

垂直方向の加速度の知覚強度を増幅する錯視技法

齋藤 文人^{1,a)} 中西 泰人^{2,b)}

受付日 2021年3月10日, 採録日 2021年11月2日

概要: VR アトラクションの普及とともに、臨場感を高めるベクション生成の技術が注目されている。今後普及が見込まれる MR アトラクションでは現実世界の様子も見えるため、ベクションを生成する視覚刺激の座標のすべてを動かすことができないという問題がある。そこで2次元の視覚刺激で3次元の立体感を感じさせることのできる錯視に着目し、錯視を床面に配置することでMR空間に配置されたバーチャルオブジェクトへの視線を妨げることなくベクションの生成ができるという仮説をもとに、まずはVR空間におけるベクションと錯視の関係について調査した。本稿では、錯視の種類、垂直方向の加速度の提示中における錯視の配置、視線の水平方向角度、提示位置として床面と天井面での比較についての実験を行い、床面に錯視を提示する手法の有効性を検証した。結果、垂直方向の加速度を提示中に視覚刺激としてテクスチャ勾配の錯視を床面に提示し、錯視に直接意識が向かない位置に視線を向けた状態で観察することで垂直方向のベクションの強度を増幅できることが明らかとなった。

キーワード: ベクション, 錯視, VR, MR, モーションライド

Amplification of Vertical Acceleration Using Optical Illusion

MONDO SAITO^{1,a)} YASUTO NAKANISHI^{2,b)}

Received: March 10, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: With the spread of VR attractions, the technology of vection generation to enhance the sense of realism has been attracting attention. In MR attractions, which are expected to become popular in the future, there is a problem that not all of the coordinates of the visual stimuli used to generate vection can be moved because the real world is also visible. Based on the hypothesis that vection can be generated without interfering with the gaze to the virtual objects in the MR space by placing the illusion on the floor, we first investigated the relationship between vection and illusion in the VR space. In this paper, we investigate the relationship between vection and illusion in VR space. In this paper, we examined the types of illusions, the placement of illusions during the presentation of vertical acceleration, the horizontal angle of gaze, and the comparison of the presentation position between the floor and the ceiling to verify the effectiveness of the method of presenting illusions on the floor. As a result, it was found that the intensity of the vertical vection could be amplified by presenting the illusion of the texture gradient on the floor as a visual stimulus during the presentation of vertical acceleration and observing it with the gaze turned to a position where the observer is not directly conscious of the illusion.

Keywords: vection, illusion, virtual reality, mixed reality, motion ride

1. はじめに

近年、人工現実感 (Virtual Reality; VR) 技術を利用した

モーションライド施設の増加とともに、コンテンツの没入感向上を目的とした、視覚誘導性自己運動感覚 (Vection: 以下ベクション) の研究が注目を集めている。ベクションとは、広範な視野領域に対して提示された一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。たとえば、止まっている車の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

¹ 慶應義塾大学大学院政策メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University,
Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

² 慶應義塾大学環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio Uni-
versity, Fujisawa, Kanagawa 252-0882, Japan

a) saito_mondo@keio.jp

b) naka@keio.jp

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。

VR モーションライドにおいて垂直方向の直線ベクション (Linear Vection; LV) の強度を増幅させる技術は、上昇および落下する感覚などの非日常的な体験を設計するうえで必要不可欠であり、水平方向の LV の強度を増幅させる技術と同様に開発が求められている [1]。

体感加速度を増幅を目的として、ユーザに垂直方向の視覚刺激を与え、垂直方向の体感加速度を提示するものがある [2]。しかし、視覚刺激に合わせて人の質量を垂直方向に一定時間の間、等加速度運動を行うためには大きなエネルギーが必要であるという問題、等加速度運動の時間が長くなるほど移動距離も加速度的に必要なになるという問題がある。座席を車両型の移動装置に載せて前進と後進を繰り返すことで疑似的に垂直方向の加速度を表現するものがあるが [3]、これが提示している加速度は水平直線方向であり、視覚刺激の加速度方向である垂直方向と異なっている。これは視覚系が前庭系よりも支配的であるという人の加速度知覚特性を利用した事例である [4]。

その一方で VR 空間では背景も含めてすべ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、これから普及が見込まれる複合現実感 (Mixed Reality; MR) の技術を用いたモーションライドでは周囲の現実世界の風景に合わせてバーチャルオブジェクトを配置するため、視覚刺激の座標のすべてを動かすことが困難であり、上記のような人の加速度知覚特性を利用することが難しい。そこで本稿では、MR 空間において垂直 LV の生成を目的として、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]。錯視は 2次元で立体感を表現できる種類もあり、錯視を床面に配置することで MR 空間に配置されたバーチャルオブジェクトへの視線を妨げることなく垂直 LV の生成ができるという仮説をもとに、その前段階の調査として、VR 空間内で錯視の提示方法がベクションの生成に及ぼす影響について、実験 1: 錯視の種類、実験 2: 垂直方向加速度、実験 3: 視線方向、実験 4: 錯視の配置位置、それぞれについて調査を行った。実験 2~4 は実験 1 の結果から選定された 1 種類の錯視を用いた。

2. 実験環境

2.1 頭部装着型ディスプレイ

ベクションの知覚強度と周辺視野の関係については視覚刺激の提示面が広いほど強い LV が発生することが報告されている [6]。そこで実験に用いる HMD として、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 Oculus 社の Rift S を採用した。これは水平・垂直ともに 110° の視覚刺激の提示が可能であり、リフレッシュレートは 80 Hz である。

2.2 垂直方向加速度提示装置

実験 2~4 では垂直方向の加速度を提示するため、市販の乗馬型健康器具の垂直方向移動機構を利用した (図 1 左)。本研究の実験では実験参加者に垂直方向の加速度を提示することが求められるため、上下動作を備えている Panasonic 社のジョーバ EU-JA50 を採用した。本機は上下方向に 200 mm の移動距離を保有している。垂直方向移動機構に使用されていた DC モータは人が加速度を感じる閾値までスピードを上げることができなかつたため、オリエンタルモータ社のブラシレスモータ (BXM6200-A) に変更した。モータの回転数は外部直流電圧によって制御した。座面が静止状態から下降、上昇を経て同じ位置に静止するまでの 1 周期の加速度を、モータの回転数からシミュレーションした一例を図 2 に示す。座面が上昇するときの提示加速度を正、下降するときを負と定義している。

モータの誤作動による暴走を防ぐため、リミットスイッチを使ったモータの動作範囲制限を行った。実験参加者が危険を感じたり不快感を覚えたりした場合、実験参加者自身の意思で動作の停止を行えるようにモータドライバの主電源を切る非常停止ボタンを設置した。VR 空間内には非常停止ボタンの 3D モデルを用意し、現実世界の非常停止ボタンと一致する位置で表示した。実験参加者には緊急時に円滑に非常停止ボタンを押せるよう、実験前に十分に練習させた。

VR 空間には自動二輪車の立体モデルを用意し、現実世界の垂直方向加速度提示装置に設置された手すりシートとの位置が一致する位置で表示した (図 1 右)。先行研究で



図 1 垂直方向加速度提示装置と VR 空間内の自動二輪車
Fig. 1 Vertical acceleration presenter and motorcycle in VR space.

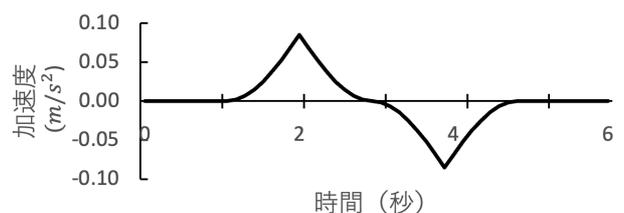


図 2 垂直方向加速度提示装置が下降・上昇する際の加速度
Fig. 2 Acceleration of the vertical acceleration presenter as it descends and ascends.

は、VR 空間で車両を使って移動する視覚刺激を提示する場合、現実世界で疑似的な車輪の振動を与えることで VR 酔いが減少し、没入感が増したことが報告されている [7]。本実験でも VR 空間における自動二輪車に乗っている感覚の向上および VR 酔いの防止を目的に、手すりと座椅子の下に振動モータを配置し、振動を与えた。

モータの動作音が垂直 LV の強度に及ぼす影響を少なくするため、実験参加者に装着した HMD 内蔵のスピーカから自動二輪車のアイドリング音を再生した。モータなどの機械動作にともなう音を打ち消すためにホワイトノイズを再生するのが従来の方法であるが、近年の研究 [8] から刺激の意味づけによってベクシオンの強度に変化を与える可能性が示唆されたため、視覚情報と聴覚情報の間で違和感を生じさせない意味づけを狙って選定した。自動二輪車のアイドリング音はモータの動作音の周波数域に近いものを選定した。

2.3 視覚刺激

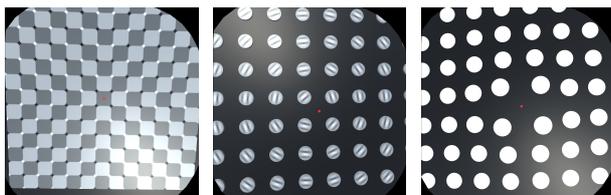
本稿では垂直 LV を誘発する錯覚として 3 種類の錯視を用意した。図 3 は実験参加者が VR 用 HMD を通して提示された 3 種類の錯視のキャプチャ画像である。

(1) Y 接合部の錯視

北岡が作成した Y 接合部の錯視による膨らみの錯視 [9] にならない、動的な錯視を生成した。これを Y 接合部の錯視と呼ぶ。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) ドリフトガボールの錯視

Shapiro らが作成したカーブボール錯視 [10] にならない、動的な錯視を生成した。ドリフトガボールの錯視は、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（以下ガボールパッチと呼ぶ）、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



(a) Y 接合部の錯視 (b) ドリフトガボールの錯視 (c) テクスチャ勾配の錯視

図 3 実験に使用した 3 種類の視覚刺激

Fig. 3 Three types of visual stimuli used in Experiments.

に錯覚させることができる。ガボールパッチを二次元上に等間隔に配置し、実験参加者の真下とガボールパッチの中心点を通る直線に対して白黒の縞模様が直行するように回転配置し、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。実験参加者とガボールパッチ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、ガボールパッチが実験参加者に近ければ近いほど速くスライドさせた。ガボールパッチの直径は、VR 空間上で実験参加者の真下に来るガボールパッチが視野角に換算して 11 度になるように生成し、隣り合うガボールパッチの中心を結ぶ直線の距離がガボールパッチの直径の 2 倍になるように配置した。ガボールパッチ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) テクスチャ勾配の錯視

ドリフトガボールの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、実験参加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。実験参加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、白点が実験参加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。白点の直径はドリフトガボールの錯視と同様に、VR 空間上で実験参加者の真下にく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。

3. 実験

3.1 実験参加者

実験参加者は実験 1~4 で共通して正常視力（矯正含む）を有する成人 10 名（男性：7 名、女性：3 名）、平均年齢 27.6（±10.3）歳である。

3.2 実験 1：錯視の種類に関して

3.2.1 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、強いベクシオンを生成できる視覚刺激の選定が必要になる。実験環境の視覚刺激（2.3 節）で述べた 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。

3.2.2 実験条件

実験 1 に用いる視覚刺激は図 3 に示した Y 接合部の錯視、ドリフトガボールの錯視、テクスチャ勾配の錯視の 3 種類とした。

実験参加者には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（図4左）をとらせた。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（図4右）から目を離さないように指示した。視覚刺激上の赤い円は被験者の視野範囲を示している。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実験参加者に指示した。

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。実験の要因は視覚刺激の種類となり、実験参加者はグループに分けず6試行を通して実験を行ったため、被験者内の比較となる。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。

3.2.3 実験手順

実験手順は先行研究[6]にならい、サーストンの一対比較法に基づいて行った。実験参加者には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、実験参加者が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。試行回数は実験参加者1名あたり、3つの視覚刺激の総当たりとなる ${}_3C_2 = 3$ 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つ目の視覚刺激を実験参加者に提示する。
- (3) 2つ目の視覚刺激を実験参加者に提示する。
- (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) 残りの組合せについて(2)~(6)を繰り返す。
- (7) コメントを聴取する。

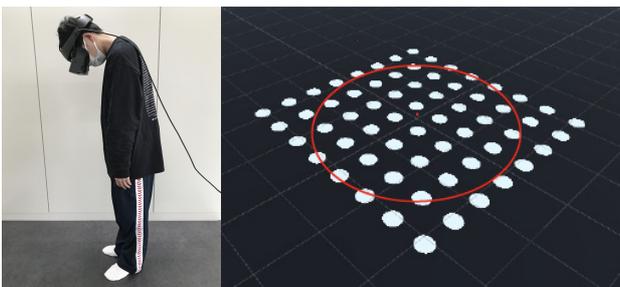


図4 実験1で実験参加者に指示した姿勢とVR空間内の視覚刺激
 Fig. 4 The posture that we instructed to participants in Experiment 1 and visual stimulus in VR space.

3.2.4 実験結果と考察

3種類の視覚刺激を総当たりした結果、以下2点の知見が得られた。

- (1) ドリフトガボールの錯視とテクスチャ勾配の錯視で生成された垂直LVの強度の差は確認されなかった。
- (2) Y接合部の錯視は残り2つの錯視に対してすべての試行の結果で弱い垂直LVの強度を示した。

以上2点より、3つの錯視で生成された垂直LVの強度を一对比較法の数直線上で表現することができなかった。

Y接合部の錯視は他の2つの錯視と比較して、錯視の全体を観察しないと立体感を感じにくいという仮説が考えられる。今回提案する錯視の提示位置は床面であり、実験参加者の足元に最も立体感を感じる中心の位置を合わせる必要がある。視線の水平方向角度が水平方向を向いている場合に錯視の一部しか見ることができないため、床面に配置する錯視として適さないと考えられる。また、錯視の最も立体感を感じる中心の位置を足元から移動させることによってベクションにどのような変化があるのかを調査する必要性もあると考えられる。

ドリフトガボールの錯視とテクスチャ勾配の錯視の間にベクションの強度の差は確認されなかった。この理由として、2つの錯視を床面に配置したときの落下および上昇の感覚が異なったことからベクションの強度の比較が難しかったことが推測される。実験参加者からのコメントとして、テクスチャ勾配の錯視は足元の床面を中心として蟻地獄のようなすり鉢状のような形に床が変形しているように知覚したのに対し、ドリフトガボールの錯視は床面全体が上下するように知覚した、との意見が複数確認されている。ここからMRモーションライドの場面ごとの提示したい落下感覚に応じて錯視の種類も変化させる必要性が考察される。

また、ドリフトガボールの錯視は間接視野で観察するほうが立体感の強度が高く認知されるという性質がある。錯視を床面に配置して垂直LVの増幅を狙う場合、同様の性質がある錯視を選ぶとより高い効果が期待できる。

実験1では実験参加者1名あたり、3つの視覚刺激の総当たりとなる ${}_3C_2 = 3$ 試行の比較であった。この試行数では検定力は不足しており、テクスチャ勾配の錯視とドリフトガボールの錯視のパラメータを変えたうえでより詳細な一対比較を行うべきであるが、実験2~4では3種類の錯視のなかで比較的強い垂直LVの生成の可能性を示した錯視の1つであるテクスチャ勾配の錯視を用いることにした。

3.3 実験2：垂直方向加速度に関して

3.3.1 実験目的

錯視が垂直加速度の知覚強度に与える影響を計測する実験を行うためには、実際に垂直方向の加速度を提示し、床面に配置する動的な錯視の有無による加速度の知覚強度の変化を計測する必要がある。仮説「垂直方向の加速度を提

示中に床面に動的な錯視を配置することによって、垂直方向の加速度の知覚強度を増幅することができる」を検証することを目的とし、以下に述べる実験2を行う。

3.3.2 実験条件

実験参加者には肘を伸ばした状態で垂直方向加速度提示装置に設置した手すりを握ってもらい、前傾姿勢をとるように指示した。人が安定した頭部運動によって対象情報を弁別視野内（視力などの視機能が優れている範囲）で無理なく注視できる範囲は平均して水平90°、垂直70°（下40°+上30°）であり、安定注視野と呼ばれている [11]。無理なく見上げた視線の方向が水平方向になるように、実験参加者の背中が垂直から30°傾いた状態になる位置に座るように指示した（図5）。また、Hayashizakiら [12] は足裏への振動刺激がベクシオンの強度に影響を与える可能性を示しているため、足裏からの皮膚感覚を統一するために脱靴させて靴下を履いた状態で蹬に足をかけさせた。

実験参加者が自分は動く可能性のあるものの上に乗っていると認識している場合は、動かないと思っているものに乗っていると認識している場合よりもベクシオンの潜時が短くなることが報告されている [13]。そのため、事前に実験参加者全員に垂直方向加速度提示装置が安全な速度で上下方向に動くことを伝え、実験参加者間の自己運動の可能性の認識の差を減らした。

VR空間に設置した直径20cmの赤い球体を固定指標として視線の水平方向角度を指定した（図5右）。実験参加者から赤い球体までの距離は5m、視線の水平方向角度は地面と水平に設定した。視線の中心に固定指標よりもひと回り大きい赤い丸を表示し、加速度および視覚刺激提示中は赤い丸の中に固定指標がくるように頭部の向きを調節するように指示することで、実験参加者間の視線の水平方向角度の差を減らした。

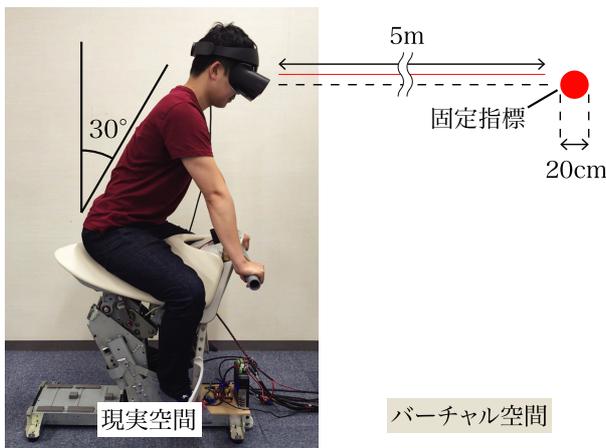


図5 垂直方向加速度提示装置上で前傾姿勢をとる実験参加者とVR空間内の固定指標

Fig. 5 Participant with forward-bent posture on the vertical acceleration presenter and red fixation point in VR space.

提示する視覚刺激として、実験1の結果からテクスチャ勾配の錯視を選定した。図6はテクスチャ勾配の錯視の立体強度が最大になる時点を上方向から見た図である。床面の中心点の上には全長2.1mの自動二輪車の立体モデルが設置されている。

実験1では白点が1往復する周期は12秒間に設定し繰り返し提示を行わなかったが、実験2~4では白点が1往復する周期は約4秒に設定し、往復運動を30秒間繰り返し提示した。この周期は垂直方向加速度提示装置の動きと同期しており、錯視を表示しない試行（基準刺激）でも同じ周期の往復運動を与えて垂直方向の加速度提示を行った。

錯視を配置する床面の広さは室内で可動するMRモーションライドへの応用を想定し、正方形（34m四方）に設定した。これはバスケットコートが2面ある標準的な体育館の広さを模している。その奥には空間のスケールが分かりやすいよう、人型のバーチャルオブジェクトを配置した。図7は、VR空間に配置した錯視の中心上に自動二輪車のバーチャルオブジェクトを配置した状態の俯瞰図である。実験4では天井面にも錯視を提示する必要があるため、壁面と天井面を加えた室内空間を作成した。天井面の高さを実験参加者の眼の位置から床面までの高さの倍に設定することで、視野角内に占める床面と天井面の面積が等しくな

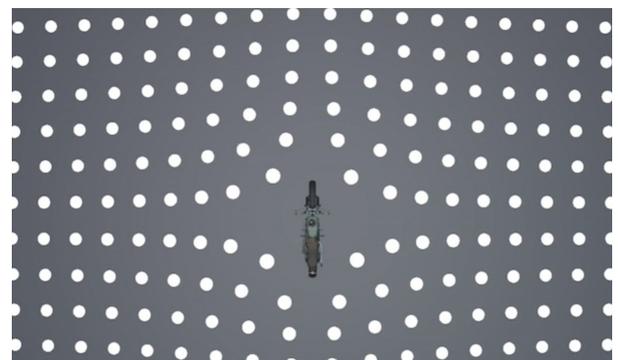


図6 テクスチャ勾配の錯視の立体強度が最大になる時点を上から見た図

Fig. 6 Top view of point where stereoscopic intensity of the texture gradient illusion reaches its maximum.

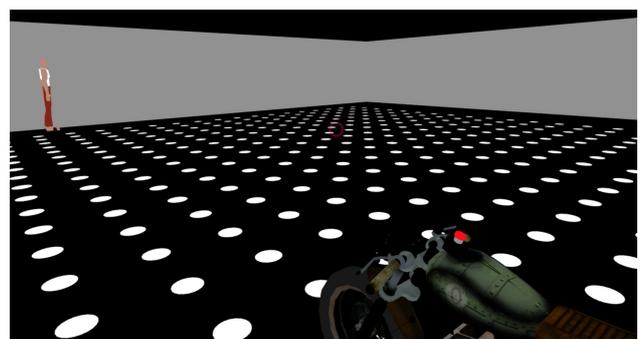


図7 実験2~4で使用したVR空間

Fig. 7 VR space used in Experiments 2-4.

るようにし、壁面の色は黒と白の中間色を用いた (図 7)。

実験 2 の要因は錯視の提示の有無となり、実験参加者は錯視の提示の有無の順序でグループに分けず実験を行ったため、被験者内の比較となる。

3.3.3 実験手順

具体的な実験手順は以下のとおりである。

- (1) 錯視の配置の有無の順序をランダムに設定する。
- (2) 実験参加者に加速度を提示する。錯視の配置の有無は事前に設定した順序に従う。
- (3) 体感加速度を忘れさせないため、10 秒ほどの短いインターバルを設ける。
- (4) 実験参加者に加速度を提示する。錯視の配置の有無は事前に設定した順序に従う。
- (5) 錯視を配置しない場合の体感加速度の強度を基準とし、錯視を配置した場合の体感加速度の強度を倍数値で回答させる。

3.3.4 実験結果と考察

床面に配置する錯視の有無を独立変数として垂直方向の加速度の体感強度を比較した実験結果を図 8 に示す。縦軸は錯視なしの状態を基準刺激とした垂直方向の加速度の知覚強度を表し、エラーバーは標準偏差を表す。Jarque-Bera 検定を用いて標本分布の正規性を検定した結果、統計量が有意水準 5% で正規分布と見なせることが確認された。t 検定より、錯視の提示の有無の条件間に有意差が認められた ($p < .01$)。実験 2 の回答の倍数値はすべて 1 倍以上であったため、対数をとった検定は行わない。

錯視なしに比べて錯視を提示した場合に垂直方向の加速度の知覚強度が約 3 倍に増幅された。人数を絞って行った事前の予備実験から「実際よりも 4~5 倍の移動量を感じる」とのコメントを得ていたため、この倍率は想定していた値よりも小さいものとなった。

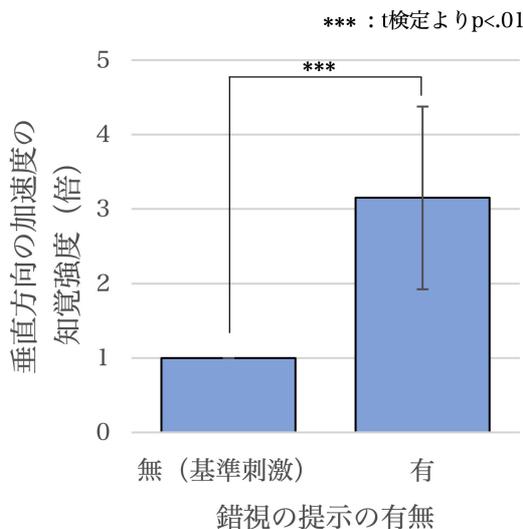


図 8 錯視なしを基準とした錯視ありの垂直方向の加速度の知覚強度

Fig. 8 Perceived intensity of vertical acceleration of the illusion based on the illusion without.

理由として、乗馬型健康器具の垂直移動機構を利用して製作した垂直方向加速度提示装置の機能的制約が関係していると考えられる。垂直移動機構は台形ねじとウォームギアボックスが組み合わさったものを定格出力 200 W のブラシレスモータで駆動する仕組みであり、最大 100 kg の荷重を上下方向に移動させるために減速比が大きく設定されているため、高速動作に向かない機構となっている。そのため、提示できる垂直加速度の最大値が約 0.1 m/s^2 であるのに対して、人間の垂直方向の加速度を弁別できる閾値が同程度であることから、目をつぶった状態だと移動方向が分からないと回答した実験参加者もいた。垂直移動機構として乗馬型健康器具を用いる場合は、ギアボックスの減速比を小さくするか、より高回転域まで出力できるモータを使用することで実験参加者がしっかりと認知できるほどの加速度を生成できるようになると考えられる。

3.4 実験 3：視線の水平方向角度について

3.4.1 実験目的

実験 1 および 2 では視線の水平方向角度を固定して実験を行った。実験 3 では視線の水平方向角度を変化させることで錯視を使って生成した垂直 LV の強度がどのように変化するかを調査することを目的とし、以下に述べる実験を行う。

3.4.2 実験条件

独立変数である視線の水平方向角度は、前傾姿勢をとっている実験参加者が背筋と垂直になる視線の角度 (水平から下向きに 30°)、背筋と垂直になる視線の角度を基準とした安定注視野の上下 2 方向 (水平方向から下向きに 0° 、 70°) および水平方向から上向きに 30° の計 4 種類とした。図 9 は 4 種類の視線の水平方向角度を横方向から図示したものである。なお、実験参加者の目元から固定指標までの距離は、下向きに 70° のときに確保できる最も長い距離 (視線と床面の交点までの距離) に統一して提示した。今回の場合、実験参加者の目元から固定指標までの距離は約 1.4 m であった。実験参加者、提示した VR 空間ならびに視覚刺激の提示位置は実験 2 と同じであり、視覚刺激も実

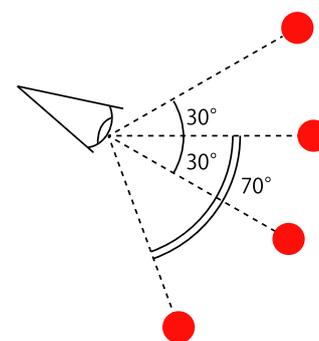


図 9 4 種類の視線の水平方向角度

Fig. 9 Horizontal angle of four types of gaze.

験2と同じテクスチャ勾配の錯視を用いた。実験3の要因は錯視を観察する4種類の視線の水平方向角度となり、実験参加者は視線の水平方向角度によってグループに分けず実験を行ったため、被験者内の比較となる。

3.4.3 実験手順

実験3では複数の対象を比較させるため、計測方法はサーストンの一対比較法を採用した。視線の水平方向角度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乱数で順序を決定した。試行回数は実験参加者1名あたり、4種類の水平方向角度の総当たりとなる ${}_4C_2 = 6$ 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4種類の水平方向角度の総当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種類目の水平方向角度を向かせた状態で垂直方向の加速度と錯視を提示する。
- (3) 2種類目の水平方向角度を向かせた状態で(2)と同じ垂直方向の加速度と錯視を提示する。
- (4) 1種類目と2種類目の水平方向角度を比較させ、どちらがより強い垂直LVを感じたかを回答させる。
- (5) 残りの組合せについて(2)~(6)を繰り返す。
- (6) コメントを聴取する。

3.4.4 実験結果と考察

実験結果を図10に示す。横軸は垂直方向の加速度の知覚強度の心理尺度を表している。視線の水平方向角度は下向きを正の方向とした。上向き30°は-30°と表記する。

下向きに30°と70°下げた2種類の視線の水平方向角度で比較的強い垂直LVが知覚されるという結果となった。下向き70°のほうが下向き30°よりも視野内を占める錯視の割合が大きいかかわらず、2種類の間で生成された垂直LVの強度の差が小さかった原因として視覚刺激の認知特性が関係していると考えられる。

ベクションと視覚刺激の認知特性について調査した研究として、視覚刺激に意識を向けない場合のほうがベクションが発生しやすくなる可能性を示した研究がある[14]。視線の水平方向角度を下向きに70°下げた状態だと、視線の固定指標の後ろに錯視が位置するため錯視自体に意識が向き、ベクションの強度が低下した可能性がある。本稿の視線の水平方向角度とベクションの関係性を調べる実験で視覚刺激として使用したのはテクスチャ勾配の錯視であったが、ドリフトガボールの錯視を使用する場合、カーブボー

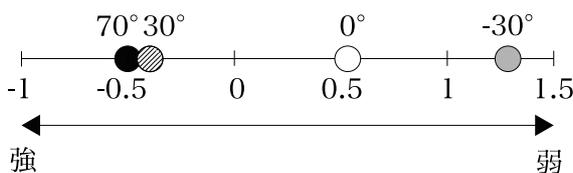


図10 垂直方向の加速度の知覚強度の心理尺度

Fig. 10 Psychological scale of perceived intensity of vertical acceleration.

ル錯視自体が周辺視野で観察したときに最も効果を発揮する特性を持っているため、下向き70°から少し見上げた状態である下向き30°の状態でもベクションの強度が維持されると考えられる。本稿では試していない他の立体感を感じさせる性質を持った錯視を使用する場合は、周辺視野で観察したときに最も効果を発揮する錯視を選ぶべきだと考えられる。

また視線の水平方向角度が水平方向、上向き30°と上がるにつれてベクションの強度が弱まっていく原因として、視線の水平方向角度を上げると間接視野を視覚刺激が占める面積が減っていくことがあげられる。VRおよびMRモーションライドで視覚刺激を床面に配置して垂直LVを生成したい場合は、ユーザの視線の水平方向角度を下向きに誘導することが必要になると考えられる。

実験3では実験参加者1名あたり、4種類の視線の水平方向角度の総当たりとなる ${}_4C_2 = 6$ 試行であった。この試行回数では検定力は不足しているため、得られた結果は定量的なものではなく定性的なものである。

3.5 実験4：錯視の配置位置について

3.5.1 実験目的

錯視の配置位置が垂直方向の体感速度に与える影響を計測する実験を行うには、等しい視野角で異なる位置に錯視を配置し、位置の差異による加速度の知覚強度の変化を計測する必要がある。仮説「垂直方向の加速度の知覚強度を増幅するために錯視を配置する場所は床面が有効である」を検証することを目的とし、以下に述べる実験4を行う。

3.5.2 実験条件

床面と等しい視野角で異なる位置に錯視を配置する場合、一般的な室内空間では天井面と壁面が配置場所として考えられる。床面および天井面と比べて壁面は面積が狭く、生成されるベクションの強度を床面および天井面と比較するのが困難なため、本稿では床面と天井面の2種類での比較実験を行う。

実験参加者の目線から床面と天井面までの高さを等しくするため、目線から床面までの高さを2倍した高さに天井高を設定し、2.7mとした。日本の一般的な住宅の天井高は2.4mでありそれよりも少し高い設定となった。実験参加者が垂直方向加速度提示装置上で前傾姿勢をとった状態で前を見たときに表示されるHMDの左眼視野を図11に示す。図11では床面と天井面の2面に錯視を配置しているが、実験では1面ずつ配置を行った。実験参加者、提示したVR空間ならびに視覚刺激の提示位置は実験2および3と同じであり、視覚刺激も実験2および3と同じテクスチャ勾配の錯視を用いた。

固定指標は実験2と同様のものを用い、視線の角度は水平方向で固定させた。また、錯視の周期に垂直方向加速度提示装置を同期させて加速度を提示した。垂直方向の加速

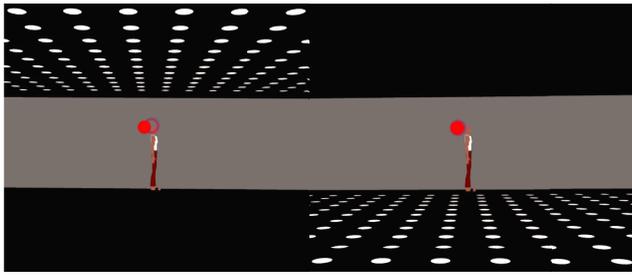


図 11 VR 空間内で床と天井面に表示される視覚刺激を観察した状態

Fig. 11 Visual stimuli displayed on the floor and the ceiling in VR space.

度の知覚強度の評価には実験 2 と同様に実験参加者主観応答を計測するマグニチュード推定法を用いて行った。具体的には、錯視を床面に配置して垂直方向の加速度を提示した場合を基準刺激とし、基準時に感じた加速度の知覚強度を 1 とする。そして錯視を天井面に配置した場合に感じた加速度の強度を基準刺激と比較して倍数值で回答させた。錯視の配置場所の順序に関してカウンターバランスをとるために疑似乱数で順序を決定した。実験 4 の要因は 2 種類の錯視の配置位置となり、実験参加者は提示される錯視の配置位置でグループに分けず実験を行ったため、被験者内の比較となる。

3.5.3 実験手順

具体的な実験手順は以下のとおりである。

- (1) 錯視の配置場所の順序をランダムに設定する。
- (2) 実験参加者に加速度を提示する。錯視の配置の場所は事前に設定した順序に従う。
- (3) 体感加速度を忘れさせないため、10 秒ほどの短いインターバルを設ける。
- (4) 実験参加者に加速度を提示する。錯視の配置の場所は事前に設定した順序に従う。
- (5) 錯視を床に配置した場合の体感加速度の強度を基準とし、錯視を天井面に配置した場合の体感加速度の強度を倍数值で回答させる。
- (6) コメントを聴取する。

3.5.4 実験結果と考察

錯視を配置する位置を独立変数として垂直方向の加速度の体感強度を比較した実験結果を図 12 に示す。縦軸は錯視が床面に配置された状態を基準刺激とした垂直方向の加速度の知覚強度を表し、エラーバーは標準偏差を表す。Jarque-Bera 検定を用いて標本分布の正規性を検定した結果、統計量が有意水準 5% で正規分布と見なせることが確認された。t 検定より、錯視を提示する位置の条件間に有意差が認められた ($p < .05$)。また回答の倍数值の対数をとった場合も、t 検定より錯視を提示する位置の条件間に有意差が認められた ($p < .15$)。

錯視を床面に配置した場合と比べて天井面に配置した場

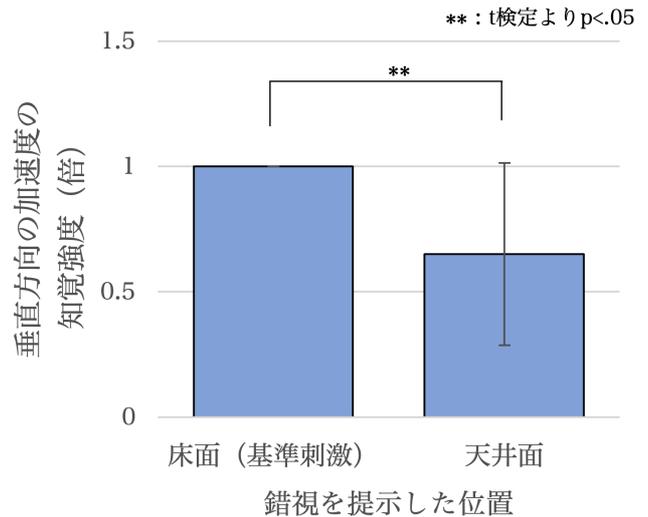


図 12 床面の錯視配置を基準とした天井面の垂直方向の加速度の知覚強度

Fig. 12 Perceived intensity of vertical acceleration of the ceiling based on arrangement of illusion on the floor.

合は約 0.7 倍の強度で垂直方向の加速度を知覚することが示された。これは室内空間において MR 上で錯視を提示してバクシオンを生成するとき、錯視を床面に配置することが天井面よりもバクシオンの強度が高まる傾向を示している。実験参加者の中には、床面よりも天井面に錯視が配置されているほうが強い垂直 LV を感じた人と答えた人もいた。

この結果は脳内の空間情報処理が関係していると考えられる。人間は地球上で長い時間をかけて重力に縛られながら進化をしてきたため、自己位置および加速度の推定に動かない地表面を重要な要素として利用している可能性がある。これは錯視を床に配置した場合に天井面に配置するよりも強いバクシオンが生成された結果を支持する。

4. おわりに

本稿では、垂直方向の加速度の提示中に錯視を VR 空間の床面に配置することが垂直方向の加速度の知覚強度に及ぼす影響に関して検討を行った。

実験 1 では、強い垂直 LV を生成できる視覚刺激の選定を目的として、3 種類の錯視から比較的強い垂直 LV を生成できる錯視の選定を行った。ドリフトガボールの錯視とテクスチャ勾配の錯視の 2 種類が比較的強い垂直 LV を生成する結果となった。実験参加者のコメントから錯視の種類によって上下移動の感覚が異なることも示唆された。

実験 2 では、床面に配置する錯視の有無によって、垂直方向の加速度の知覚強度を増幅できるか検証を行った。錯視なしに比べて錯視を配置した場合に垂直方向の加速度の知覚強度が約 3 倍に増幅されたことが示された。

実験 3 では、視線の水平方向角度と垂直方向の加速度の知覚強度の関係について検討を行った。視線の水平方向角度が水平から下向き 30° および 70° のときに最も垂直方向

の加速度の知覚強度が高まる傾向が示された。

実験4では、錯視を配置する位置の変化が、垂直方向の加速度の知覚強度に影響を与えるか検証を行った。錯視を床面に配置した場合と比べて天井面に配置した場合は約0.7倍の強度で垂直方向の加速度を知覚することが示された。

本稿は実験1で比較的強い垂直LVを生成する視覚刺激を選定し、実験2~4で提示をした。実験1と実験2~4では実験参加者の姿勢、加速度提示の有無、錯視を提示した仮想空間に違いがあるため、実験1で得られた結果が実験2~4でも同様に再現されるとは限らない。実験1での知見として、錯視の種類によって生成される上下方向の移動感覚が異なることが分かった。実験2~4を異なる錯視で比較検証することは今後の課題である。

また本稿はMR空間における垂直LVの生成を目的として、その基礎的検討としてVR空間での実験を行った。MR用HMDにはビデオシースルー型と光学シースルー型の2種類がある。ビデオシースルー型のMR用HMDはVR用HMDと同様の視野角・輝度・解像度を持つため本研究の知見が準用できると考えられるが、光学シースルー型のMR用HMDでは視野角・輝度・解像度が異なることにより本研究で得られた知見が適用できるとは限らない。しかしながら、床面に錯視を配置することで垂直方向の加速度の知覚強度を増幅させられるということは、視線の水平方向にバーチャルオブジェクトが配置される場合が多く想定されるMRモーションライドとの親和性が高いことが考えられる。また、小さい加速度の提示でも錯視を利用することで大きな加速度を知覚させられるということは、安全でかつ没入感の高いMRモーションライドの要素技術に活用できる可能性を示している。

また本稿では垂直方向の加速度に限って検討を行ったが、水平方向の加速度の体感強度の増幅への応用を模索・検討していく。垂直および水平方向の加速度の体感強度を高める錯視技法について得られた知見をもとに車輪型ロボットと組み合わせたMRモーションライドへと拡張する予定である。

謝辞 本研究の一部はJST CREST人間と情報環境の共生インタラクション基盤技術の創出と展開における「限定合理性を超越する共生インタラクション基盤(研究課題番号JPMJCR19A4)」として行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 奥川夏輝ほか：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，第22回日本バーチャルリアリティ学会論文誌，2A2-6 (2017)。
- [2] 久米祐一郎ほか：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)。
- [3] Kodama, R. et al.: COMS-VR: Mobile virtual reality entertainment system using electric car and head-mounted display, *IEEE Symposium on 3D User Inter-*

faces, pp.130-133 (2017)。

- [4] Harris, L., Jenkin, M. and Zikovitz, D.C.: Vestibular Cues and Virtual Environments: Choosing the Magnitude of the Vestibular Cue, *Proc. IEEE Virtual Reality*, p.299 (1999)。
- [5] 北岡明佳：錯視の認知心理，認知心理学研究，Vol.5, No.2, pp.177-185 (2008)。
- [6] 小西晃広ほか：リニアベクショ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(D)，Vol.J100-D, No.2, pp.162-170 (2017)。
- [7] Hansen, J.P. et al.: Providing Access to VR Through a Wheelchair, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1-8 (2019)。
- [8] Ogawa, M. and Seno, T.: Vection is modulated by the semantic meaning of stimuli and experimental instructions, *Perception*, Vol.43, No.7, pp.605-615 (2014)。
- [9] 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/~akitaoka/cushion6.html>) (参照2021-02-16)。
- [10] Shapiro, A. et al.: 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.1-7 (2010)。
- [11] 畑田豊彦：人工現実感に要求される視空間知覚特性，人間工学，Vol.29, No.3, pp.129-134 (1993)。
- [12] Hayashizaki, T. et al.: Walking Experience by Real-Scene Optic Flow with Synchronized Vibrations on Feet, *Proc. 6th Augmented Human International Conference*, No.2, pp.182-184 (2015)。
- [13] Palmisano, S. and Chan, A.: Jitter and size effects on vection are immune to experimental instructions and demands, *Perception*, Vol.33, No.8, pp.987-1000 (2004)。
- [14] Kitazaki, M. and Sato, T.: Attentional modulation of self-motion perception, *Perception*, Vol.32, No.4, pp.475-484 (2003)。



齋藤 文人 (正会員)

2021年慶應義塾大学大学院政策メディア研究科博士前期課程修了。現在、同大学特任研究員。ユーザインタフェースに関する研究に従事。



中西 泰人 (正会員)

1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。電気通信大学大学院情報システム学研究科助手、東京農工大学工学部助教授を経て、慶應義塾大学環境情報学部助教授、2015年より教授。ヒューマンコンピュータインタラクション、エクスペリエンスデザイン、創造活動支援等の研究に従事。人工知能学会、日本建築学会、ACM各会員。