともに、バッチ正則化、活性化関数、初期化手法などの諸要素を再検討することで、学習アルゴリズムの挙動を段階的に改善した。さらに、この改良版アルゴリズムを PRREDICT 安静時 EEG データなどに適用し、実データで従来の SPLICE 法を改善することを確かめた。

(2) 共同研究者の Hyvarinen 教授の研究室のポスドク研究員である Monti 氏が ATR に 10 週間滞在し、fMRI 脳機能結合から年齢を推定する機械学習法に関して国際研究を実施した。彼らが提案している Modular Hierarchical Analysis (MHA) を用いることで、CamCAN、HCP の外部データベースおよび ATR のデータベースの 3 つで、従来法よりも年齢推定精度が向上することを示した。また、このデータ駆動的な手法で、DMN、顕著性、高次視覚という解釈可能な 3 つのマジュールが抽出されるとともに、これらが年齢推定に寄与していることを発見した (Monti et al., 2020)。

(3) Hyvarinen 教授、Calhoun 教授 (ジョージア工科大) との国際共同研究で、多次元脳活動時系列データに内在する、時間プリミティブとよばれる特徴的な局所時間構造を抽出する非線形特徴量抽出フレームワークである local space-contrastive learning (LSCL) を開発した。この手法を安静時および課題時の fMRI データに適用し、異なる領域、時間帯に繰り返し現れる複

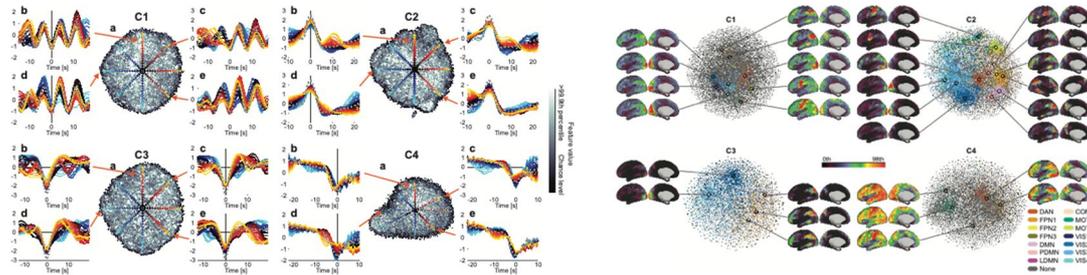


図 1: 時間プリミティブの非線形時間波形(左)、およびそれが見られる脳領域(右)。(Morioka et al., NeuroImage 2020)

数の時間プリミティブが存在すること(図 1)、および、その一部は流動性知能や作業記憶などの行動特性と関連していることを示した。

(4) Hyvarinen 教授らとともに、多次元脳活動時系列データに内在する、非線形ダイナミクスを抽出するために、加法的なイノベーションを仮定する標準的な非線形ベクトル自己回帰モデル(NVAR)を一般化したモデルのクラスを考え、independent innovation analysis (IIA)という新たな枠組みを提案した(Morioka et al., AISTATS 2021)。この解析法が、任意の非線形イノベーションに対して、真のモデル(およびこれと同値なモデル)の識別可能性をもつことを証明した。さらに、モデルに含まれる補助変数が一般の観測値(IIA-GCL)、時間などの離散観測値(IIA-TCL)、観測できない場合(IIA-HMM)のそれぞれに対して、学習アルゴリズムを開発した。脳磁図(MEG)データに対して、IIA-TCL を適用したところ、従来法より視覚刺激時と聴覚刺激時の判別パフォーマンスが有意に向上し、聴覚刺激、視覚刺激、事象関連電位に対応する成分が抽出できることが示した。

(5) 安静時や様々な課題実施時という行動状態に依存しない脳機能結合の個人特性(共通神経モード)を抽出することを目指す国際共同研究(Takagi et al., NeuroImage 2019)において、多集合正準相関分析(M-CCA)に基づくアルゴリズム開発に貢献した。この手法を大規模な安静時 fMRI データベースに適用したところ、異なる知能や能力と相関する 3 つの共通神経モード(モード 1: 流動性知能など、モード 2: 自己調整、言語能力、持続的注意など、モード 3: 方向感覚など)を発見した。さらに、この共通神経モード指標を説明変数に加えることで、知能テスト結果のみを用いる場合に比べて、収入や生活満足度などの予測精度が改善することを示した。

(6) 複雑な認知課題を実行している際に、複数の脳領域間で課題に関連する情報がどのように共有されているかを解明するための手法として、課題条件ごとに複数領域の脳活動信号間の因果関係を発見するための特徴量抽出法 demixed shared component analysis (dSCA)を開発した。これを海外共同研究者が持つ、マカクザルの意思決定課題中の神経活動記録データに適用したところ、ターゲットの場所情報については 1 つの脳領域(DLPFC)の活動が他の 2 つ(ACC と OFC)に比べて時間遅れがあり、従来法の CCA では明確でなかった因果性を示唆する結果が得られた(図 2)。その後、ATR が所有する脳波データへの dSCA の適用可能性を検証した。

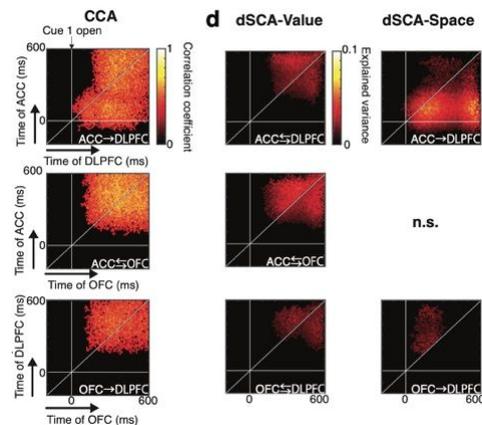


図 2: dSCA を用いたマカクザル意思決定課題データの解析(Takagi et al., NeurIPS 2020)

(7) 自然な刺激や実験デザインを用いた脳イメージングデータから、複数の脳領域間で、どのような情報がどのように共有されているかを明らかにできる、新たな解析手法 Neural dSCA を開発した(Takagi et al., arXiv 2021)。この方法は、既存の次元削減法 dSCA と、ニューラルネットワークを用いた非線形分散分析を組み合わせたもので、課題パラメータや刺激特徴ごとの非線形効果を分離することができる。映画やダンスなどの自然な映像を観ているときの脳イメージングデータを Neural dSCA を用いて解析し、従来法では捉えることができなかった、自然な感覚入力を処理する際の、多領域間の相互作用に関する新たな洞察を与える可能性を示唆する結果が得られた。

(8) 集中力を必要とする運動イメージトレーニング中の、多領域の脳活動間の因果関係を解析するために、DirectLiNGAM (引用文献)という因果解析法を、タッピング課題中の fMRI データに適用した(Ogawa et al., NeuroImage 2022)。タッピングを想像した手と反対側の外側運

動前野から初期運動野、および同側の運動前野から上頭頂葉への有向脳機能結合を抽出し、DirectLiNGAM による fMRI 因果解析の可能性を示唆する結果を得た。

(9) 集中力を必要とする運動イメージトレーニング中の脳波データを、実験参加者 9 人に対して収集した。同一腕の異なる運動イメージを判別するために、さまざまな時間窓、周波数、チャンネルの特徴量に基づくスパースロジスティック回帰(引用文献)を用いた解読法を構築した。また、課題実行時と安静状態との脳活動パターンの違いについて検証した。

(10) SPLICE 法(引用文献)から得られる特徴量に基づいて、fMRI 脳機能結合の状態を推測するフレームワークを構築し、ATR が保有する、安静時および集中が必要な課題実施時の EEG-fMRI 同時計測データに対して適用した(Ogawa et al., OHBM 2019 など)。さらに、ATR が保有するオンライン可視化システムを用いて、特徴量スコアを実験参加者にフィードバックする実験を行い(図 3)、トレーニング前後での脳活動の変化について検証した(小川他, 第 7 回日本 BMI 研究会 2020)。この研究の拡張および検証実験を ATR の他のプロジェクトで継続中である。



図 3: フィードバック実験風景

< 引用文献 >

- Hirayama J., Hyvarinen A. and Kawanabe M. (2017). SPLICE: Fully Tractable Hierarchical Extension of ICA with Pooling. Proc. of Int. Conf. on Machine Learning, PMLR 70:1491-1500.
- Shimizu S., Inazumi T., Sogawa Y., Hyvarinen A., Kawahara Y., Washio T., Hoyer P.O. and Bollen K. (2011). DirectLiNGAM: A Direct Method for Learning a Linear Non-Gaussian Structural Equation Model. J. Machine Learning Research, 12:1225-1248.
- Yamashita O., Sato M., Yoshioka T., Tong F. and Kamitani Y. (2008). Sparse estimation automatically selects voxels for the decoding of fMRI activity patterns. NeuroImage, 42:1414-1429.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 9件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Yu Takagi, Steven W. Kennerley, Jun-ichiro Hirayama and Laurence T. Hunt | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Demixed shared component analysis of neural population data from multiple brain areas | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS2020) | 6. 最初と最後の頁 6235-6244 |
| 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 |
| 1. 著者名 Morioka Hiroshi, Calhoun Vince and Hyvarinen Aapo | 4. 巻 218 |
| 2. 論文標題 Nonlinear ICA of fMRI reveals primitive temporal structures linked to rest, task, and behavioral traits | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 NeuroImage | 6. 最初と最後の頁 116989 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neuroimage.2020.116989 | 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 |
| 1. 著者名 Monti Ricardo Pio, Gibberd Alex, Roy Sandipan, Nunes Matthew, Lorenz Romy, Leech Robert, Ogawa Takeshi, Kawanabe Motoaki and Hyvarinen Aapo | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Interpretable brain age prediction using linear latent variable models of functional connectivity | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 PLOS ONE | 6. 最初と最後の頁 e0232296 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0232296 | 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 |
| 1. 著者名 Yu Takagi, Jun-ichiro Hirayama and Saori C. Tanaka | 4. 巻 201 |
| 2. 論文標題 State-unspecific patterns of whole-brain functional connectivity from resting and multiple task states predict stable individual traits | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 NeuroImage | 6. 最初と最後の頁 116036 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neuroimage.2019.116036 | 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 Ogawa Takeshi, Shimobayashi Hideki, Hirayama Jun-Ichiro, Kawanabe Motoaki | 4. 巻 247 |
| 2. 論文標題 Asymmetric directed functional connectivity within the frontoparietal motor network during motor imagery and execution | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 NeuroImage | 6. 最初と最後の頁 118794 ~ 118794 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuroimage.2021.118794 | 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 |

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Yu Takagi, Laurence T. Hunt, Ryu Ohta, Hiroshi Imamizu, Jun-ichiro Hirayama | 4. 巻 2106 |
| 2. 論文標題 Neural dSCA: demixed 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) なし | 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 Hiroshi Morioka Hermanni Halva, Aapo Hyvariene | 4. 巻 130 |
| 2. 論文標題 Independent innovation analysis for nonlinear vector autoregressive process | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of The 24th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (Proceedings of Machine Learning Research Series) | 6. 最初と最後の頁 1549-1557 |
| 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15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yu Takagi, Steven W. Kennerley, Jun-ichiro Hirayama and Laurence T. Hunt |
| 2. 発表標題 Demixed shared component analysis of neural population data from multiple brain areas |
| 3. 学会等名 Computational and Systems Neuroscience (Cosyne2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takeshi Ogawa |
| 2. 発表標題 Individual trait and brain dynamics associated with creative insight |
| 3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小川剛史、玉野竜太、蔡暢、片桐愛里沙、川鍋一晃 |
| 2. 発表標題 EEG-fMRI同時計測データを用いた脳状態推定とEEGニューロフィードバック |
| 3. 学会等名 第7回日本BMI研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takeshi Ogawa, Hiroki Moriya, Nobuo Hiroe, Takashi Yamada, Motoaki Kawanabe and Jun-ichiro Hirayama |
| 2. 発表標題 Network extraction method using hierarchical ICA-based approach: a simultaneous EEG-fMRI study |
| 3. 学会等名 25th Annual Meeting of Organization of Human Brain Mapping (OHBM2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Jun-ichiro Hirayama, Aapo Hyvarinen, Vesa Kiviniemi, Motoaki Kawanabe and Okito Yamashita |
| 2. 発表標題 Characterizing variability of brain connectivity with constrained principal component analysis |
| 3. 学会等名 Data Science, Statistics & Visualization (DVSS2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroshi Morioka |
| 2. 発表標題 Nonlinear spatial ICA of resting-state fMRI via space-contrastive learning |
| 3. 学会等名 3rd Japanese Meeting for Human Brain Imaging |
| 4. 発表年 2019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 | 小川 剛史 (OGAWA Takeshi) (10614323) | 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・主任研究員 (94301) | |
| 研究分担者 | 森岡 博史 (MORIOKA Hiroshi) (20739552) | 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・連携研究員 (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1件

| | |
|--|--------------------|
| 国際研究集会 Symposium on "Neuroscience of Creativity: individual difference and brain dynamics", at The 43rd Annual Meeting of Japanese Neuroscience Society | 開催年 2020年～2020年 |
|--|--------------------|

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 |
|---------|---------|

| | | | | |
|--------|------------|---------------------------|----------|------|
| フィンランド | ヘルシンキ大学 | | | |
| 米国 | ジョージア州立大学 | ジョージア工科大学 | エモリー大学 | 他1機関 |
| 英国 | オックスフォード大学 | University College London | ケンブリッジ大学 | 他2機関 |
| フランス | パリ・サクレ大学 | INRIA-Sacley | | |