



|              |                                                                                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | Classification accuracy of pain intensity induced by leg blood flow restriction during walking using machine learning based on electroencephalography |
| Author(s)    | 今井, 大達                                                                                                                                                |
| Citation     | 大阪大学, 2026, 博士論文                                                                                                                                      |
| Version Type |                                                                                                                                                       |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/105728">https://hdl.handle.net/11094/105728</a>                                                                 |
| rights       |                                                                                                                                                       |
| Note         | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨  
Synopsis of Thesis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名<br>Name                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 今井 大達                                                                                                                                                                                      |
| 論文題名<br>Title                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Classification accuracy of pain intensity induced by leg blood flow restriction during walking using machine learning based on electroencephalography</b><br>(脳波機械学習を用いた歩行中の下肢虚血痛の強度分類) |
| 論文内容の要旨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                            |
| 〔目 的(Objective)〕                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                            |
| 臨床現場における痛みの評価は、NRS (Numerical Rating Scale) などの患者の主観的な自己申告に大きく依存している。この主観性は、患者と医療提供者間の認識のギャップを生む可能性があり、客観的で自動化された痛み評価方法の確立が強く求められてきた。これまでもfMRIや脳波 (EEG) を用いた客観的な評価の試みはあるが、それらの研究の多くは安静時の痛み刺激に焦点を当てたものであった。しかし、実際の臨床現場や日常生活では、動作や運動に伴う痛みの評価が極めて重要である。そこで本研究の目的は、額に装着する3電極の小型ウェアラブル脳波デバイス (HARU-2) と機械学習を組み合わせ、動作中に誘発される痛みの強度を、客観的に分類・評価することである。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                            |
| 〔方法ならびに成績(Methods/Results)〕                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                            |
| 方法として、25名の健康人 (平均年齢33.2±2.0歳) が研究に参加した。痛みを誘発するため、両下腿に駆血帯を巻き、血流を制限した状態での歩行を指示した。被験者はまず、止血帯圧0 mmHg (痛みなし) の状態で2分間歩行し (Task 0)、その後、圧力を200～250 mmHgに増加・維持したまま、さらに合計8分間の痛みを伴う歩行を行った。この8分間の歩行は、2分ごとにTask 1からTask 4までの4つのタスクに分割した。各タスク (Task 0～4) の終了直後に、NRS (0～10) を聴取し主観的な痛みの強度を評価した。脳活動の記録には、額の3箇所電極を配置するパッチ型のウェアラブル脳波計 (HARU-2) を使用した。このデバイスは、低ノイズの電極材料とワイヤレス信号により、歩行中のモーションアーチファクトを低減するよう設計されている。取得したEEGデータは前処理後、 $\theta$ (4-8 Hz)、 $\alpha$ (8-13 Hz)、 $\beta$ (13-26 Hz)、 $\gamma$ (26-90 Hz) の各周波数帯のパワースペクトルを算出した。さらに、周波数スペクトル全体の重心を反映する「BrainRate (BR)」という指標も算出した。機械学習モデルの構築にはRandom Forest、XGBoost、LightGBMの3つが使用され、痛みのレベルを「2クラス (痛みなし/最悪の痛み)」「3クラス (痛みなし/中程度/最悪の痛み)」「5クラス (痛みなし/軽度/中程度/重度/最悪の痛み)」に分類する3つのスキームで性能を評価した。 |                                                                                                                                                                                            |
| 結果は、まずNRS評価では、Task 0の平均0±0に対し、Task 1で4.2±1.0、Task 2で6.2±1.1、Task 3で7.8±0.9、Task 4で9.0±0.8と、歩行時間の経過とともに痛みの強度が統計的に有意に増加することが確認できた。機械学習アルゴリズムの比較では、XGBoostが最も高い分類性能を示し、BrainRate (BR) を含めずに周波数パワーのみを特徴量としてXGBoostで分類した場合、その精度 (Acc) は2クラス分類で0.82、3クラス分類で0.60、5クラス分類で0.40であったが、特徴量としてBRを追加したところ、分類精度は2クラスで0.96、3クラスで0.75、5クラスで0.47へと、すべての分類スキームで顕著に向上した。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                            |
| 〔総 括(Conclusion)〕                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                            |
| 本研究は、下肢の血流制限を用いた疼痛モデルと、小型ウェアラブル脳波計および機械学習を組み合わせることで、これまで客観的な評価が困難であった「運動中」の痛みの強度を分類できることを初めて実証した。安静時の研究と比較するとやや精度が低下するが、額の3電極のみ、かつノイズが混入しやすい運動中という条件下でも、2クラスおよび3クラス分類において高い分類精度を達成した。特に注目すべきは、周波数スペクトルの重心を示す「BrainRate (BR)」という指標が、分類精度を全クラスで大幅に改善した点である。これは、BRが痛み刺激に伴う脳活動の変化に敏感であり、痛みの客観的な評価における新規バイオマーカーとしての可能性を秘めていることを示唆している。本研究の限界は、サンプルサイズが25名と小さいことや、痛みの感受性の個人差を考慮できていない点である。本研究の成果は、リハビリテーションの現場や術後の患者モニタリングなど、実世界の臨床環境において客観的な痛み評価を実現するための重要な一歩となる。                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                            |

論文審査の結果の要旨及び担当者

|               |              |       |
|---------------|--------------|-------|
| (申請者氏名) 今井 大達 |              |       |
| 論文審査担当者       | (職) 氏 名      |       |
|               | 主 査 大阪大学教授   | 岡田 誠司 |
|               | 副 査 大阪大学教授   | 妻木 彰行 |
|               | 副 査 大阪大学特任教授 | 田中 啓之 |

論文審査の結果の要旨

本研究は、臨床現場における客観的指標の欠如という課題に対し、パッチ式ウェアラブル脳波計と機械学習を用い、従来困難であった運動中の痛みの客観的評価を行ったものである。健康成人25名を対象とした下肢血流制限歩行実験において、XGBoostモデルに周波数スペクトル重心BrainRate (BR) を特徴量として導入した結果、2クラス分類の精度が0.82から0.96へ、3クラスでも0.75へと劇的に向上することを見出した。

本研究は、ノイズが混入しやすい運動環境下であっても、簡易な3電極デバイスとBR指標を用いることで、痛みの強度を高精度に分類可能であることを初めて実証したものである。この成果は、リハビリテーションや術後管理など実世界での客観的疼痛評価の実現に大きく寄与するものであり、学位の授与に値すると考えられる。