



視聴覚刺激の周波数の同期性が SSVEP の振幅に与える効果

The Effect of Temporal Synchronization between Visual and Auditory stimulus on the Frequency Amplitude of SSVEP.

細川佐介¹⁾, 唐山英明¹⁾, 崔高超²⁾, 井上康之¹⁾

Sasuke HOSOKAWA, Hideaki TOUYAMA, Gaochao CUI and Yasuyuki INOUE

- 1) 富山県立大学大学院 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, {u555025, touyama, inoue}@st.pu-toyama.ac.jp)
- 2) 富山県立大学 情報工学部 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180, cuihao@st.pu-toyama.ac.jp)

概要: 定常視覚誘発電位 (SSVEP) を用いた BCI においてフリッカ刺激の提示周波数を高めることはちらつき低減によるユーザビリティの向上と脳波振幅の低下による識別性能の低下のトレードオフがある。本研究は 36Hz と 45Hz の二つの明滅フリッカ刺激に対してその一方の明滅周期と一致させたキャリア周波数を持つ AM 変調音の同時提示が各周波数帯の FFT 振幅に影響を与えるかを調べ、SSVEP における視聴覚クロスモーダル効果による増強効果を検討した。

キーワード: SSVEP, ASSR, BCI

1. はじめに

近年、脳波を計測することで心的ストレスを測定し、精神状態の評価を行うなど、脳活動データから人間の内的状態を推定する技術の活用が期待されている[1]. その中でも特定の脳活動データを抽出して機械学習することによって、身体の動きを伴わない思考のみによるコンピュータ制御を可能にするブレインコンピュータインターフェース (Brain-Computer Interface, BCI) 技術は特に注目されている[2]. BCI では特定の刺激入力への注意や運動イメージの想起などの手続きを行うことでユーザの意図を反映する大きな脳活動の変化を人為的に作り出す必要がある。

視覚刺激を用いた代表的な BCI 手法の一つが一定周期で明暗が反転明滅するフリッカ刺激を提示することで脳波のフーリエスペクトルにおける同一周波帯の振幅が増加する定常視覚誘発電位 (SSVEP) を利用したシステムである[3].

4~20Hz の低周波のフリッカ刺激は、SSVEP の振幅が大きく BCI システムの利用に有利である。しかし、低周波のフリッカ刺激はちらつきの知覚による眼精疲労や不快感が発生しやすい。それに対して、30~40Hz の高周波のフリッカ刺激はちらつきや不快感は低周波の場合に比べて小さくなる。しかし提示刺激のフリッカ周波数が高くなるほど脳波スペクトルに現れる SSVEP の振幅も小さくなるため、微弱な脳波信号を安定して検出することが困難となる。そのため、SSVEP を用いた脳波 BCI では刺激の周波数パラメータによる識別精度の向上とユーザビリティの両立が課題となっている。

その一方で、視覚以外の感覚提示を用いた BCI として聴性定常応答 (Auditory Steady-state response, ASSR) を用いたシステムの検討が行われている[4]. ASSR は 1000-2000Hz の正弦純音中に振幅変調で埋め込まれた 40-80Hz の音聴覚刺激に対して誘発される脳波成分であり、SSVEP と同様に入力刺激と同期した周波数帯のフーリエスペクトルの振幅にピーク成分が現れる。

また、視覚と聴覚の複数の感覚提示を利用した BCI システムも研究されている。Xie らの研究 [5] では、SSVEP に基づく BCI のフリッカ刺激の提示時に適切な音圧レベルの聴覚ノイズ (白色雑音刺激) を重畳提示することで確率共鳴によって SSVEP の振幅が増加し、さらに後頭領域 (視覚皮質) と側頭領域 (聴覚皮質) から計測した脳波データ間の位相の同期性が高まることを報告している。これは、聴覚ノイズ刺激中にランダムに含まれた視覚刺激の明滅周期と同期した成分が SSVEP の振幅を促進していた可能性を示唆する。

本研究では、視覚刺激と聴覚刺激の時間的な同期性によるクロスモーダル効果に着目する。視覚に比べて聴覚は時間分解能が高く、視聴覚クロスモーダル刺激に対する時間領域の知覚は聴覚情報が視覚情報を捕捉する (cf. ダブルフラッシュ錯視[6]). そのため、フリッカ刺激の明滅周期と同期した周波数で振幅変調された聴覚刺激の重畳提示は、Xie らの聴覚ノイズと同等あるいはそれ以上に SSVEP の振幅を促進し、脳波 BCI の精度向上に寄与する可能性がある。もしそうであれば、視聴覚の同期刺激を用いることで、より高周波帯域のフリッカ刺激を利用した SSVEP を

安定して計測することが可能となる。それによって、SSVEP を用いた BCI で問題となる、提示画面のちらつきによるユーザビリティの低下の問題を解決できると期待される。また、臨界融合周波数を超えた高速フリッカ刺激を映像内に埋め込むことでより違和感のないユーザーフェースを備えた BCI の実現につながると考えられる。

本研究では、視聴覚の同期刺激による脳波を解析することで、視覚と聴覚のクロスモーダル効果が高周波フリッカ刺激に対する SSVEP 振幅が増強するかどうかを検証することを目的とする。

2. 実験

2.1 参加者

4名の健常な大学生・大学院生が明滅フリッカ刺激に対する SSVEP を測定する脳波計測実験に参加した。実験参加者には事前に実験内容に関する説明を十分に行い実験参加への同意を得た。本研究は富山県立大学における人を対象とした研究に関する倫理審査の承認を受けた。

2.2 脳波計測

脳波計測にはアクティブ電極式の生体アンプ (g.tec 社, g.USBamp) を使用した。実験参加者の頭部に張り付けた銀-塩化銀電極からサンプリング周波数 512Hz で脳波を計測した。計測部位は拡張 10-20 法に基づく、O1, O2, T7, T8 の 4 チャンネルであった (基準電極: Cz, 接地電極: 右耳朶)。計測ノイズを除去するため 2~60Hz のバンドパスフィルタと 60Hz のノッチフィルタを適用した。脳波計測はシールドテント内において電磁波を放出する通信機器を持ち込まずに行った。

2.3 実験プロトコル

本実験のプロトコルを図 1 に示す。実験参加者は脳波計を取り付けた状態で椅子に座り、前方約 60cm 離れた場所に置かれた液晶ディスプレイ (Pixio PX259PS, リフレッシュレート: 360Hz, 解像度 1920×1080px) の画面を注意して見るよう求められた。左右に 15cm 離れた場所に表示された 5×5cm の 2 つの矩形領域が、それぞれ異なる周期 (フリッカ周波数) で出現と消失を繰り返す明滅刺激が提示された。ディスプレイに提示される 2 つの明滅刺激のうち、実験参加者はあらかじめ指定された左右いずれかの刺激に注意を向けるように教示され、もう片方の明滅刺激は隠して実験を行った。この時、左側の刺激周波数は 36Hz, 右側の刺激周波数は 45Hz であった。また、イヤホンから流れる音にも注意するよう求められた。イヤホンからは、指定された聴覚刺激が決まったタイミングで提示された。

計測は、視覚刺激 (36Hz) を注視しつつ聴覚刺激を与えないパターン、視覚刺激 (36Hz) とともに聴覚刺激 (36Hz) を提示するパターン、視覚刺激 (36Hz) とともに聴覚刺激 (45Hz) を提示するパターン、視覚刺激 (36Hz) とともに

ホワイトノイズを提示するパターン、視覚刺激 (45Hz) を注視しつつ聴覚刺激を与えないパターン、視覚刺激 (45Hz) とともに聴覚刺激 (36Hz) を提示するパターン、視覚刺激 (45Hz) とともに聴覚刺激 (45Hz) を提示するパターン、視覚刺激 (45Hz) とともにホワイトノイズを提示するパターンの計 8 パターンで実施した。



図 1: 本実験のプロトコル

2.4 実験時間

本実験では、(視覚刺激と聴覚刺激を提示するパターンでは)視覚刺激および聴覚刺激を同時に提示した。各試行において約 10 秒間、音と光の定常刺激 (例えば、45 Hz 視覚刺激+45Hz 聴覚刺激) を被験者に提示し、これを 12 試行実施した。試行間には 5 秒の休憩を設けたため、1 セッションの実験時間はおよそ 3 分 30 秒 (提示時間 2 分+休憩時間 1 分) となった。なお、電極装着の準備などを含めた総所要時間は約 45~60 分程度である。

3. データ解析

3.1 高速フーリエ変換 (FFT)

視覚刺激に対する SSVEP の周波数成分を評価するために、各試行における脳波データに対して高速フーリエ変換 (FFT) を行い、周波数領域での振幅解析を実施した。

まず、測定した脳波データを刺激提示開始のトリガー信号に基づいて切り出し、各刺激条件の試行に対応する脳波エポック (区間長 10 秒間) を参加者後ごとに 384 データ (8 刺激条件×4 チャンネル×12 試行) 抽出した。次に、各エポックデータに対して FFT を行い、振幅スペクトルを算出し、刺激周波数に関連する 36 Hz 帯域 (35-37 Hz) および 45 Hz 帯域 (44-46 Hz) の二つの周波数帯域における平均振幅をそれぞれ求めた。この帯域ごとの平均振幅を、計測チャンネル・刺激条件ごとに 11 試行データを平均して刺激周波数に対する定量的な反応の強さを評価した。

4. 結果

3 章で述べた各試行における脳波データに対して高速フーリエ変換 (FFT) を行い、周波数領域での振幅解析を実施した結果の一例を図 2, 図 3 に示す。全体的な特徴として、有意な差は確認されなかった。(図 2, 図 3)

そこで、音を聞いていない条件の 36Hz 帯および 45Hz 帯のデータの比率を 1 として基準化し、各条件において正規化を行った。さらに、4 人分のデータを平均して算出した (図 4, 図 5, 図 6, 図 7)。この値が 1 に近いほど聴覚刺激による変化が小さく、有意な差がないことを示す。結果として、36Hz 帯では聴覚刺激 36Hz を提示した条件で最も大きな変化が見られた。一方で、45Hz 帯においては顕著な変化は見られず、有意な差は確認されなかった。

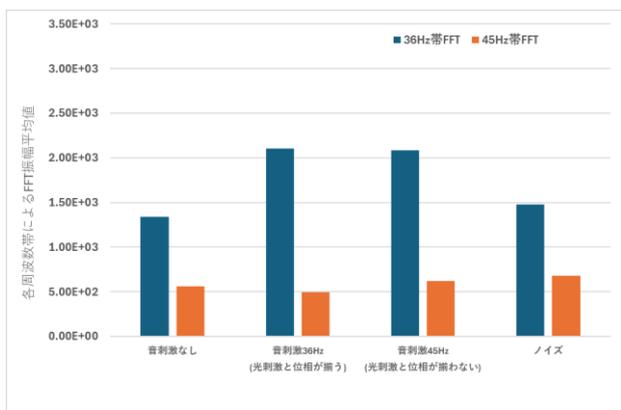


図 2 : 被験者 3, 光刺激 36Hz, 脳波計測位置 01 における 36Hz 帯域と 45Hz 帯域 の SSVEP の FFT 平均値

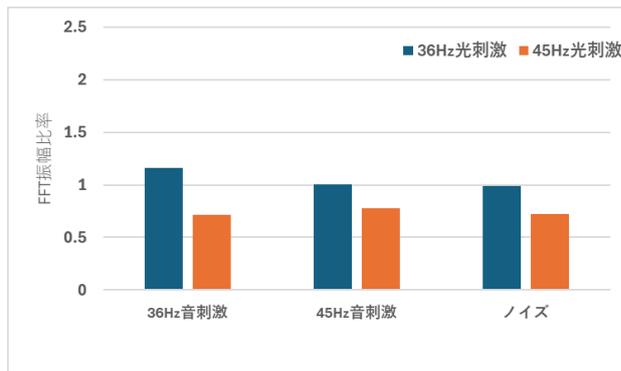


図 5 : 脳波計測位 02 における, 音刺激なし条件の比率を 1 としたときの各条件における FFT 振幅比率の平均

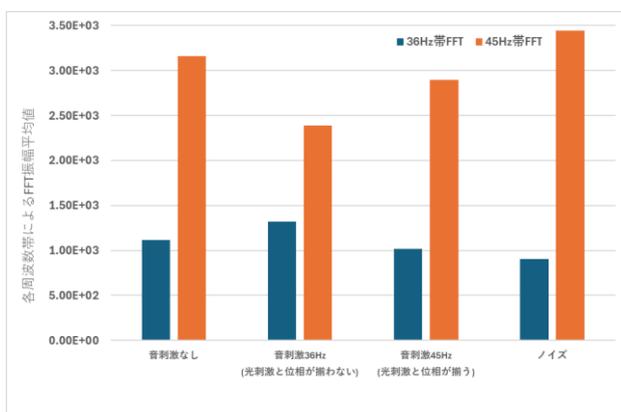


図 3 : 被験者 3, 光刺激 45Hz, 脳波計測位置 01 における 36Hz 帯域と 45Hz 帯域 の SSVEP の FFT 平均値

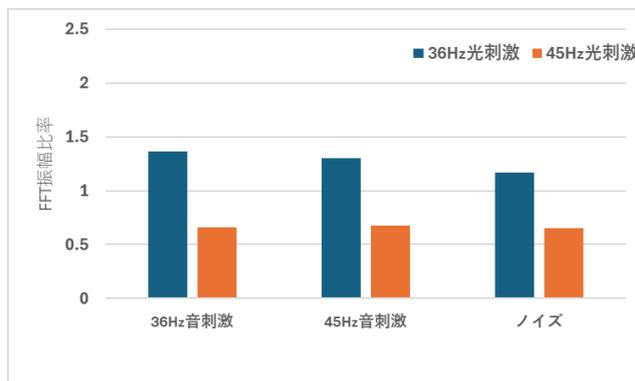


図 6 : 脳波計測位 T7 における, 音刺激なし条件の比率を 1 としたときの各条件における FFT 振幅比率の平均

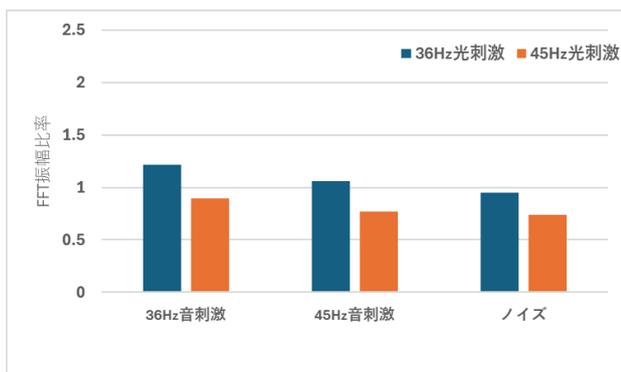


図 4 : 脳波計測位 01 における, 音刺激なし条件の比率を 1 としたときの各条件における FFT 振幅比率の平均

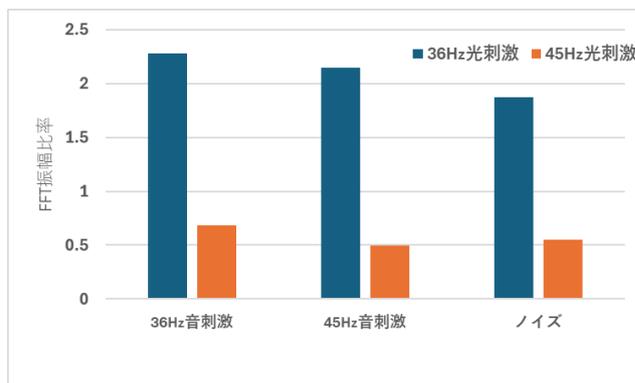


図 7 : 脳波計測位 T8 における, 音刺激なし条件の比率を 1 としたときの各条件における FFT 振幅比率の平均

5. 考察

結果より、視覚刺激 36Hz 提示条件においては、聴覚刺激 36Hz 提示条件において、聴覚刺激 45Hz 条件やノイズ条件と比較して FFT 振幅の差が有意に強調される傾向が見られた。一方、視覚刺激 45Hz 条件においては、聴覚刺激の違いによる顕著な振幅変化は確認されなかった。このことから、視覚刺激 36Hz 計測条件においては、SSVEP の振幅が増強される可能性が示唆される。つまり、視覚刺激に対して同期した聴覚刺激を提示することで、脳の視覚応答が強化されると考えられる。

一方、視覚刺激 45Hz 条件では同様の結果が得られなかったことから、高周波数帯 (45Hz 以上) では、視覚と聴覚の相互作用が起こりにくく、その効果は提示する周波数に依存する可能性がある。

6. まとめ

本研究では、視聴覚の同期刺激による脳波を解析することで、視覚と聴覚のクロスモーダル効果が高周波フリッカ刺激に対する SSVEP 振幅が増強するかどうかを検証することを目的として、36Hz、45Hz の視覚刺激における聴覚刺激 (36Hz、45Hz) を組み合わせた SSVEP 計測を行った。視覚刺激 36Hz 提示条件では、光刺激と音刺激の周波数が一致している条件において FFT 振幅の増加が見られ、視覚刺激 45Hz 提示条件では優位な結果が得られなかった。

今後の課題として、視覚刺激 45Hz 条件で有意な結果が得られなかった要因を検討し、異なる光刺激条件での計測を行う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] RatebKatmah, Fares Al-Shargie, Usman Tariq, Fabio Babiloni, Fadwa Al-Mughairbi, Hasan Al-Nashash: A Review on Mental Stress Assessment Methods Using EEG Signals Sensors 2021, 21(15)
- [2] 小島優希也, 島田匠悟, 岡本正吾, ヤエム ヴィボル, 池井寧ら: 複数のテレプレゼンスロボットを用いた 2 重身体感覚に関する研究, 第 28 回日本ヴァーチャルリアリティ学会大会論文集, 2023.
- [3] Meng Gu, Weihua Pei, Xiaorong Gao & Yijun Wang: An open dataset for human SSVEPs in the frequency range of 1-60 Hz scientific data, 2024.
- [4] Do-Won Kima, Han-Jeong Hwanga, Jeong-Hwan Lima, Yong-Ho Lee b, Ki Young Jungc, Chang-Hwan Imd: Classification of selective attention to auditory stimuli: Toward vision-free brain-computer interfacing, Journal of Neuroscience Methods 197, pp.180–185, 2011.
- [5] Jun Xie, Guozhi Cao, Guanghua Xu¹, Peng Fang, Guiling Cui³, Yi Xiao, Guanglin Li, Min Li, Tao Xue, Yanjun Zhang, Xingliang Han, : Auditory Noise Leads to Increased Visual Brain-Computer Interface Performance: A Cross Modal Study, Front. Neurosci., 22 December 2020.
- [6] Ladan Shams, Yukiyasu Kamitani, Shinsuke Shimojo: What you see is what you hear, Nature 408, 788 (2000).