

# 錯視を用いたMRにおける垂直リニアベクションの生成と 身体姿勢による影響

斎藤 文人<sup>1,a)</sup> 中西 泰人<sup>2,b)</sup>

**概要:** ベクションとは、視覚刺激を観察することで発生する運動感覚である。これは人工現実感 (VR) の向上の指標としても用いられるが、本稿では複合現実感 (MR) システムの中で錯覚を用いて垂直リニアベクション (LV) を実現する手法を提案する。MR システムでは現実の様子も見えるため、視覚刺激の全てを人工的に提示できない。現実の様子に錯覚を重ねて垂直 LV を生成できれば、現実の体験を拡張することができ、MR システムにおけるコンテンツの臨場感や表現力の向上が期待できる。本稿では第一段階として VR システム上での垂直 LV の生成と評価を行った。実験 1 では、視覚刺激の種類が垂直 LV に与える影響を確認した。結果、カーブボール錯視を使った動的な錯視の視覚刺激が最も強い垂直 LV を発生させることを確認した。実験 2 では、被験者の姿勢と垂直 LV の強度の関係性について分析を行った。結果、立位のほうが端座位に比べて垂直 LV の強度を高める効果がある可能性を示唆する結果となった。

## Generation of Vertical Linear Vection in Mixed Reality using Optical Illusion and the effects of Body Posture

### 1. はじめに

視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) とは、広範な視野領域に対して提示された様に運動する視覚刺激を観察することによって得られる運動感覚である。例えば、止まっている車中で両脇を動くトラックを観察した際に、あたかも自分が乗っている車が走っているかのように感じられることがある。つまり、ベクションとは視覚系によって認知される運動感覚であり、観察する視覚刺激の移動方向と逆方向に運動が知覚される現象である。

ベクションは観察する視覚刺激の広さや視野における領域と密接な関係があることが知られており、認知科学的な研究として様々な研究がなされてきた [6]。そして近年、人工現実感 (Virtual Reality; VR) コンテンツにおける没入感向上を目的に、様々な没入型ディスプレイの開発・運用が盛んに行われているが、ベクション強度:得られる運動感覚の強さは、没入感の指標として着目されている。ベクションは、直線運動感覚 (Linear Vection; LV) と回転運

動感覚 (Circular Vection; CV) の 2 つに分けられる。ベクションと視野の関係に着目した研究には、水平方向の LV [1] や CV に関する検討 [2]、垂直方向の LV に関する研究 [3], [4] など幅広く実験が行われている。

こうした研究ではいずれも視覚刺激提示面の最大観察視角を確保すべく、広視野ディスプレイや VR 用の HMD (Head Mounted Display) を用いて実験が行われているが、これから普及が見込まれる複合現実感 (Mixed Reality; MR) 用の HMD を用いた LV に関する研究はまだ手つかずの研究課題である。その理由として、MR システムにおいてベクションを実現するには以下の困難な課題を解決する必要がある。VR では背景も含めて全ての視覚刺激の座標を自在に動かして提示することが可能であるが、MR では周囲の現実の風景に合わせて仮想オブジェクトを配置するため、視覚刺激の座標の全てを動かすことが不可能であることが挙げられる。

そこで本稿では、MR システムにおいて垂直 LV を実現することを目的として、錯視を利用した垂直 LV の疑似提示方法を提案する。錯視とは視覚性の錯覚であり、錯覚とは実在する対象の真の性質とは異なる知覚のことを指す [5]。MR システムにおいて錯視を用いた垂直 LV の生成が可能

<sup>1</sup> 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

<sup>2</sup> 慶應義塾大学環境情報学部

a) mondo@sfc.keio.ac.jp

b) naka@sfc.keio.ac.jp

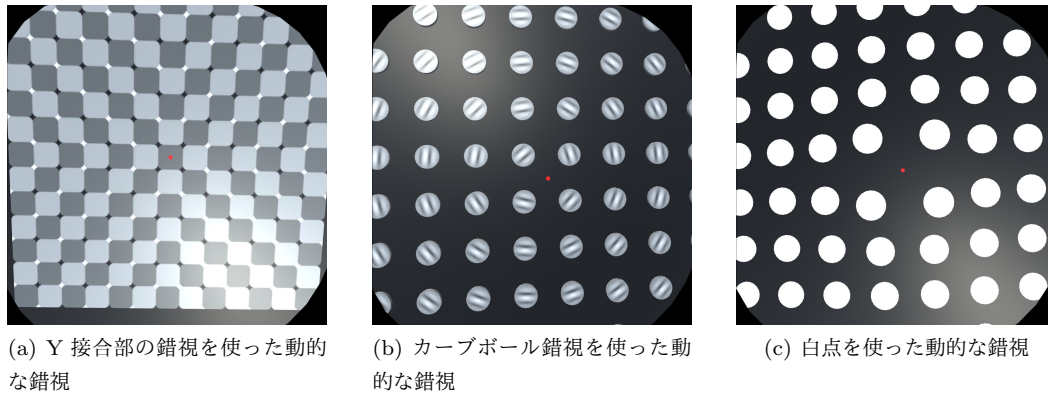


図 1 実験に使用した 3 種類の視覚刺激

となれば、モーションライド型のアミューズメント施設への応用も考えられる。

MR 用の HMD は透過型とビデオシースルー型の 2 つに分けられる。前者は透過型ディスプレイ上に仮想オブジェクトを提示するが、VR と比べて輝度が低いため透過して見える背景と重なってしまい VR と比べて強い視覚刺激を与えることができない。また、VR と比べて提示可能な視野角が狭いため、視覚刺激を用いたベクシジョンの生成に必要な周辺視野への提示ができない。そこで高い輝度で仮想オブジェクトを提示でき、かつ視野角が広いビデオシースルー型の HMD での垂直 LV の生成を目指し、本稿では第一段階として VR 空間内での錯視を使った垂直 LV の生成と強度の検証、姿勢が垂直 LV に与える影響を計測する実験を行う。

## 2. 実験環境

### 2.1 頭部装着型ディスプレイ

ベクシジョンの知覚強度と周辺視野の関係については研究がされてきており、視覚刺激の提示面が広いほど強い LV が発生することが示されている [6]。そこで実験に用いる HMD として、Oculus 社の Rift S を採用した。これは水平・垂直ともに約 110 度の視覚刺激の提示が可能であり、一般向けに販売されている HMD の中でも比較的広い視野角を有している。

### 2.2 視覚刺激

MR システム上でのベクシジョンに関する検討が少ない理由として、周囲が見えるため座標軸を動かすことが困難であることを挙げた。そこで本研究では座標軸を動かすことなく平面上で立体感を提示することができる錯視に着目した。提示する視覚刺激は被験者の足元を中心とした床面を対象とした。このとき、床面の視覚刺激を視野角いっぱい提示させるため、被験者には立位をとらせた後に真下を向かせた状態で視覚刺激を提示した。十分な垂直 LV を知

覚させるためには、ある程度の時間、視覚刺激を提示する必要がある。そこで本稿では、視覚刺激は下降と上昇の刺激を 3000ms ずつ、計 6000ms の提示を行った。また、視線方向を指定するため、注視点を被験者の真下に設置した。

本稿では垂直 LV を誘発する錯視としての 3 種類の錯視を用意した。図 1 は被験者が VR ゴーグルを通して提示された 3 種類の錯視のキャプチャ画像である。いずれも VR 空間内に用意した 1 辺 4.0m の 2 次元 CG 正方形オブジェクトの上面に動的な錯視をテクスチャとしてマッピングし、正方形の対角線の交点が被験者の真下に来るように設置した。図 2 は、白点を使った視覚刺激を VR 空間上に設置した状態の俯瞰図である。図中の赤い丸枠は被験者が真下を向いたときのおおよその視野範囲を表している。本稿において動的な錯視とは時間軸に応じて変化する錯視のことを指し、変化しない錯視を静的な錯視と呼ぶ。

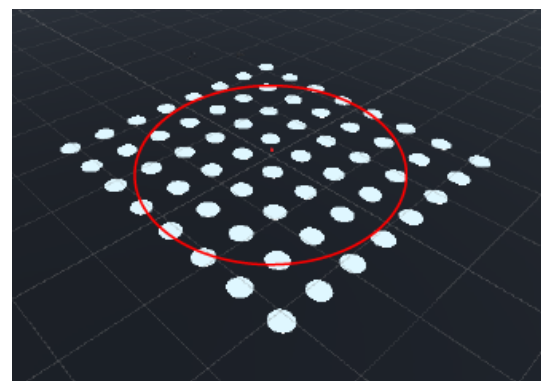


図 2 視覚刺激の俯瞰図

#### (1) Y 接合部の錯視を使った動的な錯視

北岡明佳が作成した膨らみの錯視 [7] に倣い、動的な錯視を生成した。膨らみの錯視は、市松模様内の正方形の角の接点に白黒の星を交互に配置することで立体感があるように錯覚させることができる。星の白黒の濃度を動的に変化させることで立体感の強度を変化させた。市松模様内の正方形の 2 種類の色は、8 ビットのグレースケールを 3 分

割した中間の2点の濃度を使用した。

### (2) カーブボール錯視を使った動的な錯視

Shapiro らが作成したカーブボール錯視 [8] に倣い、動的な錯視を生成した。カーブボール錯視は、低空間周波数成分に還元した白黒の縞模様を円形に切り取り、円形内の縞模様を模様と直行する方向にスライドさせながら円形を直線移動させたものを周辺視で観察することで引き起こされる錯視であり、本来移動している直線からずれた角度で移動しているように錯覚させることができる。このカーブボール錯視の円形オブジェクトを二次元上に等間隔に配置し、被験者の真下と円形オブジェクトの中心点を通る直線に対して白黒の縞模様が直行する様に回転配置し、白黒の縞模様をスライドさせる移動速度を変化させることで立体感の強度を変化させた。被験者と円形オブジェクトとの距離を自乗した数値の逆数と、白黒の縞模様をスライドさせる速さを対応させ、円形オブジェクトが被験者に近ければ近いほど速くスライドさせた。円形オブジェクトの直径は、VR 空間上で被験者の真下に来る円形オブジェクトが視野角に換算して 11 度になるように生成し、隣り合う円形オブジェクトの中心を結ぶ直線の距離が円形オブジェクトの直径の 2 倍になるように配置した。円形オブジェクトの背景にあたる床面の色は 8 ビットのグレースケールを 2 分割した中間点の濃度を使用した。

### (3) 白点を使った動的な錯視

カーブボール錯視を使った動的な錯視と同様に白色の円形オブジェクトを二次元上に等間隔に配置し、被験者の真下と白点の中心を端点とする直線上を移動させる動的な錯視を生成した。被験者と白点との距離を自乗した数値の逆数と、白点が移動する距離を対応させ、白点が被験者に近ければ近いほど移動距離を増やした。同時に白点の大きさも変化させることで立体感があるように錯覚させることができる。白点の大きさの変化量を調整することで立体感の強度を変化させた。白点の直径はカーブボール錯視を使った動的な錯視と同様に、VR 空間上で被験者の真下に来る円形オブジェクトが視野角に換算して 11 度になるように生成し、隣り合う白点の中心を結ぶ直線の距離が白点の直径の 2 倍になるように配置した。白点の背景にあたる床面の色は黒色を使用した。

## 2.3 計測方法

ベクション強度を計測する方法として、被験者の主観応答を計測する主観評価指標と身体反射応答を計測する客観評価指標の 2 つがある。前者の主観応答を計測する実験では、Scheffé の一対比較法 [3] やサーストンの一対比較法 [1] を用いて心理尺度を計測する方法、マグニチュード推定法

を利用する方法などが用いられている。後者の身体反射応答を計測する実験では、閉眼時と開眼時の重心移動の 2 次元軌跡の差を定量的に解析する方法 [9] や、三次元位置計測装置を使用して頭部位置移動量を計測する方法 [10]、心拍数変動と脈波の変化などの生体データを計測する方法 [11] などが用いられている。

本稿では被験者の主観応答を計測する主観評価指標を採用する。具体的には、3 種類の錯視から最も強い垂直 LV を生成できる錯視を選定する実験 3 ではサーストンの一対比較法を用い、視覚刺激の提示時における被験者の姿勢が垂直 LV の強度に与える影響を確認する実験 4 ではマグニチュード推定法を用いる。

## 3. 実験 1：垂直ベクションを知覚する視覚刺激の確認

### 3.1 実験目的

姿勢が垂直 LV に与える影響を計測する実験を行うためには、強いベクションを生成できる視覚刺激の選定が必要になる。先に述べた 3 種類の錯視から最も強い垂直 LV を生成できる錯視を選定するために以下に述べる実験 1 を行う。

### 3.2 実験条件

実験 1 に用いる視覚刺激は図 1 に示す Y 接合部の錯視を使った動的な錯視 (a)、カーブボール錯視を使った動的な錯視 (b)、白点を使った動的な錯視 (c) の 3 種類とした。

被験者にはロンベルグ試験に倣い、水平な床の上で脱靴した状態でつま先を合わせて立位姿勢をとった後、身体と頭を前に傾けて頭部が 90 度傾くような姿勢 (前傾姿勢) をとらせた (図 2 (a))。その後、VR 空間上における被験者の真下に配置した赤色の注視点から目を離さないように指示した。実験者の合図で視覚刺激の提示を開始し、提示終了の合図があるまでその姿勢を維持するように被験者に指示した。

視覚刺激の提示順序に関してカウンターバランスをとるために疑似ランダムな順序で実験を行った。試行回数は、3 種類の視覚刺激に対して 2 回ずつ評価するため、3×2 の 6 試行となる。また、3 種類の視覚刺激の提示の間には十分な休憩を入れた。計測は視覚刺激提示開始の 1000ms 前から行い、視覚刺激提示終了から 2000ms 後まで連続してサンプリング周波数 5Hz にて計測した。なお、被験者は正常視力 (矯正含む) を有する成人 8 名 (男性: 6 名, 女性 2 名) である。

### 3.3 実験手順

実験手順はサーストンの一対比較法に基づいて行った。

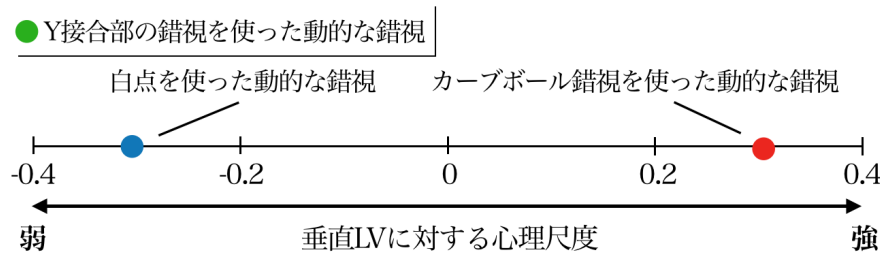


図 3 視覚刺激ごとの垂直 LV の知覚強度

被験者には2つの視覚刺激を提示し、どちらがより強い垂直 LV を得られたかを回答させる。これを3つの視覚刺激の総当たり回数分行う。この方法であれば提示された2つの視覚刺激から得られた垂直 LV の強度の大小を選んでいくだけで、被験者が3つ以上の選択肢で迷うことなく複数の選択肢の順位付けを簡便に行うことができる。試行回数は被験者1人あたり、3つの視覚刺激の総当たりとなる  ${}_3C_2 = 6$  試行である。

具体的な実験手順は以下のとおりである。

- (1) 評価する3つの視覚刺激の総当たりの順序をランダムに設定する
- (2) 設定した順序に沿って1つ目の視覚刺激を被験者に提示する
- (3) 2つ目の視覚刺激を被験者に提示する
- (4) 1つ目と2つ目の視覚刺激を比較させ、どちらがより強い垂直 LV を得られたかを回答させる
- (5) 疲労による影響を軽減するため、1分以上のインターバルを設ける
- (6) 残りの組み合わせについて(2)~(6)を繰り返す
- (7) コメントを聴取する

### 3.4 実験結果と考察

実験結果を図3に示す。数直線は各視覚刺激の垂直 LV の強度に対する心理尺度を示しており、数値が小さくなるにつれて被験者はより強い垂直 LV を得られたことを示す。なお、3種類の視覚刺激を総当たりした結果、Y接合部の錯視を使った動的な錯視が、残り2つの動的な錯視に対して全ての試行の結果で弱い垂直 LV の強度を示す回答を得たため、一対比較法の数直線上に表現することができなかった。そのため残り2つの動的な錯視同士を数直線上で比較した。

図3より、カーブボール錯視を使った動的な錯視と白点を使った動的な錯視の間に有意差は認められないことがわかった。実験1の目的は強いベクションを生成できる視覚刺激の選定であるため、3種類の視覚刺激の中で最も強い垂直 LV の生成の可能性を示したカーブボール錯視を使った動的な錯視を選定した。なお、Y接合部の錯視を使った動的な錯視と残り2つの動的な錯視の間に有意水準5%で

有意差が認められることがわかった。ここから、Y接合部の錯視を使った動的な錯視が残り2つの動的な錯視よりも生成できる垂直 LV の強度が低いことがわかる。

この実験で「カーブボール錯視を使った動的な錯視は床面が全体的に上下しているように感じたのに対して、白点を使った動的な錯視は床の一部が陥没しているように感じた」というコメントが得られた。このコメントから、垂直 LV を提示したいコンテキストに合わせて錯視の種類を選択する必要性を示唆している。

## 4. 実験2：被験者の姿勢が垂直 LV の強度に与える影響

### 4.1 実験目的

実験2では、実験1で選定した白点を使った動的な錯視を視覚刺激を用いて、視覚刺激の提示時における被験者の姿勢が垂直 LV の強度に与える影響を確認する。

### 4.2 実験条件

実験2の独立変数間では姿勢の変化が発生し、身体動揺の比較は信頼性を欠くため、垂直 LV の強度の評価は被験者の主観応答を計測する主観評価指標であるマグニチュード推定法を用いて行った。具体的には、直立姿勢(図4(a))を基準とし、基準の垂直 LV の強度を1とする。そして端座位(図4(b))の場合に知覚した垂直 LV の強度を基準刺激と比較して倍数值で回答させた。

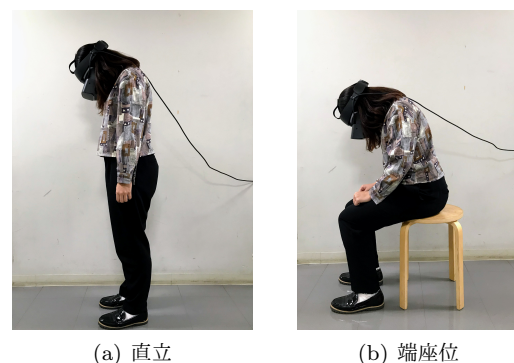


図 4 実験時の姿勢

実験1で被験者にとらせた直立姿勢とは異なり、水平の床の上で脱靴した状態で足を肩幅まで広げ立位姿勢を取った後、身体と頭を前に傾けて頭部が90度傾くような姿勢（前傾姿勢）をとらせた（図4(a)）。その後、VR空間上における被験者の真下に配置した赤色の注視点から目を離さないように指示した。

端座位（図4(b)）は水平な床の上に設置した座面の高さが40cmの木製椅子上に端座位をとった後、VR空間上における被験者の真下に配置した赤色の注視点から目を離さないように指示した。また、立位と端座位で床面からの距離が変わり、提示される錯視の範囲が変わってしまうため、姿勢に応じて錯視の大きさを変化させることで同じ範囲を提示できるようにした。

実験1と同じく、視覚刺激の提示順序に関してカウンターバランスをとるために疑似ランダムな順序で実験を行った。試行回数は各姿勢に対して1回ずつ評価するため、一人あたり2試行となる。なお、被験者は実験1と同じ成人男女8名である。

#### 4.3 実験手順

実験手順は以下のとおりである。

- (1) 評価する2つの姿勢の提示順序をランダムに設定する
- (2) 設定した順序に沿って1つめの姿勢を被験者にとらせ、視覚刺激を提示する
- (3) 2つめの姿勢を被験者にとらせ、(2)と同じ視覚刺激を提示する
- (4) 立位姿勢を基準としたときの端座位での垂直LVの強度を倍数值で回答させる
- (5) コメントを聴取する

#### 4.4 実験結果と考察

姿勢間での垂直LVの強度を比較した実験結果を図5に示す。横軸は姿勢、縦軸は垂直LVの知覚評価値を表す。

立位のほうが端座位に比べて垂直LVの強度を高める効果がある可能性を示唆する結果となった。t検定の結果、視覚刺激の条件間に有意差は認められなかった。図中のerror barが示す標準誤差が端座位の評価値に対して3割以上の大きさを示していることから、母集団の分布が広いことがわかる。ここから、被験者の姿勢が垂直LVの強度に与える影響には個人差があることがわかる。

これは文献[12]の結果と合わせて考えると、被験者の知識や経験が垂直LVの強度に影響を与える可能性が考えられる。実験終了後に聴取したコメント「経験的に立っているときのほうが座っているときよりも倒れて怪我をする可能性が高いと感じるから」からも同様の可能性が示唆される。また「立っているときよりも座っているときのほうが固定されてる部分が多いから垂直LVを弱く感じた」との

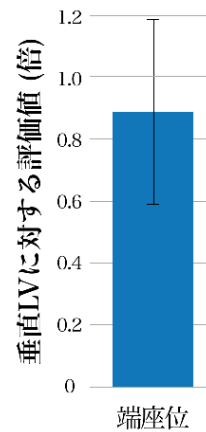


図5 立位と基準とした端座位の垂直LVの知覚強度

コメントを得た。ここから足裏の接地の有無、椅子の背板の有無、座面の素材など垂直LVの強度に影響を与える可能性のある要素を読み取ることができる。

## 5. おわりに

本稿では、VR空間内で錯視を使った垂直LVの生成と強度の検証、姿勢が垂直LVに与える影響について分析を行った。実験1では、用意した3種類の錯視の中から最も強い垂直LVを生成できる視覚刺激の選定を行った。今回準備した3種類の錯視の中ではカーブボール錯視を使った動的な錯視が最も強い垂直LVを生成できる可能性が示唆されたため、この錯視を実験2で使用する視覚刺激として採用した。

本実験では錯視に対して視線が垂直に交わるような体勢を取らせたが、MRコンテンツを利用する人の視線は常に真下を向いているわけではない。視線の方向と生成される垂直LVの強度についての関係についても追加実験が必要だと考えられる。その他、本実験で検証できなかった錯視が生成する垂直LVの強度や視野を占める錯視の面積、提示する錯視の広さ、MRコンテンツの利用者自身の表示の有無など垂直LVの強度に影響するであろう要素についても分析していきたい。

実験2では、視覚刺激の提示時における被験者の姿勢が垂直LVの強度に与える影響を確認した。結果として立位のほうが端座位に比べて強い垂直LVを知覚させる可能性が示唆されたが、姿勢間による垂直LVの強度に与える差は確認されなかった。この結果から、端座位の状態で視覚刺激を提示できるモーションライド型のアミューズメント施設への応用も期待される。

白点を使った錯視とカーブボール錯視を使った錯視の間では生成される垂直LVの強度に有意差は認められなかったが、両者を組み合わせることで、より強い垂直LVを生成させられる可能性も大いに考えられる。今後、複数の錯

視の組み合わせがベクシオン強度に与える影響について模索・検討していく。また今回は垂直 LV のみの検証だったが、文献 [13] に倣い、錯覚が水平 LV に与える影響についても分析していきたい。

## 参考文献

- [1] 小西晃広, 橋口哲志, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: リニアベクシオン現象を高める広視野空間での周辺視刺激の活用とその効果, 電子情報通信学会論文誌, Vol.1, No.2, pp.162-170, 2016.
- [2] Cui Z, Yagyu, H., Sakamoto, S., Iwaya, Y., Suzuki, Y: RJ-004 the effect of rotationally moving sound on the circular vection, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.12, No.3, pp.33-38, 2013.
- [3] 奥川夏輝, 古賀宥摩, 石津航大, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間における視覚刺激によって発生する落下感覚の分析, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.22, pp.2A2-6, 2017.
- [4] 久米祐一郎, 長谷川大: 鉛直方向加速度と視覚情報の移動感覚へ与える影響, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.5, pp.727-730 (2004).
- [5] 北岡明佳: 錯視の認知心理学, 認知心理学研究, Vol.5, No.2, pp.177 - 185 (2008).
- [6] 小西晃広, 橋口哲志, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: リニアベクシオン現象を高める広視野空間での周辺視刺激の活用とその効果, 電子情報通信学会論文誌, Vol.1, J100-D, No.2, pp.162-170, 2017.
- [7] 北岡明佳: 立体感のある幾何学的錯視の作品集 6 (オンライン), 入手先 (<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/aki-taoka/cushion6.html>) (参照 2019-11-15).
- [8] Shapiro, A., Lu, Z.-L., Huang, C.-B., Knight, E., Ennis, R: Transitions between Central and Peripheral Vision Create Spatial/Temporal Distortions: A Hypothesis Concerning the Perceived Break of the Curveball, PLOS ONE, Vol.5, No.10, pp.e13296, 2010.
- [9] 望月要, 大西仁, 杉本裕二, 永岡慶三: 重心動揺を指標としたサラウンドディスプレイの視覚的効果の測定, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.25.44, pp.15-21 (2001).
- [10] 青山一真, 安藤英由樹, 櫻井悟, 宮本靖久, 古川正紘, 前田太郎: 頭頂方向前庭電気刺激が及ぼす加速度感覚知覚と身体反射応答への影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.219-228, 2015.
- [11] 宗像朝歌, 曾根順治, 久米祐一郎, 畑田豊彦, 徳山喜彦, 鳥谷浩志, 今野晃市: ドームディスプレイと 3 次元コンテンツによる人間の体感への影響, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.27, No.22, pp.17-20 (2003).
- [12] Ogawa, M., Seno, T: Vection is modulated by the semantic meaning of stimuli and experimental instructions, Perception, Vol.43, pp.605-615, 2014.
- [13] 森将輝, 妹尾武治: 身体姿勢の違いがベクシオンに及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.3, pp.391-394, 2017.