

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

**概要:** VR アトラクションの普及に伴い、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全てを動かすことができない問題がある。我々は 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 空間に配置された仮想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、ベクションと錯視の関係について検討している。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で垂直方向の加速度の知覚強度を増幅させることを目的として、実験 1 では錯視の有無による垂直 LV の強度の変化、実験 2 では錯視の配置位置による垂直 LV の強度の変化、実験 3 では視線の水平方向角度が垂直 LV の強度に与える影響を調査した。実験 1 の結果、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 2 倍に増幅されたことが示された。実験 2 の結果、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。実験 3 の結果、視線の水平方向角度が水平から下向き 30° 及び 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。

## Amplification of Vertical Acceleration using Optical Illusion

### 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共に、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) 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。例えば、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、水平方向の LV の強度を増幅させる技術と同様に没入感の向上に必要な技術である。

体感加速度の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。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り、ピッチ方向に座席を回転させる機構を用いることで、比較的少ないエネルギーで擬似的に垂直方向の加速度を表現するものや、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擬似的に垂直方向の加速度を表現するものがある [1]。これらが提示している加速度は回転方向と水平直線方向であり、いずれも視覚刺激の加速度方向である垂直方向と異なっている。これらは視覚系が前庭系よりも支配的である [2] という人の加速度知覚特性を利用した事例である。

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困難であり、上記の様な人

<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

の加速度知覚特性を利用することが難しい。そこで前稿では、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した[3]。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[4]。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空間に配置された仮想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、VR空間上で錯視の種類と被験者の姿勢の2種類の要素について垂直LVとの関係性について調査を行った。結果、錯視の種類が垂直LVの強度に影響を与えること、立位と端座位の間では垂直LVの強度に差が認められないことを示した。

そこで本稿ではこの研究成果に基づいて、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で垂直方向の加速度の知覚強度の増幅させることを目的とし、実験1) 錯視の有無による垂直LVの強度の変化の調査、実験2) 錯視の配置位置による垂直LVの強度の変化の調査、実験3) 視線の水平方向角度が垂直LVの強度に与える影響の調査を行った。

## 2. 実験環境

### 2.1 頭部装着型ディスプレイ

バ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[5]。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80Hzである。

### 2.2 垂直方向加速度提示装置

本実験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。乗馬型健康器具には前後スライド、前後チルト、左右チルト、ひねり、上下動作など、メーカーや機種によって備わっている機能が異なる。本研究の実験では被験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200mm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モーター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ったため、オリエンタルモーター社のブラシレスモーター(BXM6200-A)に変更した(図1参照)。モーター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、モーター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、提示加速度を正、

下降するときを負と定義している。

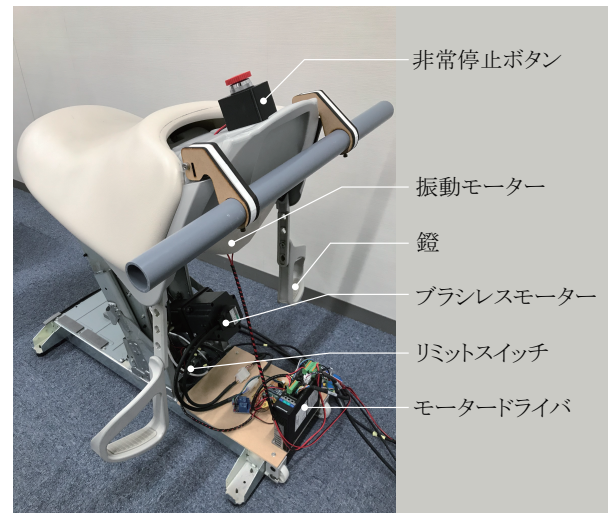


図1 垂直方向加速度提示装置

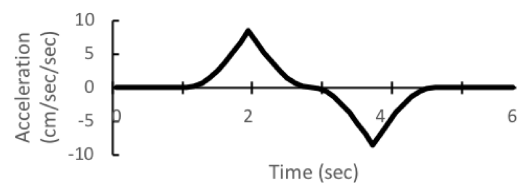


図2 垂直方向加速度提示装置が下降・上昇する際の加速度

モーター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ーの動作範囲制限を行った。被験者が危険を感じたり不快感を覚えた場合、被験者自身の意思で動作の停止を行えるようにモーター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。被験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。先行研究では、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、現実世界で擬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[6]。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及びVR酔いの防止を目的に、手すりシートの下に振動モーターを配置し、振動を与えた。

モーターの動作音が垂直LVの強度に及ぼす影響を少なくするため、被験者に装着したHMD内蔵のスピーカーから自動二輪車のアイドリング音を再生した。モーターなどの機械動作に伴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[7]から刺激の意味づけによってバクショ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。バイクのアイドリング音はモーター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

前稿 [3] では 3 種類の錯視の比較実験を行った。生成された垂直 LV の強度が比較的強かった白点を使った動的な錯視とカーブボール錯視のうち、白点を使った動的な錯視を選定した。図 3 は白点を使った動的な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。錯視が配置された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。

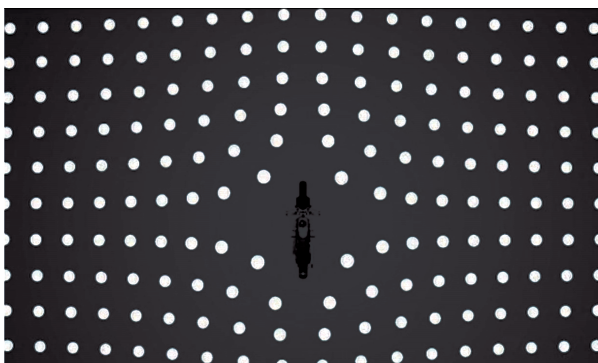


図 3 白点を使った動的な錯視

白点を使った動的な錯視とは、白点の円形オブジェクトを二次元上に正方格子状に配置し、被験者の頭部から垂直に降ろして床面と交わった座標と、白点の中心の座標を端点とする直線上を移動させる動的な錯視を指す。被験者と白点との距離を二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が大きくなる。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。白点の大きさと移動距離の変化量を調整することで、立体感の強度を変化させることができる。白点の直径は VR 空間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  $10^\circ$  になるに生成し、隣り合う白点の中心座標を結ぶ直線の距離が白点の直径の 3 倍になるように配置した。白点の背景にあたる部分は黒色を使用した。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。ベクションは視覚刺激が運動を開始してからすぐに生起するものではなく、運動開始から少なくとも 1 秒ほどの潜時において生起することが報告されている [8]。潜時は視覚刺激の種類によって変動するが、本実験で視覚刺激として使用する白点を使った動的な錯視に近いランダムドットを提示した場合、4~7 秒程度が一般的な潜時になることが示されている。本実験では加速度の知覚に必要な十分だと考えられる 30 秒を加速度提示時間とした。

室内で可動する MR モーションライドへの応用を想定し、錯視を配置する床面の広さは、バスケットコート 2 面分の短い辺に合わせた正方形 (34m 四方) に設定した。これは標準的な体育館の広さを模している。壁面の色は白と黒の中間色を用いた。図 4 は、VR 空間に配置した錯視の中心上に自動二輪車の仮想オブジェクトを配置した状態の俯瞰図である。

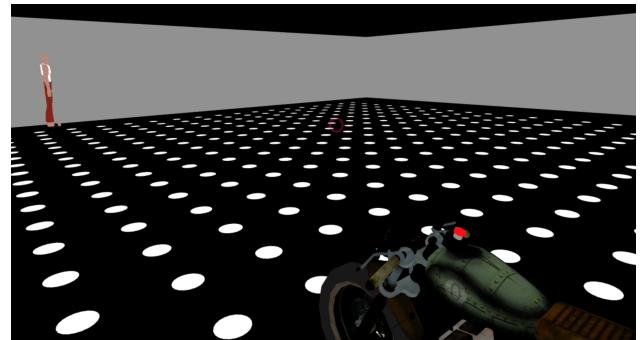


図 4 VR 空間に設置された自動二輪車と錯視の俯瞰図

## 2.4 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、シェッフェの対比較法 [9] やサーストンの対比較法 [5] 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 [10] 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 [11]、視線の動揺量を計測する方法 [12]、計測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 [13] などが用いられている。

本稿では垂直方向加速度提示装置を用いて加速度を提示するため、被験者の身体反射応答を計測する方法は信頼性が低くなる。そこで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、錯視が垂直方向の体感加速度に与える影響を調べる実験 1 及び 2 ではマグニチュード推定法を用い、視線の水平方向の角度が体感加速度に与える影響を調べる実験 3 ではサーストンの対比較法を用いる。

実験では垂直方向の加速度の知覚強度の評価に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、錯視を配置せずに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。そして錯視を配置しながら垂直方向の加速度を提示した場合に知覚し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



置の有無の順序に関してカウンターバランスをとるために擬似乱数で順序を決定した。被験者人数は矯正を含めて全員が正常視力を有し、過去に前庭系の疾患などに罹患していない成人 10 名（男性：9 名，女性：1 名）であった。

### 3. 実験 1：錯視が垂直方向の体感加速度に与える影響

#### 3.1 実験目的

動的な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 1 を行う。

#### 3.2 実験条件

被験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、前傾姿勢を取るよう指示した。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 [14]。無理なく見上げた視線の方向が水平方向になるように、被験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 参照）。また、Hayashizaki ら [15] は足裏への振動刺激がベクショ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鏡に足をかけさせた。



図 5 垂直方向加速度提示装置上で前傾姿勢をとる被験者

被験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ョンの潜時が短く

なることが報告されている [16]。そのため、事前に被験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、被験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。被験者から赤い球体までの距離は 5m，視線の水平方向角度は 0° に設定した。視線の中心に固定指標よりも一回り大きい赤い丸を表示し、加速度及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、被験者間の視線の水平方向角度の差を減らした。

#### 3.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 錯視の配置の有無の順序をランダムに設定する。
- (2) 被験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 秒程の短いインターバルを設ける。
- (4) 被験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。
- (6) 二輪車及び自動二輪車の運転経験の有無について回答させる。

#### 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 6 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ないことが確認された。そのため図中の値には四分位偏差，エラーバーには最大値と最小値を用いた。中央値は第 1 四分位数と同じ 2 倍であった。図中の値に対して統計的処理は行わない。

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 2 倍に増幅されたことが示された。これは、視覚刺激を適当に与えることによって、垂直方向の小さな加速度の提示でも大きな自己運動感覚を生起する仮想環境を構築できる可能性を示唆した関連研究 [17] の内容を裏付けるものでもある。

被験者の二輪車及び自動二輪車の運転経験の有無についての回答結果として、10 人全員が二輪車の運転経験があり、うち 8 人が自動二輪の運転経験及び乗車経験がないと回答した。これは被験者の大半が「自動二輪車を運転してい



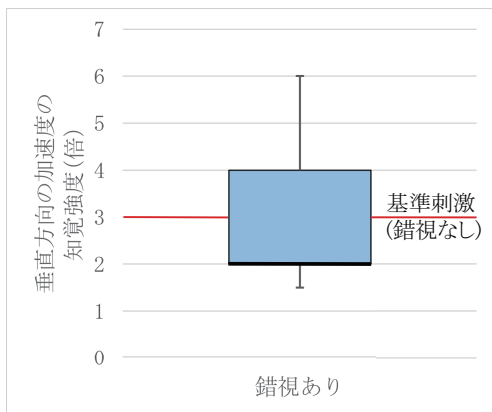


図 6 錯視なしを基準とした錯視ありの垂直方向の加速度の知覚強度

ると強い加速度を感じる可能性がある」というイメージを持っていなかった可能性を意味している。この知識が垂直方向の落下感覚を弱めた要因の一つである可能性が考えられる。視覚刺激の経験の有無とベクシヨンの強度の関係について奥川ら (2017)[9] が言及している。

また本実験で使用した垂直方向加速度提示装置が提示した垂直方向の加速度はピーク時に約  $0.1m/sec^2$  ほどであり、これは人の垂直方向の加速度方向の弁別能が頭部の前後ピッチ角に関わらずおおよそ  $0.1m/sec^2$  ほどである [18] ことから、床面に錯視を配置することでわずかに感じるほどの加速度の提示でも没入感を高められる可能性を示唆している。

被験者の年齢によってベクシヨンの強度に差が生じる [19] こと、年齢が高くなるにつれてベクシヨンの強度が弱まっていく [20] ことが指摘されている。今回の被験者 10 人の年齢は、20 代が 8 人、30 代が 1 人、50 代が 1 人であった。被験者間での年齢の差が垂直方向の落下感覚に影響を与えた可能性があり、同様の実験を異なる年齢層で行った場合、結果に変化が生じる可能性がある。

## 4. 実験 2：錯視の配置位置が垂直方向の体感加速度に与える影響

### 4.1 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動的な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 2 を行う。

### 4.2 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。床面及び天井面と比べて壁面は面積が狭く、

生成されるベクシヨンの強度を床面及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。

被験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た。このとき床面から天井高までの距離は 2.7m であった。これは日本の一般的な居室の天井高である 2.4m よりも少し高い。被験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 7 に示す。図 7 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。

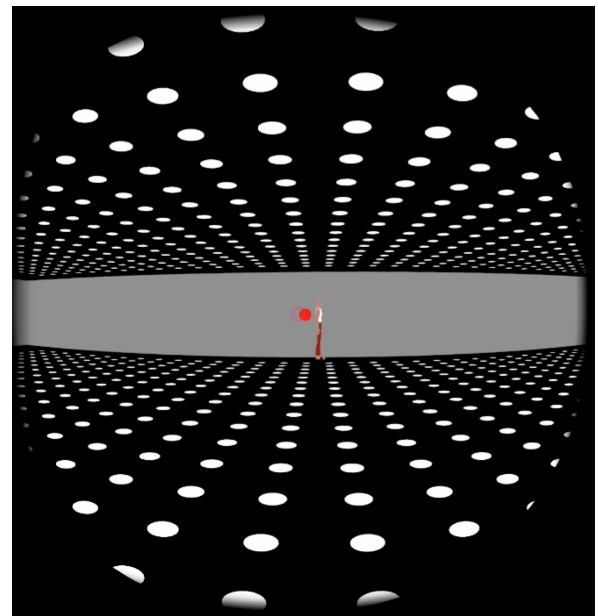


図 7 床と天井面に表示される錯視を見た状態の HMD の左眼視野

固定指標は実験 1 と同様のものを用いた。また、動的な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。垂直方向の加速度の知覚強度の評価には実験 1 と同様に被験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値で回答させた。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。

### 4.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 錯視の配置場所の順序をランダムに設定する。
- (2) 被験者に加速度を提示する。錯視の配置の場所に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 秒程の短いインターバルを設ける。

- (4) 被験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値で回答させる。
- (6) コメントを聴取する。

#### 4.4 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8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ないことが確認された。そのため図中の値には四分位偏差、エラーバーには最大値と最小値を用いた。図中の値に対して統計的処理は行わない。

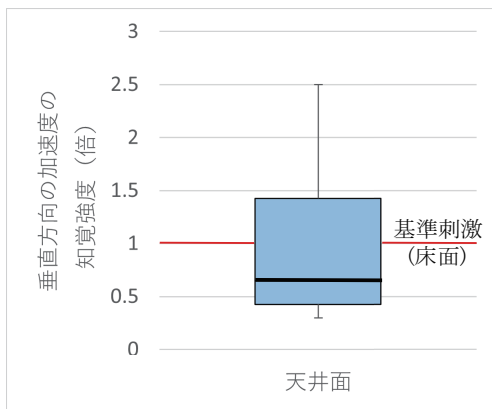


図8 床面の錯視配置を基準とした天井面の垂直方向の加速度の知覚強度

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。これは室内空間においてMR上で錯視を提示してバクションを生成するとき、錯視を床面に配置することが天井面よりもバクションの強度が高まる傾向を示している。この傾向は人が周囲の風景から自己運動を推定するとき、床面からの視覚情報に重きを置いて処理している可能性が考えられる。

### 5. 実験3：視線の水平方向角度が垂直方向の体感加速度に与える影響

#### 5.1 実験目的

実験1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。

#### 5.2 実験条件

独立変数である視線の水平方向角度は、前傾姿勢を取っている被験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°）及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、被験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、被験者の目元から固定指標までの距離は約1.4mであった。

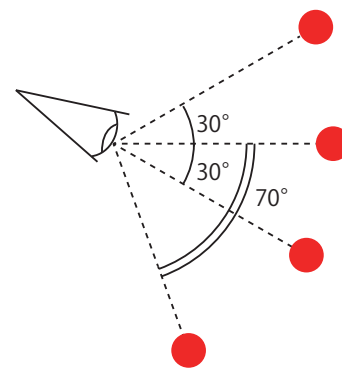


図9 4種類の視線の水平方向角度

#### 5.3 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。被験者には2つの視線の水平方向角度を向いてもらい、どちらがより強く垂直LVを得られたかを回答させる。これを4種類の視線の水平方向角度の総当たり回数分行う。この方法であれば指定された2種類の水平方向角度から得られた垂直LVの強度の大小を選択していただくだけで、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。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擬似乱数で順序を決定した。試行回数は被験者1人あたり、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通りである。

- (1) 評価する4種類の水平方向角度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) 残りの組み合わせについて(2)~(6)を繰り返す。
- (6) コメントを聴取する。

## 5.4 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。

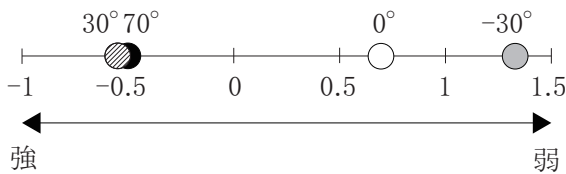


図 10 垂直方向の加速度の知覚強度の心理尺度

視線の水平方向角度が水平から下向き 30° 及び 70° のときに最も垂直方向の加速度の知覚強度が高まる可能性を示唆する結果となった。また、4 種類の視線の水平方向角度の中で上向き 30° が最も知覚強度が低い結果となった。この結果は (i) 中心視領域のマスク領域、(ii) 奥行き感、(iii) 視覚刺激の認知的特性、(iv) 身体姿勢とベクシオンに関する先行研究の報告と関係していると考えられる。

(i) の周辺視領域のマスク領域と LV の関係について、Konishi ら (2017)[5] が中心視領域に視野角計算で 20° のマスク領域の配置の有無が LV の強度に与える影響を検討している。結果、マスク領域を適用した場合のほう適用しなかった場合と比較して LV の強度が高まる傾向を報告している。マスク領域とは視覚刺激を提示しない範囲のことであり、実験 2 において視線の水平方向角度が水平を向いた時、中心視領域に錯視が提示されない範囲が視野角計算で約 24° であった。これは視線の水平方向角度が水平から下向きに 30° 及び 70° の場合の垂直方向の加速度の知覚強度に比べて水平方向を向いている場合の知覚強度が高い傾向であった結果と反する結果となった。

ただし、本実験で使用した頭部装着型ディスプレイは視野角が水平及び垂直に 110° であるが、Konishi ら (2017) は小型ドーム内に視覚刺激を提示することで水平視野角が 180° 以上の環境で実験を行っているため、周辺視領域の錯視提示についてさらなる検討が必要である。

(ii) の奥行き感とベクシオンの関係について、Ito & Shibata(2005)[21] は刺激方向の違う視覚刺激を異なった距離をとって配置し、重畳して提示することでどの方向にベクシオンが生起されるのか検討を行っている。結果、観察者から最も離れた距離に配置された視覚刺激の刺激方向にベクシオンが生起することを示した。今回錯視を配置したのは奥行きがある 3 次元空間の床面であり、視線の水平方向角度が水平に近づくにつれて被験者から離れた床面の錯視が視野角に入ってくる実験条件となっており、周辺視領域に提示される錯視までの距離が垂直方向の加速度の知覚強度の変化に影響を及ぼした可能性が示唆される。

ただし、Ito & Shibata(2005) は視覚刺激を配置してい

る面が被験者の頭部及び上半身に対して水平であるのに対し、実験 3 では視覚刺激を床面に配置している。また、視覚刺激の中心点を視線の中心に配置しているのに対して、実験 3 では視覚刺激の中心点を被験者の足元に配置している。視覚刺激を配置している面と被験者の位置関係、視覚刺激の中心点と被験者の位置関係について追加の検討を行う必要がある。

(iii) の視覚刺激の認知的特性について、Kitazaki & Sato(2003)[22] は、意識を向けている注視対象と、注視対象の背景にあたる部分が逆向きの視覚刺激を提示する場合、どちらの向きにベクシオンが生起されるのか検討を行った。結果、注視対象の背景にあたる部分の視覚刺激の方向と反対方向にベクシオンが生起された。視線の水平方向角度が水平から 70° 下向きに向いた時、固定指標の周囲に観察される錯視と被験者の間の距離が最も近くなり、錯視自体に意識が向いたことによって垂直方向の加速度の知覚強度が弱まった可能性が示唆される。

この実験で「視線が一番下を向いている時は、床面に描かれている模様は動いているだけに見えた」というコメントが得られた。このコメントからも、下を向きすぎると錯視を模様だと認知してしまいベクシオンの強度が低くなる可能性を支持している。

(iv) 身体姿勢とベクシオンの関係について、Mori & Seno(2017)[23] は、頭部と胴体の向きとベクシオンの強度の関係について検討を行った。結果、頭部が上向きであるときは正面を向いているときよりも知覚されるベクシオンの強度が低くなる傾向を示した。これは常習的に経験される身体姿勢であるか否かがベクシオンの強度に影響を与える可能性を示唆する内容となっている。これは視線の水平方向角度が 70° 上に向いた場合、4 種類の視線の水平方向角度の中で最も垂直 LV の強度が低かった実験 3 の結果とよく合致する。

この実験で「視線が一番上を向いているときは首が痛くて視線方向を保つのが辛かった」というコメントが得られており、視線の水平方向角度が 70° 上に向いた状態が常習的に経験されない身体姿勢であることを裏付けている。

## 6. むすび

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、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 2 倍に増幅されたことが示された。

実験 2 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。

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° 及び 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。

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、視線の水平方向に仮想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。

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。垂直及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。

## 参考文献

- [1] Kodama, R., Koge, M., Taguchi, S. and Kajimoto, H.: COMS-VR: Mobile virtual reality entertainment system using electric car and head-mounted display, *IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 130–133 (2017).
- [2] Harris, L., Jenkin, M. and Zikovitz, D. C.: Vestibular Cues and Virtual Environments: Choosing the Magnitude of the Vestibular Cue, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality*, p. 229 (1999).
- [3] 齋藤文人, 中西泰人: 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, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション Vol.186 No.16, pp. 1–6 (2020).
- [4] 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).
- [5] 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 Vol.1 No.2, pp. 162–170 (2017).
- [6] Hansen, J. P., Trudslev, A. K., Harild, S. A., Alapetite, A. and Minakata, K.: Providing Access to VR Through a Wheelchair, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1–8 (2019).
- [7] 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).
- [8] Bubka, A., Bonato, F. and Palmisano, S.: Expanding and contracting optic-flow patterns and vection, *Perception Vol.37 No.5*, pp. 704–711 (2008).
- [9] 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).
- [10] 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 No.44, pp. 15–21 (2001).
- [11] 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).
- [12] Kim, J. and Palmisano, S.: Eccentric gaze dynamics enhance vection in depth, *Journal of Vision Vol.10 No.7*, pp. 1–11 (2010).
- [13] 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).
- [14] 畑田豊彦: 人工現実感に要求される視空間知覚特性, pp. 129–134 (1993).
- [15] Hayashizaki, T., Fujita, A., Nozawa, J., Ueda, S., Hirota, K., Ikei, Y. and Kitazaki, M.: Walking Experience by Real-Scene Optic Flow with Synchronized Vibrations on Feet, *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference No.2*, pp. 182–184 (2015).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] MacNeilage, P., Banks, M., DeAngelis, G. and Angelaki, D.: Vestibular heading discrimination and sensitivity to linear acceleration in head and world coordinates, *The Journal of Neuroscience Vol.30 No.27*, pp. 9084–9094 (2010).
- [19] Shirai, N., Imura, T., Tamura, R. and Seno, T.: Stronger vection in junior high school children than in adults, *Frontiers in Psychology Vol.5 No.563*, pp. 1–6 (2014).
- [20] Haibach, P., Slobounov, S. and Newell, K.: Egomotion and Vection in Young and Elderly Adults, *Gerontology Vol.55*, pp. 637–643 (2009).
- [21] Ito, H. and Shibata, I.: Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity, *Vision Research Vol.45 Issue.4*, pp. 397–402 (2005).
- [22] Kitazaki, M. and Sato, T.: Attentional modulation of self-motion perception, *Perception Vol.32 No.4*, pp. 475–484 (2003).
- [23] Mori, M. and Seno, T.: Effect of Body Posture on Vection, *Sasa Vol.22 No.3*, pp. 391–394 (2017).