

周波数応答関数を使用した右腕と左腕の運動推定と電極の関係性
 Estimation of right and left arm motion using frequency response functions and electrode relationships.

金本 翔 土屋 誠司 渡部 広一
 Sho Kanemoto Seiji Tsuchiya Hirokazu Watabe

1. はじめに

近年、病気や怪我などによって運動に障害を抱える身体障害者のための生活支援技術として、BCI (Brain Computer Interface) が注目されている。BCI とは人間の脳波をコンピュータの入力とするシステムのことであり、これを用いることで体を動かさない人でも、直感的に機器の操作ができるようになって期待されている。

BCI の研究としては外部刺激による手法や想起による手法などがあるが、前者は外的要因に対する受動的な反応であるため自発的な運用を目的とするのであれば後者がより有効であると考えられる。

本研究では想起による手法の中でも、運動時の脳波を用いる手法について考える。脳波による運動推定の研究では、主に運動野を用いているが、運動電位が運動野確認が取れていないという問題点がある。そこで本研究では、右腕と左腕運動において、活動量の高い電極を調査する。一般的に、運動部位に対して活発になる脳部位は左右非対称であると考えられている。各腕の運動準備時および運動時にどの電極が活発なのかを検証する。

2. 関連技術

2.1. 脳波

脳波とは脳から生じる電気活動を電極によって記録したものであり、本研究で使用する脳波は図 1 の測定機器を頭皮上に電極を乗せて計測する頭表脳波を使用する。これは株式会社 ZMP 製の脳波測定機器^[1]であり、32 個の電極を被験者の頭部に取り付け電位の測定を行い、付属のソフトウェアを用いて波形のモニタリングを行う。電極の配置は図 2 であり、国際 10%法に基づいて頭部を 10%ごとに区切るように配置されている。円内部の文字はそれぞれの電極名を示しており、最大サンプリングレートは 1000Hz である。



図 1 脳波測定機器



図 2 電極配置

2.2. 運動準備電位

本研究では注目する脳波の特徴として運動準備電位を用いる。運動準備電位とは人の随意運動時に動作開始の 0.5-1.0s 前から 0.2s 前にかけて現れる電位の減少のことを指す。これは脳の一次運動野 (図 3) や補足運動野 (図 4) で観測され、体のどの部位を動かしたかで減少傾向が異なる。また、動かした側と左右反対の位置に現れ、実際の運動を行うときだけでなく運動のイメージを想起したときにも発生する。これらの特徴から運動準備電位を用いる利点として、運動開始前に運動推定を行うことができるためリアルタイムでの推定に適しているということと、実際の運動を伴わなくても推定が可能であるた

め筋電位の発生が困難な身体障害者でもシステムを利用できる。

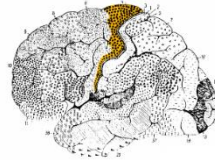


図 3 一次運動野

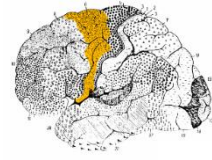


図 4 補足運動野

2.3. 周波数応答解析

周波数応答解析とは、物体の挙動を時間領域から周波数領域に変換し、周波数ごとの応答を解析する手法である。周波数領域に変換された入力データ $I(j\omega)$ がシステム $H(j\omega)$ を介したことで変化した量 $O(j\omega)$ は式(1)で表現される。変化量は振幅比や位相差で表すことができ、周波数特性として式(2)、式(3)の関係式で成り立つ。

$$H(j\omega) = \frac{O(j\omega)}{I(j\omega)} \quad \text{式(1)}$$

$$|H(j\omega)| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{式(2)}$$

$$\angle H(j\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{式(3)}$$

3. 先行研究

3.1. 評価結果

運動準備電位を用いた先行研究として、運動推定を行った研究がある^[2]。北澤氏らの研究では左右の肘と手の分類が行われている。その結果を表 1 に示す。

表 1 先行研究の評価結果

	先行研究 ^[2]
解析区間	運動準備区間
被験者	2
電極数	25
測定回数	4 動作 × 50 回
手法	3DCNN
精度	平均 29.5%
運動部位	右手・左手・右肘・左肘

3.2. 問題点

チャンスレベルを上回る精度が確認され、運動推定の有効性が見込めると考えられる。しかし、運動に対して様々な電極が活用されているため、十分な精度を得られていない問題点がある。

4. 提案手法

周波数応答解析を用いて右腕運動に対する左腕運動の、左腕運動に対する右腕運動の活動量の割合を基に、運動の特徴が現れている電極を調査する。以下に一例として、右腕運動における電極調査手法は以下の通りである。

- ① 左腕運動に対する右腕運動の変化量を、式(4)の周波数応答関数を用いて解析する。変化量のうち、電位変動との関りが深いと考えられる振幅比を特徴量として扱う。

$$H(j\omega) = \frac{o(\omega)}{I(\omega)} \begin{cases} I(\omega) = \text{左腕運動} \\ O(\omega) = \text{右腕運動} \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

- ② 左腕の変化量である振幅比の全電極平均を求める.
- ③ 電極ごとにカウンターを用意する.
- ④ 全電極平均から①で求めた振幅比との差分を、電極ごとに求める. 平均値よりも高い振幅比を持った場合は、有効な電極であるとして、見込み値 1 を電極カウンターに加算する.
- ⑤ ③を測定 100 回分繰り返す.
- ⑥ 全電極カウンターの平均値を求め、平均以上の電極を保存する.
- ⑦ 被験者 2 名ごとに①~⑥の処理が終了後、保存した電極の共通項を左腕運動の特徴が出現する電極として評価する.

以上の処理を踏まえると、左右の運動の違いを見いだせると考えた.

4.1. 使用データ

本研究では先行研究^[1]で使用した脳波を使用する. 先行研究^[1]の使用データの詳細は下記の通りである.

被験者	2名
電極数	32
運動部位	右手・左手・右肘・左肘
測定回数	4動作×50回
サンプリングレート	1000Hz

4.2. 解析区間

解析対象区間は北澤氏によって設定された運動準備区間と運動区間に従う. 下図は北澤氏の測定手法である.

①で運動内容の指示を行い、②で待機し、③で動作を行い、④でリセットを行う. これらの測定手法より、本研究では 2.2 節を参考の基、下記のように設定した.

運動準備電位：③の 1 秒前から 0.2 秒前

運動電位：③の 1 秒間

を解析区間とする. また、使用電極は電極ごとの変化に差異があるかを確認するため、全 32 電極を解析区間とする.

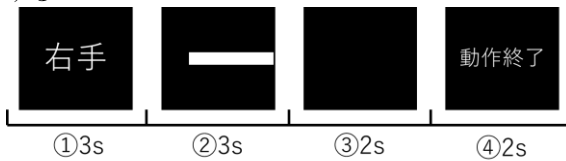


図 5 北澤氏の脳波測定フロー

4.3. 周波数解析

脳波に対してフーリエ変換を行うことで、周波数帯域ごとのスペクトルの取得が可能である. 脳波は周波数帯域によって分類されており、一般的に使用されるのが δ ・ θ ・ α ・ β ・ γ 波といわれる成分である. 以下の表 2 に脳波成分の種別を示す.

表 2 脳波の周波数分類

名称	周波数帯域	主な雑音源
δ 波	1.00Hz~4.00Hz	筋電・心電
θ 波	4.00Hz~8.00Hz	-
α 波	8.00Hz~13.00Hz	-
β 波	13.00Hz~30.00Hz	-
γ 波	30.00Hz~64.00Hz	周囲の電子機器

本研究では安静・閉眼時において検知されやすい 8.00Hz~13.00Hz の周波数帯域である α 波と、通常の覚醒時の意識と関連付けられ、活発な思考や集中状態のときに検知されやすい 13.00~30.00Hz の周波数帯域である β 波を使用する. それ以外の周波数帯域を使用しない理由として、 δ (デルタ) 波の周波数帯域では筋電・心電といったものが雑音源となり、 θ 波は浅い睡眠状態の場合に検出されやすく、 γ 波の周波数帯域では周辺の電子機器が雑音源となるためである.

5. 検証結果

本研究では被験者 2 名に共通する平均以上に活発な電極を求めた. また、右腕動作時における、左腕の特徴と、左腕動作時における、右腕の特徴を検証した. その結果を、図 6、図 7、図 8、図 9 に示す.

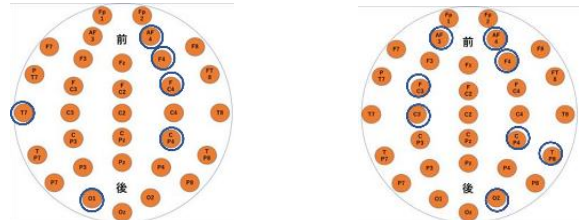


図 6 左腕運動の特徴(運動)

図 7 右腕運動の特徴(運動)

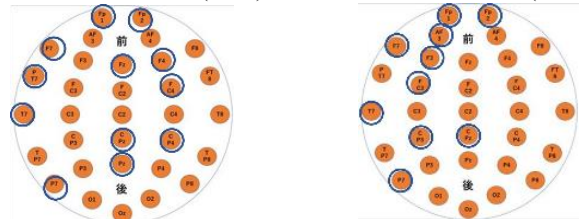


図 8 左腕運動の特徴 (運動準備電位)

図 9 右腕運動の特徴 (運動準備電位)

6. 考察

評価結果より、前述した動作に対する脳の活動部位が左右非対称であることが、図 6 と図 7 の運動時の結果より確認できた. 特に、電極 F3, F4 や電極 FC3, FC4, 電極 CP3, CP4 は運動野に対応する電極である. また、運動野以外にも小脳に対応する電極 O1 や頭頂連合野に対応する電極 O2 も左右非対称になっていることがわかる. これらは運動のバランスを調整するために筋肉に指令を出す機能や、動作イメージの形成を行っている. したがって、左右の運動を指令するにあたり、運動野以外の部位も左右非対称であると考えられる. 運動準備電位でも同様に、運動野に対応する電極が左右非対称であることが確認できる. しかし、運動時と異なり中心の電極も共通して特徴が現れている為、左右によって振幅比の大きさが異なっていると考えられる. また、左右の検証結果を比較すると、右腕より左腕運動の特徴が現れている. これは、脳機能における「慣れ」によって、電位活動が活発になりにくいという特性に応じている. つまり、利き手よりも逆手の方が電位変動が活発であると考えられる.

7. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 16K00311 の助成を受けて行ったものです.

参考文献

- [1] 「最大サンプリングレート 1000Hz 対応 32ch ウェアラブルワイヤレス脳波センサ販売開始」, <https://www.zmp.co.jp/news/pressrelease20180214> (2022-6-20)
- [2] 北澤脩平, "3次元 CNN を用いた運動準備電位による運動予測に関する検討", FIT2019 第 18 回, F-032