

# 時間ゲート型 BCI によるアクチュエータ制御と駆動閾値の最適化

齋藤 夕綺 (鶴岡工業高等専門学校 生産システム工学専攻, s200007@edu.tsuruoka-nct.ac.jp)

小野寺 良二 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, r-onodera@tsuruoka-nct.ac.jp)

穴戸 道明 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, m-shishido@tsuruoka-nct.ac.jp)

## Optimization of threshold for actuator control using gate-time BCI

Yuki Saito (Department of Advanced Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Ryoji Onodera (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Michiaki Shishido (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

### 要約

近年、少子高齢化の進行にともない、要介護者の増加および介護従事者の負担増加が深刻化している。要介護者の自立支援と生活の質向上を図る試みのひとつとしてBrain-Computer Interface (BCI) の応用が挙げられる。そこで著者らは、脳波の集中と弛緩状態の信号を応用し、シリアル動作に特化したBCIシステムを構築した。既往研究では、従来のシステムの課題であった時間の遅れを軽減するために、新しいモータ制御手法としてサンプリング脳波信号の処理においてゲート時間と定義した新しい評価区画の考え方を導入した新システムを構築した。本研究では、さらなる応答性の改善を目指し、新システムにおける最適な駆動閾値を検証した。結果として、閾値40、50において課題成功率は68 %以上と高値を示し、従来のシステムと比較するとおよそ10 %の向上が確認された。さらに、Friedmanの検定において有意差が認められ、対応のあるt検定では閾値40、50において有意差が認められた。この結果から、閾値40、50において課題成功率が有意に向上し、随意的なモータ制御が可能であると判断できる。誤作動率は、閾値にかかわらず21~31 %を示し、Friedmanの検定においては有意差が認められなかった。一方で、閾値の増加にしたがって停止誤作動の占める割合が増加した。また、閾値60、70でモータ駆動を成功した被験者は、脳が極度の集中状態となり、Task区間の間モータが駆動し続けてしまうことや、Rest区間に移行した後もモータ停止までに時間を要した。BCIの普及促進を図るうえで安全性の担保および使用者の意図に従った機器制御は必須であるため、モータの駆動・停止において安定した制御が可能であった閾値40、50が最適な閾値であるといえる。

### Abstract

Recently, the birthrate declines and the population ages, the number of people require nursing care and the burden on nursing care workers has been increasing. One of the attempts to support the independence and improve the quality of life of those who need care is the application of Brain-Computer Interface (BCI). BCI system was developed by us specialized for serial operation, based on EEG signals of concentration and relaxation states. In the previous study, a new system was constructed which introducing a new motor control method that introduces a new evaluation compartment concept defined as gate time in the processing of sampled EEG signals to reduce the time delay that was a problem with the conventional system. In this study, we verified the optimal threshold in the new system in order to further improve the response. Consequently, the success rate of task was as high as more than 68 % at the threshold of 40 and 50, which is an improvement of about 10 % compared to the conventional system. Furthermore, the Friedman's test was indicating a significant difference in the success rate of task in each threshold, and the paired t-test was indicating a significant difference in the success rate of task in threshold 40 and 50. This can be concluded that the task success rate of task is significantly improved at threshold 40 and 50, and voluntary motor control is possible. The malfunction rate ranged from 21 to 31 % regardless of the threshold, and no significant difference was observed in Friedman's test. On the other hand, the percentage of malfunction by stop increased as the threshold value increased. In addition, the subjects who successfully drove the motor at the threshold of 60 and 70 had their brains in a state of extreme concentration, and the motor continued to drive during the task section, and it took time to stop the motor even after the transition to the rest section. Since it is essential to ensure safety and to control equipment according to the user's intentions in order to promote the use of BCI which enabled stable control of motor drive and stop, can be said to be the optimal threshold was 40 and 50.

### キーワード

非接触制御, 脳波, ブレイン・コンピュータ・インタフェース, アクチュエータ制御, 駆動閾値

び介護施設の不足が深刻化している。2007年から2017年の10年間において、介護認定者数は1.41倍に増加しており、介護施設においても1.12倍の増加が確認されたが、急速な需要に対して供給量が追いついていない(厚生労働省, 2017)。その結果、介護従事者の負担が増加し、介護の質が低下している。これらの背景から、要介護者の自立支援と介護負担の軽

### 1. 緒言

近年、少子高齢化の進行にともない、要介護者の増加およ

減を図り、要介護者の生活の質 (Quality Of Life: QOL) を向上させることは重要な課題であるといえる。その対応策のひとつとして、電動車いすや電動介護用ベッドなどの介護福祉機器の使用が挙げられる。これまでも要介護者の自立支援を促進する実用的で利便性の高い機器展開がなされてきた (井上他, 2012; 中沢, 2016; 長谷川, 2008)。それらの機器開発のひとつとして、Brain-Computer Interface (BCI) が挙げられる。BCIとは、生体信号である脳波を入力信号として外部機器の随意的制御を行う実用的インタフェースであり、ヒトの意思や動作や言語を媒介せずに、ダイレクトに機器制御を行うことが可能である (木村・山崎, 2010)。したがって、脊髄損傷などによる重篤な四肢麻痺患者や進行性神経疾患など完全に運動危機が失った場合でも、周囲とコミュニケーションを取ることができる。一方で、微弱な信号である脳波は複雑な機器制御に応用する際に不安定であり、BCI制御における要求動作にはある程度の経験が求められるといった課題が阻害要因となり、社会に還元される速度は鈍い (雑賀他, 2009)。これらの要因を解決し、BCIの普及促進を図ることは、健常者のみならず肢体不自由者のQOL向上に資すると考えられる。また、システムの単純化を図り、シリアル動作に特化することで、介護福祉分野におけるニッチ市場への技術還元の加速化を狙える。

そこで、著者らは、複雑な動作をともなわない冗長性設計が許容される分野で、単数のアクチュエータのシリアル動作に特化したBCIシステムを構築した。その後、システムの応答性改善に向けたアプローチとして、モータ制御手法および駆動閾値の検討を行ってきた。一方で、従来のシステムでは使用者の意図が機器に反映されるまでにタイムラグが発生してしまうという課題が挙げられた。そこで、既往研究では、新しいモータ制御手法としてサンプリング脳波信号の処理においてゲート時間と定義した新しい評価区画の考え方を導入した新システムを構築した。その結果、応答精度の改善と誤作動低減効果が確認された (齋藤他, 2020)。

本研究の目的は、動作制御の応答性の向上に結びつくモータ制御システムを検証するために駆動閾値を 40、50、60、70 に設定し、それらの課題成功率および誤作動率から BCI システムの動作信頼性を評価することであった。

## 2. 実験装置

### 2.1 BCI システム概要

図1にBCIシステムの概略図を示す。システムは、簡易脳波計 (MindWave Mobile, NeuroSky)、マイクロコンピュータ (Arduino Uno R3, Arduino)、Bluetooth モジュール (BlueSMiRF,

Sparkfun)、モータ (RE-260, MABUSHIMOTOR)、PCより構成される。本システムでは、社会還元の応用展開が図りやすく、小型かつ軽量である理由からアクチュエータ部にはDCモータを採用した。

簡易脳波計の脳波のサンプリングタイムは512 Hzであり、eSenseメータ (attention:集中, meditation:弛緩) を取得する。計測データはバイト型から整数型に変換し、PCに記録された。データ送信は、簡易脳波計とマイクロコンピュータ間ではBluetoothによる無線通信、マイクロコンピュータとPCはUSBケーブルによる有線通信でデータ送信を行った。なお、本システムではattentionがmeditationを上回り、attentionが閾値を超えた場合にモータが駆動する設定とした (富樫・穴戸, 2019)。また、眼球運動や瞬目によるノイズの混入を防ぐためにPC画面中央に注視点を表示した。

### 2.2 脳波計測概要

図2に国際10-20法に基づく電極配置図と計測部位を示す。本研究では、複雑な動作をともなわない冗長性設計が許容される分野への応用を目的としているために、臨床レベルで求められる計測精度は必要としない。したがって、低拘束および低コストである点に着目し、簡易脳波計を選定した。簡易脳波計による脳波の電極は、国際10-20法により左前額部 (Fp1) と、耳朶 (A1) に貼付した。また、簡易脳波計ではFFT解析による各周波数帯域の抽出 ( $\delta$  波、 $\theta$  波、 $\alpha$  波、 $\beta$  波、 $\gamma$  波) と、NeuroSky社独自のeSenseアルゴリズムによるeSenseメータ (attention:集中, meditation:弛緩) の取得が可能であり、これらの信頼性は担保されている (NeuroSky, 2009)。attentionとmeditationは、0~100の範囲で算出さ

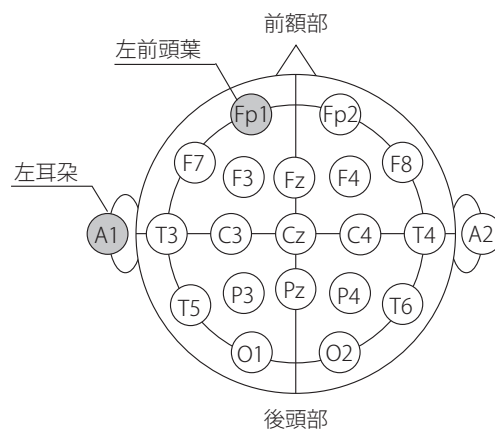


図2：国際10-20法に基づく電極配置図と計測部位

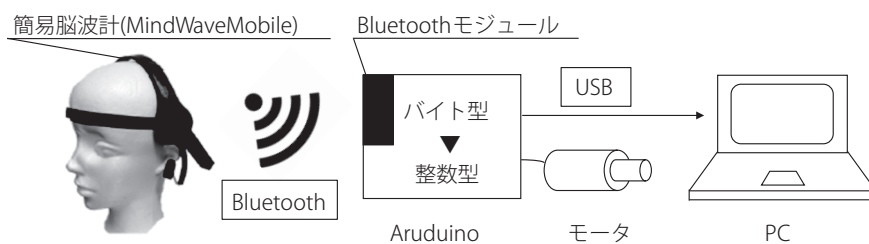


図1：BCIシステムの概略図

れ、0近傍値は低集中・低リラックス、100近傍値は高集中・高リラックス状態を表す。本システムではこの attention・meditationのデータをモータ駆動・停止を制御する入力信号として利用した。

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験条件

被験者は健常な男子学生5名(平均年齢21.0歳)とし、事前実験の趣旨と方法について説明し、十分な理解を得た。なお、各被験者において現在の体調・睡眠時間・カフェイン飲料の摂取等のアンケートを行い、問題がないことを確認したうえで実験を実施した。

実験は、外部からの影響を最小限に抑えること、電磁的ノイズに強いことから、2.7 × 2.6 × 2.0 mのシールドルーム内にて実施した。また、室内環境の不快感によるeSenseメータの変化を防ぐために、温湿度計によって室内温度を24 ~ 26 °C、湿度を55 ~ 70 %に維持した(Wolkoff, 2018)。室内には、呈示画面モニタを設置するための机と被験者の椅子を準備した。

#### 3.2 モータ制御手法

図3にモータ制御手法を示す。脳波集中状態(Concentration: 以下Cという)または弛緩状態(Relaxation: 以下Rという)を1 sec単位で自動的に判定された。一定の時間において同一のサンプリング信号が継続するゲート時間を3 secと設定し、モータ制御はゲート時間中にCが連続すればモータが駆動し、Rが連続すればモータは停止した(齋藤他, 2020)。この手法は従来のシステムで課題であった時間の遅れを軽減し、操作性の向上が期待される。

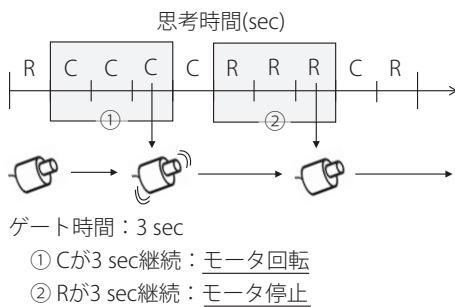


図3: モータ制御手法

#### 3.3 実験課題

図4に実験のタイムチャートを示す。実験は、閉眼安静区間(Rest)とモータ制御区間(Task)で構成される。Task区間を60 sec、その前後のRest区間を30 secとし、全実験時間を120 secとした。Rest区間は、興奮状態の脳波を安静状態にすることが目的である。Task区間において、Relaxを瞬目や体動を許容する区間、Rotationはモータの駆動想起によりモータ駆動を試みる区間と定義する。なお、RelaxおよびRotationはそれぞれ10 secとした。閾値は40、50、60、70と設定し、各被験者は各閾値において3回ずつ実験を実施した。

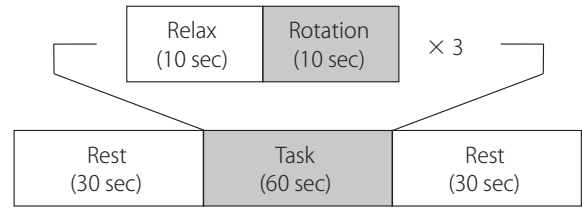


図4: 実験のタイムチャート

#### 3.4 評価方法

本実験では、各閾値における課題成功率および誤作動率を評価する。課題成功率はモータ駆動を試みるRotation区間のみの評価指標であり、誤作動率は実験時間全体の評価指標である。また、これらの評価指標の有意性を検証するために、有意水準5%としたFriedmanの検定を行った。Friedmanの検定はノンパラメトリック検定であり、対応のある3群以上のデータに有効であるとされる。その後、有意差を認めた条件に対して対応のあるt検定を行った。t検定は、両側検定であり、有意水準は5%とした。

課題成功率は、Rotation時間を $R_i$ 、実際のモータ駆動時間を $X_i$ とし、Rotation区間の課題成功率を式(1)より算出した。

$$\text{課題成功率 (\%)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{X_i}{R_i} \times 100 \quad (1)$$

誤作動率は、全実験時間 $T_s$ に対する総誤動作時間の割合より算出した。全実験時間を通して、誤動作が起きた時間をタイマーで計測し、その累積時間を総誤動作時間 $T_M$ と定義する。その後、誤作動率を式(2)より算出した。

$$\text{誤作動率 (\%)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{T_M}{T_s} \times 100 \quad (2)$$

#### 3.5 倫理的配慮

本実験は、機器の使用によって人体への影響がないことを確認している。そのため、被験者への影響はない。また連結不可能匿名化したデータのみを用いているため、個人情報の保護は十分になされている。さらに実験への参加・中止は、本人の意思に委ねられており、実験参加者の心理的苦痛をもたらさないものと想定される。以上のことから、本実験は、倫理審査を必要とする実験ではないと判断して実施した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 課題成功率

図5に各閾値における課題成功率、図6に各閾値における課題成功率分布を示す。課題成功率は、閾値40、50において68%以上と高値であったが、閾値60では45%、閾値70では30%と低値であった。また、従来のシステムと比較すると閾値40、50においてはおよそ10%向上しており、応答精度の向上が確認された。また、課題成功率分布より四分位範囲を比較すると、閾値40では54 ~ 98%、閾値50では48 ~ 91%と高値に集中しており、四分位範囲が小さいことから個人差は小さいことがわかる。閾値60では17 ~ 89%と個人差が最

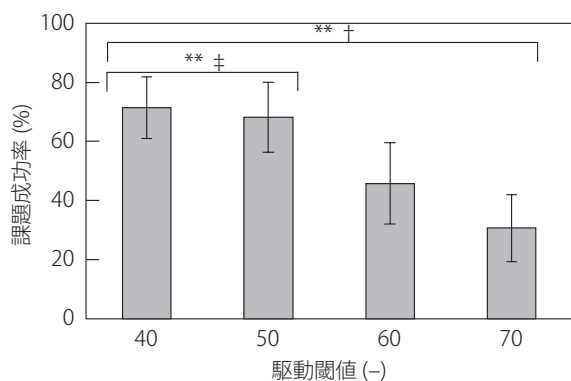


図5：各閾値における課題成功率

注：Mean ± S.D., †：Friedmanの検定、‡：対応のあるt検定、\*\*： $p < .05$ 。

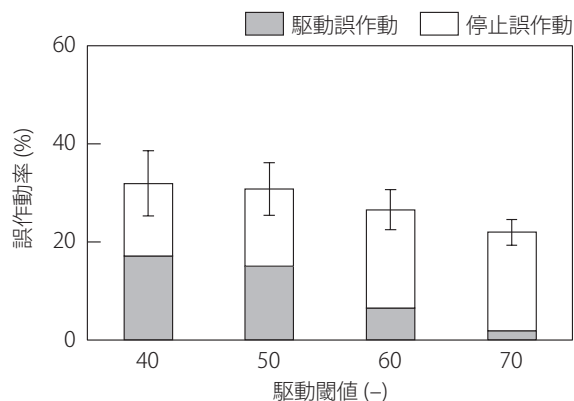


図7：各閾値における誤作動率

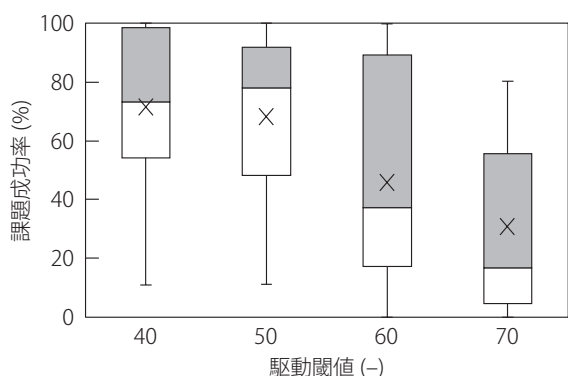


図6：各閾値における課題成功率分布

も大きく、最小値は0%であった。閾値70では4~55%に収束し、閾値60と比較すると個人差は小さいが、最小値は0%を示し、ほかの3つの閾値と比較すると非常に低値に集中している。課題成功率において、Friedmanの検定を行った結果、 $p$ 値は0.013 ( $p < 0.05$ )となり、有意差が認められた。その後、対応のあるt検定を行った結果、閾値40、50において有意差が認められた ( $p < 0.05$ )。この結果から、閾値40、50における課題成功率が有意に向上し、随意的にモータ制御が可能であると判断できる。その要因は、閾値を低値に設定することで全被験者において閾値以上のattentionを容易に維持することができたためである。その結果、Rotation区間において素早いモータ駆動を可能とし、個人差は小さく、課題成功率は高値を示した。閾値60、70では閾値が高値であるため、閾値を超えるattentionを維持する難易度が上がり、モータを駆動することができない被験者が多く確認された。その結果、課題成功率は低値を示したと考えられる。

#### 4.2 誤作動率

図7に各閾値における誤作動率を示す。誤作動率は、各閾値において21~31%を示した。また、誤作動率において、Friedmanの検定を行った結果、 $p$ 値は0.09 ( $p > 0.05$ )となり、有意差は認められなかった。誤作動は、モータが停止している状態が適切であるRestやRelax区間内でのモータ駆動による誤作動(駆動誤作動)と、モータが駆動している状態が

適切であるRotation区間内でのモータの停止による誤作動(停止誤作動)の2つに分類される。誤作動率がほぼ一定であることから、誤作動の種類は異なるが総誤作動時間に差はないことがわかる。課題成功率が高値である閾値40、50と閾値60、70の総誤作動時間に差がない要因として、駆動誤作動の有無が挙げられる。閾値40、50では閾値が低値であることにより容易にモータ駆動を行うことができる。そのため、Rotation区間において高値となったattentionが、Relax区間やTask区間後のRest区間において減少し、モータが停止するまでに時間を要し、駆動誤作動が発生している。しかし、従来のシステムと比較すると、新しいモータ制御手法を導入したことで適切なモータの駆動・停止の切り替えができており、切り替えまでに要する時間は短縮している。一方で、閾値60、70では実験時間全体においてモータ駆動を一度も成功することができない場合もあり、モータの停止状態が続くことが多く確認された。そのため、停止誤作動は全体の75%以上を占めており、駆動誤作動は低値を示している。また、閾値60、70でモータ駆動を成功した被験者は、attentionを高値に維持し続けることによって脳が極度の集中状態になってしまう。その結果、Task区間の間モータが駆動し続けてしまうことや、Task区間からRest区間に移行した後も脳波が安静状態に変化せず、モータ停止までに時間を要した。BCI技術のようなヒューマンインタフェースの場合、安全性を担保するうえで機器が危機的状況に陥った際は瞬時に停止することが前提条件である。また、介護現場への導入に向けて、使用者の意図に従った機器の制御および作動についても重要な点である。したがって、モータの駆動・停止において安定した制御が可能であった閾値40、50が最適な閾値であるといえる。

#### 4.3 各閾値における attention と meditation の推移

図8に各閾値におけるattentionとmeditationの推移を示す。被験者5名の中でも最も動作指示に従ったeSenseメータであった被験者Cを選定した。最も動作指示に従ったeSenseメータとは、閉眼安静区間であるRest区間では、脳波状態の安静を目的としているためにattentionは低値、meditationは高値を示す。反対に、モータ制御区間であるTask区間では思念の集中を行うためにattentionは高値、meditationは低値を示す。すなわち、実験時間全体においてattentionでは「凸型」、

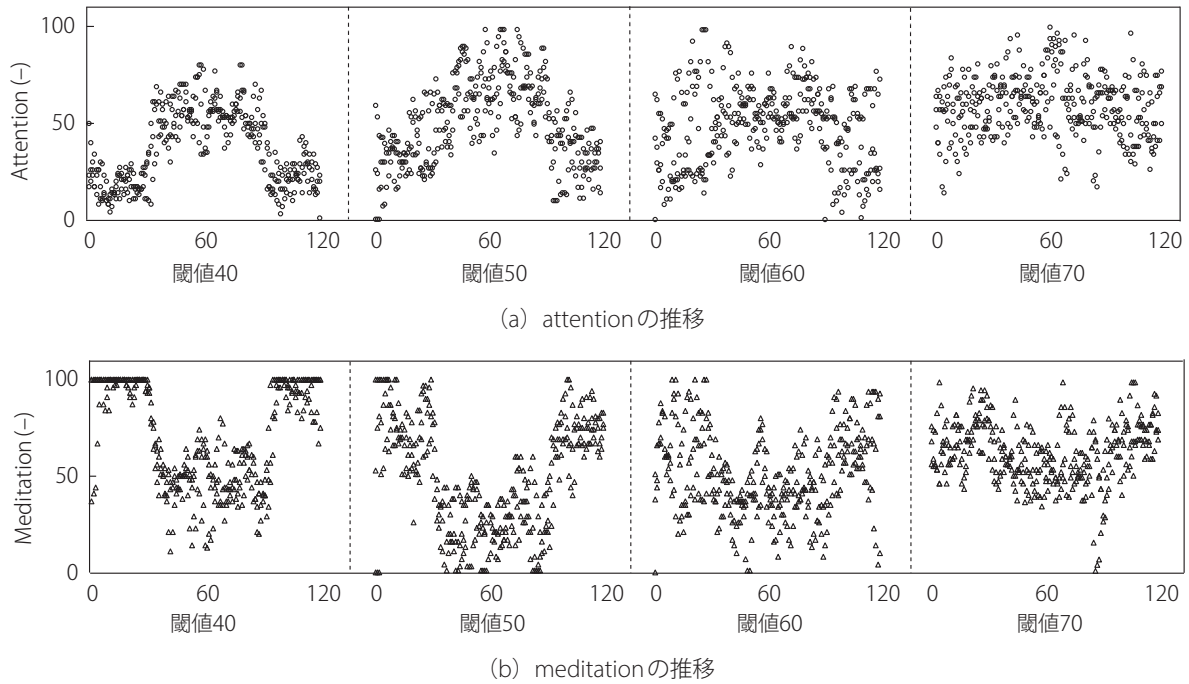


図8：各閾値におけるattentionとmeditationの推移

meditationでは「凹型」に変化する形が最も適切であるといえる。

閾値40、50においては、Rest区間である0～30 secおよび90～120 secでのattentionは0～50と低値を示し、meditationは50～100と高値を示した。一方で、Task区間である30～90 secでのattentionは40～100に収束し、meditationは0～70に収束した。推移の形に着目するとattentionでは「凸型」、meditationでは「凹型」を表しており適切な切り替えが行われていることがわかる。とくに、Task区間終了後において瞬時にeSenseメータの切り替えが行われ、脳波が短時間で安静状態に変化し、モータの停止が確認されている。

閾値60、70においては、閾値40、50と比較してattentionとmeditationの両方において混在しており、非常に不安定な推移となっている。とくに、閾値70においては全実験時間を通してattentionとmeditationともに40～100に収束しているため、モータの駆動条件 (attention > meditation) を満たすことができず、停止誤作動につながった。また、Task区間終了後においても脳波状態は安静状態に変化せず、attentionは40以上を示した。これは、閾値を高値に設定することでモータ駆動における難易度が高くなるため、被験者はより集中状態を高めることが要求される。一度集中状態を極度に高めた被験者は脳波を安静状態にすることが困難になり、実験を通してattentionは高値に集中したと考えられる。また、attentionが高値に集中することで疲労感を感じる事が予想されるため、閾値の設定において短時間で脳波が安静状態に変化することが可能であるという点は非常に重要であるといえる。

これらの結果から、閾値を低値に設定することで、集中と弛緩状態の適切な切り替えを可能とし、操作性の向上効果および疲労感の減少効果が見込まれる。

## 5. 結言

本研究の目的は、動作制御の応答性の向上に結びつくモータ制御システムを検証するために閾値40、50、60、70に設定し、それらの課題成功率および誤作動率からBCIシステムの動作信頼性を評価することであった。得られた結果の要約を以下に示す。

- Friedmanの検定では、各閾値の課題成功率において有意差が認められ、誤作動率については有意差が認められなかった。
- 閾値40、50の課題成功率は、t検定より有意差が認められ、随意的にモータ制御ができたことが確認された。
- 誤作動率はほぼ一定であるが、閾値の増加にしたがって停止誤作動の占める割合が増加した。
- 閾値40、50においてattentionは「凸型」、meditationは「凹型」に変化し、脳波の集中・弛緩状態において適切な切り替えを可能とした。
- BCIの普及促進を図るうえで安全性の担保および使用者の意図に従った機器制御は必須であるため、モータの駆動・停止において安定した制御が可能であった閾値40、50が最適な閾値であるといえる。

## 引用文献

- 井上剛伸・塚田敦史・酒井美園・坂上勝彦・諏訪基 (2012). 重度障害者の自律移動支援機器の開発に関する研究—個別対象によるオーファン・プロダクツの開発—. バイオメカニズム, Vol. 21, 65-77.
- 木村達洋・山崎清之 (2010). 最近のBrain-Computer-Interface (BCI) 研究の動向. 東海大学紀要開発工学部, Vol. 20, 7-12.

- 
- 厚生労働省 (2017). 平成29年 介護保険事業状報告書.  
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031859812&fileKind=2>. (閲覧日: 2021/11/27)
- 雑賀広記・三浦直樹・王碩玉 (2009). 黙読を用いた Brain-Computer Interface の開発. *バイオメディカル・フアジィ・システム学会誌*, Vol. 11, No. 1, 61-66.
- 齋藤夕綺・小野寺良二・穴戸道明 (2020). BCIシステムを用いたモータの非接触制御における最適なゲート時間の検討. *日本福祉工学会第24回学術講演会講演論文集*, 27-28.
- 富樫亮太・穴戸道明 (2018). BCIを用いた随意的モータ制御における駆動閾値の比較検討. *生体医工学*, Vol. 56, 5-6.
- 富樫亮太・穴戸道明 (2019). モータの非接触制御における誤作動率の評価検討. 平成31年東北地区若手研究者研究発表会, 69-70.
- 中沢信明 (2016). 福祉ロボットとヒューマンインタフェース. *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol. 19, No. 6, 389-393.
- NeuroSky (2009). NeuroSky's eSense Meters and Detection of Mental State.
- 長谷川良平 (2008). ブレインマシンの現状と将来. *電子情報通信学会誌*, Vol. 91, No. 12, 1066-1075.
- Wolkoff, P. (2018). Indoor air humidity, air quality, and health: An overview. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 221, No. 3, 376-390.

(受稿: 2022年1月17日 受理: 2022年3月3日)