



VR 空間における周辺視野の物体とベクションが SSVEP 誘発に与える影響

Effects of peripheral view objects and vection on SSVEP induction in VR space

神谷琢斗¹⁾, 渡邊翔太²⁾, 板井陽俊²⁾

Takuto KAMIYA, Syota WATANABE, and Akitoshi ITAI

1) 中部大学 工学研究科 (〒 487-8501 愛知県春日井市松本町 1200, tp23005-3481@sti.chubu.ac.jp)

2) 中部大学 工学部 (〒 487-8501 愛知県春日井市松本町 1200, itai@isc.chubu.ac.jp)

概要: SSVEP 型 VR-BCI は、点滅する視覚刺激に注意を向けた際に誘発される脳波成分である定常状態視覚誘発電位 (SSVEP) を利用し、VR 空間内の操作を行うインタフェースである。VR 空間では移動感覚を誘発させるため空間内に設置されたオブジェクトを移動方向と反対に動かす必要がある。SSVEP は注意との関連が指摘されており、視覚から移動感覚を得ることにより注意が逸れ、減少する可能性が考えられる。本研究では、視覚刺激の周囲に位置する物体の存在や自身が前進しているように感じるベクションの誘発が SSVEP 誘発に与える影響について調査する。

キーワード: VR-BCI, SSVEP, ベクション

1. はじめに

近年、筋萎縮性側索硬化症 (ALS: Amyotrophic Lateral Sclerosis) などにより全身運動が困難である重度身体不自由者が自発的に VR 体験を得ることを実現するシステムとして、ブレインコンピュータインタフェース (BCI: Brain Computer Interface) を利用した VR システム (VR-BCI) が注目されている。BCI とは、使用者の身体動作を必要とせず、脳波など脳機能を反映する生体信号を利用してコンピュータや車椅子などの外部機器を操作する技術である [1]。BCI にて使用される脳波成分の 1 つに定常状態視覚誘発電位 (SSVEP: Steady-State Visually Evoked Potentials) がある。SSVEP とは一定間隔の点滅周期を有する視覚刺激を注視することにより誘発される脳波であり、誘発に使用者の事前訓練を必要とせず、他の脳波成分と比較して安定的に誘発されることから BCI に広く利用されている。

SSVEP を用いた VR-BCI における一般的な制御の流れは、以下の通りである。VR 空間にはコマンドが割り当てられた異なる点滅周波数を有する視覚刺激が複数個提示される。使用者が実行したいコマンドが割り当てられた視覚刺激を注視すると、刺激の点滅周波数に対応する周期の SSVEP が誘発される。計測された使用者の脳波データに周波数解析を適用することにより、使用者が注視した視覚刺激を特定し、割り当てられたコマンドを VR 空間に反映させる。

VR 空間における自身のアバタ移動操作を目的とした SSVEP 型 VR-BCI では、使用者の周辺視野に木や建物などの物体が存在する。視覚刺激に割り当てられるコマンドはアバタの前進や後進などであり、コマンドが実行された場

合、使用者には前進や後進による視点移動を伴う映像が提示される。そのため、視点移動に伴う視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) の誘発により実際の運動を伴わない VR 空間における移動感覚の表現が可能であり、VR 空間内の移動体験における臨場感の向上が期待される。しかし、SSVEP 型 BCI では視覚的な注意が視覚刺激から周辺視野に存在する物体へ引き寄せられることにより分散され、視覚刺激への注意が妨げられる可能性がある。これにより、SSVEP 誘発特性が変化し、SSVEP 型 BCI の制御性能に影響を及ぼすことが考えられる。

SSVEP 型 VR-BCI に関する先行研究として、VR 空間にて SSVEP を誘発させる視覚刺激の透過率と SSVEP 誘発の関係調査 [2] や異なる点滅周波数を有する 4 つの視覚刺激に対する SSVEP 周波数識別率の評価などが行われている [3]。しかし、これらは視覚刺激の周囲に物体が存在せず、かつ、視点移動によるベクション誘発を伴わない VR 空間にて実験が行われている。したがって、周辺視野に存在する視覚刺激以外の物体やベクションが SSVEP 誘発に与える影響については明らかにされていない。

本研究では、VR 空間におけるアバタの移動操作を目的とした SSVEP 型 VR-BCI に関する基礎検討として、VR 空間上に SSVEP を誘発させる視覚刺激とベクションを誘発させる刺激を提示するシステムを構築し、SSVEP の計測を行う。これにより、周辺視野における物体の存在やベクションの誘発が SSVEP 誘発に与える影響について調査する。

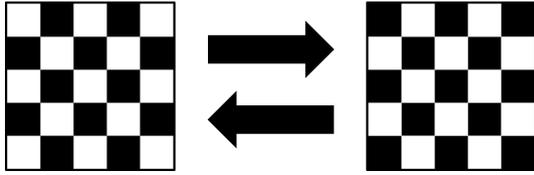


図 1: パターンリバーサル刺激の例

2. SSVEP

SSVEP とは、一定の時間間隔により明滅する光、あるいは任意の模様を構成する色のパターンが切り替わる視覚刺激を注視することにより誘発される周期的な脳波成分である。主に視覚野に近い後頭葉にて誘発され、視覚刺激へ注意を向けることにより強調される特性を有する [4]。SSVEP の誘発に用いられる視覚刺激には、フラッシュ刺激、パターンリバーサル刺激の 2 種類が存在する。フラッシュ刺激は光源の明滅により構成され、LED やモニタの白黒点滅により表現される。誘発された SSVEP は、視覚刺激の点滅周波数と同一の周波数成分を持つ。パターンリバーサル刺激はチェッカーボードの反転により構成され (図 1)、点滅周波数の偶数倍である高調波に SSVEP が誘発されやすいという特徴を持つ [5]。いずれの刺激においても SSVEP を最も強調する視覚刺激の点滅色は白と黒の反転 [6]、視覚刺激の点滅周波数は 15Hz とされている [7]。また、フラッシュ刺激はパターンリバーサル刺激と比較して SSVEP 誘発の個人差が大きいことが知られている [8]。したがって、本研究にて使用する視覚刺激は、15Hz の点滅周波数を有する白黒のパターンリバーサル刺激とする。

点滅周波数 15Hz のパターンリバーサル刺激を注視した際に左後頭葉 (O1) から計測された 60 秒間の脳波データに離散フーリエ変換を適用し、得られた振幅スペクトルの例を図 2 に示す。図 2 の縦軸は振幅スペクトル量、横軸は周波数 [Hz] である。図 2 より、点滅周波数 15Hz とその高調波である 30Hz に振幅スペクトルのピークが確認され、パターンリバーサル刺激による高調波 (30Hz) の強調が見られる。本研究においては、点滅周波数 15Hz のパターンリバーサル刺激を使用するため、30Hz の振幅スペクトル量を SSVEP 誘発量とする。

3. SSVEP 誘発実験

3.1 VR アプリケーション

SSVEP を誘発させる視覚刺激を含む VR 空間を提示する VR アプリケーションは Unity Technologies 社製のゲームエンジンである Unity(ver.2022.3.8f1) を用いて作成される。実験に用いられる VR 空間は視覚刺激と周辺視野により構成される。中心視野に位置する視覚刺激は点滅と非点滅の 2 種類である。周辺視野は、物体なし (VS)、停止物体あり (PVO)、被験者に向かい前進するベクション刺激あり (PVV) の 3 種類である。上記の組み合わせからなる 6 条件に加え、視覚刺激がなく被験者に向かい前進するベクション刺激のみ提示される (PV) の 7 条件に対応する VR アプ

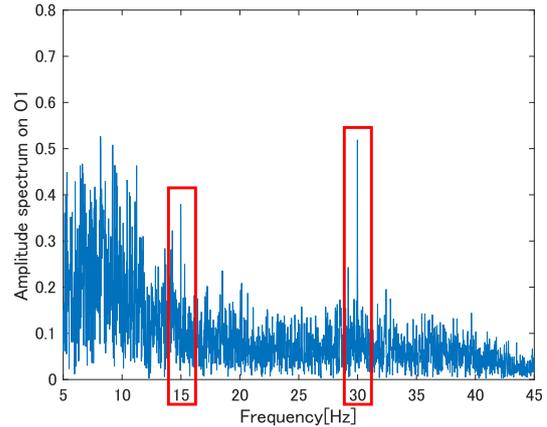
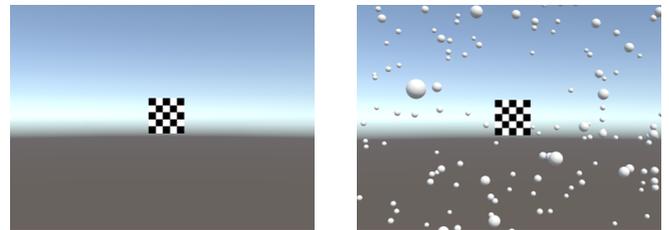
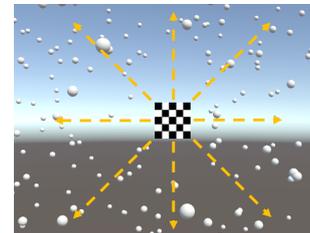


図 2: 点滅周波数 15Hz のパターンリバーサル刺激注視時における脳波の振幅スペクトル例



(a) 視覚刺激のみ (VS)

(b) 周辺視野に停止球体あり (PVV)



(c) 周辺視野に手前へ移動するベクション刺激あり (PVV)

図 3: VR 空間の条件

リケーションを構築する。

3.2 実験環境

実験条件を表 1、実空間の実験環境概要を図 4、VR 空間の概要を図 5 に示す。被験者は油脂によるインピーダンス増加を防ぐため、アルコールウェットティッシュにより頭皮を脱脂した後、脳波計測機器 (Emotiv EPOC X) を装着する。被験者は VR-HMD 以外に光源が存在しない暗室内の椅子に座り、顎乗せ台に顎を乗せて頭部を固定され、台の上に設置された VR-HMD (HTC VIVE Pro) を覗き込む。このとき、VR-HMD の映像が鮮明に見えるように VR-HMD の瞳孔間距離と設置位置を調整する。また、VR 空間にて提示される視覚刺激は 5×5 cm、 5×5 マスのパターンリバーサル刺激であり、屋外を想定し構築された VR 空間内において被験者の 60cm 前方に配置される。

各条件に対応した VR アプリケーション実行後、VR 空

表 1: 実験条件

脳波計測機器	Emotiv 社製 Emotiv EPOC X
サンプリング周波数	128Hz
出力機器	HTC VIVE Pro
リフレッシュレート	90Hz
計測時間	65 秒
点滅周波数	0Hz(非点滅), 15Hz
使用電極	O1, O2
被験者	成人男性 5 名
計測回数	各 3 回

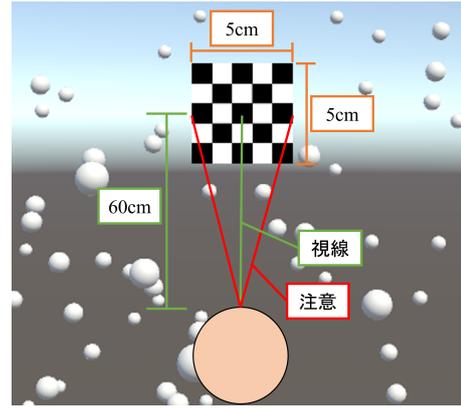


図 5: VR 空間の実験環境概要

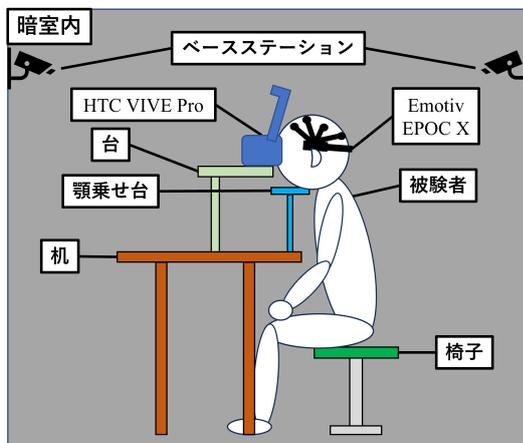


図 4: 実空間の実験環境概要

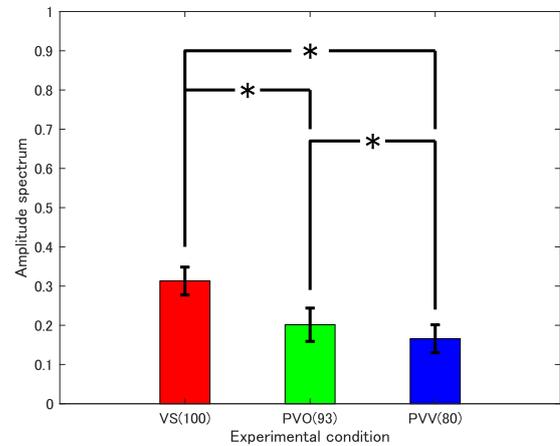


図 6: SSVEP 誘発量

間に視覚刺激が 65 秒間提示され、被験者は VR アプリケーションが終了するまで視覚刺激の中央に視線と注意を向ける。これを各条件 1 回ずつランダム順にて行うことを 1 セットとし、計 3 セット脳波計測を行う。また、3 セット終了後、被験者に対して「視覚刺激の有無に関係なく前進しているように感じたか」、「周辺視野における物体ありや前進のときの視覚刺激に注意を向けやすかったか」という 2 つの質問を行い、主観的なベクシオンや注意の強度について記録する。被験者は成人男性 5 名である。一方、実空間の LCD モニタを用いてベクシオン刺激を提示した先行研究では、誘発されたベクシオンによる乗り物酔いが発生しやすい人は発生しにくい人と比較し、SSVEP 誘発が増加することが示されている [9]。被験者による乗り物酔いのしやすさの違いが SSVEP 誘発結果に与える影響を考慮し、被験者に対して乗り物酔いに関する事前聴取を行った結果、全被験者が乗り物酔いが発生しにくいと回答している。

3.3 解析方法

計測された 60 秒間の脳波データに離散フーリエ変換を適用し、得られた 30Hz の振幅スペクトルが SSVEP 誘発に起因するかを判断する方法として 3σ 法による閾値処理を用いる。各条件における非点滅刺激注視タスクにより得られた脳波データにおける 30Hz の振幅スペクトル量を用い、式

(1) により閾値を求める。

$$X = \mu + 3 \times \sigma. \quad (1)$$

式 (1) の X は閾値、 μ は 30Hz における振幅スペクトルの平均値、 σ は標準偏差である。後頭葉に位置する脳波電極 O1, O2 の内、30Hz の振幅スペクトルが大きい方を SSVEP 誘発量として採用し、SSVEP 誘発量が閾値を超える場合、SSVEP が誘発されたと判断する。また、各条件において SSVEP が誘発された割合を SSVEP 誘発率とし、式 (2) により求める。

$$\text{誘発率} [\%] = \frac{\text{SSVEP が誘発された回数}}{\text{全試行回数}} \times 100. \quad (2)$$

4. 結果

視覚刺激点滅条件における SSVEP 誘発量の被験者全体平均を図 6、SSVEP 誘発率を表 2 に示す。図 6 の縦軸は振幅スペクトル量、横軸は周辺視野の刺激の種類、カラーバーは各条件における SSVEP 誘発量の平均値、エラーバーは標準偏差である。また、横軸のラベル名横 () 内は SSVEP 誘発率 [%]、"*" は t 検定により SSVEP 誘発量が $p < 0.05$ となる条件を指す。

表 2: SSVEP 誘発率 [%]

被験者 \ 条件	VS	PVO	PVV
a	100.0	66.7	33.3
b	100.0	100.0	100.0
c	100.0	100.0	66.7
d	100.0	100.0	100.0
e	100.0	100.0	100.0
全体平均	100.0	93.2	79.8

5. 考察

実験後の全被験者に対する聴取において、PV と PVV にて自身が前進しているように感じたことと回答されたことから、ベクション刺激の提示により視覚刺激の有無に関係なく前進しているように感じるベクションが誘発されたことがわかる。

SSVEP 誘発量は周辺視野に物体が存在せず視覚刺激のみを提示した VS において最大となり、周辺視野に停止または被験者に向かい移動する物体が存在する PVO、PVV において減少傾向になった。これは、周辺視野に物体が存在することにより、視覚刺激への注意が低下し、周辺視野の情報が中心視野の情報に影響を及ぼしていると推測される。また、PVV においては前進するベクション刺激が自分の動きと不一致である視覚的な錯乱を引き起こし前進しているように感じているため、周辺視野の動きに対して注意が向きやすくなることにより視覚刺激への注意の安定性を失い、PVO よりも SSVEP 誘発量の低下に影響を与えた可能性が考えられる。

さらに、周辺視野に物体が存在する場合は視覚刺激に注意を向けにくかったと回答した被験者 a, c において、PVO と PVV の両方または PVV にて SSVEP 誘発率が低下した。これは、視覚刺激と周辺視野の物体への注意の割り当てが困難になり、物体が前進する場合に周辺視野の動きに対する注意が強くなったことが考えられる。一方、周辺視野における物体の存在やベクション刺激に関係なく、視覚刺激に注意を向けやすかったと回答した被験者 b, d, e においては、全条件にて SSVEP 誘発率が 100% であった。これは、被験者の注意制御が高く、視覚刺激に対する注意が安定していたことが考えられる。以上より、被験者により周辺視野の物体に対する主観的な注意の向きやすさには違いがあり、被験者間における SSVEP 誘発の差に繋がったことが示唆された。

6. まとめ

本研究では、VR 空間におけるアバタの移動操作を目的とした SSVEP 型 VR-BCI に関する基礎検討として、周辺

視野に存在する物体や誘発されるベクションが SSVEP 誘発に与える影響について調査した。その結果、周辺視野における物体の存在や自身が前進しているように感じるベクション刺激の提示により SSVEP 誘発量が減少することが示唆された。原因として、視覚的な注意が周辺視野の物体に分散され、SSVEP を誘発させる視覚刺激に対する注意が妨げられることが考えられた。また、視覚刺激に対する注意の集中度や周辺視野への干渉度合いには個人差があることが示された。

今後の課題として、ベクション刺激映像の速度を変更したときや周辺視野の物体を透過させたときの SSVEP 誘発特性の調査、乗り物酔いしやすい被験者における調査が挙げられる。

参考文献

- [1] 東広志, 中西正樹, 田中聡久: 脳波処理とブレイン・コンピュータ・インタフェース - 計測・処理・実装・評価の基礎 -, コロナ社, 2022.
- [2] 横井健, 板井陽俊: BCI における視覚刺激の透過率が誘発脳波, 反応速度に与える影響, 信学技報, Vol. 122, No. 410, pp. 10-14, 2023.
- [3] 神谷琢斗, 板井陽俊: VR 空間におけるアバタの移動操作を目的とした SSVEP 型 VR-BCI に関する基礎検討, 信学技報, Vol. 123, No. 77, pp. 56-60, 2023.
- [4] S. T. Morgan, J. C. Hansen, and S. A. Hillyard: Selective attention to stimulus location modulates the steady-state visual evoked potential, PNAS, Vol. 93, No. 10, pp. 4770-4774, 1996.
- [5] S. Ueda and A. Itai: The analysis of SSVEP evoked by the modulated visual stimulus in medium and high frequencies, Proc. of SCIS-ISIS, pp. 1639-1642, 2014.
- [6] T. Cao, et al.: Flashing color on the performance of SSVEP-based brain-computer interfaces, Proc. of EMBC, pp. 1819-1822, 2012.
- [7] R. Kus, et al.: On the quantification of SSVEP frequency responses in human eeg in realistic bci conditions, PLoS One, Vol. 8, No. 10, e77536, 2013.
- [8] 松井大輔, 青浩二: 定常状態視覚誘発電位を用いたブレインコンピュータインタフェースの性能向上と測定システムに関する研究, 大分工業高等専門学校紀要, Vol. 52, pp. 27-36, 2015.
- [9] Y. Wei, Y. Wang, Y. Okazaki, K. Kitajo, and, R. So: Motion sickness resistant people showed suppressed steady-state visually evoked potential(SSVEP) under vection inducing stimulation, Cognitive Neurodynamics, pp. 1-13, 2023.