

頸髄損傷患者の fNIRS 信号を用いた機械学習による脳活動状態推定

増尾 明[†] 花井 俊哉[†] 阿部 信美[‡] 佐久間 拓人[†] 加藤 昇平[‡]

名古屋工業大学大学院工学研究科[†] 名古屋医健スポーツ専門学校[‡]

1. はじめに

Brain-Computer Interface (BCI) とは、脳の生体信号を用いて外部機器の制御を可能とする技術である¹⁾。重度の運動機能障害者は、四肢の筋力低下によりナースコールなどの物品操作が困難となり意思表出手段の制限をきたすことから、リハビリテーション現場においてはBCIを用いた運動機能障害者の代替的な生活支援手段の確立が期待されている。

これまでのBCIに関する先行研究では、脳波を用いた報告が散見されるが、脳波は体動によるノイズに対して脆弱であり、正確な計測にシールドルームを必要とすることから、脳波を用いたBCIは臨床応用する上で実用性の乏しさが課題として挙げられる。一方、脳の血行動態変化を利用した間接的な脳活動計測手法である機能的近赤外分光法 (fNIRS) は、脳波と比較して計測時の拘束性が低いという利点を持つため、fNIRSは不随意運動により体動の制御が困難な運動機能障害者およびその生活環境においても脳機能を測定可能であり、BCIの医療応用を目指す本研究においては有用な生体信号の計測手法であると考えられる。

以上から、本研究はBCIのリハビリテーション応用のための基礎検討として、頸髄損傷患者を対象に暗算課題遂行時および安静時のfNIRS信号を計測し、教師あり機械学習手法であるサポートベクターマシン (SVM) を用いて生体信号から脳活動状態を推定することを目的とした。なお、本研究は、生命倫理審査委員会の承認および対象者の同意を得て実施した。

2. 方法

第5-6頸髄損傷レベルの不全頸髄損傷患者1名(70歳、男性)を対象とした。fNIRS信号の計測にはOEG-SPO2 (Spectratech社製) を使用し、国

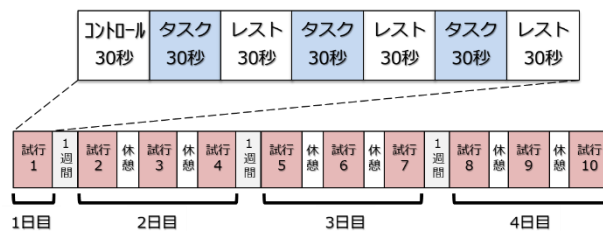


図1 ブロックデザイン

際10-20法に準拠し、前頭極の直上に9ch部分が位置するようにヘッドセットを装着し、照射プローブと受光プローブ間距離を3cm、サンプリング周波数12.4Hzにて計16chでHbO、HbR、HbTを計測した。図1に、本実験で用いたブロックデザインを示す。コントロール後にタスク30秒と安静30秒の3回ずつの繰り返しを1試行とし、1日に1~3試行を4日間で合計10試行を行いfNIRS信号を計測した。タスクには1桁+1桁の連続加算を行う暗算課題を用いた。また、生体信号の日間変動を考慮して、測定日はそれぞれ1週間空けて設定した。

実験はシールド機能のない対象者の居室にて、車椅子に腰かけた安静座位で実施した。対象者は70cm前方に設置したディスプレイ上に表示される教示画面に従って課題を実施した。fNIRS信号への眼球運動や体動などのノイズの混入を防ぐため、認知課題は十字の固視点を注視した状態で行うよう統制した。また、暗算課題は声には出さず、心の中で実施するよう教示した。

データ処理および解析は、データ欠損のない1chおよび3ch(右側腹外側前頭前野領域に該当)のデータを対象に、各暗算・安静区間のfNIRS信号に対して血流動態分離法を適用した後に、平均0・分散1となるよう標準化処理を行った。これらのデータから5秒の時間窓を0.5秒ずつシフトさせてデータを切り出し、算術平均(mean)、分散(var)、最大値(max)、最小値(min)、範囲(range)、傾き(slope)の6つの統計量を算出してデータセットを構築した。学習には教師あり機械学習手法であるSVMを用い、カーネル

Estimating brain activity by machine learning using fNIRS signals in patient with cervical spinal cord injury

[†] Dept. of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

[‡] Dept. of Occupational Therapy, Nagoya College of Medical Health and Sports

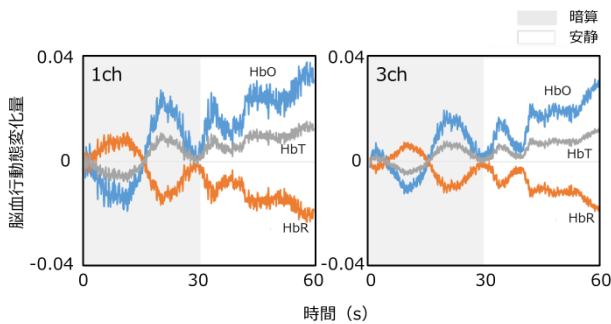


図2 fNIRS 信号例 (第10 試行)

表1 4 分割交差検証の結果

CV	accuracy	f1score
1st	0.80	0.79
2nd	0.57	0.41
3rd	0.75	0.74
4th	0.50	0.57
Avg.	0.66	0.62

パラメータは rbf, linear, sigmoid のうち最良のスコアとなるものでパラメータチューニングを行った。判別モデルの評価には、3 日分のデータを学習データに使用し、残り 1 日分のデータをテストデータとする検証を全ての組み合わせで実施する 4 分割交差検証を用いた。なお、各交差検証の平均値を脳活動状態の判別性能の評価値とした。

3. 結果

図2に、計測した fNIRS 信号例として、10 試行目における暗算課題遂行時および安静時の fNIRS 信号に対して加算平均処理を施した波形を示す。1ch, 3ch ともに暗算課題遂行区間の HbO, HbT は時間経過に伴い減少と増加を繰り返しながら概ね増加傾向を示し、安静区間で増加傾向が維持される変動を示した。一方、HbR は HbO, HbT とは反対に、1ch, 3ch ともに暗算課題遂行区間は時間経過に伴い増加と減少を繰り返しながら概ね減少傾向を示し、安静区間で減少傾向が維持される変動を示した。

表1に、4 分割交差検証による脳活動状態の判別性能を示す。交差検証の結果、本モデルを用いた脳活動状態推定の正答率は約 66%、f1score は約 62%であった。

4. 考察

暗算課題および安静課題を実施時の fNIRS 信号を基に、SVM による二値分類性能を評価した結果、分類モデルの正答率は約 66%であった。以上か

ら、本対象者に対して YES の場合は暗算課題を、NO の場合は安静課題を行うといった特定の法則性に従う教示を行うことで、約 66%の正答率で脳活動を用いた意思疎通や機器制御が行える可能性が示唆された。本研究における脳活動状態推定手法を実用的水準まで改良することで、運動機能障害により意思疎通が困難となる閉じ込め症候群 (locked-in syndrome) を呈する対象者に対して、BCI による福祉機器の自律的操作や意思表出を可能とする新たな生活支援手法に応用できる可能性があり、本結果は重度の運動機能障害者の生活支援を推進しているリハビリテーション領域において有用な知見であると考えられる。

一方で、医療応用を目指す上で正答率の改善による汎用性の向上が必要であると考えられる。Vidaurre らは、BCI 制御に関する問題点として、BCI は約 15~30%のユーザに対して機能しない²⁾ことを報告している。本実験においてはデータ欠損のないチャンネルは 1ch と 3ch のみであったことから、右側腹外側前頭前野領域に由来する fNIRS 信号のみを用いたことが脳活動状態推定の正答率の乏しさに繋がった可能性がある。そのため、本アルゴリズムを用いて、異なる対象者に対しても同程度の判別性能を有するモデル構築が可能であるかは不明である。今後は、脳活動状態の判別に有用な特徴量を含んだ生体信号を取得できるよう、全てのチャンネルの生体信号を対象とした上で、特徴量選択を行うことで正答率の向上に努める必要があると考える。また、症例ごとに有用な特徴量は異なる可能性が考えられることから、症例数を増やし本アルゴリズムが個人においても適用可能であるか検討していく必要がある。

5. 結論

本研究は、不全頸髄損傷患者のリハビリテーション支援を目的に、暗算課題時および安静課題時の fNIRS 信号を基とした SVM による脳活動状態の推定を行った。その結果、約 66%の正答率で脳活動状態を推定可能という結果を得た。本知見を BCI に応用することで、新たな福祉機器操作手法の確立に繋がる可能性が示唆された。

6. 引用文献

- 1) J. R. Wolpaw et al., "Brain-computer interfaces for communication and control", *Clinical Neurophysiology*, vol. 113, pp. 767-779, 2002.
- 2) Vidaurre, C., Blankertz, B., "towards a cure for BCI illiteracy", *Brain Topography*, 23 (2), pp. 194-198. 2010.