

脳活動・自律神経活動の融合解析によるハイブリッド型 BCI の研究開発 (112103010)

Brain-computer interface by hybridized analysis of brain activity and autonomic nervous activity

研究代表者

小谷 潔 東京大学

Kiyoshi Kotani The University of Tokyo

研究分担者

なし

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

本研究では、脳活動と循環器活動の計測によって内部状態を評価し、ブレイン・コンピュータ インタフェース (BCI: Brain-Computer Interface) に応用する技術を開発した。はじめにひやりはっと状態や知的作業 (暗算課題、記憶課題) 時の皮質脳活動および自律神経活動を解析し、特徴を抽出・識別する手法を構築した。次に、ハイブリッド型 BCI として、脳活動と自律神経活動をリアルタイムに評価し、匂い刺激によって知的作業支援を行うプラットフォームを開発した。

1. まえがき

近年、脳波などの脳活動から被験者の意図を読み取る研究が BCI (Brain-Computer Interface) として積極的に進められている。しかしながら、現在の BCI 技術は随意運動情報の抽出に特化しており、そのため実用面からみると福祉領域に限定された支援技術となっている。一方で、脳は遠心路の自律神経活動によって末梢臓器を支配しているため、末梢臓器から自律神経活動をリアルタイムに読み取り、脳活動計測と融合することで、より実用的なインタフェース構築が可能である。脳活動は非常に多くの情報量が反映された活動であるが、S/N 比が低いために非侵襲で細かな思考・感情変化を抽出することが困難という欠点がある。一方で、自律神経活動は分類可能な状態に限られており取得可能な情報量は少ないが、脳活動よりも S/N 比が高く活動状態を正確に評価可能である。そこで、本研究ではこれらの特性を考慮することで、脳活動と自律神経活動の融合解析を行い、それぞれの欠点を補って利点を活かしたハイブリッド型 BCI として、効果的なインタフェースを構築する。

2. 研究開発内容及び成果

2.1. タスク時の脳活動、自律神経活動評価

脳・循環器活動の数理モデルを構築し、神経系の伝達遅れを持つ力学系に関して、有効な解析解および近似解の導出手法を開発した。中でも視床-皮質モデルについて、そのダイナミクスを時間遅れ微分方程式系の縮約理論によって解析的に扱う手法を開発した。その結果、皮質間の相互作用によって生じる複雑な同期特性を含めたリズム現象の数理について、解析的に扱うことを可能とした (図 1)。

次に、数理モデルを用いて生体計測信号から内部状態を推定する技術を開発した。その手法を睡眠時脳波に適用し、睡眠ステージに応じて皮質間の興奮性・抑制性神経活動のバランスを表すパラメータが変化することを示し、睡眠ステージ評価への有効性を示した。また、脳・循環器相互作用のモデルから、NIRS (近赤外光トポグラフィ) 信号から神経活動を精度良く推定する手法を開発した。その結果、ブロックデザインによる記憶タスク時の脳活動について、加算回数が少ない場合においても精度良く神経活動を推定可能であることを示した (図 2a)。

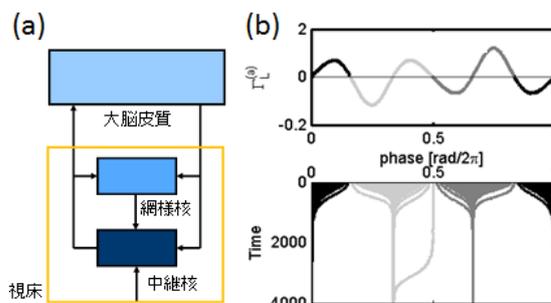


図 1 視床-皮質モデルを用いた解析 (a) 視床-皮質モデルのダイアグラム (b) 同期特性の評価と検証。時間遅れ微分方程式系の理論解析手法を発展させ、複数の位相差で同期が起こる現象 (Multimodal phase-locking) を解析的に予見し、シミュレーションによって理論の妥当性を確認した。

さらに、外部刺激に対する生体反応の評価実験を行い、適切な解析手法を構築した。はじめに循環器計測から自律神経活動をリアルタイムに評価するシステムを構築し、姿勢変化に起因する自律神経バランスの変化を 95% 以上の精度で識別可能であることを示した。また、ひやりはっと状態の識別に対して循環器活動および発汗量の計測から被験者のひやりはっと反応を検出するアルゴリズムを構築した。定量的な評価実験の結果、85% の検出が可能であった。さらに、短期記憶課題時の NIRS 信号の解析によって、記憶タスクのパフォーマンスにおける神経活動が高い状態と低い状態での神経活動の違いを評価し、両者を統計的に有意な差 ($P < 0.05$) として評価することができた (図 2b)。

2.2. 匂い刺激システムの支援評価

外部からのバイオフィードバック技術として、本研究ではエアポンプと電磁弁を用いた定量性・再現性の高い匂い刺激システムを構築した。構築したシステムによる匂い刺激によって暗算課題・記憶課題において、それぞれに統計的に有意なパフォーマンス (正答率) の向上がみられた ($P < 0.05$)。さらに、暗算課題時には脳波の Fm θ 波 (Frontal-midline theta wave) の有意な増加 ($P < 0.05$) が認められた。

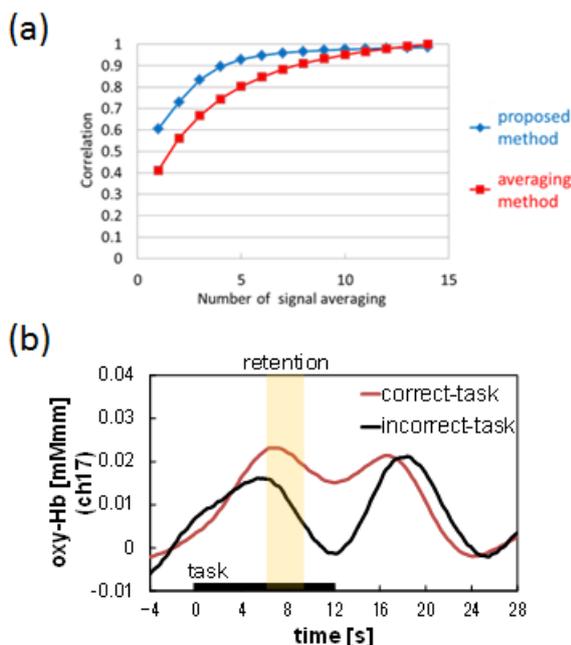


図 2 (a)記憶タスク評価による試行数と結果の相関。循環器-脳活動融合解析の結果、従来法よりも少ない試行数で精度の高い評価が可能となった。(b)記憶タスクパフォーマンスと NIRS 信号解析の結果。正答タスク時には脳血流の有意な増加 ($P<0.05$) がみられた。

2.3. ハイブリッド型 BCI プラットフォームの構築

これまでに得られたタスク、パフォーマンスと生体信号の知見を実際の生活環境での支援に役立てるため、ハイブリッド型 BCI システムのプラットフォームを構築した。構築したシステムは図 3 の通りである。被験者は無線生体信号計測センサによって身体活動を制限されることなく作業を行うことが可能である。生体信号（心電図、呼吸、脳波、NIRS）は無線によって解析プラットフォームに送信され、リアルタイムで自律神経活動、脳電気活動、脳血流の解析が行われる。その結果、被験者の状態を識別し刺激制御部に信号を送る。本装置においては被験者に暗算課題を課し、外部刺激として匂い刺激を与えるデモを行った。その結果、Fm θ 波の低下に応じて匂い刺激を与え、Fm θ 波の回復と暗算パフォーマンスの上昇が認められた。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

今後、脳活動および循環器活動の非侵襲計測から内部状態を読み取る要素技術をさらに発展させ、継続的に得られた知見・技術をハイブリッド BCI プラットフォーム上に実装していくことで、システム全体としてより柔軟で支援効果の高いものと発展して行く。さらに、実生活での簡便な使用を想定してセンサの小型化や装着の容易さなどハード面の改良を行い、職場での安全管理や知的作業支援に幅広く発展させることが期待される。

4. むすび

本研究開発においては新しい BCI システムにおいて、基礎フェーズの生体情報の読み取り技術の開発および応用フェーズのハイブリッド型 BCI プラットフォームの開発まで幅広く取り組み、支援の有効性を示すことができた。

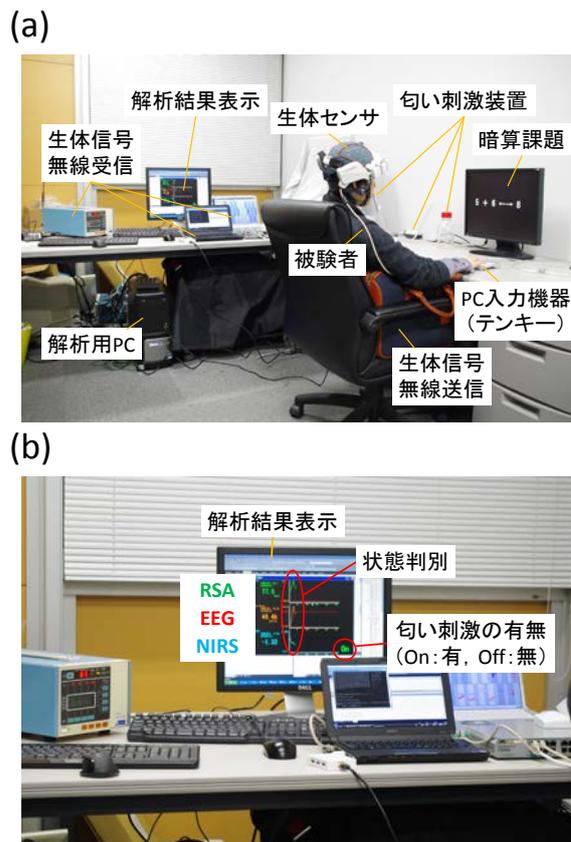


図 3 構築したハイブリッド BCI プラットフォーム (a)システムの概観 (b)状態表示・コントロール画面

【誌上発表リスト】

- [1] K. Kotani, I. Yamaguchi, Y. Ogawa, Y. Jimbo, H. Nakao, and G. B. Ermentrout, "Adjoint Method Provides Phase Response Functions for Delay-Induced Oscillations", *Physical review letters*, 109, 44101 (2012)
- [2] K. Kotani, H. Ogawa, H. Ogata, T. Numata, K. Nakazawa, and Y. Jimbo: Method for evaluation of fractal properties from data with noisy observational errors *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 8, 247-252 (2013)
- [3] T. Numata, K. Kotani, and Y. Jimbo, Effect of body motion to respiratory sinus arrhythmia with different timings of respiration, *International Journal of Bioelectromagnetism*, 15, 47-53 (2013)

【受賞リスト】

- [1] 岸田悠志, 平成 24 年電子・情報・システム部門優秀ポスター賞, "ニオイ刺激のバイオフィードバック応用に向けた脳・循環器応答の評価", 平成 24 年電気学会 電子・情報・システム部門大会 2012.9.6
- [2] 小谷潔, 中山賞奨励賞, "非線形動力学を用いた生体調節機構の解明と生活支援システムへの応用" 2012.9.9
- [3] Y. Ogawa, IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter Young Researcher Award (SCIS & ISIS 2012) "An Analysis of Neural Activations Measured with the Near Infrared Spectroscopy during Working Memory Tasks" 2012.11.22

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://neuron.t.u-tokyo.ac.jp>