

内在脳活動の辞書学習 —— 脳波信号からのヒト高次脳機能解明 ——

Dictionary learning of intrinsic brain activities
—— Toward understanding human higher cognitive functions from EEG ——

2171015



研究代表者

北陸先端科学技術大学院大学

田 中 宏 和

[研究の目的]

機械が人間を支援するためにはヒト高次脳機能の理解は不可欠である。一般的に脳活動は誘発脳活動と内在脳活動に分類される。誘発脳活動は感覚刺激や運動出力といった外部事象と時間的に同期した脳活動であり、内在脳活動は意思決定・視覚意識・記憶に代表される外部事象から直接推定できない脳活動である。これまでの脳波研究は誘発脳活動に重点が置かれており、外部事象タイミングが利用できない内在脳活動に関しては理解が進んでいない。ハードウェア・ソフトウェア両面の進歩により、身体運動を拘束することのない自然行動中の脳波計測が可能になってきている。脳波は計測の容易さから、ブレイン・コンピュータ・インターフェイスといった応用面が期待されている。しかし脳波信号は再現性に乏しく、筋電や体動などのアーティファクトも混入するため、適切な信号解析法が不可欠である。本研究では機械学習手法を駆使して内在脳活動を抽出する信号解析法を開発する。ヒト高次脳機能の多くは内在脳活動であり、「心」を読み解き機械に伝えることで人間と機械の調和の促進に貢献する。

[研究の内容, 成果]

脳波や脳磁は大脳皮質の集団活動を頭皮上で非侵襲的に計測する方法であり、神経細胞の入力であるシナプスの局所的同期活動を計測していると考えられている。脳波は近年ハードウェア・ソフトウェア両面で長足の進歩を遂げ、身体拘束のない自然運動中の脳機能計測やブレインコンピュータインターフェイスとして期待されている。頭皮上で計測可能な電場・磁場の変化が現れるためには、数 cm^2 の大脳皮質中の数千万個程度のシナプスの同期活動が必要であると考えられている。それでも、頭皮上の電位変化はマイクロボルト、また磁場変化はフェムトテスラのオーダーと微小である。一方、脳波電極の電位変化には上記の集団神経活動に加えて、瞬目・体動・筋電・電極インピーダンスの変化などといったアーティファクトが混在している。報告者のグループでは、頭皮上の脳波計測を用いて上腕運動における運動方向の脳内表現 [1] や、脳磁計測を用いて時間感覚の適応に対応する脳活動変化 [2] といった、脳波を用いて自然行動中の脳内情報処理に迫る研究を行っている (図 1)。一方、従来行われてきた身体運動を拘束する実験室条件下での脳波計測と比較して、自然行動中の脳波計測では体動や電極のインピーダンス変化が増大し、アーティファ

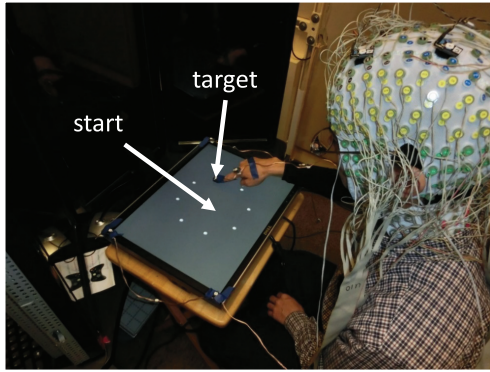


図1 到達運動時の脳波・行動同時測定実験。

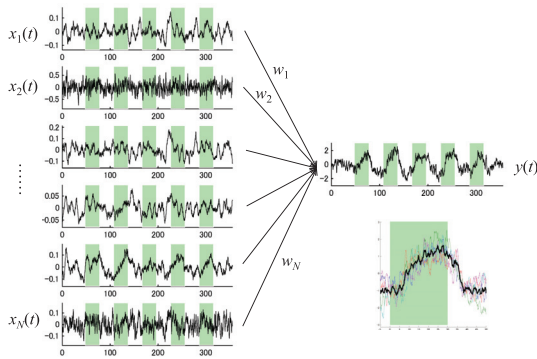


図2 試行再現性最大化法の模式図。

クトの問題が深刻化する。これらのアーティファクトは脳波ではミリボルトのオーダーであり、神経活動由来に比べて 1000 倍程度の大きさを持つ。したがって、脳波信号からアーティファクトを除去し、脳活動に由来する成分を抽出する信号解析法は不可欠である。

脳波信号から脳活動由来成分を抽出する一手法として、報告者のグループでは試行再現性最大化法という多変量の信号解析法を提案している（図2）。基本的なアイデアは、ある課題を行った際に試行間の再現性を持って現れる成分は課題に関連する神経活動由来であり、再現性のない成分はアーティファクトであると仮定することである。具体的には、複数の電極から得られる信号の適切な重み付け和を計算し、課題中での再現性を最大にするように電極の重み付け和を決定する。この再現性最大化問題は、一般固有値問題として知られる定式化ができ、

標準的な数値手法で効率よく解くことができる。試行再現性最大化法は当初、機能的近赤外スペクトロスコピー（fNIRS）に適用され、手指運動課題やワーキングメモリ課題時の脳活動を再現性よく抽出することが示されている [3, 4]。

本研究では、試行再現性最大化法を脳波信号に適用するため、二つの拡張手法を提案した [5-7]。一つ目の拡張手法は、脳波の潜時を施行毎に調整することで試行再現性を最大化する方法である。秒程度の時定数をもつ脳血流に基づく fNIRS では問題にならないが、ミリ秒オーダーの時間解像度を持つ脳波信号では時間窓の適切な設定は必須である。また、同じ刺激を与えても、脳波の反応開始時刻（潜時, latency）は必ずしも一定ではなく、試行毎に変動することが知られている。したがって、外部刺激のタイミングで脳波の単純な加算平均を行うことは必ずしも再現性の向上に繋がらない。そこで、従来手法の最適化した重み付け和に加えて、試行毎の脳波潜時を調整するアルゴリズムを新たに提案した。提案手法では、与えられたタイミングを用いた際の重み付け係数の最適化と、重み付け係数が与えられた際の脳波潜時の最適化を繰り返すことで再現性を最大化する、反復アルゴリズムである。まず提案手法を検証するために、脳内に信号源を置いて施行毎に潜時のばらつきを持つ頭皮脳波信号のシミュレーションデータを作成した。重み付け係数だけを最適化する従来手法では信号源とその時系列を再現することが出来なかった一方、施行毎の潜時も最適化する提案手法では信号源と時系列を正しく再現することが出来た。提案手法を実データ（ミスマッチ陰性電位, mismatch negativity）にも適用し、従来手法に比べて再現性の高い脳波信号を抽出することを示した（図3）。

もう一つの拡張手法は、複数被験者群での試行再現性を最大化する方法である [6, 7]。大脳皮質のシワ（脳回）は個人ごとに異なり、そのため同じ課題を行っているとしても、複数被験

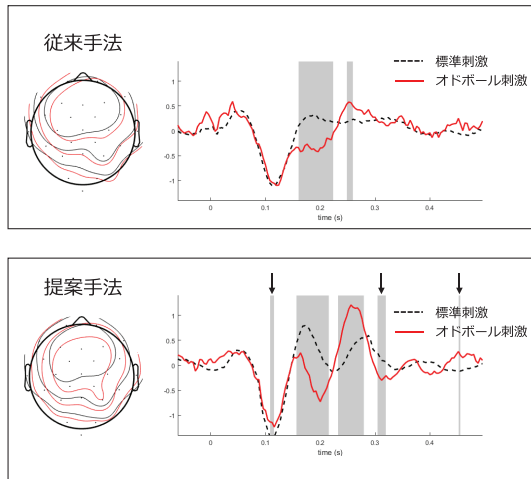


図3 ミスマッチ陰性電位課題データにおける従来手法と提案手法の比較。

者の頭皮上の同一位置に配置された電極から、被験者間で再現性のある信号が測定できるとは限らない。ある被験者の一つの電極から計測される脳波信号が、他の被験者の異なる位置の電極から計測される脳波信号と似ているという事例も見受けられる。そのため、被験者間で脳波信号をどのように比較すべきかという重要な問題がある。この問題は被験者群で脳波解析を行うときの問題点として知られているが、標準的な手法が知られていない。本研究では、単一被験者の試行間における再現性の最大化を拡張して、試行間・被験者間で再現性を最大化する手法を提案した。提案手法では、被験者間で再現性のある時系列を見出すために、被験者毎に異なる重み付け係数を最適化することで、個々の被験者の個性を吸収する。この手法では複数被験者の重み付け係数を最適化するため、大規模行列 (10^3 - 10^4) の一般固有値問題を解く必要があるが、効率のよい数値解法を用いて数秒程度で解くことが出来る。提案手法を検証するため、定常状態視覚誘発電位 (steady-state visual evoked potential) の実験データに適用した。従来手法と比較して、提案手法は脳波スペクトラムと信号源を被験者間でより再現性高く抽出することが出来た (図4)。また提案手法は再現性の要請から、訓練データに入ってい

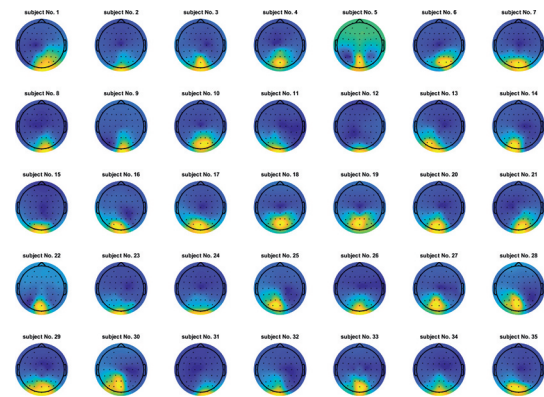


図4 提案手法により抽出された被験者群の脳波信号源。

ない被験者のデータからも再現性の高い成分を抽出することが出来た。この結果は、ブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの応用に展開が期待できる。

【今後の研究の方向、課題】

今回、脳波信号解析に特化した試行再現性最大化法の拡張を試みた。従来手法と比較して試行間・被験者間でより再現性の高い成分を抽出できること、また数値的効率性が高いことなどから、有望な手法と考えられる。今後は、様々な実験条件下でのデータセットへの応用や、ブレイン・コンピュータ・インターフェイスへの実装などを通して、人と機械の調和の促進への貢献が期待できる。

今後の課題としては、完全に外部事象のタイミングに依存しない脳波信号解析法の構築である。本研究では外部事象のタイミングをある程度調整することで、再現性を最大化することを提案し、その有効性を実証した。その際、脳波の潜時が100ミリ秒程度ばらつくことを考慮し、その時間窓内でタイミングを最適化することで、問題を簡略化することができた。しかし、この手法は依然外部事象のタイミングに依存しているため、外部事象のタイミングが与えられない際に適用することはできない。上述したように脳波信号は極めてノイジーであり、外部事象のタイミングが与えられない際に再現性の成分を

見出すのは難しいこと、脳波の全区間を探索するのは膨大な時間がかかることなどが、予備的解析の結果、判明している。今後はより効率の良い数値的手法を構築するなどして、本来の目的である脳波信号解析から「心」を読み取る技術の開発に引き続き取り組んでいきたい。

[成果の発表, 論文等]

- [1] Tanaka, H., Miyakoshi, M., & Makeig, S. "Dynamics of directional tuning and reference frames in humans: A high-density EEG study." *Scientific Reports*, 8(1), 8205, 2018.
- [2] Cai, C., Ogawa, K., Kochiyama, T., Tanaka, H., & Imamizu, H. "Temporal recalibration of motor and visual potentials in lag adaptation in voluntary movement." *NeuroImage*, 172, 654–662, 2018.
- [3] Tanaka, H., Katura, T., & Sato, H. "Task-related component analysis for functional neuroimaging and application to near-infrared spectroscopy data." *NeuroImage*, 64, 308–327, 2013.
- [4] Tanaka, H., Katura, T., & Sato, H. "Task-related oxygenation and cerebral blood volume changes estimated from NIRS signals in motor and cognitive tasks." *NeuroImage*, 94, 107–119, 2014.
- [5] Tanaka, H. & Miyakoshi, M. "Unified trial-reproducibility maximization (TRM) for evoked and induced EEG responses," *The 5th Yamada Symposium on "Neuroimaging of Natural Behaviors,"* Tokyo, Japan, 2017
- [6] Tanaka, H. & Miyakoshi, M. "Group trial-reproducibility maximization (TRM) for MEEG data analysis", *The 5th Yamada Symposium on "Neuroimaging of Natural Behaviors,"* Tokyo, Japan, 2017
- [7] 田中宏和, 「試行再現性最大法: 脳波信号解析とBCI 応用への可能性」, 研究会「日常のこころを読み解く脳信号解析法」, 広島大学, 2018.