

イヤホン型 BCI におけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法

平野 怜旺* 渡邊 恵太†

概要. ブレインコンピュータインタフェース (BCI) は、脳と外部機器との直接通信を可能にする技術である。従来の頭皮脳波計測は日常利用に適さないため、耳部位を中心とした脳波 (ear-EEG) が注目を集めている。しかし、ear-EEG のセンサー配置の特性上、一般的な BCI 制御手法の適用は困難である。本研究では、イヤホン型 BCI におけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法の有用性を検証する。EMOTIV MN8 のイヤホン型 BCI を用いて脳波データを計測し、脳波解析を行った。さらに、オノマトペによる発話イメージで操作可能なシステムを開発し、実用的なアプリケーションを実装した。

1 はじめに

ブレインコンピュータインタフェース (BCI) は、脳と外部機器との通信を可能にする技術である [11]。従来の BCI 研究において、電解質ゲルや導電性ペーストを用いた電極による頭皮脳波の計測が主流である [7]。しかし、準備の煩雑性、装着時の不快感、外観上の問題により、日常生活での実用化には課題がある。BCI の社会実装を実現するためには、ユーザの負担を最小化し、ユーザが使いやすいインタフェースの開発が必要である [6]。

耳部位を中心とした脳波計測 (ear-EEG) は、装着性、可搬性、外観上の自然さの観点から、BCI の研究分野において注目を集めている計測手法である [10]。この手法は、従来の頭皮脳波計測と比較して、複雑な機器準備を必要とせず、センサーがユーザの毛髪に接触しない利点がある [5]。さらに、耳掛け型、イヤホン型、ヘッドホン型など、多様な形態での開発がされており、日常的な BCI 利用に適している [4]。

ear-EEG のセンサー配置は、言語野および聴覚野に近接している。この特性により、定常状態視覚誘発電位 [2]、事象関連電位 [8]、運動イメージ [13] などを用いた一般的な BCI 制御手法の適用は困難である。一方、実際の発声を伴わずに内的な発声を想起する発話イメージは、言語野および聴覚野における脳波活動を効果的に誘発することができる [3, 1, 9]。

我々は、発話イメージの特性を活用し、オノマトペを用いた脳波制御訓練手法を提案した [14]。本手法では、オノマトペによる発話イメージを想起することで脳波制御を行う。例えば、歩行動作を日本語のオノマトペ「テクテク」として表現し、その反復的な内言により、キャラクターの歩行を制御する。

Copyright is held by the author(s). This paper is non-refereed and non-archival. Hence it may later appear in any journals, conferences, symposia, etc.

* 明治大学大学院先端数理科学研究科

† 明治大学総合数理学部



図 1. イヤホン型 BCI におけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法。オノマトペによる発話イメージを想起することで、アプリケーションを制御できる。

本研究では、イヤホン型 BCI におけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法の有用性と応用可能性を検討する (図 1)。イヤホン型 BCI を用いて脳波データを計測し、脳波解析を行った。さらに、本手法により操作可能なシステムを開発し、実用的なアプリケーションを実装した。この研究を通じて、イヤホン型 BCI と本手法を統合した新しいインタフェースの可能性を検討し、BCI の日常利用の実現を目指す。

2 システム

2.1 脳波計測機器

本システムでは、非侵襲型脳波計測デバイスである EMOTIV MN8 を用いて脳波計測を行った。このデバイスは、イヤホン型の形状であり、従来型の脳波計測装置と比較して、軽量性と使用性に優れているため、日常的に利用しやすい。電極は耳介に接触する部分である T7, T8 のセンサー配置に対応するように配置され、ドライ電極を採用していることから、イヤホンの装着のみで即座に計測を開始できる。さらに、計測した脳波データは Bluetooth 経由で PC に送信される。

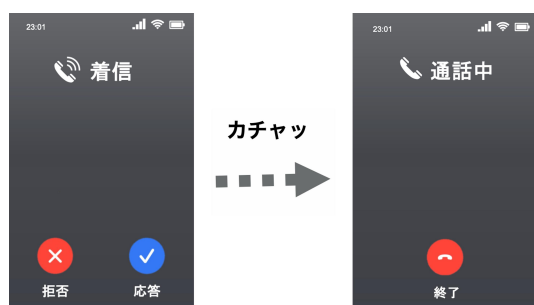


図 2. 本手法を用いた電話着信応答アプリケーション.

2.2 BCI システム

本研究では、脳波信号のリアルタイム処理とアプリケーション制御を統合したシステムを開発した。このシステムは、MATLAB 上で実装した独自のプログラムにより、脳波データの前処理から特徴抽出、特徴分類までの一連の処理を実行する。分類結果は UDP 通信を介して Unity へ送信され、それに基づいたアプリケーションの制御を可能にした。

脳波データの解析プロセスは、複数の処理段階で構成した。前処理段階では、1-40Hz の帯域でバンドパスフィルタを適用し、不要なノイズを除去した。その後、刺激に対する脳の反応を詳細に分析するため、取得した脳波データを 2 秒間のエポック単位に分割して解析を行った。特徴抽出段階では、共通空間パターン (Common Spatial Pattern : CSP) アルゴリズムを用いて、空間的特徴量を抽出した。特徴分類段階では、サポートベクターマシン (SVM) を用いて特徴量の分類を行った。事前に収集した訓練データを用いて分類器を構築することで、入力される脳波データから 0.5 秒ごとにユーザの想起状態をリアルタイムに推定するシステムを実装した。

2.3 システム検証

本システムの有効性を検証するため、電話の受話動作を脳波で制御するタスクを行った。検証では、参加者 1 名に対して、内言による電話受話の制御タスクを課した。まず、参加者は 30 分間、指定されたタイミングで「カチャッ」という内言を繰り返すトレーニングを行った。この時、安静時と発話イメージ想起時の脳波データを収集し、分類器の学習データに用いた。その後、開発した BCI システムを用いて実際の電話受話タスクを 30 回行った。タスクでは、電話の着信時に内言による受話制御を行い、システムの応答性と制御精度を評価した。

検証の結果、オフライン分類精度は 60.90% を達成した。一方で、電話の着信がない状況での誤判定 (エラー率) は 21.7% であった。また、内言開始から受話判定までの平均応答時間は 1.57 秒であった。これらの結果は、30 分程度の短時間の学習データでも、ある程度の制御が可能であることを示唆した。

3 アプリケーション

本章では、オノマトペの内言によりアプリケーションを制御する方法を論じる。オノマトペによる発話イメージを用いたインタラクション技術は、イヤホンの装着が日常的な場面において、新しい操作体験を実現できる可能性がある。特に、イヤホンの装着が自然な文脈である「ビデオゲーム」、「スマートフォン」、「XR」の場面において、本手法がもたらす利点について検討する。

3.1 ビデオゲーム

ビデオゲームにおける魔法詠唱は、プレイヤーの想像力を刺激し、ゲーム世界への没入感を高める重要な要素である。本手法を用いた魔法インタラクションは、プレイヤーの意図とゲーム内の魔法効果を直接的に結びつける新しい体験を実現できる [12]。例えば、「メラメラ」という内言による炎の発動、「ビリビリ」による電撃の放出、「ヒヤヒヤ」による凍結効果など、音象徴的な特徴を活かした直感的な魔法システムの構築が可能である。この技術により、従来のボタン入力では実現できなかった没入感の高い魔法体験を提供できる可能性がある。

3.2 スマートフォン

スマートフォンの操作において、オノマトペによる発話イメージを活用することにより、ハンズフリーでの直感的な操作が可能である。例えば、「スッ」という内言によるスワイプ操作、「カチャッ」による電話着信応答 (図 2)、音楽プレイヤーにおける「ピッ」による曲送りや「トン」による一時停止など、日常的な操作音を模倣したオノマトペを用いることで、自然な操作感を実現できる可能性がある。この技術は特に、イヤホンを日常的に使用している歩行時や作業時など、画面操作が煩雑な状況における新しいインタラクション手法として、操作の直感性と効率性の向上を期待できる。

3.3 XR

XR 環境において、オノマトペによる発話イメージを用いたインタラクションは、従来のコントローラやジェスチャーによる操作の制約を解消する可能性を持つ。「パッ」という内言によるウィンドウの表示/非表示、「グイッ」によるスケーリング、「ポチッ」による選択操作など、直接的な動作表現を用いることにより、手を使用せずに空間操作が可能となる。イヤホンの装着のみでイメージによる操作ができるため、追加の機器を必要とせず、より自由度の高い XR 体験を提供できる可能性がある。さらに、ハンドトラッキングや視線追跡などの既存のインタラクション手法と組み合わせることにより、コントローラフリーでありながら、より精緻な操作性の実現を目指す。

参考文献

- [1] A. Aleman, E. Formisano, H. Koppenhagen, P. Hagoort, E. H. De Haan, and R. S. Kahn. The functional neuroanatomy of metrical stress evaluation of perceived and imagined spoken words. *Cerebral Cortex*, 15(2):221–228, 2005.
- [2] A. Evain, F. Argelaguet, N. Roussel, G. Casiez, and A. Lécuyer. Can I think of something else when using a BCI? Cognitive demand of an SSVEP-based BCI. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5120–5125, 2017.
- [3] A. Jahangiri and F. Sepulveda. The relative contribution of high-gamma linguistic processing stages of word production, and motor imagery of articulation in class separability of covert speech tasks in EEG data. *Journal of medical systems*, 43:1–9, 2019.
- [4] J. Y. Juez, H. Moumane, M. Nassar, I. Molina-Salcedo, F. E. Segura-Quijano, M. Valderrama, and M. Le Van Quyen. Ear-EEG devices for the assessment of brain activity: a review. *IEEE Sensors Journal*, 2024.
- [5] S. L. Kappel, M. L. Rank, H. O. Toft, M. Andersen, and P. Kidmose. Dry-contact electrode ear-EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(1):150–158, 2018.
- [6] S. M. Kosslyn, G. Ganis, and W. L. Thompson. Neural foundations of imagery. *Nature reviews neuroscience*, 2(9):635–642, 2001.
- [7] M. L. Martini, E. K. Oermann, N. L. Opie, F. Panov, T. Oxley, and K. Yaeger. Sensor modalities for brain-computer interface technology: a comprehensive literature review. *Neurosurgery*, 86(2):E108–E117, 2020.
- [8] W. McClinton, D. Caprio, D. Laesker, B. Pinto, S. Garcia, and M. Andujar. P300-Based 3D brain painting in virtual reality. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6, 2019.
- [9] P. McGuire, D. Silbersweig, R. Murray, A. David, R. Frackowiak, and C. Frith. Functional anatomy of inner speech and auditory verbal imagery. *Psychological medicine*, 26(1):29–38, 1996.
- [10] K. B. Mikkelsen, S. L. Kappel, D. P. Mandic, and P. Kidmose. EEG recorded from the ear: characterizing the ear-EEG method. *Frontiers in neuroscience*, 9:438, 2015.
- [11] C. S. Nam, A. Nijholt, and F. Lotte. *Brain-computer interfaces handbook: technological and theoretical advances*. CRC Press, 2018.
- [12] A. Nihei, R. Hirano, and K. Watanabe. Intuitive Brain-Computer Interface Control Using Onomatopoeia for an Enhanced Gaming Experience. In *Companion Proceedings of the 2024 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp. 208–214, 2024.
- [13] A. Vourvopoulos, S. Bermudez i Badia, and F. Liarokapis. EEG correlates of video game experience and user profile in motor-imagery-based brain-computer interaction. *The Visual Computer*, 33:533–546, 2017.
- [14] 平野怜旺, 渡邊恵太. メンタルイメージベースの BCI におけるオノマトペを用いた脳波制御訓練手法の提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, pp. 220–227, 2023.