

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：94301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25730155

研究課題名(和文)階層型統計モデルによる多次元信号処理とその応用

研究課題名(英文) Hierarchical statistical modeling for multivariate signal processing and its applications

研究代表者

平山 淳一郎 (Hirayama, Jun-ichiro)

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・専任研究員

研究者番号：80512269

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)：主に脳活動計測データを対象とし、データの特徴的な性質を発見、抽出する新たな多変量データ解析・信号処理手法を開発した。特にデータの背後の階層性を陽にモデル化することで、脳活動を特徴づける基底パターン(共活性化パターン、モジュール)の抽出と、それらに基づく大域的な変動の特徴づけを統一的に実現した。開発した各手法はシミュレーションと脳波・脳磁図や機能的MRIデータを用いて検証され、既存手法に対する優位性や実際の脳活動計測データ解析における有用性が示された。将来的な認知神経科学や神経工学等への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed novel multivariate data analysis and signal processing methods to find and extract characteristic patterns from data, focusing on applications to the analysis of functional brain activity measurements. Our methods seek to find basis patterns (coactivation patterns, modules) of brain activity, thereby characterizing the global variability of functional brain connectivity, in a unified manner by explicitly modeling hierarchical structures underlying data. We evaluated each method with simulations, electro/magnetoencephalography and functional MRI data, which demonstrated the advantages over existing methods as well as applicability to functional brain imaging data analysis. Future applications to cognitive neuroscience or neural engineering can be expected.

研究分野：機械学習

キーワード：機械学習 生体信号処理 脳機能イメージング ブレイン・マシンインターフェイス

1. 研究開始当初の背景

脳活動の非侵襲計測はヒト認知神経科学やブレイン・マシンインターフェイス(BMI)等の神経工学応用に広く用いられる。計測手法としては脳活動に伴う血流変化を計測する機能的磁気共鳴画像法(fMRI)、神経活動によって生じる電磁場を頭外に配置したセンサ群で計測する脳波(EEG)や脳磁図(MEG)が代表的である。

近年、特に fMRI を用いた安静時脳活動計測の発展により、空間的に離れた脳活動が自発的に協調する“機能的”結合やその大域的なパターン(ネットワーク)が調べられるようになり、それらと脳機能の関連に注目が集まっている。その解析のため、既存手法の組み合わせだけでなく、非侵襲脳活動計測データ特有の問題や性質にあわせた新たな統計的信号処理・多変量解析の技術開発が必要とされる。

また、脳機能研究の主流である fMRI は高い空間分解能に強みがあるが、時間分解能は秒単位と低い。そのため、脳活動の動的な性質の解明や BMI への応用には、fMRI 以外に神経活動と同等のミリ秒単位の高い時間分解能をもつ EEG/MEG の利用が期待される。しかし、EEG/MEG の計測データは多数の信号源の影響を重ねあわせたものとなるため、そこから興味のある信号源を分離・抽出する必要があり(図1左)、fMRI と比較して解析が複雑になるという問題がある。

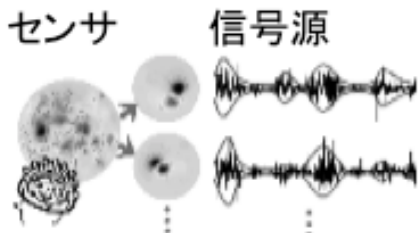


図 1

2. 研究の目的

主に脳活動計測データを対象とし、データの特徴的な性質を発見、抽出する新たな多変量データ解析・信号処理手法を開発する。特に、脳活動を特徴づける時空間的な基底パターン(共活性化パターン、及びモジュール)の抽出(図2)と、それらに基づいて大域的な結合関係の変動を特徴づける解析な変動の特徴づけを適切に行う手法の開発を行う。

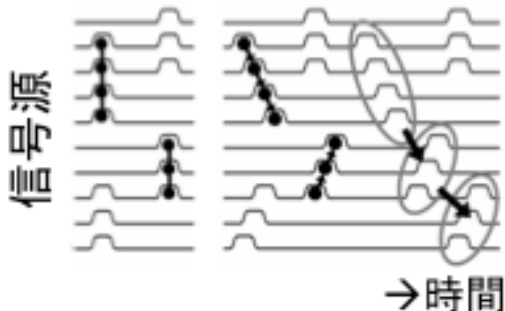


図 2

開発にあたっては、脳活動計測データの性質を考慮した階層型統計モデルを構築することで、EEG/MEG における信号分離と信号源レベルでの結合性解析のような、多段階の処理過程を統一的に取り扱う方法論を構築する。また、開発した手法を実際の脳活動計測データ解析に応用するとともに、既存手法との比較検証を行うことで、提案手法を脳活動計測データ処理の新たな手法として確立し、将来的な認知神経科学や BMI 応用等への利用可能性を示す。

3. 研究の方法

(1)階層型統計モデルに基づく独立成分分析(ICA)の拡張: ICA は EEG/MEG の信号源分離に標準的に用いられる手法の1つであるが、通常仮定される信号源間の独立性は機能的結合を伴う脳活動の性質にはそぐわない。実際に、ICA で分離した脳信号源では、しばしばそれらの活性度(短期間分散)間に相関が見られ(図1右)、信号源間のこうした「共活性化(coactivation)」のパターンは、安静時脳活動における機能的ネットワークの典型的な特徴づけの1つである。

こうした非独立な EEG/MEG 信号源における信号源分離と信号源間の共活性化パターンに基づく機能的結合解析を統一的に実現するため、ICA を階層化した階層型統計モデルである Latent Coactivity Mixture Model (LCMM; 図3) を定式化し、その効率的なパラメータ推定アルゴリズムの開発を実施した。このモデルでは、離散的な状態変数  $k$  がある事前確率に従って生成され、信号源は状態毎に異なる共活性化(分散)パターンを示す。観測は通常の ICA と同様に、信号源の線形重ねあわせによって得られる。特に EEG/MEG 信号源の振動的な性質に対応するため、観測信号を狭帯域の複素解析信号(実部と虚部がヒルベルト変換対)とし、状態毎の信号源分布を複素多変量  $t$  分布とした(分散をロバストに推定)ことに特色がある。

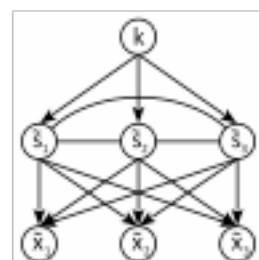


図 3

開発した手法の評価のため、シミュレーションによる基本的な性能検証を実施した。特に、異なる条件(ノイズの大きさ、真の状態数の違い等)における提案手法の有効性を検証した。また、研究協力者(小川剛史博士、ATR)より提供を受けた安静時 EEG データへの適用を行った。データは非侵襲 BMI で典型的な運動想像課題の実施前後に取得した安静時 EEG 計測によるもので、ここでは安静時

データから求めた信号分離フィルタと共活性化パターンから、運動想像と非想像の2条件の識別への汎化性を2帯域 ( $\alpha$ : 8-12Hz,  $\beta$ : 13-30Hz)、5被験者について検証した。

(2)機能的な結合関係の大域的な変動を定量化するための多変量解析手法の開発を実施した。ここでは fMRI および EEG/MEG 信号源 (パワー) に関して結合関係を表す行列 (機能的結合行列) が被験者もしくは時間窓毎に陽に与えられている状況を考察した (図4)。

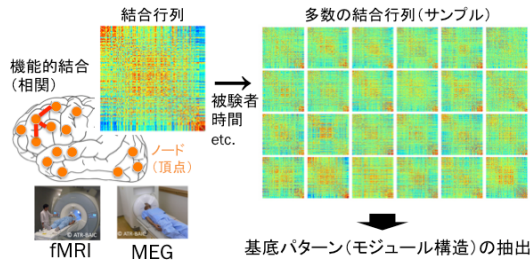


図 4

手法は fMRI 関心領域もしくは EEG/MEG 信号源の各々をノードとし、ノードを部分的にひとまとめにした機能単位 (モジュール) の抽出と、モジュール間結合関係の変動パターン解析を統一的に実現する。背後にノードとモジュールの階層性を考慮した階層型統計モデルを想定するが、具体的には Leonardi ら (参考文献②) による機能結合行列の行列値主成分分析 (PCA) 法に制約を導入したアルゴリズムとして実装した。

第一に、結合行列 PCA における基底パターン (固有結合) を2つのモジュール間の総体的な結合関係のみを表すよう制約し (図5)、各モジュールへのノード割当ての重みベクトル同士を正規直交とした新たな制約付き PCA 法を開発した。第二に、これを発展させ、固有結合がモジュール間だけでなくモジュール内の変動や3モジュール以上を扱えるよう修正した手法を開発した。

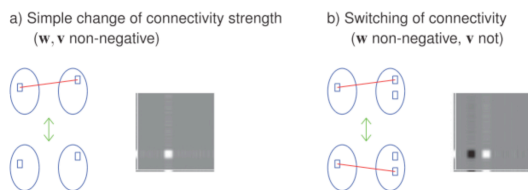


図 5

開発や結果の解釈にあたっては研究協力者ら (ATR、ヘルシンキ大、オウル大学病院) と共同で実施した。手法の評価は Web 公開されている約 1000 人の fMRI 機能的結合行列 (USC Multimodal Connectivity Database; <http://umcd.humanconnectomeproject.org>) および安静時 MEG データ (研究協力者による解析) を用いて実施した。

#### 4. 研究成果

(1) ICA による EEG/MEG 信号源分離を発展させ、信号源分離と信号源間の共活性化パターン

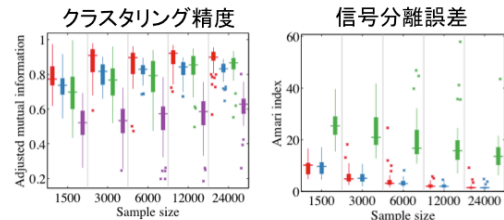
抽出の二段階の解析を階層型統計モデル (LCMM) に基づく統一的な枠組みで実現する共活性化成分分析法を開発し、基本的な性能検証と安静時 EEG データ解析における有用性の実証を終えた (論文③、発表①③)。研究当初における文献調査等の一部は解説記事 (論文④) 執筆に活かされた。

提案手法は脳活動に有限個の異なる状態を仮定し、予め興味のある周波数帯域に制限した計測信号から信号源を分離し、それらの活性化パターンを各状態へ教師なし分類 (クラスタリング) する (図6)。状態数の決定は一般の混合分布モデルにおける手法を援用し、ベイズ情報量基準を用いて行う。



図 6

人工データを用いたシミュレーション (図7) では、従来方式である二段階推定法と比較して、提案した階層型統計モデルによる統一的な扱いの優位性が示された。また、ヒルベルト変換を介した複素信号表現を用いることで、信号源の共活性化状態を比較的安定に推定できることが示された。



- 複素数値LCMM (提案手法)
- 実数値LCMM
- 二段階法1 (複素ICA + 混合t分布クラスタリング)
- 二段階法2 (複素ICA + K-平均クラスタリング)

図 7

実際の安静時 EEG データ解析では、運動想像課題の実施前後に取得した安静時活動から課題関連のパターンが抽出された (例: 図8)。これは日常環境での自然な脳活動について、脳波から意味のある脳状態を読み取りうる可能性を示唆し、ブレイン・マシンインターフェイス技術等の高度化への寄与が期待される。

本成果は、従来の二段階法と比較して階層モデルによる統合解析の有効性を初めて明確に示した点、近似に依らない実用的なアルゴリズムを提示した点で意義が大きい。統合解析の必要性は例えば BMI のための EEG 信号



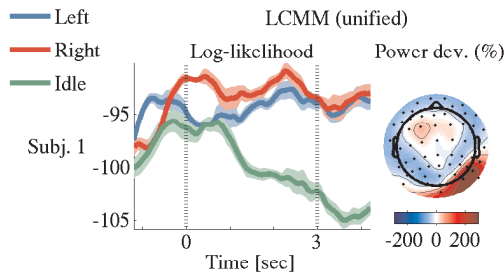


図 8

解析のレビュー（参考文献①）でも指摘されていたが、具体的な研究例はなく、国際的に見ても新規性が高い。

今後の展望としては、提案手法の制約を緩和し、最上位の状態変数を連続量とした新たな階層型統計モデルへと発展させることを想定している。また、本研究で検証を終えた基本的な2階層モデルを3階層以上へ拡張することで、脳情報解析のための新たな「深層学習」手法への展開が期待される。現在、こうした拡張を試作し、シミュレーション等による性能検証を進めている。

(2) fMRI 関心領域や EEG/MEG 信号源強度などが示す大域的な結合（相関）関係の被験者間・時間変動の解析のため、基底となる少数のモジュールの抽出とモジュール間結合関係の変動パターン分析の二段階の解析を統一的に実現するモジュール制約つき行列値 PCA 手法を開発した。モジュール数が2の場合に限定した「直交結合性因子化(OCF)」法について基本的な性能検証と安静時 fMRI および MEG データ解析での有用性の実証を終えた（論文②、発表④）。また、モジュール数が2以上への拡張である「モジュール結合性因子化(MCF)」法について基本的なアルゴリズムの検証を終え（発表②）、詳細なシミュレーションと安静時 fMRI データ解析で有用性を検証した（論文投稿中）。性能向上のため、開発済みであった高度な時変ネットワーク推定法の利用を検討し、その際に得た知見の一部は当該手法の論文①に含めた。

安静時 fMRI や MEG 計測データ解析では、よく知られた機能的ネットワークであるデフォルト・モードネットワークや Salience ネットワーク等がモジュールとして抽出された（図9）。さらにモジュール間・モジュール内の固有結合パターンが抽出され、開発した手法特有の神経科学的にも興味深い知

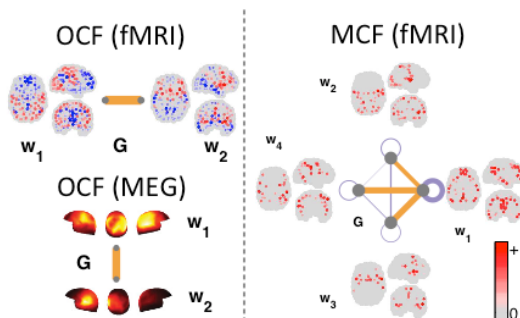


図 9

見が得られた。

以上の成果により、高次元データである機能的結合行列の変動を、不変なモジュールパターンを基底とした低次元のモジュール間結合の変動として捉えることが可能となった。近年、脳機能イメージング分野において、大域的な機能的結合関係の被験者間・時間変動から意味のあるパターンを抽出する方法論の開発が国内外で盛んに進められているが、ほとんどは既存の汎用的な手法の組み合わせにとどまる。それらに対し、本成果は背後に適切な階層型統計モデルを導入した統一的なアプローチを初めて導入した点で新規性が高い。特に脳活動計測データは一般に高次元、少数サンプルとなるため、モジュール性等の事前知識を導入して推定効率や解釈性を高める意義が大きい。今後は同様のモジュール構造の PCA 以外の手法との組み合わせや、成果(1)と同様の EEG/MEG 信号源分離手法との融合を進める予定である。

#### <参考文献>

- ①S. Makeig, et al. (2012). Evolving signal processing for brain-computer interfaces. *Proceedings of the IEEE*, 100, 1567-1584.
- ②N. Leonardi, et al. (2013). Principal components of functional connectivity: A new approach to study dynamic brain connectivity during rest. *NeuroImage*, 83, 937-950.

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

- ①J. Hirayama, A. Hyvärinen and S. Ishii. Sparse and low-rank matrix regularization for learning time-varying Markov networks. *Machine Learning*, in press. 査読有
- ②A. Hyvärinen, J. Hirayama, V. Kiviniemi and M. Kawanabe. Orthogonal connectivity factorization: Interpretable decomposition of variability in correlation matrices. *Neural Computation*, 28(3), 445-484, 2016. 査読有
- ③J. Hirayama, T. Ogawa and A. Hyvärinen. Unifying blind separation and clustering for resting-state EEG/MEG functional connectivity analysis. *Neural Computation*, 27(7), 1373-1404, 2015. 査読有
- ④平山 淳一郎, 石井 信. 潜在空間モデリングによる時系列からの再構成. *電子情報通信学会誌*. Vol. 97, No. 5, pp. 399-404. 2014. 査読無

〔学会発表〕（計4件）

- ①J. Hirayama, T. Ogawa and A. Hyvärinen. Unifying blind separation and clustering for resting-state EEG/MEG functional

connectivity analysis. Germany-Japan Adaptive BCI Workshop, 2015 年 10 月 29 日, 京都大学 (京都府京都市)

②平山 淳一郎, Aapo Hyvärinen, 川鍋 一晃, 山下 宙人. 脳結合の変動を縮約するモジュール制約付き主成分分析. 第 25 回日本神経回路学会全国大会(JNNS2015). 2015 年 9 月 3 日, 電気通信大学 (東京都調布市).

③J. HIRAYAMA, T. Ogawa and A. Hyvärinen. Simultaneous blind separation and clustering of coactivated EEG/MEG sources for analyzing spontaneous brain activity. The 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC' 14), 2014 年 8 月 29 日, Chicago (USA).

④ A. Hyvärinen, J. HIRAYAMA and M. Kawanabe. Dynamic Connectivity Factorization: Interpretable decompositions of non-stationarity. International Workshop on Pattern Recognition in Neuroimaging (PRNI' 14), 2014 年 6 月 5 日, Tübingen (Germany).

[その他]

ホームページ等

共活性化成分分析 (LCMM) ソースコード公開  
<http://www.cns.atr.jp/~hirayama/software.html>

直交結合性因子化 (OCF) ソースコード公開  
<https://www.cs.helsinki.fi/u/ahyvarin/code/ocf/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平山 淳一郎 (HIRAYAMA, Jun-ichiro)  
株式会社国際電気通信基礎技術研究所  
(ATR)・脳情報通信総合研究所・専任研究  
員  
研究者番号 : 80512269

### (2) 研究協力者

Aapo Hyvärinen, ヘルシンキ大学 (フィン  
ランド)

Vesa Kiviniemi, オウル大学病院 (フィン  
ランド)

小川 剛史 (OGAWA, Takeshi), 株式会社  
国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)

川鍋 一晃 (KAWANABE, Motoaki), 株式会  
社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)

山下 宙人 (YAMASHITA, Okito), 株式会  
社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)

石井 信 (ISHII, Shin), 京都大学