

輝度変化による運動錯視を用いた SSVEP ベース BCI

振原 知希¹ 宮下 芳明^{1,a)}

概要：輝度を変化させた静止画の連続によって、一方向に無限に移動しているように知覚させる運動錯視が存在する。この運動錯視を用いることで、言語によらない直感的な選択を行えるような UI のデザインが可能になる。一方、SSVEP ベースの BCI に向けた UI をデザインする際、一定周期で明滅を繰り返すフリッカ刺激をターゲットとして用いる。このような UI では、フリッカ以外のアニメーションを各ターゲットに付与できないため、リッチな UI のデザインが困難になる。そこで、輝度変化による運動錯視に注目した。この運動錯視は輝度を反転させるため、一定周期をもつフリッカ刺激とみなすことができる。そのため、SSVEP ベースの BCI 向け UI に導入することができれば、UI デザインの質を高めることが可能になる。本研究では、輝度変化による運動錯視を BCI 向けの UI に導入した場合、UI としての機能性を保証することができるか調査した。実験では異なる周波数を持つ運動刺激に対する識別精度を測定し、その結果、最大で 80%以上の精度で識別可能であることがわかった。

1. はじめに

エレベーターの「開」ボタンと「閉」ボタンには記号が描かれていることが多い。これは言語関係なく意味が伝わるようにするための工夫だが、初見ではどちらが「開」なのかわかりにくい。このように、静止した画像や図形を用いて UI をデザインすると、ユーザは直感的に操作できなくなることがある。ところが、これらの UI デザインに動きを付与することによって、直感的な操作性を補うことができる。実際にゲーム制作の場では、ユーザが使いやすく、楽しめる UI をデザインするために、様々な種類のアニメーションを用いている。

一方、錯視の一つとして、少数の静止画の繰り返しであるにも関わらず、刺激が一方向へ動き続けているように知覚される運動錯視が存在する。このような運動錯視を UI に導入することにより、ユーザはアプリケーションの操作時に錯覚を楽しむことができるようになる。その上、ユーザが直感的に UI を操作することも可能になるだろう。例えば、図 1 の右側のように円環の UI コンポーネントを 2 つ用意し、一方は拡大し続けているように知覚される運動錯視、他方は縮小し続けているように知覚される運動錯視を付与する。すると、拡大して見えるコンポーネントには“+”，縮小して見えるコンポーネントには“-”の意味が



図 1 輝度変化による運動錯視を用いた SSVEP ベースの BCI 向け UI の提案イメージ。ドローン操縦用の UI を想定している。各 UI コンポーネントは並進運動や回転運動、拡大・縮小運動を無限に繰り返しているかのように知覚される。

生じる。また、図 1 の中央下部にある 2 つの円環上に矢印が並ぶデザインに対し、無限に回転し続けているように知覚される運動錯視を用いることで、矢印が持つ意味合いを補強することができる。

輝度変化による運動錯視を UI に取り入れることの利点は、言語によらない操作を可能にすることだけではない。もう一つの大きな利点として、この運動錯視の「輝度が反転する」という特徴が、後述する SSVEP ベースの BCI と非常に相性が良いことが挙げられる。

Brain-Computer Interface (BCI) は、脳波など脳から取得される情報を用いることで、感情の可視化や文字の

¹ 明治大学
^{a)} homei@homei.com



図 2 各 UI コンポーネントに対し、正方形のフリッカ刺激を用いた UI デザイン。従来のフリッカ刺激を用いた場合、図 1 よりもデザインの質が悪くなってしまふ。

入力などコンピュータとのインタラクションを可能にする。BCI には、取得する脳波の種類によってインタフェースが変化するという特徴がある。視覚野の脳波を取得する BCI は、決められた周期で明滅を繰り返すフリッカ刺激を注視した際、その状態の識別を可能にする。そのためコンピュータ画面上にフリッカ刺激を配置することで、カーソルの移動や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 は識別精度が高い上にキャリブレーション時間が比較的小さいため、BCI を介して GUI の操作を行う際、最も一般的かつ効率的なアプローチとして用いられる [1]。

BCI 用に作られる UI はフリッカ刺激を含まなければならぬため、既存のフリッカ刺激を用いた場合、図 2 のようにデザイン面が乏しいものになりやすい。そのため UI に含まれる UI コンポーネントの質を上げることが難しくなってしまうと考えられる。また SSVEP 関連の研究では、疲労を軽減させるためにフリッカ刺激の改良を試みる研究は見られるが、デザインの向上を目的とした研究はあまり行われていない。

輝度変化による運動錯視は輝度を反転させた静止画の連続によって引き起こされるため、静止画の更新頻度を周期的にすることで、一定の周期を持つフリッカ刺激と見なすことができる。そのため輝度変化による運動錯視を SSVEP ベースの BCI 向け UI に導入し、各 UI コンポーネントに無限運動を付与した図 1 のような UI をデザインすることが可能になると考えられる。

本研究の目的は、SSVEP ベースの BCI 向け UI に対し、輝度変化による運動錯視の有用性を示すことである。そこで白黒の 2 色からなる矢印の画像を用いて、矢印の指し示す方向に動いて見える運動錯視を作成した。実験では作成した運動錯視を用い、ターゲットの選択をどれほど正確に行えるか検証を行った。その結果、白黒に明滅する正方形のフリッカ刺激よりも平均の精度は劣ってしまったが、半

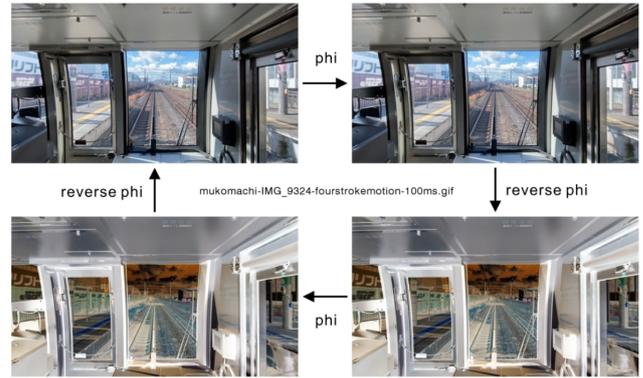


図 3 電車のシーンの 4 ストローク運動の例 ([5] より引用)。

数の参加者からは 85%以上の精度が得られ、BCI 向け UI における有用性が示唆された。

2. 関連研究

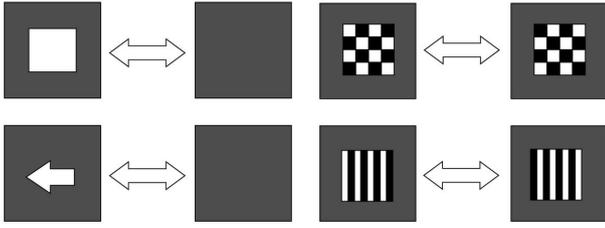
2.1 輝度変化を用いた運動錯視

静止画の連続によって引き起こされる仮定の運動を知覚する現象をファイ現象といい、これは Wetheimer によって発見された [2]。また、Anstis は、輝度が反転した上でわずかにずれた 2 つの画像を連続して提示した際、知覚される運動が画像のずれとは反対方向になることを報告した [3]。この知覚現象は、ファイ現象と逆の効果があり、リバースファイと呼ばれている。

Anstis らは、2 枚の連続する画像と、それらの輝度を反転させた 2 枚の画像を用いて、ファイ現象とリバースファイを交互に知覚させる 4 ストローク運動の存在を示した [4]。4 ストローク運動は、図 3 のような 4 コマの静止画を繰り返すことによって一方向に無限に移動しているように知覚させる運動錯視である。また北岡は、元画像を輝度反転させた画像と、2 枚のエンボス画像を組み合わせた場合でも運動錯視の再現が可能であることを示した [5]。

2.2 Steady-State Visual Evoked Potentials (SSVEP)

定常状態視覚誘発電位 (Steady-State Visual Evoked Potentials: 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) の一つであり、特定の周波数で明滅する視覚刺激 (フリッカ刺激) によって誘発される自然な周期的反応である [6]。視覚情報を識別する際は P300 事象関連電位や SSVEP を用いることが多いが、最近では特に SSVEP が注目されている [1]。SSVEP は、1-90 Hz の周波数を持つフリッカ刺激によって誘発される [7, 8]。刺激周波数は、1-12 Hz の低周波数帯、12-30 Hz の中周波数帯、30-60 Hz の高周波数帯に識別できる [9]。多くの BCI では、より大きな反応を得やすい低周波数帯と中周波数帯を使用しているが、特に 15 Hz



(a) 単一グラフィック刺激 (b) パターン反転刺激

図 4 フリッカ刺激の各周期において交互に提示される視覚刺激 ([9] Figure 3 より引用).

付近で振幅が最大となるため [8], 一般的に 15 Hz 付近が刺激周波数として用いられる.

SSVEP の研究で用いられるフリッカ刺激は, 光刺激, 単一グラフィック刺激, パターン反転刺激の三つに大きく分けられる [9]. 光刺激は LED, 蛍光灯などの光源を用いて, 指定された周波数で変調されたものであり, あらゆる波形を正確に表現できるという利点がある. 他 2 種の刺激はコンピュータの画面上に表示される. 単一グラフィック刺激 (図 4a) は, 正方形や矢印などのグラフィックを明滅させて表示させるものであり, 光刺激をコンピュータ画面上で模倣している. パターン反転刺激 (図 4b) は, チェッカーボードなどのグラフィカルなパターンを反転させ, 交互に表示するものであり, 通常は白と黒で色分けされている. 光刺激と単一グラフィック刺激は 1 サイクルの明滅, すなわち 2 回の交替で SSVEP 反応を引き起こすのに対し, パターン反転刺激は 1 回の交替で SSVEP 反応を引き起こす.

2.3 CCA を用いた SSVEP の識別手法

Lin らは, 多チャンネルの脳波データにおける SSVEP を検出するために正準相関分析 (Canonical correlation analysis: CCA) を導入した [10]. CCA は 2 つのデータセット間の基礎的な相関を見つけるために用いられる多変数統計的手法である. Y と X をそれぞれ, 多チャンネルの脳波信号と参照信号を表す 2 つの多次元変数とする. CCA では, 2 つの正準変量 Y と X の相関が最大となるような線形結合 $y = Y^T W_y$, $x = X^T W_x$ を求める. ここで, 重みベクトル W_y と W_x は, 以下の最適化問題を解くことにより求めることができる.

$$\begin{aligned} \max_{W_y, W_x} \rho(y, x) &= \frac{E[y^T x]}{E[y^T y] E[x^T x]} \\ &= \frac{E[W_y^T Y X^T W_x]}{E[W_y^T Y Y^T W_y] E[W_x^T X X^T W_x]} \end{aligned} \quad (1)$$

W_y および W_x における ρ の最大値は最大正準相関であり, W_y および W_x への射影は正準変量である. SSVEP における CCA では, C 個のチャンネルの脳波信号 $Y \in \mathbf{R}^{C \times P}$ (C チャンネル \times P プロット) と m 番目の刺激周波数の信号 $X_m \in \mathbf{R}^{2H \times P}$ (式 2) が入力として使用され, すべて

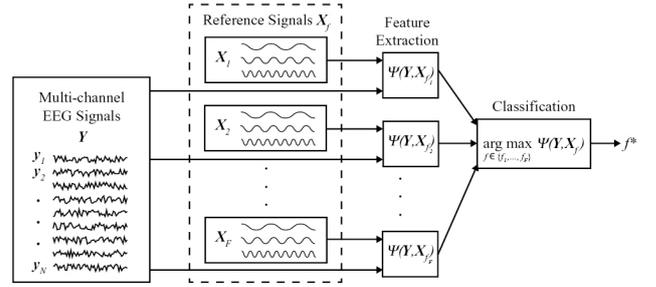


図 5 訓練データが不要の識別手法における, SSVEP の検出過程を表す図 ([11] Figure 1 より引用).

の刺激周波数について正準相関係数 ρ_m が計算される.

$$X_m = \begin{pmatrix} \sin(2\pi f_m t) \\ \cos(2\pi f_m t) \\ \vdots \\ \sin(2\pi H f_m t) \\ \cos(2\pi H f_m t) \end{pmatrix}, \quad t = \frac{1}{F}, \frac{2}{F}, \dots, \frac{P}{F}, \quad (2)$$

ここで, H は高調波の数, F はサンプリングレートを示す. 最終的に出力される周波数 \hat{f} は, 以下の式によって求められる.

$$\hat{f} = \arg \max_{f_m} \rho_m, \quad m = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

CCA は訓練データが不要な識別手法の 1 つである. 訓練データが不要な識別手法は, いずれも SSVEP の検出を図 5 に示された過程で行う. 1 回の試行における多チャンネルの脳波信号と, 各刺激周波数の正弦・余弦参照信号を入力することで, ターゲットごとの特徴量 $\Psi(Y, X_f)$ が抽出される [11]. なお, CCA では最大正準相関が特徴量 Ψ にあたる.

2.4 Steady-State Motion Visual Evoked Potentials (SSMVEP)

近年では, 動作に基づく視覚誘発電位 (Motion-based Visual Evoked Potentials: mVEP) が SSVEP ベースの BCI の分野における新たなトレンドになっている [12]. 中でも, 定常的な視覚誘発電位である Steady-State Motion Visual Evoked Potentials (SSMVEP) への関心が特に高まっている. Stawicki らは, SSMVEP に関する研究で提案されてきた視覚刺激をまとめ, パフォーマンスに関して SSVEP との比較実験を行った [12]. 比較対象となった運動刺激は, スイング運動, コインが回転しているような動作, 市松模様が放射状に収縮と膨張を繰り返す動作, 円や市松模様の隣り合う円弧が外向きと内向きで交互に動く動作, 円弧の回転動作であった (図 6). 実験の結果, スイング運動のみ, パフォーマンスに関して SSVEP と同等

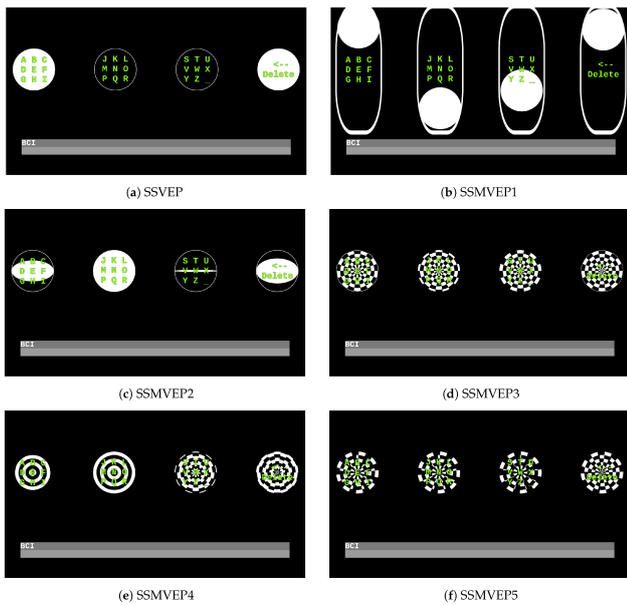


図 6 Stawicki らによるパフォーマンスの比較実験で用いられた刺激の一覧 ([12] Figure 2 より引用).

であったが、検証したどの刺激も、主観的に従来のフリッカー刺激よりも快適であることは確認できなかったと報告している。

輝度変化による運動錯視は明滅刺激のため、刺激に動作がありつつも SSMVEP ではなく SSVEP を誘発すると考えられる。よって、SSMVEP で用いられる刺激と SSVEP で用いられる刺激の双方の利点を活かすことが期待できる。

3. 実験

輝度変化による運動錯視を用いた場合でも SSVEP を識別できるか検証するために、指定されたフリッカー刺激を注視するタスクを行った。

3.1 機材と実験環境

実験では、BCI (EPOC Flex) と、デスクトップ PC (Intel Core i9-12900KF, GeForce RTX 3070 Ti, 32.00 GB RAM) を使用した。ディスプレイの解像度は 1920 × 1080 pixels (24.5 inches, 542.4 mm × 305.1 mm, 0.2825 mm/pixel) で、リフレッシュレートは 240 Hz であった。実験システムは Unity で実装され、ディスプレイに垂直同期し、240 fps、フルスクリーンで実行された。

環境音による脳波のノイズを避けるため、実験は防音環境が整った部屋で、無音の状態で行われた。同様の理由で、各試行の終了を知らせるフィードバック音は提示しなかった。また、現在の試行回数や BCI の接続状態など、注視の妨げになり得る情報は実験画面に表示させずに実験を行った。参加者の眼精疲労を軽減するために、外光を遮断し蛍光灯を点けた状態で実験を行った。予備実験によって、蛍光灯の明滅が精度に影響を与えないことは確認している。

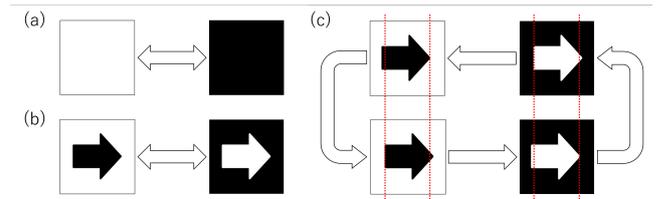


図 7 実験で用いたフリッカー刺激のフレーム遷移の様子。(a) 四角形のフリッカー刺激。(b) 矢印のフリッカー刺激。(c) 4 ストローク運動。



図 8 タスクの概要図。各位置でそれぞれ提示される周波数や矢印の向きが固定されている。

3.2 計測

脳波は、Emotiv 社の EPOC Flex を用いて計測した [13]。電極装着部位は 10%法に従って、P₃, P₄, P₇, P₈, P_z, O_z, O₁, O₂ を用いた。脳波データは EPOC Flex によって 2048 Hz でサンプリングされ、128 Hz にダウンサンプリングされた後に、Bluetooth を介して PC に送信された。PC 側では、Emotiv Pro を用いてデータを受け取り、Lab Streaming Layer を介して Unity に送信された。

3.3 刺激

フリッカー刺激の種類を独立変数とし、以下の 3 種類のフリッカー刺激を用いた。

- (1) 白黒に明滅する四角形のフリッカー刺激 (図 7a)。
- (2) 輝度が反転する矢印のフリッカー刺激 (図 7b)。
- (3) 指し示した方向へ矢印が動いているように知覚される 4 ストローク運動 (図 7c)。

輝度変化による運動錯視ではリバースファイが起こる際に輝度が反転するため、リバースファイの周期を輝度が反転する周期に合わせて。そのため運動錯視の画像の更新は、他の 2 条件と比べ 2 倍の頻度で行われた。

本実験で用いたフリッカー刺激は、各フレームに対応する連番画像を生成し、生成した連番画像から動画を作成することで実装した。連番画像の生成には Processing を用いた。また、連番画像から動画を作成する際は FFmpeg を用い、白黒に明滅するフリッカー刺激は 120fps、輝度変化による運動錯視は 240fps でエンコードされた。

3.4 タスク

タスクの概要図を図 8 に示す。灰色の背景で、左右上下には異なる周波数のフリッカー刺激、中央には注視すべきターゲットを指し示す矢印が表示された。

参加者には、任意のタイミングで Space キーを押下さ

せた。Space キーが押下されると、中央の矢印が次のターゲットを指し示し、参加者は指定されたターゲットを注視するよう促された。フリッカ刺激は4秒後に開始され、6秒間提示された。そのため参加者は試行ごとに10秒間の注視をするよう求められた。参加者には、必要があれば各試行の間で休憩を取るよう指示し、実験中に体調不良が起こった際は直ちに実験を中止できることを伝えた。

4つのターゲットそれぞれに対して1試行ずつ、合計4試行を行うまでを1セットとし、参加者は各ブロックごとに10セットを続けて行った。実験は3回に分けて行われ、1回の実験では2ブロックが行われた。各ブロック間で、実験者は参加者の体調状態を確認した。

実験終了後、参加者は簡単なアンケートフォームに回答を行った。

3.5 実験デザインと手順

各フリッカ刺激の周波数 (F) は 8.57, 10.00, 12.00, 15.00 Hz であった。これは、120 Hz で画面を更新する際、フレームの変化がそれぞれ 4, 5, 6, 7 フレームごとに起こることを意味する。各フリッカ刺激の大きさは 200 pixels で統一した。フリッカ刺激の種類 (S) は 3.3 節の 3 種類であり、それぞれを “Square”, “Arrow”, “4 stroke” とした。 S は提示順は上記の順に固定し、1回の実験につき1条件を提示した。よって、2ブロックごとに刺激が変更された。 F の出現順序はセットごとにランダムで決定した。

1回目の実験では、まず参加者に対し実験概要の説明を行った。その後の手順は3回とも同じであった。まず参加者はBCIを装着し、電極の接触状態の調整を行った。次に参加者は練習用タスクを2セット行い、続けて本番のタスクを2ブロック行った。全ての実験の終了後、参加者は簡単なアンケートに回答した。一人当たり合計で6ブロックを行ったため、全試行は2,160試行 ($= 4 (F) \times 10$ セット $\times 6$ ブロック $\times 9$ 名) であった。

3.6 参加者

9名が実験に参加した(平均22.6歳, $SD = 1.01$)。参加者の内、裸眼の人は3名、眼鏡を着用していた人は5名、コンタクトレンズを着用していた人は1名であった。また、BCIの使用経験を訪ねたところ、何度も経験したことがある人は3名、1-2回程度経験したことがある人は6名であった。

4. 結果

$4 (F) \times 10$ セット $\times 6$ ブロック $\times 9$ 名 $= 2,160$ 試行の試行を用いて結果をまとめる。分散分析はIBM SPSSを用いて行った。多重比較にはBonferroni法を用いた。独立変数は S 、従属変数は Acc 、 ITR であった。グラフ中のエラーバーは標準誤差、***は $p < .001$ を示す。

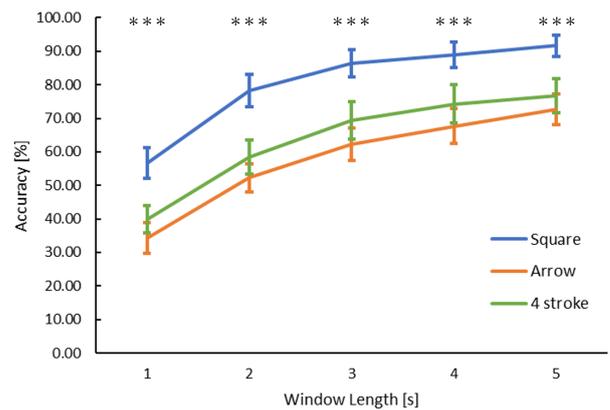


図9 時間窓長ごとのCCAの識別精度。

4.1 精度の算出方法

SSVEPの識別方法にはCCAを用いた。5つの時間窓長 ($T = 1, 2, 3, 4, 5$ s) に対し、各試行ごとに、 Y を全チャンネルから得られたデータ、 X_m を m 番目の刺激周波数の第2高調波までの参照信号として、 \hat{f} を算出した。 \hat{f} の値がターゲット周波数に等しければ、その試行を成功とした。本稿では、正解率を次のように定めた。なお、 N_c は識別に成功した試行回数、 N は全試行回数を示す。

$$Acc = \frac{N_c}{N} \times 100[\%] \quad (4)$$

4.2 各刺激における精度の比較

全参加者の平均識別精度を図9に示す。エラーバーは標準誤差を表している。刺激の種類によらず、CCAを用いた識別手法の精度は時間窓長を大きくすることで向上する傾向が見られた。また各条件を比較すると、Square条件で最も精度が高くなり、次いで運動錯視の精度が高いという結果になった。

一元配置反復測定分散分析により、すべての時間窓長において各刺激間の識別精度に有意差があることが示された ($T = 1$ s : $F_{2,16} = 13.14, p < .001$; $T = 2$ s : $F_{2,16} = 20.61, p < .001$; $T = 3$ s : $F_{2,16} = 18.10, p < .001$; $T = 4$ s : $F_{2,16} = 12.21, p < .001$; $T = 5$ s : $F_{2,16} = 14.01, p < .001$)。ペアごとに比較すると、全ての時間窓長に対し、arrow条件と4 stroke条件のペア以外で有意差が見られた。

表1は、参加者間で識別精度を比較したものである。9人中4人の参加者が、4 s以上の時間窓を用いることで運動錯視の周期を85%以上の精度で識別できたことが読み取れる。

4.3 各刺激におけるITRの比較

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

表 1 4, 5 s の時間窓に対する参加者の精度比較.

参加者	Square		Arrow		4 stroke	
	4 sec	5 sec	4 sec	5 sec	4 sec	5 sec
1	100.00	100.00	66.25	67.50	96.25	95.00
2	98.75	98.75	77.50	83.75	88.75	92.50
3	92.50	98.75	65.00	72.50	85.00	85.00
4	96.25	98.75	82.50	86.25	76.25	76.25
5	97.50	97.50	97.50	98.75	95.00	96.25
6	68.75	73.75	52.50	60.00	56.25	62.50
7	71.25	78.75	48.75	60.00	70.00	70.00
8	93.75	96.25	70.00	70.00	55.00	61.25
9	81.25	82.50	48.75	55.00	46.25	52.50

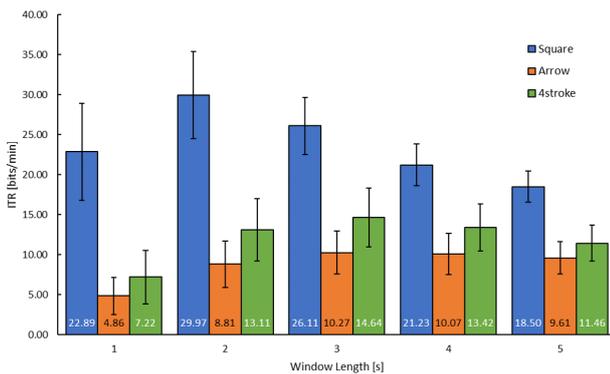


図 10 時間窓長ごとの ITR の推移.

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 [14]. 1 回の試行で送信されるビット数 B は, 式 5 で計算できる.

$$B = \log_2 N + P \log_2 P + (1 - P) \log_2 \left[\frac{1 - P}{N - 1} \right] \quad (5)$$

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 (min) で除算することで計算できる.

式 5 に基づいて, 各刺激における平均 ITR を算出した. ITR の参加者間平均を図 10 に示す. なお, エラーバーは標準誤差を示す. 3 条件の中で Square 条件は最も選択効率が良いことが読み取れる. しかし, 矢印を用いた 2 条件を比較すると, 全ての時間窓長に対し運動錯視を起こしたほうが選択効率が高いという結果になった.

ITR についても参加者間で比較を行った. 時間窓長が 2 s, 3 s のとき, 2 名の参加者は運動錯視に対して 30 bits/min を上回る選択効率を示した. 図 10 の結果と比較すると, これらは選択効率が最も高い Square 条件に匹敵する.

4.4 アンケート結果

「各周波数に対して運動錯視は生じたか」という質問に対し, 8 名の参加者は全ての周波数に対して錯視が起きたと回答したが, 1 名の参加者は最も高い周波数では錯視が起らなかったと回答した. また, 3 種類の刺激に対す

る好みの順位付けを行ってもらったところ, 全員が運動錯視を 1 番に選び, 矢印の明滅は 2 番目に多く好まれた. 理由については「単なる点滅よりも動きがあって集中して見ることができた」, 「運動錯視は矢印全体を捉えようとしたため, 注視する位置がなんとなく定まった」などの回答が得られた.

5. 議論

5.1 CCA を用いた識別手法の精度

輝度変化による運動錯視は, 正方形のフリッカ刺激に比べて精度が劣る結果となった. 正方形のフリッカ刺激では他のいずれの刺激とのペアで有意差が見られたことから, 刺激に含まれる白色画素の比率が他の 2 条件に比べて大きいことが要因であると考えられる. 白色画素の比率が大きくなるにつれて SSVEP 反応が強くなることは, Garcia らによって報告されている [15]. しかし, 実験中に電極の接触状態が不安定な場面や, 参加者の集中が持続しない場面が見られたため, これらの外的要因が精度に影響を及ぼしている可能性も考えられる. 約半数の参加者が高い精度で識別できていたことや, 矢印を明滅させた刺激よりも精度が高かったことから, 輝度変化による運動錯視を用いた場合でも SSVEP の識別が可能であると思われる.

5.2 ITR の比較

最も ITR が高い条件は Square 条件であったが, これは 3 条件の中でも短い時間窓長に対し高い精度を示したことが理由として挙げられる. 一方で最も精度が低かった Arrow 条件は, ITR が最も低いという結果になった.

Square 条件では 2 s 間の時間窓を用いた場合に, それ以外の条件では 3 s 間の時間窓を用いた場合に ITR が最も高かった. よってリアルタイムでの識別を行う際, 精度がやや低い場合は 3 s 間, 精度が十分に高い場合は 2 s 間の時間窓を用いるのが良いと考えられる.

Tang らは識別精度と ITR に関して, 時間の経過とともに明確な学習効果が示されたことを報告している [16]. また, BCI の性能が安定していた参加者は, 実験終了時まで安定した状態を維持できていたことも報告されている. これらを今回の結果に踏まえると, 何度も練習を行うことにより, 4 stroke 条件の平均グラフの形を square 条件に近づけることができると予想できる.

5.3 アンケート結果の考察

アンケートの結果から, 運動錯視は BCI 向けの UI として好まれることがわかった. また, 運動錯視が注視位置を安定させる役割を担っていることが自由記述により判明した. 以上のことを踏まえ, エンタテインメント性やユーザーパフォーマンスの観点から見て, 運動錯視はデザインとして取り入れる意義があると考えられる.

実験後の感想として、「眠くなった」や「疲れが溜まった」という回答が多く見られた。また、タスクの量が多いという回答も複数得られた。そのため、フリッカ刺激の注視を頻繁に要求するインタフェースには適していない可能性が高いと言える。そのため、提案イメージとして図1でドローン用UIを例に用いたが、ドローン操縦では多くのコマンド選択が要求されるため、BCIに適した実装例とは言い切れないと考える。対して、音楽や動画の再生インタフェースなど、低頻度で選択を行うアプリケーションには適していると考えられる。

6. 制約と展望

SSVEPに関する研究では、サンプリングレートが256 Hz以上のBCIを用いることが多い。そのためBCIのサンプリングレートが128 Hzと低く、識別可能な周波数が大きく制限されてしまうことは本実験の制約である。しかし、その少ないサンプリングレートにも関わらず、高い識別精度を実現できたため、よりサンプリングレートの高いBCIを用いることによって、より広い周波数帯をターゲット周波数として用いることが可能になると考えられる。

また今回の実験では白黒の2色で構成される運動錯視を用いたが、グレースケール画像を用いた場合に同じ結果が得られるかは不明瞭である。2値化された画像では細かい描画ができないため、使えるデザインが基本図形を組み合わせたものに制限されてしまう。もしもグレースケール画像を用いて作成した輝度変化による運動錯視がSSVEPを誘発することができれば、そのような制限がなくなり、よりUIデザインの質を高めることができると考える。そこで今後は、グレースケール画像を輝度反転させた場合にどれほどSSVEPを誘発できるか検証を行った上で、デザイン拡張の可能性を調査していきたい。

今後は、今回の実験データに対し、CCA以外の識別手法を試していく予定である。CCAは訓練データを必要としないため、BCI機器を装着するだけでアプリケーションの操作が可能になるという利点がある一方で、精度がやや不十分だといった問題点が挙げられる。Combined-CCAやMset-CCAなど、CCAよりも識別精度が高い手法は多く存在する[11]。これらを用いることで、訓練データが必要になってしまうが、輝度変化による運動錯視に対する精度を上げることができると考えている。

7. 結論

本稿では、SSVEPベースのBCIのターゲットとして用いられるフリッカ刺激を、輝度変化による運動錯視に変更した場合の影響について調査を行った。その結果、正方形のフリッカ刺激と比べて平均の精度は劣る結果となったが、半数の参加者から85%以上の精度を得ることができており、ユーザが選択に熟達していくことで精度の向上も見

込むことができる。また、アンケート結果から、運動錯視がエンタテインメント性やユーザパフォーマンスに好影響をもたらすことが示唆された。よって今後は、分析方法の改善や、運動錯視のデザインの検討によって識別精度の向上を図っていきたい。

参考文献

- [1] Nakanishi, M., Wang, Y., Chen, X., Wang, Y.-T., Gao, X. and Jung, T.-P.: Enhancing Detection of SSVEPs for a High-Speed Brain Speller Using Task-Related Component Analysis, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 65, No. 1, pp. 104–112 (2018).
- [2] Wertheimer, M.: Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung., *Zeit Schrift Für Psychologie*, Vol. 61, pp. 161–265 (1912).
- [3] Anstis, S.: Phi movement as a subtraction process, *Vision research*, Vol. 10, No. 12, pp. 1411–1430 (1970).
- [4] Anstis, S. M. and Rogers, B. J.: Illusory continuous motion from oscillating positive-negative patterns: Implications for motion perception, *Perception*, Vol. 15, No. 5, pp. 627–640 (1986).
- [5] 北岡明佳: 輝度変化による運動錯視(リバーズファイなど)の再検討, <http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/sakkakuWS2021.html> (2021). (Accessed on 11/05/2022).
- [6] Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottareau, B. R. and Rossion, B.: The steady-state visual evoked potential in vision research: A review, *Journal of Vision*, Vol. 15, No. 6, p. 4 (2015).
- [7] 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 (2001).
- [8] Pastor, M. A., Artieda, J., Arbizu, J., Valencia, M. and Masdeu, J. C.: Human Cerebral Activation during Steady-State Visual-Evoked Responses, *Journal of Neuroscience*, Vol. 23, No. 37, pp. 11621–11627 (2003).
- [9] Danhua Zhu, Jordi Bieger, G. G. M. R. M. A.: A Survey of Stimulation Methods Used in SSVEP-Based BCIs, *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2010, pp. 1–12 (2010).
- [10] Lin, Z., Zhang, C., Wu, W. and Gao, X.: Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 54, No. 6, pp. 1172–1176 (2007).
- [11] Zerafa, R., Camilleri, T., Falzon, O. and Camilleri, K. P.: To train or not to train? A survey on training of feature extraction methods for SSVEP-based BCIs, *Journal of Neural Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 1–24 (2018).
- [12] Stawicki, P. and Volosyak, I.: Comparison of Modern Highly Interactive Flicker-Free Steady State Motion Visual Evoked Potentials for Practical Brain-Computer Interfaces, *Brain Sciences*, Vol. 10, No. 10 (2020).
- [13] Emotiv: EPOC Flex - 32-Channel Wireless EEG Device - EMOTIV, <https://www.emotiv.com/epoc-flex/>. (Accessed on 11/06/2022).
- [14] 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).
- [15] Garcia, D. E., Zheng, K. W., Liu, Y., Tao, Y. S. and Mann, S.: Painting with the Eye: Understanding The

Visual Field of the Human Eye with SSVEP, *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 3689–3694 (2020).

- [16] Tang, Z., Wang, Y., Dong, G., Pei, W. and Chen, H.: Learning to control an SSVEP-based BCI speller in naïve subjects, *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1934–1937 (2017).