

SSVEP ベースの BCI におけるフリッカ刺激の数と大きさの影響

振原 知希¹ 宮下 芳明^{1,a)}

概要：視覚情報を取得する SSVEP ベースの BCI は、コンピュータ画面上で様々な操作ができ、また高速な通信ができることから注目を集めている。SSVEP ベースの BCI は刺激の数が少ないほど高い精度が得られることがわかっているが、ターゲットサイズが BCI の制御に与える影響については調べられていない。そこで本研究では、フリッカ刺激をタイル状に並べた BCI 用の UI を設計し、刺激の大きさが SSVEP ベースの BCI のパフォーマンスに与える影響を調査した。その結果、刺激の数による影響は見られなかったが、刺激の視角が選択時間に影響を与えていることがわかった。また、実験結果をもとに BCI の特性を利用した最適な UI について考察した。

1. はじめに

Brain Computer Interface (BCI) は、脳波の検出、あるいは脳への刺激の付与によって、脳とコンピュータとのインタフェースをとる機器の総称であり、特に運動能力が低下したユーザに適したインタフェースである。娯楽、安全、セキュリティのために、より幅広いユーザを対象としたアプリケーションや BCI 機器が登場している。BCI 機器には、muse2 [1] や FocusCalm [2] といった集中度をモニタリングする事ができるものや、NextMind [3] のように視覚情報を取得することができるものがあり、取得する脳波データによって用途が全く異なっているのが特徴である。

様々な脳波を扱うことができる BCI の中でも視覚野の脳波の検出をベースとする BCI は、周期的に明滅するフリッカ刺激を注視している状態を識別できる。そのため、コンピュータ画面上でのカーソルの移動、アイコンの選択など、用途に応じた複数の操作が可能となる。視覚野から取得できる情報の 1 つに定常状態視覚誘発電位 (Steady-State Visual Evoked Potential : SSVEP) がある。SSVEP を検出することにより、わずかなキャリブレーション時間で最大 70 bits/min の通信速度を実現するためオンラインの性能も高く、SSVEP ベースの BCI は注目を集めている [4]。

本研究の目的は、BCI の特性を利用した最適な UI を提案することである。一度に 4 つの刺激を表示し、複数回選択を行う階層型の選択方法を高く評価する研究 [5] や、最適なフリッカ刺激の数を評価する研究 [6] は存在するが、



図 1 実験の様子。写真では撮影のために電気をつけているが、実験中は PC 画面以外の光を遮断した状態で実験を行った。

どれもターゲットサイズが BCI の制御に与える影響についてはあまり言及されていない。そこで本研究では、フリッカ刺激をタイル状に並べた BCI 用の UI を設計し、フリッカ刺激の大きさが SSVEP ベースの BCI のパフォーマンスにどのような影響を与えるか調査した。調査を行うために NextMind を用いた実験を行った (図 1, 2)。調査結果をもとに選択に適したフリッカ刺激の大きさについて考察し、最適な UI を提案した。

2. 関連研究

2.1 SSVEP の特性

SSVEP は、視覚刺激の提示によって誘発される視覚誘発電位 (Visual Evoked Potential : VEP) の一つである。

¹ 明治大学

^{a)} homei@homei.com



図 2 実験に用いた NextMind の写真.

周期的に明滅する刺激（フリッカ刺激）に注意を向けると SSVEP が誘発され、脳波、特に一次視覚野からの信号に、刺激と同じ周波数の基本波または高調波に一致する成分が現れる [7]. SSVEP は、1-100 Hz の周波数を持つフリッカ刺激によって誘発され [8], 10 Hz 付近で最大の振幅が見られる. 一方で高周波のフリッカ刺激では、最小の反応が見られる [9].

2.2 刺激の数と BCI のパフォーマンス

刺激の数が BCI の制御に与える影響を調査した文献がいくつか存在する. Gemblar らは刺激の数が多くなることで BCI の制御が悪くなることを示した [6]. 画面上の刺激の数が増えることで、一部の実験参加者は視覚疲労などの不快感を訴えた. また、隣接するフリッカ刺激を選択してしまうエラーが多かったため、刺激の近接性が BCI の制御を悪化させた主な原因であると報告している. 一方でターゲット数が少ないほど高い精度が得られたことも報告している. 特に 4 つのフリッカ刺激をターゲットとして使用した BCI 研究では、すべてのユーザがアプリケーションを制御できるようになったことが報告されている [5, 10, 11].

Stawicki らは SSVEP ベースの BCI は精度や速度でアイトラッキングに劣ると指摘しているが、ターゲット数が少ない GUI に対し、非侵襲的な SSVEP ベースの BCI の性能は非常に有望で、スタンドアロンの高速通信ツールとして使用できる可能性を示している [12].

2.3 Information Transfer Rate (ITR)

情報伝達率 (Information Transfer Rate : ITR) は、BCI システムのために考案された一般的な評価指標であり、精度、選択可能なターゲットの数、各選択に要する時間からシステムの出力によって伝達される情報量を決定するものである [13]. 1 回の試行で送信されるビット数 B は、式 1 で計算できる.

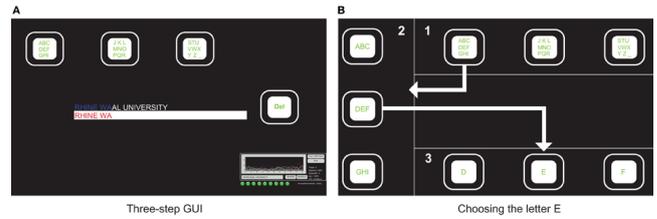


図 3 Three-step spelling application の GUI ([5] Figure 2 より引用).

$$B = \log_2 N + P \log_2 P + (1 - P) \log_2 \left[\frac{1 - P}{N - 1} \right] \quad (1)$$

ここで、 N は選択可能なターゲットの数であり、 P はターゲットが正しく選択される確率である. ITR は、 B を 1 試行あたりの時間 (分) で除算することで計算できる.

2.4 BCI 向けの階層型メニュー GUI

Gemblar らは、SSVEP ベースの BCI が少数のターゲットに対して高い精度や速度を得られることから、3 回の選択で文字を決定する Three-step spelling application (図 3) を提案している [5]. 刺激周波数、分類閾値、セグメント長など SSVEP に関する定数をユーザごとに慎重に選択することで、幅広い層で高い精度を達成できることが確認された.

また、Gemblar らは、2 回の選択で文字を決定する Two-step spelling application を提案し、28 個のボタンを表示させる QWERTZ speller と Three-step spelling application とで比較を行っている [14]. その結果、ターゲットの数が増えると ITR は上昇し、選択精度は低下することが判明した.

3. 実験

本実験は、ターゲットの大きさと数が選択時間、エラー率、ITR に与える影響を調査すること目的に行った. また、フリッカ刺激を見続けることで起こる酔いへの影響を、16 項目の質問群からなる The Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) を用いた 4 段階アンケートで評価した [15].

3.1 実験環境

BCI は NextMind を使い、PC は ALIENWARE M17 R2 (Intel Core i7-9750H, 2.6 GHz, 16GB RAM, Windows 10) を使用した. PC の解像度は 1920×1080 pixels であり、ディスプレイは 17.3 インチ (383.0×215.4 mm, 0.199 mm/pixel) であった. 実験システムは Unity 2020.3 で実装されており、フルスクリーンで表示された.

蛍光灯や LED などのフリッカ刺激、外光が選択時間に影響を与えてしまう可能性を考慮し、実験はディスプレイ以外の光を遮断して行った.

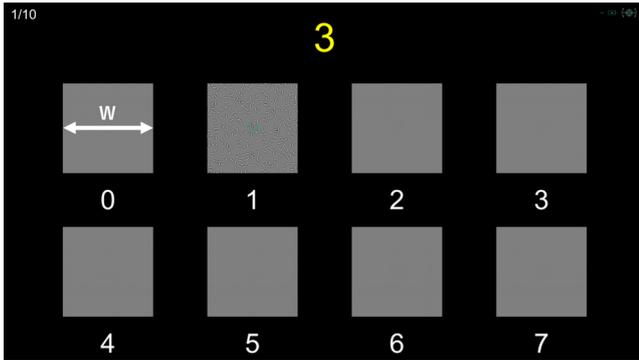


図 4 タスクの概要図。Space キーを押下した後、上部に黄色で書かれた番号のフリッカ刺激を注視して選択する。

3.2 タスク

図 4 にタスクの概要を示す。タスクには、複数のフリッカ刺激のアイコンを用意し、アイコンの形は正方形に統一した。それぞれのアイコンの大きさ (W) は等しくし、各アイコンの中心間の距離は 400 pixels (79.6 mm) で統一した。

参加者は実験の開始前にキャリブレーションを行った。キャリブレーションのスコアは 1 点から 5 点までの 5 段階で評価され、3 点以上のスコアを獲得した上で、同時に提示される 3 つのフリッカ刺激の選択に成功した場合に、キャリブレーションを成功とした。

選択すべきターゲットとなるアイコンの番号はすべてランダムで指定され、画面上部の黄色い数字で表示された。Space キーを押下してから指定されたターゲットのアイコンを選択するまでを 1 試行とし、1 つの条件で続けて 6 試行の選択を行うまでを 1 セットとした。非ターゲットのアイコンを選択した場合は 1 試行内のエラーとしてカウントされた。参加者が非ターゲットを選択した際は、誤選択を伝える音によりフィードバックされ、各ターゲットの選択時には、上部の黄色の数字が赤色に変化することでフィードバックされた。

参加者はキャリブレーション終了時と、5 セットのタスクを終えるごとに、SSQ に回答した。また、実験終了後は自由記述のアンケートにも回答した。また、必要があれば条件が変わる時点で十分な休憩を取らせた。

視覚野の情報を取得するセンサのステータスは常に右上に表示されている。参加者はセンサが認識されていることを確認した上でタスクを行った。

3.3 参加者

参加者は 10 名 (19-24 歳, 平均 21.6 ± 1.36 歳) であった。その内男性が 7 名, 女性が 3 名であった。参加者のうち、眼鏡の使用者は 2 名, コンタクトレンズの使用者は 3 名で、裸眼は 5 名であった。参加者のうち 1 名は、NextMind を何度も使用したことがあり、3 名は NextMind を 1-2 回使用したことがあった。

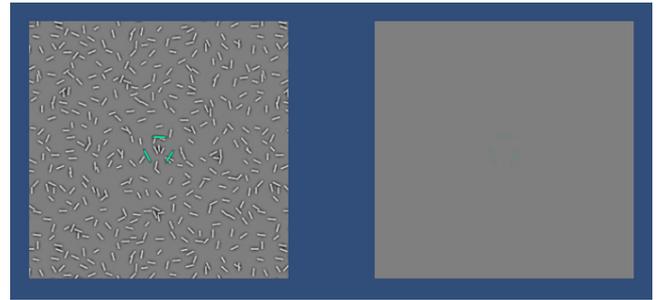


図 5 本実験で用いたフリッカ刺激。

また、参加者からは予め、30 分から 1 時間程度、暗い場所で PC 画面を見続けるタスクを行くことへの了承を得ていた。

3.4 刺激

提示するフリッカ刺激は、NextMind SDK に含まれているものを使用した (図 5)。全フレームで高々 1 つの刺激が図 5 (左) の状態になっており、2 フレーム続いて同じ描画がされる箇所がランダムに存在した。また、各刺激の明滅する順番には一定の周期性が見られた。

3.5 実験デザインと手順

ディスプレイから参加者の眼までの距離は 50 cm に固定した。アイコンの大きさ (W) は 5 条件 (100, 150, 200, 250, 300 pixels; それぞれ, 視角 2.28° , 3.42° , 4.56° , 5.70° , 6.84°) であった。フリッカ刺激の個数 (N) は 3 条件 (2 個, 4 個, 8 個) であったが、 $N = 4$ の条件において、アイコンの配置方法を 2 条件 (1 行 \times 4 列, 2 行 \times 2 列) としたため、 N を 4 条件 ($N=2, 4 (1 \times 4), 4 (2 \times 2), 8$) として扱った。

W の条件ごとに 1 セット、計 5 セットを 1 ブロックとし、 N の条件ごとに 1 ブロック、計 4 ブロックのタスクを行った。したがって、全試行は $5 (W) \times 4 (N) \times 6$ 試行 = 120 回であった。 N と W の順番はランダムであり、各ブロックで W の順番は統一した。

3.6 計測値

Space キーを押下してからターゲットが選択されるまでの選択時間 (T)、エラー率、ITR であった。

4. 結果

6 試行 \times 5 (W) \times 4 (N) \times 10 名 = 1,200 試行のデータが得られた。実験プログラムの起動直後は NextMind の接続状態が安定していない可能性があったため、各セットの 1 試行目 (合計 200 試行) を除外し、1,000 試行を分析した。IBM SPSS を用いて分散分析を行った。多重比較には Bonferroni 法を用い、もし、Mauchly の球面性検定が成立しなかった場合、自由度や p 値などの値は Greenhouse-

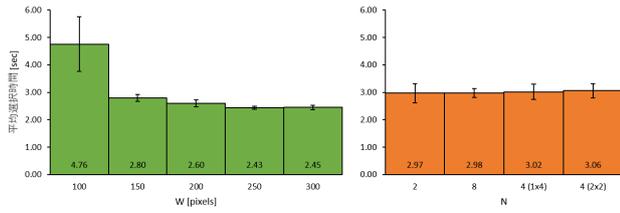


図 6 W ごとの平均選択時間, N ごとの平均選択時間.

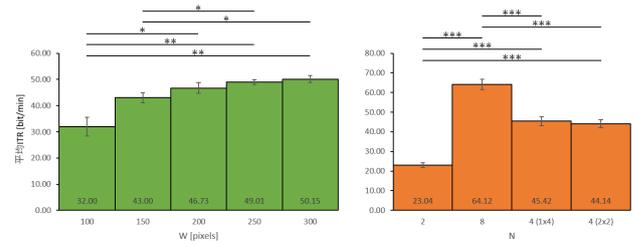


図 7 W ごとの平均 ITR, N ごとの平均 ITR.

表 1 各条件でのエラー率 (%).

	N = 2	N = 4 (1 × 4)	N = 4 (2 × 2)	N = 8
W = 100	0	1.96	0	1.96
W = 150	0	1.96	0	0
W = 200	0	0	0	1.96
W = 250	1.96	0	0	1.96
W = 300	0	0	0	0

Geisser 推定によって補正された。独立変数は W , N , 従属変数は操作時間 T , ITR であった。グラフ中のエラーバーは標準誤差, ***, **, *はそれぞれ $p < .001$, $p < .01$, $p < .05$ を示す。

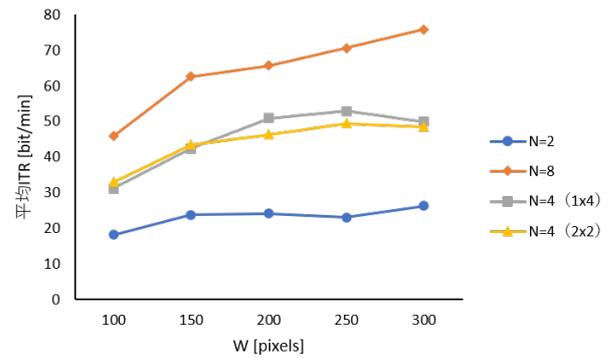


図 8 各 N における W の平均 ITR への影響.

4.1 ターゲットサイズ W , フリッカ刺激の数 N ごとの選択時間 T

主効果が見られたのは W ($F_{1,05,9.43} = 5.128$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.363$) であった。 N ($F_{3,27} = 0.074$, $p = 0.973$, $\eta_p^2 = 0.008$) では見られなかった (図 6)。また, 交互作用は見られなかった。

自由記述のアンケートでは, 10 名中 7 名の参加者が「ターゲットが小さいと選択が難しかった」と回答したが, 一方で 1 名の参加者は「ターゲットの小ささは気にならなかった」と回答した。また, 2 名の参加者は「ターゲットが増えたことで探すのに時間がかかった」と回答している。

4.2 ターゲットサイズ W , フリッカ刺激の数 N ごとのエラー率と ITR

全 1,000 試行の間に, エラーは 6 回発生した。すべての条件でエラー率が低く, W と N による影響もあまり見られなかった (表 1)。

各条件における平均 ITR を図 7 に示す。ITR の算出には, 式 1 を用いた。 W ($F_{1,99,17.87} = 18.834$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.677$) と N ($F_{3,27} = 120.391$, $p < .001$, $\eta_p^2 = 0.930$) で主効果が見られた。多重比較の結果, W が大きくなるほど ($W = 100$ と $W = 250$, $W = 100$ と $W = 300$ のペアでは $p < .01$, $W = 100$ と $W = 200$, $W = 150$ と $W = 250$, $W = 150$ と $W = 300$ のペアでは $p < .05$), また刺激の個数が多いほど ($p < .001$) ITR が増加した。また, $W \times N$ では交互作用が見られ ($F_{12,108} = 160.507$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.259$), W が大きくなるほど, N の影響が大きくなるのが観察された (図 8)。

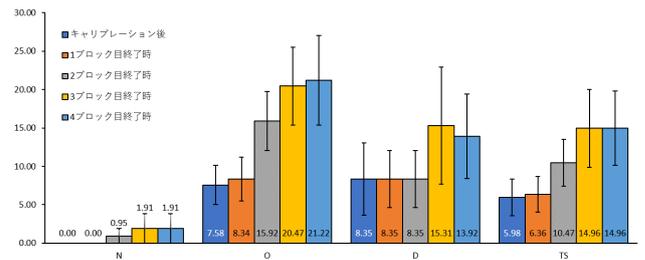


図 9 キャリブレーション終了時と, 各ブロック終了時における SSQ の各平均スコア.

4.3 SSQ の推移と実験中の体調変化

SSQ のスコアは, Nausea (悪心, N), Oculomotor (眼精疲労, O), Disorientation (失見当識, D), Total Serenity (総合スコア, TS) の 4 項目で採点された。図 9 は, 参加者間の平均スコアの推移を示したものである。エラーバーは標準誤差を示している。

自由記述のアンケートでは, 複数の参加者が実験の後半で体調が変化したことを回答した。3 名の参加者は BCI の締め付けによって頭痛が起きたと回答しており, 4 名の参加者は眠気や眼精疲労, 集中力の低下が起こったと回答した。

5. 考察

ターゲットサイズが大きくなるほど, 選択時間が短くなる傾向が見られた。特に, $W=100$ では平均選択時間が長くなっており, 標準誤差も大きくなっていった。このことから, ターゲットサイズを一定以上小さくすると, 選択時間に大きな個人差が生じてしまうと予想できる。一方で, フ

リッカ刺激の数や配置は、ターゲットの選択時間にあまり影響を与えなかった。このことから、フリッカ刺激のアイコンを画面内に複数表示してもパフォーマンスが損なわれないと考えられる。また、ITRの結果から、 W が同じであれば一度に複数のアイコンを表示したほうが選択の効率が上がると考えられる。Gemblerらは、ターゲットが増えることによって選択精度が下がると報告していたが [6]、本実験の結果から、選択精度が下がった要因はターゲットサイズの変化である可能性が考えられる。さらに、本実験では眼精疲労を起こした参加者が多かったことが、SSQやアンケートの結果から読み取れる。このことは、小さいターゲット、特に $W=100$ (視角 2.28°) で選択時間が長くなってしまったことが主な原因であると考えられる。以上のことから、SSVEP ベースの BCI に向けた UI を設計する際は、ある程度大きいフリッカ刺激を画面上に配置する前提で、配置できる最大数を考慮する必要があると言える。

6. 小さなディスプレイに対する実用性の検証

ディスプレイサイズの制約により、一定以上の大きさを保ちながら提示できるフリッカ刺激の数には限界がある。そのため、ウェアラブルウォッチなど、ディスプレイが小さく、ターゲットサイズを大きくすることが困難なデバイスに対しては、実用性が低いように思われる。しかし、ディスプレイと顔の距離を短くすることで視角が大きくなり、問題が解決する可能性がある。そこで、視角が同じであれば、選択のしやすさに差が出ないか調査するための実験を行った。

6.1 実験環境, 参加者, 刺激

3章の実験と同じ実験環境で行った。実験で用いた刺激も、本実験と同じであった。参加者は1名で、本実験に参加していた。

6.2 タスク

タスクには、2個のフリッカ刺激のアイコンを用意した。本実験と同様、アイコンの形は正方形に統一、2個のアイコンの大きさ (W) は等しくした。また、アイコンの中心間の距離は 400 pixels (79.6 mm) で統一した。

タスクの内容は本実験とほぼ同じであったが、異なる点として、1つの条件で続けて 11 試行の選択を行うまでを 1 セットとし、SSQ への回答は行わなかった。

6.3 実験デザインと手順

ディスプレイから参加者の眼までの距離 (D [cm]) とターゲットサイズ (W [pixels]) の組み合わせは 3 条件 ($(D, W) = (25, 100), (50, 100), (50, 200)$; それぞれ、視角 $4.56^\circ, 2.28^\circ, 4.56^\circ, 100, 200$ pixels は 19.9, 39.8 mm) であった。

1 ブロックを (D, W) の条件がランダムな順番で選出さ

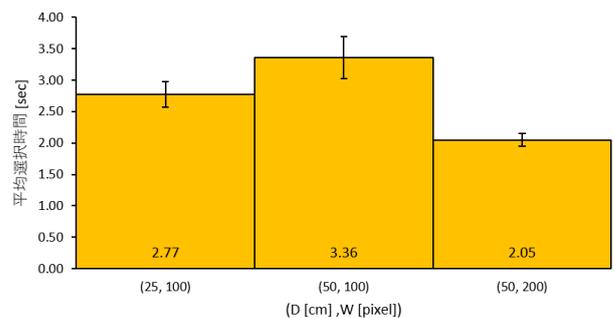


図 10 (D, W) ごとの平均選択時間。

れる 3 セットとし、5 ブロックの実験を行った。したがって、全試行は 3 条件 \times 11 試行 \times 5 ブロック = 165 回であった。

6.4 計測値

Space キーを押下してからターゲットが選択されるまでの選択時間 (T)、エラー率であった。

6.5 結果

本事件と同様に、各セットの 1 試行目 (合計 15 試行) を除外し、150 試行を結果に用いた。エラー率は標準誤差を示す。また、全ての試行でエラーは見られなかった。同じ W 間で比較すると、 D が小さくなることで選択時間が減少した (図 10)。また、視角が同じ場合でも選択時間にわずかな差が見られた。

6.6 考察

D の変化によっても操作時間に影響が見られたことから、フリッカ刺激の選択時間は視角による影響を強く受けると考察できる。この考察から、ディスプレイと顔の距離を短くすることも、選択のしやすさを向上させる手段として期待できる。一方で、視角が同じ場合でも、ディスプレイから参加者の眼までの距離が長いと選択時間が短くなったことから、視角以外で選択時間に影響を与える要因があると考えられる。

7. 制約・展望

本実験で試行回数を決める際、最初は 1 セットあたり 11 試行のデータを取る予定だったが、1 名の参加者が後半で体調不良を訴えたため、試行回数を見直した。そのため、1 名あたり 1 条件で 6 試行のデータしか得ることができなかった。しかし、複数の参加者は「実験中に選択のコツを掴んだ」と回答しており、練習用として試行回数を増やせば違った結果が得られた可能性も考えられる。

本実験でフリッカ刺激の数の最大条件を 8 個としたが、8 個より多くするとディスプレイに入り切らなくなってしまうため、それ以上の数については調べることができず、

先行研究 [6] の結果が妥当であるかの考察ができなかった。そのため、8 個より多い条件について、本実験で用いたものよりも大きいディスプレイを用いて追実験を行う必要がある。

本研究で行ったすべての実験は、外光を遮断して行った。そのため、外光を考慮した場合に異なった結果が得られる可能性がある。しかし、PC やタブレットなどで実用化する際は、外光を取り入れた場合のデータを用いる必要がある。一方で、外光を遮断して使用する VR 機器に対しては有用なデータである可能性が高い。そこで今後の展望として、外光を遮断した VR 空間で追実験を行い、本実験と似た傾向のデータが得られるかの調査を行いたいと考えている。

8. 結論

本研究では、フリッカ刺激の大きさが SSVEP ベースの BCI のパフォーマンスに与える影響を調査した。実験の結果から、フリッカ刺激の数が選択時間に与える影響は見られなかったが、フリッカ刺激の視角が選択時間に影響を与えていることが明らかとなった。また、どの条件でもエラー率が低く、SSVEP ベースの BCI の正確性が示された。さらに、ITR の結果からは大きいターゲットを多く表示するのが最も効率的であることがわかった。

以上のことから、SSVEP ベースの BCI 向けに UI を設計する際、ターゲットの大きさを項目ごとに調整することで使いやすい UI を作ることができる。例えば、選択される回数の多い場所はターゲットを大きくし、あまり選択されないことがない場所のターゲットを小さくすることで、使いやすい UI の設計が期待できる。

参考文献

- [1] Muse™: Muse 2: Brain Sensing Headband - Technology Enhanced Meditation, <https://choosemuse.com/muse-2/>. (Accessed on 12/01/2021).
- [2] FocusCalm: FocusCalm — Train Your Brain to Reduce Stress — Meditation Headband, <https://focuscalm.com/>. (Accessed on 12/01/2021).
- [3] NextMind: NextMind - Real-time Brain Computer Interface - Order your Dev Kit now, <https://www.next-mind.com/>. (Accessed on 12/01/2021).
- [4] Parini, S., Maggi, L., Turconi, A. C. and Andreoni, G.: A Robust and Self-Paced BCI System Based on a Four Class SSVEP Paradigm: Algorithms and Protocols for a High-Transfer-Rate Direct Brain Communication, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2009, pp. 1–11 (2009).
- [5] Gembler, F., Stawicki, P. and Volosyak, I.: Autonomous Parameter Adjustment for SSVEP-Based BCIs with a Novel BCI Wizard, *Frontiers in Neuroscience*, Vol. 9, p. 474 (2015).
- [6] Gembler, F., Stawicki, P. and Volosyak, I.: Exploring the possibilities and limitations of multitarget SSVEP-based BCI applications, *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1488–1491 (2016).
- [7] hua Zhu, D., Bieger, J., Molina, G. N. G. and Aarts, R. M.: A Survey of Stimulation Methods Used in SSVEP-Based BCIs, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2010, pp. 1–12 (2010).
- [8] Herrmann, C.: Human EEG responses to 1-100 Hz flicker: resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena, *Experimental Brain Research*, Vol. 137, pp. 346–353, DOI: 10.1007/s002210100682 (2001).
- [9] Regan, D.: *Human brain electrophysiology: Evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine*, Elsevier (1989).
- [10] Guger, C., Allison, B., Grosswindhager, B., Prueckl, R., Hintermüller, C., Kapeller, C., Bruckner, M., Krausz, G. and Edlinger, G.: How many people could use an SSVEP BCI?, *Frontiers in neuroscience*, Vol. 6, p. 169, DOI: 10.3389/fnins.2012.00169 (2012).
- [11] Stawicki, P., Gembler, F. and Volosyak, I.: Driving a Semiautonomous Mobile Robotic Car Controlled by an SSVEP-Based BCI, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2016, pp. 1–14, DOI: 10.1155/2016/4909685 (2016).
- [12] Stawicki, P., Gembler, F., Saboor, A. and Volosyak, I.: Comparison of Speed, accuracy, and User Friendliness between SSVEP-based BCI and Eyetracker, *GBCIC* (2017).
- [13] McFarland, D. J., Sarnacki, W. A. and Wolpaw, J. R.: Brain-computer interface (BCI) operation: optimizing information transfer rates, *Biological Psychology*, Vol. 63, pp. 237–251 (2003).
- [14] Gembler, F., Stawicki, P. and Volosyak, I.: Suitable Number of Visual Stimuli for SSVEP-Based BCI Spelling Applications, *IWANN*, pp. 441–452 (2017).
- [15] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. and Lilienthal, M. G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220 (1993).