

奥行き方向の注意に対応可能な SSVEP を用いた BCI の安全性解析

松井 真秋^{1,a)} 板井 陽俊¹

概要: 近年, 身体不自由者の補助インタフェースとして入力に四肢の動作を必要としない脳コンピュータインタフェース (BCI) が注目されている. BCI に意思を伝える脳波として, 特定の周期にて点滅する視覚刺激に注意を向けるだけで誘発される SSVEP が注目されている. 一方, SSVEP を利用した BCI を車いす制御等に使用する場合, 制御のためディスプレイ等に表示された視覚刺激に注意を向けつつ, 状況把握のため周囲の物体にも注意を向けなければならない. 危険な状況の発見が遅れる可能性が考えられる. そのため先行研究では, 平面ディスプレイを用い, SSVEP と反応時間を計測することにより BCI の安全性解析を行った. しかし, 水平方向の反応時間のみ計測しているため, 今後発展するであろう AR 技術や MR 技術には対応しておらず, また奥行き方向の注意についても計測が困難であった. そこで本研究では, VR ヘッドセットによる仮想空間上の実験環境を構築し, 奥行き方向の注意に対応可能な BCI の安全性解析を行う.

Safety Analysis for SSVEP Based BCI That Can Deal with Depth Attention

1. はじめに

通常, コンピュータへの情報・命令入力はマウスやキーボードなど入力装置を用いて行われる. しかし, 四肢欠損や身体麻痺など, 入力装置の使用が困難である人々も存在する. そこで, 手足を介さず情報・命令入力を実現する脳コンピュータインタフェース (BCI; Brain Computer Interface) が注目を集めている. 中でも定常状態視覚誘発電位 (SSVEP; Steady-State Visually Evoked Potentials) を用いた BCI は視覚刺激に注意を向けるだけで制御可能であることから, 車いす制御等に 응용されている.

一方, 近年では通常のモニタ以外を用いた仮想現実 (VR; Virtual Reality), 拡張現実 (AR; Augmented Reality) といった技術の発展が目覚ましい. AR 技術を用いた製品としては Google 社から Google Glass[1] が 2013 年に発売され話題となった. また, VR 技術においては, 2016 年には, Oculus 社から Oculus Rift[2] が, HTC 社からは HTC VIVE[3] が, Sony からは PlayStation VR[4] がそれぞれ発売され, VR 元年と称し賑わいを見せた [5]. さらに, これ

らの技術の発展に合わせて複合現実 (MR; Mixed Reality) と呼ばれる仮想的な映像を現実空間に複合して投影を行う技術も発展の兆しがみられる.

しかし, BCI に用いるデバイスが変更された場合においても, SSVEP を用いた BCI では, 視覚刺激に注意を向けて制御を行いつつ, 周囲の状況に注意を向けなければならない. そのため, BCI 利用中に危険な状況が発生したとき, その発見が遅れることが問題視されている. そこで, 先行研究では色の変化する円を注意対象として用い反応時間と SSVEP を計測することにより, 安全性の解析を行った [6]. しかし, 先行研究では平面ディスプレイを用いて実験を行っているため, 現実の 3 次元空間のみならず今後発展が予想される VR, AR, MR 技術を用いた BCI における奥行き方向の注意対象に対する安全性が確認されていない. そのため本研究では, VR ヘッドセットを用い, 仮想 3 次元空間上で奥行き方向に注意対象を配置することにより VR, AR, MR 技術に対応した安全性解析を行う. また, VR ヘッドセットを用いて実験を行うにあたり, 平面ディスプレイと VR ヘッドセットで異なる特性が存在するか確認を行う.

¹ 中部大学大学院工学研究科情報工学専攻

^{a)} tp17024-0676@sti.chubu.ac.jp



図 1 HTC VIVE ヘッドセットの全体像 [3]

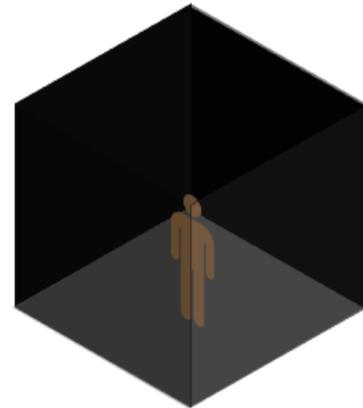


図 2 仮想 3 次元空間概略図

2. 計測環境

本研究では平面ディスプレイに加え HTC 社製の HTC VIVE (図 1) と呼ばれる VR ヘッドセットを用いて実験を行う。VR ヘッドセットを用いる実験では、Unity を用いて作成された仮想 3 次元空間内に視覚刺激と色の変化する指標を配置する。被験者は仮想空間内で暗室を模した黒い 6 面体に覆われており、6 面体の中心に配置されている (図 2)。また、VR ヘッドセットを使用する実験では、脳波計と VR ヘッドセットを同時に装着するとノイズが発生する。そのため、専用の顎乗せ台を作成し、顎乗せ台に VR ヘッドセットを固定する。被験者が VR ヘッドセット用の顎乗せ台に顎を乗せ、VR ヘッドセットを覗き込んでいる様子を図 3 に示す。

視覚刺激は平面ディスプレイ、VR ヘッドセットの両実験において視野角 4.77 度のフラッシュ刺激 (図 4) であり、1 秒間に 15 回白と黒が交互に入れ替わる。指標は、平面ディスプレイ実験では視野角 0.05 度の円、VR ヘッドセット実験では視野角 0.05 度の球を用い、視覚刺激が提示されている間にランダムな間隔で 5 回から 6 回、 R, G, B がそれぞれ 100, 100, 0 から R 成分のみ 1 秒間に 20 ずつ増加し、255, 100, 0 に変化する。被験者は両実験共に暗室内で顎乗せ台に顎を乗せ、頭部固定状態で安静に座り、視覚刺激に視線を向けつつ指標に注意を向けるように指示されている。また、被験者は指標の変化に気づいたときに、平面ディスプレイ実験では手元にあるキーボードのスペースキーを押すように、VR ヘッドセット実験ではマウスをクリックするように指示されている。指標変化開始時刻と被験者の反応時刻を記録し、差を求めることで反応時間 (秒) とする。

3. VR ヘッドセットと平面ディスプレイの比較

VR ヘッドセットと平面ディスプレイに異なる特性が存在するか確認を行うため、VR ヘッドセットを用いて行われた実験と、平面ディスプレイを用いて行われた実験の比較を行い、両実験に違いが発生するか検証を行う。



図 3 VR ヘッドセット用顎乗せ台使用時

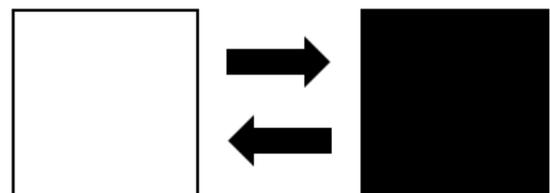


図 4 フラッシュ刺激の例

3.1 実験環境

VR ヘッドセット実験では、被験者は顎乗せ台に固定されているヘッドセットを覗き込み、正面に配置された視覚刺激に視線を向け、視覚刺激から水平方向 θ 度に配置されている指標に注意を向けるよう指示されている。平面ディスプレイ実験では、正面におかれている平面ディスプレイの中心に配置された視覚刺激に視線を向け、視覚刺激から水平方向 θ 度に配置されている指標に注意を向けるよう指示されている。指標の位置 θ は両実験共に視覚刺激の中心の指標の中心が重なる点を 0.0 度とし、0.0 度から 10.0 度まで 2.5 度刻みの 5 種類とする。また、両実験共に指標のみが 0.0 度の位置に提示され、指標を注視する実験が含

表 1 計測条件

使用機器	Emotiv 社製 Emotiv EPOC+
サンプリング周波数	128Hz
点滅周波数	0Hz, 15Hz
被験者	成人男性 5 名 (平均 22.6 歳, +1.4, -1.6)
実験回数	1 セット

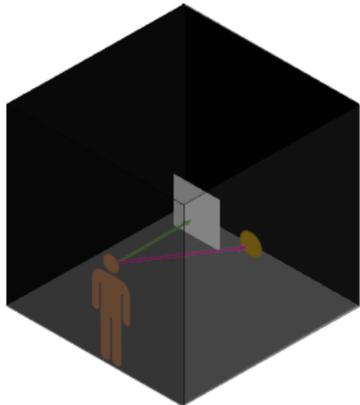


図 5 仮想 3 次元空間概略図

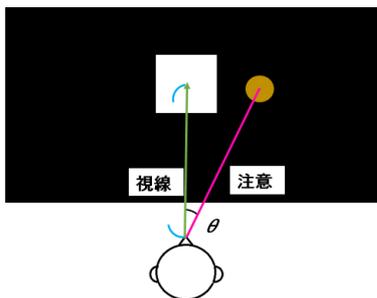


図 6 被験者視点の実験概略図

まれる。そのため、実験は 6 種類を 1 セットとする。VR ヘッドセット実験の計測条件を表 1 に、仮想空間内の実験概略図を図 5 に、被験者視点の実験概略図を図 6 に示す。平面ディスプレイ実験の計測条件は表 1 と同じである。また、実験概略図は図 6 と同じである。

3.2 SSVEP 誘発量比較

VR ヘッドセットを用いた水平方向に対する安全性解析の結果と、平面ディスプレイを用いた水平方向に対する安全性解析の結果の SSVEP 誘発量の比較を行う。図 7 に VR ヘッドセットを用いた実験と平面ディスプレイを用いた実験の SSVEP 誘発量の比較を示す。

図 7 の縦軸は SSVEP 誘発量、横軸は指標の位置 θ である。また、データ数は 5 である。エラーバーはそれぞれの角度における標準偏差を示す。また、マゼンタのバーは VR ヘッドセットを、シアンのバーは平面ディスプレイを

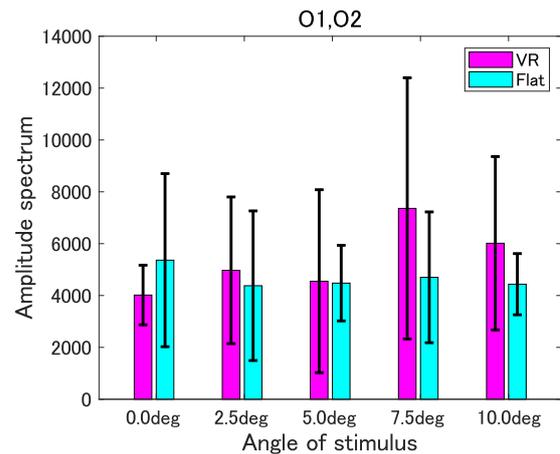


図 7 SSVEP 誘発量比較

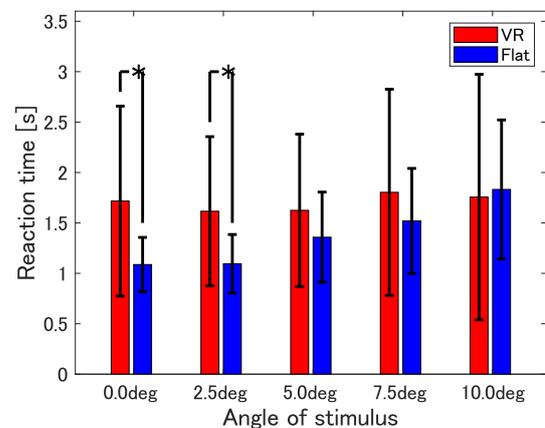


図 8 反応時間比較: 指標注意時

用いた実験における SSVEP 誘発量である。

図 7 より、VR ヘッドセットと、平面ディスプレイを用いた実験において SSVEP 誘発量に有意差がない事が分かる。

3.3 反応時間比較

VR ヘッドセットを用いた水平方向に対する安全性解析の結果と、平面ディスプレイを用いた水平方向に対する安全性解析の結果の反応時間の比較を行う。図 8 に VR ヘッドセットを用いた実験と平面ディスプレイを用いた実験における反応時間の比較を示す。また、図 9 に両実験における指標注視時の反応時間比較を示す。

図 8, 図 9 の縦軸は反応時間、エラーバーは標準偏差、データ数は 25, *は有意水準 0.05 の有意差が存在する状態を示す。また、図 8 の横軸は指標の位置 θ , 赤いバーは VR ヘッドセット, 青いバーは平面ディスプレイを用いた実験における反応時間を表す。図 9 の黄色のバーは VR ヘッドセット, 緑のバーは平面ディスプレイを用いた実験における反応時間を表す。

図 8 より、0.0 度と、2.5 度に有意差がみられる。また、この有意差はどちらも VR ヘッドセットを用いた実験で反

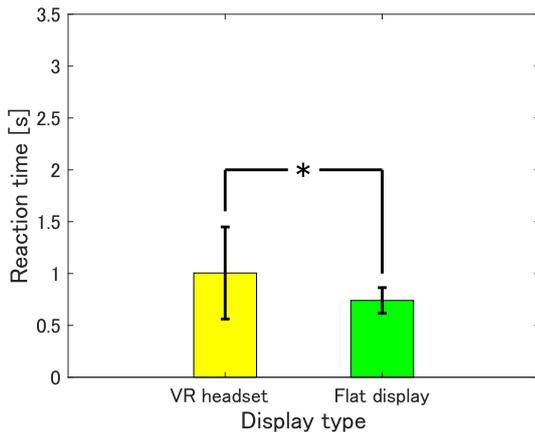


図 9 反応時間比較: 指標注視時

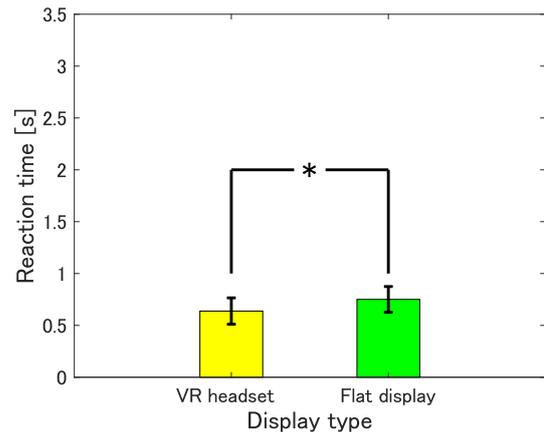


図 10 反応時間比較: 指標注視時

応時間が長くなること示している。

図 9 より, VR ヘッドセットと, 平面ディスプレイで反応時間に有意差がみられる。また, この有意差も VR ヘッドセットを用いた実験で反応時間が長くなること示している。

3.4 考察

図 7 より, 全ての角度において VR ヘッドセットと平面ディスプレイを用いた実験において SSVEP 誘発量に有意差が見られない。このことから, SSVEP 誘発量は両実験において変化がないと考えられる。

図 8 より, 指標注意時, 0.0 度と 2.5 度に有意差が見られ, VR ヘッドセットを用いた実験の方が反応時間が長くなっている。このことから, VR ヘッドセットを使用した BCI を構築した場合, 平面ディスプレイと比べ, 視覚刺激の周辺状況への反応が遅れることが示唆される。

図 9 より, 指標注視時において, VR ヘッドセットを用いた実験の反応時間は, 平面ディスプレイを用いた実験に比べ反応時間が長くなっている事が分かる。このことから, VR ヘッドセットを用いた場合には指標を注視した場合でも平面ディスプレイと比べ反応時間が長くなる事が示唆される。しかし, 反応時間はトレーニングを行うことにより短くなる事が示されている [10]。このトレーニングは, 反応時間の計測に則り行われている。本実験において, 平面ディスプレイを用いた実験は, VR ヘッドセットを用いた実験より後に行われているため, 実験を重ねることによりトレーニングと同等の効果が表れ, 反応時間に差が生じたのではないかと考えられる。そのため, VR ヘッドセットを用いた場合にも, トレーニングを行うことにより平面ディスプレイと同程度の反応時間になる可能性が考えられる。そこで, 平面ディスプレイを用いた実験より後に行われた実験のデータとの比較を行う。図 10 に指標注視時の反応時間 t 検定結果を示す。

図 10 の縦軸は反応時間, エラーバーは標準偏差, 緑の

バーは図 9 の緑のバーと同じデータである。また, 黄色いバーは比較実験より後に行われた奥行き方向に注意対象を配置した実験における指標注視時の反応時間である。データ数は 25 である。

図 10 より, 平面ディスプレイと VR ヘッドセットの反応時間に有意差がみられる。また, 反応時間は VR ヘッドセットを用いた方が短くなっている。これは実験を複数回行うことによりトレーニングの効果が現れた結果と考えられる。また, この有意差も平面ディスプレイを用いた実験より後に, VR ヘッドセットを用いた実験を行ったため発生したと考えられる。そのため, 平面ディスプレイを用いた場合と VR ヘッドセットを用いた場合の反応時間は, トレーニングを行うことにより, 同程度の長さになるのではないかと予想される。このことから, VR ヘッドセットを用いた実験において反応時間が注意対象の角度によらず一定であったことはトレーニングにより変化し, 平面ディスプレイを使用した実験と同様の傾向が表れるのではないかと考えられる。

これらから, 反応時間に差がみられるがトレーニングによって差はなくなり, SSVEP 誘発量にも有意差が見られないことから, VR ヘッドセットと平面ディスプレイに異なる特性は存在しないと考えられる。また, VR ヘッドセットを BCI に使用するためには事前に反応時間に関するトレーニングを行うことにより, 安全に使用可能であると考えられる。

4. VR ヘッドセットを使用した奥行き方向に対する安全性解析

本実験は半透明の視覚刺激を用い, 奥行き方向に注意を向けた場合の BCI の安全性の解析を行う。

4.1 実験環境

被験者は顎乗せ台に固定されているヘッドセットを覗き込み, 正面に配置された半透明の視覚刺激に視線を向け,

表 2 計測条件

使用機器	Emotiv 社製 Emotiv EPOC+
サンプリング周波数	128Hz
刺激周波数	0Hz, 15Hz
刺激提示時間	60 秒
被験者	成人男性 5 名 (平均 22.6 歳, +1.4, -1.6)
実験回数	1 セット

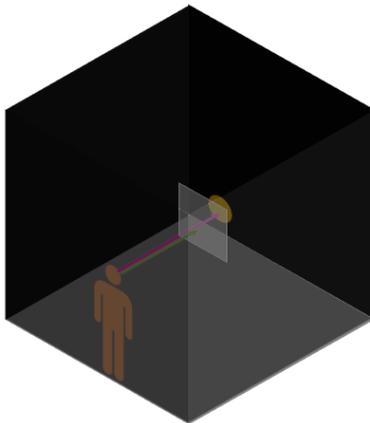


図 11 実験概略図

視覚刺激の奥に配置されている指標に注意を向けるよう指示されている。半透明の視覚刺激は、 R, G, B, α の α 値が 128 である。計測条件を表 2 に、実験環境の概略図を図 11 に示す。本実験では視覚刺激が点滅していない状態の奥行き方向に注意を向けた際の反応時間計測のため、白い半透明の視覚刺激が非点滅状態で存在している場合の計測を行う。また、指標のみが 0.0 度の位置に提示され、指標を注視する実験も含まれる。そのため 3 回の計測を 1 セットとする。

4.2 SSVEP 誘発結果

脳波の解析として離散フーリエ変換を用い、15Hz の振幅スペクトル (SSVEP 誘発量) を求め、全ての被験者の刺激点滅時、刺激非点滅時の SSVEP 誘発量を用い t 検定を行う。

図 12 の縦軸は SSVEP 誘発量、横軸は点滅周波数である。また、データ数は 5 である。エラーバーはそれぞれの周波数における標準偏差を示す。図 12 から、非点滅時と刺激点滅時の方が SSVEP 誘発量が多く、有意差がみられる。

4.3 反応時間計測結果

図 13 に各周波数に対する反応時間の t 検定結果を示す。

図 13 の*は有意水準 0.05 の有意差が存在する状態を示す。縦軸は反応時間を示す。青いバーは各周波数の反応時間を示す。緑色のバーは被験者が指標に注視した場合の反応時間を示す。また、エラーバーは標準偏差を示す。データ数は 1 度の実験から 5 つのデータを取得するため 25 で

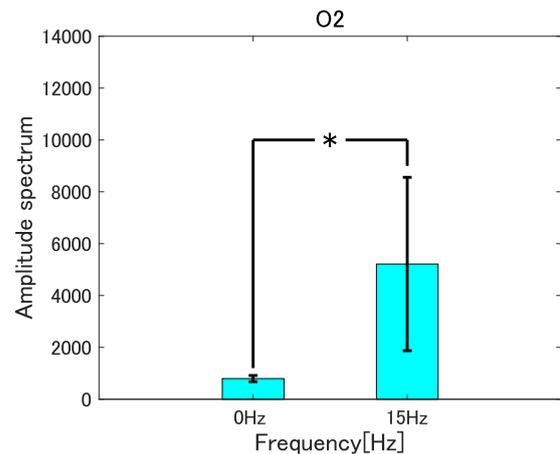


図 12 t 検定結果:O2

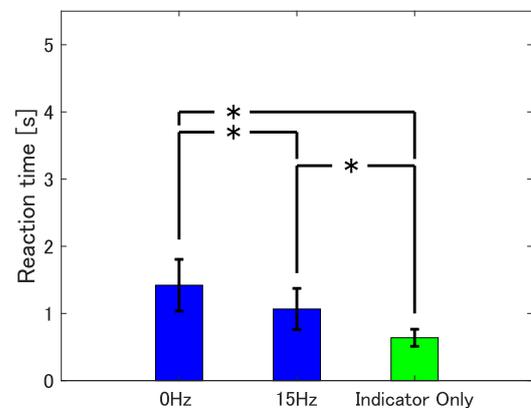


図 13 t 検定結果:反応時間

ある。

図 13 より、0Hz と 15Hz 間、0Hz と指標注視時、15Hz と指標注視時に有意差がみられる。

4.4 考察

図 12 より、刺激非点滅時と比べ、刺激点滅時の方が SSVEP 誘発量が多いことが確認された。このことから、半透明の視覚刺激を用いて奥行き方向に注意を向けた場合でも SSVEP は誘発されることが示唆された。

図 13 より、非点滅時の方が点滅時と比べ反応時間が長くなっている。これは被験者の聴取により、指標の色が視覚刺激の白側と同化して見えるため反応が遅れた、との意見が得られた。非点滅時は常に半透明の視覚刺激の白側が表示されており、そのため反応が遅れたのではないかと考えられる。しかし、刺激点滅時には半透明の視覚刺激の白側と黒側が常に入れ替わり続けるため見やすくなり、反応時間が短くなったのではないかと考えられる。このことから、複数の視覚刺激を用いる BCI では、すべての視覚刺激を点滅させ続けることで点滅していない視覚刺激が存在する状態と比べ安全であると考えられる。また、刺激点滅時、

非点滅時共に指標注視時より反応時間が長くなっている。

これらから、複数の半透明の視覚刺激を用いて BCI を構築する場合、視覚刺激は常に点滅し続けることで奥行き方向の注意対象に素早く対応可能であり、点滅しない視覚刺激が存在する場合と比べ安全であると示唆された。また、半透明の視覚刺激を用いても SSVEP の誘発が可能なことから、AR, MR 技術を SSVEP を用いた BCI に応用可能であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、今後発展するであろう VR, AR, MR を用いた BCI を想定し、奥行き方向の注意に対応可能な SSVEP を用いた BCI の安全性解析を行った。VR ヘッドセットを使用した場合と、平面ディスプレイを使用した場合の比較では、反応時間に差が現れたが、この差はトレーニングの効果であると考えられ、それを考慮した場合、VR ヘッドセットと平面ディスプレイには異なる特性が存在しない事が示された。VR ヘッドセットを用いた奥行き方向に対する安全性解析の結果、半透明の視覚刺激を常に点滅させることで、奥行き方向の注意対象に対して反応しつつ、安全に BCI の制御が可能であることが示された。以上のことから、奥行き方向の注意対象に対する反応時間と SSVEP 誘発量を計測することにより、安全に BCI を使用するための指針が示された。

今後の課題として、今回構築を行った仮想空間は暗室を模しているが、街中などの状況を仮想空間内で再現し、同様の実験を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] The Moonshot Factory: *Glass*, 入手先 (<https://x.company/glass/>) (2019. 1. 24) .
- [2] Facebook Technologies, LLC: Oculus Rift: VR 対応 PC 用の VR ヘッドセット, 入手先 (<https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=robo-recall>) (2019. 1. 24) .
- [3] HTC Corporation: VIVE 日本 VIVE ハードウェアの購入, 入手先 (<https://www.vive.com/jp/product/>) (accessed 2019-1-24) .
- [4] Sony Interactive Entertainment: PlayStation VR プレイステーション, 入手先 (<https://www.jp.playstation.com/psvr/>) (2019. 1. 24) .
- [5] 2019 VR Journal: 2016 年はなぜ「VR 元年」と呼ばれているのか?, 入手先 (https://vrjour.jp/vrgannnen/#20164HTC_Vive) (2019. 1. 24) .
- [6] Matsui, M. and Itai, A., : *Reaction time and evoking performance analysis for SSVEP based brain computer interface*, Proc. of Smart Info-Media System in Asia2017, pp.202-205 (2017) .
- [7] Matsui, T., Matsui, M. and Itai, A., : *The characteristics of SSVEP related to sight and attention for flickering stimulus*, Proc. of Smart Info-Media System in Asia2017, pp.193-196 (2017) .
- [8] M. F. ベアー, B. W. コノーズ, M. A. パラディーン: 神経科学-脳の探求-, 西村書店 (2015) .

- [9] 千々岩英彰: 色彩学概説, 東京大学出版会 (2001) .
- [10] 足利義男, 石川俊紀, 火箱保之, 増田洋, 川井浩: 選択反応時間のトレーニング効果について, 京都大学医療技術短期大学紀要 (1989) .