

BCIにおける刺激開始・停止時の SSVEP 誘発応答の時間解析

神田 愛依¹ 宮下 芳明¹

概要: 本稿では BCI における SSVEP (Steady State Visual Evoked Potential) 刺激を提示・停止したときの誘発度合いの立ち上がりや減衰がどのようになっているかを調査した。実験では刺激の提示と停止を繰り返すパターンを実験参加者に見せ、その波形をもとに誘発度合いの増加や減少を解析した。これにより SSVEP ベースの BCI におけるインタフェースにおいて、誘発の推定によるより高速な BCI システムの実現可能性が示唆された。

1. はじめに

Brain-Computer Interface (BCI) は、アプリケーションを脳信号を介して直接制御することを可能にする通信システムである [4]。中でも定常状態視覚誘発電位 (Steady-State Visual Evoked Potential: SSVEP) と呼ばれる、特定の周波数で点滅するフリッカ刺激と等しい周波数成分の脳波が観測されるという現象は、トレーニングを必要とせず高い識別精度を実現している [3]。フリッカ刺激のサイズに注目した研究では、フリッカ刺激のサイズが大きいが識別精度が高くなることが分かっている [5]。

しかし、これまでの研究では SSVEP 関連の研究は十分な時間が経過した後に解析を行っており、誘発されるまでの時間経過に注目した研究はほとんどない。また誘発の減衰に関しても時間軸で解析は行われてこなかった。SSVEP が十分に誘発されるまでの時間経過の特性を調査することで SSVEP 誘発までに必要な時間が分かることで誘発予測ができるようになり、より高速な BCI システムを実現できると考える。そこで本稿では、フリッカ刺激を提示・停止したときの SSVEP の誘発度合いの立ち上がりや減衰の時間的特性について調査した。

2. 関連研究

2.1 BCI・SSVEP に関する基礎的な研究

Wolpaw らは、BCI を使用すると脳の通常の出力経路である末梢神経や筋肉を使わずに、外界と通信したり、外界を制御したりできると述べている [4]。その中でも特に SSVEP は、トレーニングをほとんど必要とせずに最大 70

ビット/分という比較的高いビットレートを提供できるため、注目を集めている [3]。

2.2 時間経過に注目した研究

Andersen らは、2 種類のフリッカ刺激を重ねて提示した時の選択的注意による SSVEP 誘発応答と時間経過について調査した [1]。実験参加者には周波数の異なるフリッカ刺激を同時に提示し、それぞれに注意を向けるというタスクを課した。片方の刺激に注意を向けると約 220ms 経過後に SSVEP の誘発が強くなり、注意を向けない方は約 360ms 経過後に誘発が小さくなったという結果が得られた。

2.3 SSVEP の識別手法

Lin らは、複数の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) を提案した [2]。CCA では脳波の SSVEP の狭帯域周波数成分を抽出することができる。CCA の認識結果は、かつて広く使用されていた FFT (高速フーリエ変換) ベースのスペクトル推定方法を使用した場合よりも高くなっている。CCA の式を以下に示した。CCA では取得した脳波に対して、提示したフリッカ刺激の整数倍の正弦波と余弦波を重ね合わせることで、SSVEP の誘発の有無を検出するものである。

$$y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ y_4(t) \\ y_5(t) \\ y_6(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(2\pi ft) \\ \cos(2\pi ft) \\ \sin(4\pi ft) \\ \cos(4\pi ft) \\ \sin(6\pi ft) \\ \cos(6\pi ft) \end{pmatrix} \quad (1)$$

¹ 明治大学

$$t = \frac{1}{S}, \frac{2}{S}, \dots, \frac{T}{S}$$

3. 実験

3.1 参加者

実験参加者は女子学生 3 名であった。平均年齢は 20.7 歳で、1 名は眼鏡、2 名はコンタクトによる視力矯正を行っていた。脳波計の使用に関しては、1 名が初めて、1 名が数回使用したことがある、1 名がよく使用すると回答した。

3.2 機材と実験環境

実験では、脳波計 (EpoC X) と、モニター (AOPEN 25XV2QFbmiiprx) を使用した。モニターの解像度は 1920×1080 pixels で、サイズは 24.5 インチ、リフレッシュレートは 390 Hz であった。実験システムは Processing で実装し、ディスプレイにフルスクリーンで実行した。実験は防音環境が整った無音の部屋で、蛍光灯を点けて行った。実験参加者は椅子に着席し、モニターから 80cm 離れて実験を行った。

3.3 脳波の計測

電極装着部位は P7, P8, O1, O2 を用いた。脳波データは EPOC X によって 2048 Hz でサンプリングされ、256 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った。

3.4 実験デザイン

実験の目的は SSVEP の刺激開始・停止時の SSVEP 誘発応答を時間解析することであった。提示した刺激を図 1 に示す。実験は 4 種類の周波数条件と 5 つの刺激サイズ、計 20 種類行われた。周波数 f は $f=15, 12, 10, 8.57$ Hz の 4 種類、刺激のサイズは 500, 400, 300, 200, 100 pixels であった。刺激提示は 3 秒間の刺激提示時間と 3 秒間の休憩時間で構成した。周波数が大きい順に、刺激サイズが大きい順に提示し、計 20 回の提示を 1 試行として一人当たりこの試行を 3 回行った。実験参加者 3 人分の 180 回の提示が解析対象であった。また、実験終了後には簡単なアンケートに回答させた。そのアンケートの質問内容は、年齢などの基本的情報と、実験の疲労度や集中度に関するもの、またこの実験に関する自由記述であった。

4. 結果

先に述べた CCA [2] を用いて解析を行った。それぞれの方法で各試行ごとに提示した周波数の識別精度を求め、その値を縦軸に示した。横軸は経過時間を示し、0 秒の時に刺激提示を開始した。なお、時間窓長は 1 秒であり、グラフの経過時間の前後 1 秒間を対象に解析したものである。

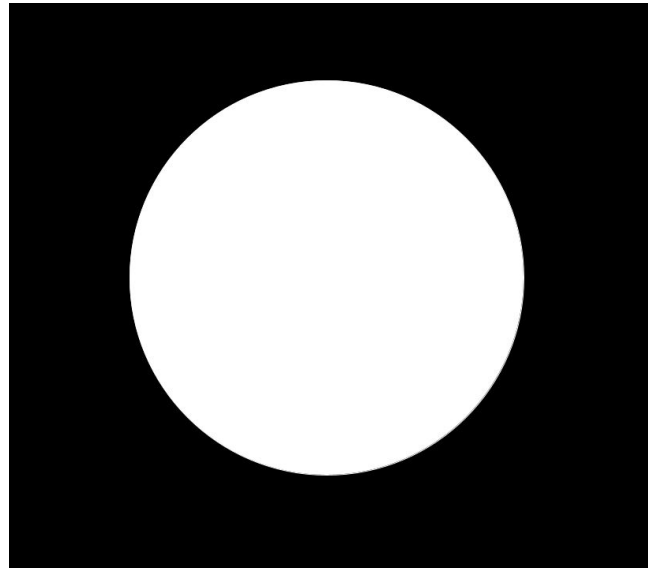


図 1 提示した刺激画像

4.1 実験参加者ごとの解析

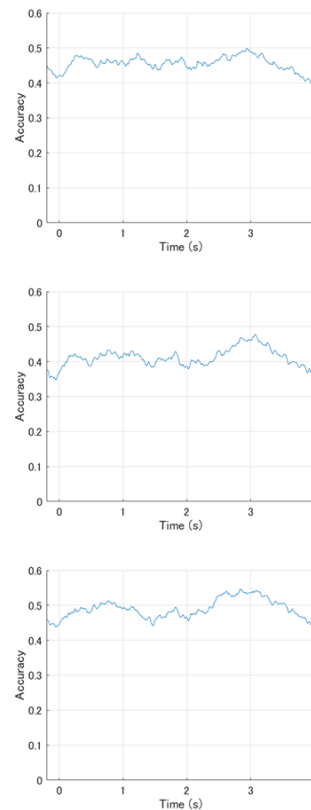


図 2 実験参加者ごとの識別精度の平均

図 2 は実験参加者ごとの識別精度の平均を示したものである。縦軸を見ると識別精度が実験参加者ごとに異なることがわかる。識別精度の範囲が 1 人目の実験参加者は 0.4 - 0.5, 2 人目は 0.35 - 0.5, 3 人目は 0.4 - 0.55 となっている。また刺激提示開始時に SSVEP が誘発され始め、刺激提示終了時に SSVEP の誘発が減衰していくという点ではどの

参加者においても同様の傾向が見られた。立ち上がりに関してそれぞれの1回目のピークの時間は242, 243, 242msと3人ともとても近い値であった。しかし3人目の実験参加者のみ1回目のピークの後も識別精度が上がり続け、誘発が落ち着いたのが441msであることには注意が必要である。また減衰に関しては、それぞれ347, 333, 341msであり、立ち上がりには比べるとばらつきはあるが、そこまで個人差が見られなかった。

4.2 周波数ごとの解析

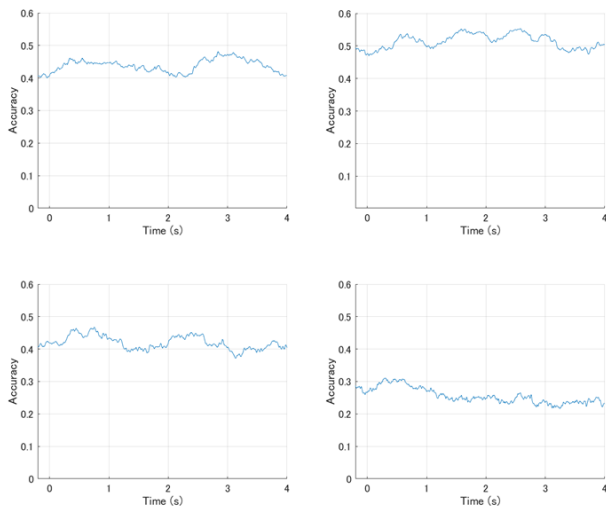


図3 周波数ごとの識別精度の平均, 左上が8.57, 右上が10, 左下が12, 右下が15 Hz

図3は周波数ごとの識別精度の平均を示したものである。15Hz以外は刺激提示開始時から識別精度が上昇し始め、刺激提示終了時から減衰していることが分かる。15Hzの時は識別精度が他の周波数に比べて著しく低くなっていて、正確に識別できていないことが読み取れる。他の周波数において、立ち上がりのピークの時間はそれぞれ243, 253, 369msであった。誘発の減衰が起こった時間は337, 389, 142msであった。8.57Hzの時と10Hzの時は同様の傾向が見られていることが分かる。

4.3 サイズごとの解析

図4は刺激サイズごとの識別精度の平均を示したものである。サイズが大きいところでは、全体の試行と同じような傾向が確認できた。しかし、サイズが300 pixels以下ではノイズの影響が大きく、特に減衰に関してきちんとした解析が困難であると判断した。500 pixelsと400 pixelsにおいて、それぞれ最初の立ち上がりのピークは刺激提示開始時からそれぞれ141, 249msであった。また減衰時間は刺激提示終了時からそれぞれ637, 439msであった。識別精度は500 pixelsの方が少し高くなった。

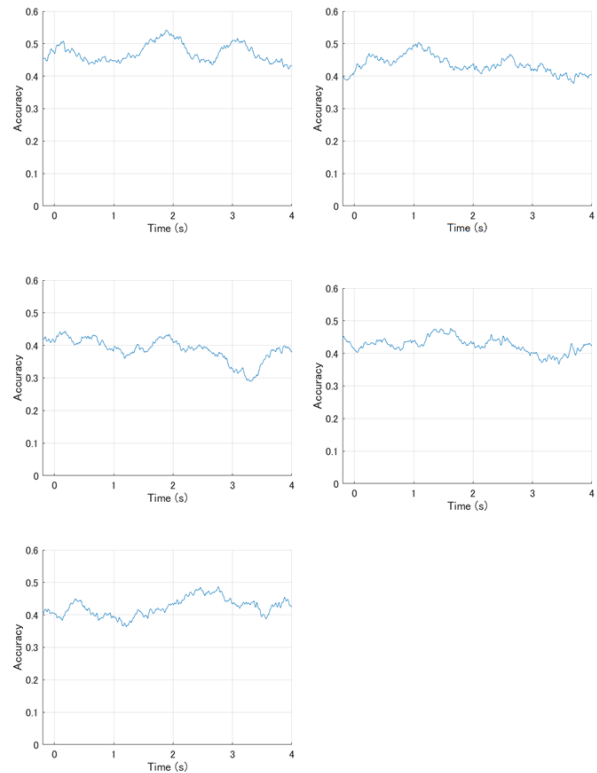


図4 刺激サイズごとの識別精度の平均, 左上が500, 右上が400, 中央左が300, 中央右が200, 下が100 pixels

4.4 アンケート結果

実験後実施したアンケートでは、疲労度・集中度を5段階で評価させた。疲労度は、1がまったく疲れていない、5が非常に疲れたという指標で回答させたところ、3が1名、4が2名であった。この中の1名は画面が眩しかったと述べていた。また、集中度は2が1名、3が2名であり、自由記述では実験時間が長かったため、後半になるにつれて集中力が切れてしまったという意見があった。また、刺激提示終了後に刺激の円が脳内に残り続ける残像現象が気になったという意見もあった。

5. 考察

5.1 被験者ごとの解析

被験者ごとの解析では、刺激提示開始時にSSVEPが誘発され始め、刺激提示終了後にSSVEPの誘発が減衰していることが分かった。刺激提示開始時から立ち上がりのピークまでの時間に個人差はほとんど見られなかった。このことからフリッカ刺激が提示されてからSSVEPが誘発されるまでの時間は個人差がなく、その時間は周波数や刺激のサイズによると考えられる。しかし、1度目のピークの後、そのまま識別精度が上がり続けた人と緩やかになった人がいた。これに関しては今回の実験だけでは正確に解析することが難しかった。そのまま上がり続けた人は脳波

を日常的に使用する人であったため、脳波経験も鑑みた更なる追実験の必要性を示唆している。

刺激提示終了時から減衰までの時間に関して、立ち上がりと比べて幅はあるもののほとんど幅が見られなかった。このことから減衰に関しても著しい個人差はなく、刺激提示後 330 - 350ms 後に誘発度合いが小さくなることが分かる。また立ち上がりと比べて減衰の方が変化が緩やかであることが分かる。これは実験参加者がアンケートで回答した残像現象とも関連がある可能性があると考えた。

5.2 周波数ごとの解析

周波数ごとの解析では、15Hz 以外の条件では、刺激提示開始時に SSVEP が誘発され始め、刺激提示終了後に SSVEP の誘発が減衰していることが確認できた。また刺激提示開始時から立ち上がりのピークまでの時間は 8.57Hz と 10Hz では近い値になり、12Hz では 369ms と長くなっていた。刺激提示終了時から減衰までの時間も 8.57Hz と 10Hz では近い値となり、12Hz では 142ms と短くなっていた。この結果からフリッカ刺激が提示されてから SSVEP が誘発されるまでの時間は、周波数による違いはないと結論付けた。

これらの結果に関して、今回の実験では周波数が低い刺激から提示をしたため、実験参加者の疲労や集中度の低下が原因であると考えられる。先行研究において、今回の周波数帯域内では周波数ごとの違いが生じていなかったため、周波数ごとの違いの検証に関しては実験参加者の疲労度や集中度に注意して実験を再度構築する必要があると考えた。

5.3 サイズごとの解析

サイズごとの結果では、300 pixels 以下のデータは、刺激提示終了後に識別精度が向上したり、刺激提示終了前から識別精度が減少していたりしたため、解析するのに十分ではないと判断した。500 pixels と 400 pixels の比較では、刺激提示開始時は 500 pixels の方が速く立ち上がりのピークを迎え、刺激提示終了時は 500 pixels の方が減衰の速度がゆっくりであった。このことから、刺激の認知しやすさが SSVEP に大きく関連していることが推測される。500 pixels は 400 pixels に比べて刺激が認知しやすく、そのため刺激提示開始時から誘発までの時間が短くなり、刺激提示終了時から減衰までの時間が長くなったのだと考えた。

この考察をもとに実験参加者と周波数が同じ場合の 500 pixels と 400 pixels の刺激提示開始時から立ち上がりまでと刺激提示終了時から減衰までの時間を比較した。4 周波数条件において、1 人当たり 3 回試行、計 3 人の 36 データを比較対象とした。結果として立ち上がりに関しては 36 試行中 34 試行が 500 pixels の方が 400 pixels と比べて刺激提示開始時からピークまでの時間が短かった。また減衰に

関しては 36 試行中 31 試行が 500 pixels の方が 400 pixels と比べて刺激提示終了時から減衰までの時間が長かった。これらの結果は刺激の認知しやすさが SSVEP に大きく関連しているという仮説を支持している。

6. おわりに

本稿では SSVEP 刺激を提示・停止したときの誘発度合いの立ち上がりや減衰の時間的特性を調査した。その結果、刺激提示開始時に SSVEP が誘発され始め、刺激提示終了後に SSVEP の誘発が減衰していることが分かった。またこれらの応答速度は今回の 3 条件の中で実験参加者間の個人差や周波数の影響は受けず、刺激のサイズにのみ影響を受けることが分かった。刺激のサイズが小さくなるほど、フリッカ刺激を認知することが難しくなり、誘発までの時間経過が長くなった。

これらの結果から特定の刺激サイズに対して、SSVEP 誘発までの時間が分かることで、より高速な BCI システムを提案できる可能性が示唆された。制約として、今回の実験では実験参加者が女子学生に偏っていたことがあげられる。また疲労度や集中度への配慮が足りていなかったため、更なる実験を実施することで、より詳細な結果が得られると考えた。

参考文献

- [1] Andersen, S. and Müller, M.: Behavioral performance follows the time course of neural facilitation and suppression during cued shifts of feature-selective attention, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, No. 31, pp. 13878–13882 (2010).
- [2] 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).
- [3] 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, No. 1, p. 864564 (2009).
- [4] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G. and Vaughan, T. M.: Brain-computer interfaces for communication and control, *Clinical neurophysiology*, Vol. 113, No. 6, pp. 767–791 (2002).
- [5] 振原知希, 宮下芳明: 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, *インタラクシオン* 2022 (2022).