

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：94301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300093

研究課題名(和文) 強化学習モデルによるヒトの潜在的な心理状態の予測に基づく共通適応BMI

研究課題名(英文) Co-adaptive BMI by reinforcement learning based on prediction of users' latent mental states

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・認知機構研究所・主任研究員

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)：ヒトの潜在的な心理状態に応じた柔軟なフィードバック・スキームを提供するリアルタイム共通適応BMIアルゴリズムの確立をめざして、BMIデコーダ構築するための強化学習法と心理状態推定のための脳情報表現法を研究開発し、ランプによるBMIフィードバック装置を用いて評価実験を行った。前者については、重み付尤度に基づき、心理状態の次元数とその間の遷移則などに関する最適状態変数モデルの決定、適切な方策モデルの設計、およびそのもとの強化学習を同時に行う枠組みを確立した。一方後者については、標準的な特徴量抽出法であるCSPを脳信号の被験者間の違いや非定常性に対してロバストにするための様々な一般化を提案した。

研究成果の概要(英文)：Toward a real-time co-adaptive BMI algorithm for providing flexible feedback schemes based on users' latent mental states, we developed reinforcement learning procedures to construct BMI decoders and representations for brain activities to infer the mental states. For the former topic, based on the weighted likelihood, we establish a theoretical framework to determine the optimal state modeling, namely the dimension of the mental states and their transition rule, to design an appropriate policy model, and to execute reinforcement learning simultaneously. For the latter topic, we proposed various generalizations of the standard feature extraction method CSP (common spatial pattern) to construct robust features against subject-to-subject variability and non-stationarity in brain signals. By integrating these element technologies, we implemented a BMI feedback device with portable EEG and a ball lamp, and tested its usefulness with a few subjects in a real-world environment.

研究分野：医用工学・機械学習

キーワード：ブレイン・マシン・インタフェース 強化学習

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初から、EEG などの非侵襲脳活動計測信号から読み取ったヒトの意図（例えば左右どちらかの手を動かすイメージ）を、タイプライタなどの文字入力ツール、車イスなどの運動補助システム、てんかんの診断や脳卒中のリハビリといった臨床医療などに適用する BMI の応用分野が広がりつつある。BMI では車イスなどのデバイス本体からもある程度は情報が得られるが、デコーダの連続値出力を、視覚などを通じて直接フィードバックすることにより被験者の学習促進をはかるのが一般的であった。

BMI は従来、次の 2 種に大別されていた。

- 1) デコーダをあらかじめ固定し、フィードバック信号に基づいてヒトが長期にわたりオペラント学習を行うもの。
- 2) フィードバックなしで数十分間の較正用データを計測し、機械学習法によりコンピュータ側が適切なデコーダを学習するもの。

これに加え、新たな第 3 の BMI として、Vidaurre et al. (*Neural Computation* 2011) は、ヒトの学習の進展ステージに応じた 3 種類の異なるデコーダを用意し、それらを順番に切り替えてフィードバック学習をすることにより、これまで BMI を使えなかった被験者が使えるようになるという結果を発表し、共通適応的な BMI の可能性を示唆した。しかし、この論文は 3 種のフィードバック・ステージをあらかじめ固定された順序で提示しただけに過ぎず、発見的な方法にとどまっていた。したがって、非定常なヒトの状態に適合したフィードバック学習スキームを理論的および実証的に研究することが求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、BMI を使用中に学習や疲労などによりヒトの脳活動状態が非定常的に変化することを数理的にモデル化することによって、ヒトの潜在的な心理状態に応じた柔軟なフィードバック・スキームを提供するリアルタイム共通適応 BMI アルゴリズムを確立することとした。ここで「共通適応」とは機械もヒトも共に適応的に学習することを指す。従来のパラダイムでは訓練を重ねても BMI を使用できない被験者も、機械が解読可能な脳活動パターンの発生のさせ方を学習できるようになれば、将来的には様々な BMI の汎用性を高めるために役立つ。また、2 つのエージェントが相互の行動履歴を参照しながら自身の行動戦略を適応的に変化させていく共通適応学習問題は様々な分野、たとえば生物学：協依存関係にある種の進化、社会心理学：チーム内での協調的な問題解決、などに適用可能であるため、幅広い分野に影響を与えうる。

## 3. 研究の方法

本研究の核として、強化学習による BMI デコーダの構築を行う。共通適応 BMI 問題に対して古典的な強化学習を適用することは、学習性能、ならびにモデリングの自由度の観点から現実的ではない。よって、本研究では良好な学習性能を持ち、かつ拡張性に富むモデリングを実現可能な新しい強化学習の数理基盤を開発する。

また、EEG 信号からヒトの心理状態を抽出する共通適応 BMI のための脳活動の情報表現の構築にあたっては、その非定常性と BMI タスクへの関連性の両方を考慮に入れる必要がある。従って、非定常性に対してロバストな情報表現の研究を実施する。

## 4. 研究成果

BMI デコーダを強化学習により構築するための理論的枠組みの整備を行った。被験者と BMI デコーダの 2 つの要素を含む共通適応 BMI システムにおいて、ヒトの心理状態をモデル化するための潜在状態の次元数、およびその間の遷移則などを観測データから適切に定める必要がある。Ueno et al. [9] はより一般的な枠組みにおいて、重み付尤度に基づく方策探索法に対して、上記のようなモデル化における多数の選択肢の中から最適なモデルの決定と、そのもとでの強化学習を同時に実行する手法を提案した。同時に、方策学習の性能を理論的に解析し、方策モデルの設計法を確立した。このアルゴリズムは共通適応 BMI の問題にも適用可能である。

さらに、この重み付き尤度に基づく方策探索法の枠組みを、ヒトの心理状態に対応する潜在変数を導入した混合型の方策関数に拡張し、潜在変数に関する統計モデルの推定と各モジュールでの強化学習を同時に実行するための理論体系を導出した。さらに、最適な方策パラメータを用いる際に用いる Q 関数をカーネル近似することにより実用的なアルゴリズムを開発・実装した。

また、実問題に必要な拡張性に富んだモデルの下でも良好な学習性能を持つ Kullback-Leiber (KL) ダイバージェンスに基づく強化学習の一般的な枠組みを提案した。この論文では、強化学習をグラフィカルモデルの推論問題へ変換することで、確率推論法から様々な強化学習法を導出できることを示すとともに、方策学習の大域解への収束条件を議論し、実用的なモデルにおいても最適な方策のよい近似を与える新しい強化学習法を構築した。この学習法のツールボックスを作成するとともに、共通適応 BMI に適応するためのモデルと報酬を検討・定式化した。

脳活動の情報表現の構築においては、EEG などの多次元時系列信号を定常および非定常

成分に分解する Stationary Subspace Analysis (SSA)とタスク関連情報を有する成分を抽出する Common Spatial Pattern (CSP)を組み合わせることにより、BMI の効率を高められることを示した[8]。図 1 に示したように判別能力が高く定常的な脳活動の空間パターン(2行2列目)として右運動野(左手担当領域)に対応するものが抽出できた。

加えて、非定常性に対してロバストな情報表現を構築するための方法として、maxmin CSP [3]、ベータダイバージェンスによる CSP 法[5]、ダイバージェンスに基づく空間フィルタ構築法の一般的な枠組み[4]などの学術的成果を挙げた。

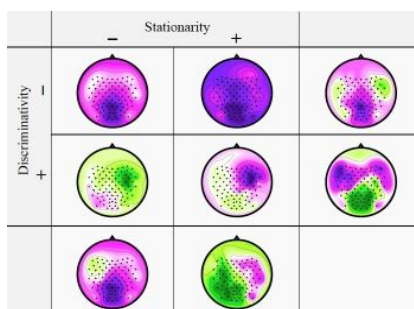


図 1 定常性 (Stationarity) と判別能力 (Discriminativity) による脳活動空間パターンの分類[8]。8つのパターンは頭部を上から俯瞰した図で、上側が前頭部、下側が後頭部。

また、他の被験者のデータを用いて新たな被験者の内部状態推定を行う転移学習法[1]を構築した。これは、辞書学習に基づき多数の被験者の EEG データを共通パターンと被験者・セッションの固有の変換に分解することで、個人および時間という変動要因に依存しないヒストグラム型の情報表現を抽出する手法であり、共通応 BMI においてよりよい内部状態モデリングが可能となる。さらに、上記の被験者・セッションの固有の変換の類似度を可視化したところ、各被験者内で課題時と安静時の違いが被験者間の差に比べて小さいことが判明したので、新たな被験者が負荷の高い BMI 訓練セッションを行うことなく、他人のデータを利用して安静時脳活動計測のみで BMI が可能となる転移学習技術を開発した。

最後に、各研究要素を統合することで、ランプを用いた BMI フィードバック実験を実施し(図 2) 精度が向上することを確認した。ただし、実環境における簡易脳波信号は日間変動も大きく、今後も被験者を増やして検証を継続していく予定である。

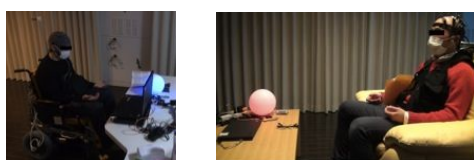


図 2 ランプを用いた BMI フィードバック装置と実験風景

## 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 16 件)

- [1] H. Morioka, A. Kanemura, J. Hirayama, M. Shikauchi, T. Ogawa, S. Ikeda, M. Kawanabe, S. Ishii, “Learning a common dictionary for subject-transfer decoding with resting calibration,” *NeuroImage*, vol. 111 pp. 167–178, 2015.
- [2] H. Morioka, A. Kanemura, S. Morimoto, T. Yoshioka, S. Oba, M. Kawanabe, S. Ishii, “Decoding spatial attention by using cortical currents estimated from electroencephalography with near-infrared spectroscopy prior information,” *NeuroImage*, vol. 90, pp. 128–139, 2014.
- [3] M. Kawanabe, W. Samek, K.-R. Müller, C. Vidaurre, “Robust common spatial filters with a maxmin approach,” *Neural Computation*, vol. 26, pp. 349–376, 2014.
- [4] W. Samek, M. Kawanabe, K.-R. Müller, “Divergence-based framework for common spatial patterns algorithms,” *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 7, pp. 50–72, 2014.
- [5] W. Samek, D. Blythe, K.-R. Müller, M. Kawanabe, “Robust spatial filtering with beta divergence,” *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, vol. 26, 2013.
- [6] 植野剛、前田新一、川鍋一晃、“統計学習の観点から見た TD 学習”、計測と制御、vol. 52、pp. 277–283、2013。
- [7] Y. Sogawa, T. Ueno, Y. Kawahara, T. Washio, “Active learning for noisy oracle via density power divergence,” *Neural Networks*, vol. 46, pp. 133–143, 2013.
- [8] W. Samek, K.-R. Müller, M. Kawanabe, C. Vidaurre, “Brain-computer interfacing in discriminative and stationary subspace,” *Int. Conf. IEEE Engineering Medicine Biology Society (EMBC)*, pp. 2873–2876, 2012.
- [9] T. Ueno, K. Hayashi, T. Washio, Y. Kawahara, “Weighted likelihood policy search with model selection,” *Advanced in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, vol. 25, pp. 2366–2374, 2012.

〔学会発表〕(計 27 件)

- [1] H. Morioka, A. Kanemura, J. Hirayama, M. Shikauchi, T. Ogawa, S. Ikeda, M. Kawanabe, S. Ishii, “Subject-independent BMI through sparse learning of spatial bases common across sessions and subjects,” *Neuroscience*, Yokohama, Japan, 2014.
- [2] 植野剛、“e 射影に基づく方策探索法”、

- 人工知能学会全国大会 (JSAI) 松山、2014。(優秀発表賞)
- [3] 植野剛、“確率推論に基づく方策探索法 (招待講演)”、ERATO 河原林 AI セミナー、国立情報学研究所、東京、2014。
- [4] 川鍋一晃、“ブレイン・マシン・インタフェースのための非定常性に対してロバストな脳波特徴量の構築法について (招待講演)”、北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科セミナー「脳機能イメージング信号処理の最前線」、石川、2014。
- [5] 川鍋一晃、“日常環境ブレイン・マシン・インタフェースのための脳情報解読法について (招待講演)”、NAIST セミナールI、奈良、2014。
- [6] A. Hyvärinen, J. Hirayama, M. Kawanabe, “Dynamic connectivity factorization: Interpretable decompositions of non-stationarity,” *Int. Workshop Pattern Recognition Neuroimaging (PRNI)*, Tübingen, Germany, 2014.
- [7] M. Kawanabe, “Robust feature construction against non-stationarity for EEG-BMI decoders (Invited Talk),” *Int. Winter Workshop Brain-Computer Interface*, Korea, 2014.
- [8] W. Samek, D. Blythe, K.-R. Müller, M. Kawanabe, “Robust spatial filtering with beta divergence,” *Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Lake Tahoe, NV, USA, 2013.
- [9] A. Kanemura, J. Yuan, Y. Kawahara, “Finding structured dictionary representation by network-flow optimization,” *Workshop on Data Discretization and Segmentation for Knowledge Discovery (DDS)*, Yokohama, Japan, 2013.
- [10] 植野剛、“学習による制御：強化学習 (招待講演)”、計測・制御・システム工学部会シンポジウム、千葉、2013。
- [11] T. Ueno, “Semiparametric statistical inference to reinforcement learning (Invited Talk),” *Bernoulli Society Satellite Meeting to the ISI World Statistics Congress*, Tokyo, Japan, 2013.
- [12] T. Ueno, K. Hayashi, T. Washio, Y. Kawahara, “Weighted likelihood policy search with model selection,” *Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Lake Tahoe, NV, USA, 2012.
- [13] 植野剛、“統計推論の観点から強化学習を考える (招待講演)”、統計数理セミナー、東京、2012。
- [14] 植野剛、“確率推論に基づく強化学習・確率最適制御 (招待講演)”、情報論的学習理論ワークショップ (IBIS) 東京、2012。
- [15] 兼村厚範、“統計的画像処理におけるモ

デリングの方向性について (招待講演)”、人工知能学会基本問題研究会 (FPAI) 横浜、2012。

- [16] 植野剛、“直接方策探索法の統計解析 (招待講演)”、統計的機械学習セミナー、東京、2013。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 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・主任研究員  
研究者番号：30272389

### (2) 研究分担者

兼村 厚範 (KANEMURA, Atsunori)  
独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・研究員  
研究者番号：50580297

植野 剛 (UENO, Tsuyoshi)  
大阪大学・産業科学研究所・招聘研究員  
研究者番号：90615824

### (3) 連携研究者

鷲尾 隆 (WASHIO, Takashi)  
大阪大学・産業科学研究所・教授  
研究者番号：00192815