

バーチャルリアリティ環境における
空間認識と姿勢制御メカニズムの検討

藤本花音

要旨

近年、バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) は我々の社会で身近な存在となった。VR における最重要課題の一つには臨場感の向上が挙げられる。心理学の観点からは、臨場感が生じる視覚環境の検討や、その心理メカニズムの解明が進められてきた。

臨場感を構成する要素の一つに「自己運動感覚」がある。自己運動感覚とは、歩行時や乗車時に感じる自己身体の移動の感覚であり、視覚や体性感覚などから生起する。特に視覚から得られる自己運動感覚は強力であり、実際の自己移動が伴わなくとも大画面に映像を表示することで自己運動感覚が生起することが報告されている。こうした自己運動の錯覚は「ベクション」と呼ばれ、多くの VR のアトラクションやゲームで活用されている。学術研究においては、効果的にベクションを誘発する条件が検討されてきた。

ベクション研究の課題の一つに、主観評定による測定が挙げられる。主観報告は評価基準が曖昧になりやすいため、課題に熟達する必要がある上に、実験者の教示などの意図せぬバイアスを受けやすい。ベクションを正確に測定し、VR の臨場感を適切に評価するためには、主観評定以外の評価尺度を導入し、総合的に評価する必要がある。

映像観察時に生じる身体姿勢反応は、補完的な指標になり得る。人

間は身体のバランスを保つために、視覚から得る自己運動の情報を活用している。姿勢制御機構は自己運動感覚と感覚情報を共有していると考えられており、姿勢反応は評価指標として有効であると考えられる。また、明示的にベクシオンを報告する必要がないため、より自然な参加者の反応が取得できる。しかしながら、姿勢反応と主観的なベクシオンの処理過程がどの程度共有されているかは十分理解されておらず、多面的な実験的検討が必要である。

ベクシオンは動的な視覚情報によって誘発されるが、自己身体に関する静的な空間認識も、動的な感覚と併せて空間認識を構成する。自己身体の傾きの感覚（自己傾斜感覚）は、そうした静的な空間認識の一つである。臨場感の評価には、動的な自己運動感覚と共に静的な自己傾斜感覚も考慮すべきである。視覚的な傾きから生じる姿勢反応は、より客観的な身体傾斜感覚の指標となることが期待されるが、視覚的な傾きと姿勢反応の詳細な関係性については十分な検討がなされていない。

本論文は、VR 映像から生じる姿勢反応とベクシオンの性質を検討するため、ヘッドマウントディスプレイを用いた一連の心理学実験を実施した。ベクシオンを誘発するような一人称視点の映像は「オプティックフロー」と呼ばれる。研究 1 では、オプティックフローの上下視野の効果を検討した。この研究は、人間の下視野に自己運動知覚に

有用な情報が多く含まれることから着想を得たものである。その結果、下視野に呈示されたオプティックフローは上視野条件に比べて大きな姿勢反応を誘発することが明らかになった。同時に測定されたベクションも姿勢反応と同様に、下視野条件において促進が見られた。この研究では、呈示視野の違いを除いては、オプティックフローの速度や密度といった物理的な条件は同一であった。研究1から、物理的な映像の強度が同一であっても、心理的にベクションを誘発しやすい映像は姿勢反応も強く誘発することが示唆された。研究2では、日常的な風景の傾きに対して生じる自己傾斜感覚と姿勢反応を検討した。風景の角度に対する姿勢反応および主観的垂直をベクトル合成モデルで近似した結果、各ベクトル成分の相対的寄与は指標間で一貫している一方で、主観的垂直の方が相対的寄与の差がより顕著であることが示された。この結果から、自己傾斜感覚と姿勢反応は感覚情報がある程度共有しているものの、共有される処理過程は限定的であることが示唆された。更に研究3では、実生活での使用環境を想定し、座位における姿勢反応を検討した。その結果、座位における姿勢反応の方向が立位に対して反転することが明らかになった。一方で、ベクションの強さや方向は座位・立位に影響されず一定であった。この結果から、座位で体験するVRコンテンツにおいても姿勢反応指標が有効であると期待される一方、ベクションとは異なり、姿勢応答では座位特有の

反応を検討する必要があることが示唆された。これらの知見は VR 体験の評価尺度に新たな観点を導入する有益な知見になり得ると考えられる。

目次

第 1 章 序論	5
1.1. 次世代の情報社会とバーチャルリアリティ (VR)	5
1.2. バーチャルリアリティにおける臨場感	7
1.3. 自己運動感覚の視覚誘導特性	9
1.4. ベクシヨンの評価指標とその課題	11
1.5. 姿勢応答とベクシヨン	14
1.6. 自己傾斜感覚の応用可能性と身体動揺	18
1.7. 本論文の目的	19
第 2 章 研究 1 姿勢応答における上下視野の影響	22
2.1. 研究背景	22
2.2. 方法	25
2.2.1. 実験参加者	25
2.2.2. 実験装置	25
2.2.3. 刺激	26
2.2.4. 手続き	27
2.3. 結果	29
2.3.1. ベクシヨン評定	29
2.3.2. 頭部運動	30

2.3.3. 頭部運動とベクシヨンの相関	36
2.4. 考察	37
2.4.1. 研究1のまとめ	37
2.4.2. 下視野の生態学的役割	38
2.4.3. 網膜座標と環境座標	39
2.4.4. 注意の影響	43
2.4.5. 拡大・縮小刺激間の非対称性	43
2.4.6. 試行後半の頭部運動	45
2.4.7. ベクシヨンと VEPR	45
2.5. 結論	49
第3章 研究2 風景の傾きに対する姿勢調整	50
3.1. 研究背景	50
3.2. 方法	54
3.2.1. 実験参加者	54
3.2.2. 実験装置	54
3.2.3. 刺激	54
3.2.4. 手続き	56
3.2.5. データ解析	57
3.2.6. モデル	57
3.3. 結果	60

3.3.1. 視覚手がかりの実質的寄与	60
3.3.2. 視覚手がかりの相対的寄与	62
3.3.3. 頭部回転と SVV 誤差の相関	63
3.4. 考察	64
3.4.1. 研究 2 のまとめ	64
3.4.2. 視覚手がかりの実質的寄与	64
3.4.3. 視覚手がかりの相対的寄与	66
3.4.4. 姿勢制御と SVV の関係性	69
3.4.5. 正立風景の選好と眼球回旋運動	70
3.5. 結論	71
第 4 章 研究 3 座位・立位における姿勢応答の違い	72
4.1. 研究背景	72
4.2. 方法	73
4.2.1. 実験参加者	73
4.2.2. 実験装置	73
4.2.3. 刺激	74
4.2.4. 手続き	76
4.3. 結果	78
4.3.1. 頭部運動	78
4.3.2. ベクシヨン	85

4.3.3. 頭部運動とベクシヨンの相関	90
4.4. 考察	92
4.4.1. 研究3のまとめ	92
4.4.2. 放射・平行オブテックフローに対する頭部運動	93
4.4.3. ベクシヨンの結果について	95
4.5. 結論	96
第5章 総合考察	97
5.1. 研究1-3のまとめ	97
5.2. 刺激強度に対する知覚と姿勢応答の一貫性	98
5.3. 姿勢応答とベクシヨンの差異	99
5.4. 今後の展望	100
5.4.1. 非線形的指標の導入	100
5.4.2. 個人差の再検討	101
5.5. 結論	101
謝辞	103
研究業績	105
引用文献	108

第 1 章 序論

1.1. 次世代の情報社会とバーチャルリアリティ (VR)

我々が生活するこの社会は高度に情報化されている。現代社会では、パーソナルコンピュータ、携帯電話、スマートフォンなどの通信機器が普及し、インターネットを介して世界中と通信が可能になった。ネットワークで繋がった現代の情報社会 (Society 4.0) では、現実世界からサイバー空間にアクセスすることで情報を入手する方法を取るが、有用な情報の入手にはリテラシーが必要であり、また情報の共有や分野横断的な連携が不十分であるという問題があった (内閣府)。こうした背景を踏まえ、内閣府の科学技術基本計画において「Society 5.0」と呼ばれる政策が策定された。Society 5.0 は現実世界とサイバー空間の融合により、モノやサービスの供給の質を向上させることを目標とする (内閣府, 2016)。この目標に向けて、モノのインターネット (Internet of Things: IoT) やビッグデータ、人工知能など、サイバー空間と現実空間を融合させるための先端技術の活用が期待されている (内閣府, 2016)。

バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) は現実世界とサイバー空間の融合に寄与し得る技術であり、近年著しい普及を示している。我々が存在する現実世界に対し、VR は視覚ディスプレイや触覚ディ

スプレイなどを用いて刺激呈示を行い，ユーザーの行動とリアルタイムに相互作用することで，ユーザー側からは現実世界と遜色のない空間を作り出す（図 1-1）．現実世界をサイバー空間に再現する点において，VR は Society 5.0 に向けて注目すべき技術の一つである．



図 1-1. VR 体験の様子.

現在 VR 機器として一般的に使用されているヘッドマウント型ディスプレイ（HMD）は 1960 年代にひな形が開発された．当初はフライトシミュレータ用途での開発が中心だったが，1990 年代に入りゲーム用途での開発が増加した（Virtual Reality Society）．2016 年には Oculus Rift CV1（Oculus VR, Menlo Park, CA, 米国），HTC VIVE（HTC Corporation, 桃園市, 台湾），PlayStation VR（Sony Group Corporation, 東京, 日本）といった，比較的安価なハイエンド向けへ

ッドマウントディスプレイ (HMD)が発売され、直前に発売されたモバイル用の Google Cardboard (Google LLC, Mountain View, CA, 米国; 2014 年発売)や Gear VR (Samsung Electronics Co., Ltd., 水原市, 韓国; 2015 年発売)の発売と併せて、日本の各種メディアでは「VR 元年」と呼称された。Grand View Research の報告によると、米国 VR 市場の規模は VR 元年から更に拡大を続け、2016 年の 2 億ドル規模から 2020 年には 158 億ドル規模に達し、今後は 2028 年まで年 18%の成長が見込まれる (Grand View Research, 2021)。2020 年初頭に発生した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19)の流行も VR の普及を後押しする。新型コロナウイルス流行以前から、観光業を中心に VR が活用されてきたが (自治体通信 Online, 2020)、新型コロナウイルスの影響による外出制限を受けて、VR 空間内で観光や買い物を行うプラットフォーム制作事業が開始するなど(日本ネット経済新聞, 2021; 日本経済新聞, 2021)、VR の需要は急速な高まりを示している。

1.2. バーチャルリアリティにおける臨場感

Zeltzer (1992)によれば、VR は自律性 (Autonomy)、相互作用 (Interaction)、臨場感 (Presence)から成る 3 つの基本要素を満たす必要がある。自律性は VR 空間の物理的な正確さを指し、物体の運動や光の反射、音の伝達といった物理モデルの精度から評価される。相互

作用は VR 空間とユーザーの相互作用を指し，ユーザーの動作に対する VR 空間の応答がリアルタイムであることに重点を置く．臨場感とは，あたかもユーザーが VR 空間内に存在しているように感じられる状態を指す．VR がユーザーにとって現実空間の代替であることを踏まえると，これらの VR の構成要素は全てユーザーの感覚に立脚して評価すべきである．例えば，人間の可聴域を超えた音刺激を VR 空間に呈示しても，その刺激は Autonomy には影響しない．また，操作に遅延があったとしても，同時性の判断に影響しない範囲であれば Interaction は保たれる．

安藤 (2011)によれば，臨場感 は時間的，空間的，身体的な 3 つの要素から構成され，感覚情報や過去の経験を元にそれらの要素が形成される．時間的な要素とは，物体の運動の滑らかさやモダリティ間の同時性といった，環境の動的な性質を測る指標である．対して，空間的な要素とは，物体の立体感や質感といった静的な性質に関する指標である．安藤 (2011)はこれらの時間的・空間的な要素を臨場感の構成要素に含んでいるが，これらは Zeltzer (1992)の定義に基づけば時空間的な物理モデルの正確性に依存し，Autonomy と関連が深い概念である．一方で，最後の構成要素である身体要素は，自己の身体が環境内に存在すると感じるために必要な要素であり，臨場感の根幹をなすと考えられる．身体要素は更に「自己存在感」,「インタラクティブ感」,

「情感」などの要素から構成される。中でも「自己存在感」には自己運動感覚や自己身体感覚が含まれるが、これらから構成される「自己存在感」の向上には、人間における自己身体の空間認識特性を理解する必要がある。

1.3. 自己運動感覚の視覚誘導特性

自己身体の位置と動きを知覚することは、環境内で適切な行動をする上で重要な能力である。自己運動知覚における最も基本的なモダリティは前庭感覚であり、三半規管から頭部の回転を、耳石器から平行運動の加速を検出する。しかしながら、これらの前庭感覚器は等速運動に対しては順応するため (Fernandez & Goldberg, 1976; St George, Day, & Fitzpatrick, 2011)、長時間の自己運動時には前庭感覚器以外の感覚情報によって自己運動を検出する必要がある (DeAngelis & Angelaki, 2012)。前庭感覚が不得手とする等速運動の検出は、視覚による補完が可能である。自己運動時に網膜に投影される視覚運動はオプティックフロー (図 1-2) と呼ばれ、その方向から自己運動方向を推定することができる (Gibson, 1950; Warren, Morris, & Kalish, 1988)。また、視覚的な自己運動は等速運動の場合にも継続的に知覚されるが、前庭感覚に比べて検出の立ち上がりは遅い (Waespe & Henn, 1977)、前庭感覚が視覚に先んじて自己運動を検出し、のちの順応を視覚が補

うという点において，前庭感覚と視覚は相補的な関係にあると言える．

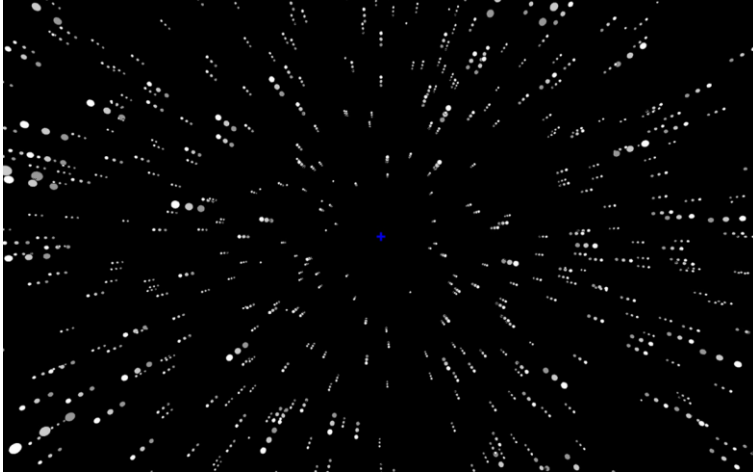


図 1-2. 典型的なオプティックフローの例．一人称視点の前進移動を撮影したアニメーションから，連続した3フレームを合成した．

等速運動時など，自己運動の検出において視覚情報のみが有効である状況下では，人間の感覚からは視覚的な自己運動と実際の自己運動は区別されない．実際に，静止した観察者に対してオプティックフローを呈示すると，あたかも自分自身が移動しているような感覚が生じる場合がある．このような自己運動の錯覚は，視覚誘導性自己運動感覚（ベクション [Vection]）と呼ばれている（Fischer & Kornmüller, 1930; Palmisano, Allison, Schira, & Barry, 2015）．自己運動感覚のこうした視覚的な特性を利用することで，静止姿勢で体験する VR コンテンツにおいても，オプティックフローによって自己運動感覚を誘発することができる．

1.4. ベクシヨンの評価指標とその課題

ベクシヨンを定量的に評価するために、学術研究では主に3種類の主観評定が用いられてきた (Seno et al., 2017)。生起潜時 (レーテンシ) と持続時間は、ベクシヨンの時間的な側面に着目した指標である、典型的なベクシヨンの実験では、参加者はオプティックフローを呈示され、ベクシヨンの生起中にボタンを押し続ける課題を遂行する。ベクシヨンの潜時は、刺激呈示開始からボタンが押されるまでの遅延時間を指し、持続時間はボタンを押し続けた累計時間によって計算される。多くの場合、オプティックフローの呈示から数秒から十数秒程度遅れてベクシヨンが生じる。これは、参加者が静止した状態ではオプティックフローと前庭感覚の間に矛盾が生じ、感覚間の統合に時間を要するためと考えられている (Wong & Frost, 1981)。潜時が短いほど、持続時間が長いほど感覚間の対立が小さいと考えられ、速やかにベクシヨンが生じ、安定してベクシヨンが持続していると解釈される。主観的強度はベクシヨンの錯視量を直接問う指標である。視覚刺激の呈示後、自分が動いているような錯覚がどれほど強力だったか (compellingness [Brandt, Dichgans, & Koenig, 1973]) をマグニチュード推定法などの方法で評価する。

これらの評価指標はいずれも内省的な主観報告であり、解釈に注意が必要である。ベクシヨンの評定は教示や実験環境の影響を受けやす

く (Lepecq, Giannopulu, & Baudonniere, 1995; Palmisano & Chan, 2004), またベクシヨンに関連して生じる映像酔い (Nooij, Pretto, Oberfeld, Hecht, & Bülthoff, 2017)や眼球運動 (Brandt, Dichgans, & Büchele, 1974), 身体動揺 (Lishman & Lee, 1973)などと混同されて評定が行われている可能性がある。

Palmisano et al. (2015)は、近年のベクシヨン研究において主観報告以外の指標を活用する必要性が高まっていることを、次の2点から主張している。1点目は、近年の研究で使用される誘発刺激の強度が低いことが挙げられる。初期の研究では、部屋の壁を動かしたり (Lishman & Lee, 1973), ドラムの回転を内部から観察することで (Brandt et al., 1973; Dichgans & Brandt, 1978; Fischer & Kornmüller, 1930; Palmisano & Gillam, 1998)ベクシヨンを誘発した。これらの研究では、視覚呈示装置と共に、回転機構や車輪等のモーシヨンプラットフォームも備えており、オプティックフローが視覚呈示装置と実際の自己運動のどちらから生成されたか曖昧な状態でベクシヨンの測定が行われる。こうした刺激呈示方法では、実際の自己運動と区別がつかないほどの非常に強力なベクシヨンが誘発される (Lishman & Lee, 1973)。一方で、近年のベクシヨン研究ではコンピュータで生成された視覚刺激を呈示する方法が主流であり、物理的な自己運動が生じないことが明確な状況でベクシヨンを測定する。そのため、こうし

た刺激で誘発されるベクシヨンの強度は比較的弱い傾向にある。また、近年では聴覚 (Dodge, 1923; Keshavarz, Hettinger, Vena, & Campos, 2014; Lackner, 1977; B. E. Riecke, Feuereissen, & Rieser, 2008; Sakamoto, Osada, Suzuki, & Gyoba, 2004) や触覚 (Murata, Seno, Ozawa, & Ichihara, 2014; Nilsson, Nordahl, Sikström, Turchet, & Serafin, 2012; Nordahl, Nilsson, Turchet, & Serafin, 2012) などから非視覚的に誘発されるベクシヨンへの関心も高まっているが、こうしたベクシヨンは総じて視覚的なベクシヨンに比べて誘発されにくい (Väljamäe, 2009)。

1 点目の理由は、近年のベクシヨン研究における認知的要因への関心が挙げられる。2000 年以降、刺激のリアリティ (Bubka & Bonatoô, 2010; B. E. Riecke & Schulte-Pelkum, 2013; B. E. Riecke, Schulte-Pelkum, Avraamides, Heyde, & Bülthoff, 2006; B. Riecke, Västfjäll, Larsson, & Schulte-Pelkum, 2005; Schulte-Pelkum, Riecke, von der Heyde, & Bülthoff, 2003), 物理的な自己運動が起こりうる環境の有無 (Lepecq et al., 1995; Palmisano & Chan, 2004; B. E. Riecke, 2009; Schulte-Pelkum, Riecke, & Bülthoff, 2004; Wright, DiZio, & Lackner, 2006), 教示 (Ogawa & Seno, 2014; Palmisano & Chan, 2004), 心的イメージ (Mast, Berthoz, & Kosslyn, 2001), 刺激の意味表象 (Ogawa & Seno, 2014; Seno & Fukuda, 2012; Seno, Ito, & Sunaga, 2009), 参

加者のパーソナリティ (Seno, Yamada, & Ihaya, 2011)など, より高次の認知機能の影響が検討されてきた. こうしたトップダウンの認知的要因を検討する際には, 参加者が実験目的に応じて評定を行う可能性に注意する必要がある.

1.5. 姿勢応答とベクシヨン

人間は身体のバランスを保つために, 複数のモダリティから自己身体の位置や運動を推定し, 直立姿勢の維持を行う (Peterka, 2002). 視覚はそうしたモダリティの一つとして, 直立姿勢の維持に重要な役割を果たす. 例えば視力低下に伴い安静立位時の重心動揺は増大し (Paulus, Straube, & Brandt, 1984), 完全な視覚遮断によって重心動揺は開眼時の約 2 倍の大きさになる (A. S. Edwards, 1946). また, 片足立ちなどの日常的に経験しない姿勢を取る場合は, 視覚フィードバックによる姿勢調整が優位となるため, 視覚を遮断すると姿勢維持が困難になる (Lee & Lishman, 1977).

外乱によって姿勢が直立状態から逸脱した場合, 姿勢制御機構は逸脱とは反対方向への姿勢調整によって直立姿勢への復帰を試みる. 前庭器官への電気刺激 (Britton et al., 1993; Day, Séverac Cauquil, Bartolomei, Pastor, & Lyon, 1997; Richard Fitzpatrick, Burke, & Gandevia, 1994; LUND & BROBERG, 1983; L. M. Nashner & Wolfson,

1974)や足裏・足首への振動刺激 (Eklund, 1972; A. Kavounoudias, Roll, & Roll, 2001; Anne Kavounoudias, Roll, & Roll, 1998)によって、刺激の方向に応じた姿勢反射が生じるが、視覚的な外乱によっても姿勢の調整が行われる場合がある。典型的な例ではオプティックフローによって姿勢応答が誘発されることが知られており、こうした視覚誘導性姿勢応答 (Visually evoked postural response: VEPR)について数多くの検討が行われている (Berthoz, Lacour, Soechting, & Vidal, 1979; Dichgans & Brandt, 1978; Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975; Lestienne, Soechting, & Berthoz, 1977; Lishman & Lee, 1973)。

VEPR はオプティックフロー方向に沿って生じることから、知覚された自己運動の補償反応であると考えられている (Lestienne et al., 1977; Lishman & Lee, 1973)。例えば右方向のオプティックフローに対しては右方向、左方向のオプティックフローでは左方向の姿勢応答が生じる。また、拡大オプティックフローに対しては後方向、縮小オプティックフローに対しては前方向の姿勢応答が生じる。これは、右方向のオプティックフローによって左方向の自己運動が想起され、知覚された自己運動とは反対方向への姿勢調整を行い、直立姿勢の維持を試みていると考えることができる。同様に、放射方向のオプティックフローでは、拡大刺激に対しては前方向、縮小刺激では後方向の自己運動が想起され、それぞれ反対方向への姿勢調整によって主観的な

自己運動を補償していると捉えることができる。

VEPR が自己運動感覚の補償反応であるという仮説を踏まえると、主観報告に代わるベクシヨンの測定指標として、こうした姿勢応答が有用である可能性がある (Palmisano et al., 2015)。実際に、限定的な条件下ではあるが、ベクシヨンと VEPR の関連性がいくつかの調査で報告されている。例えば、オプティックフローのサイズ (Kawakita, Kuno, Miyake, & Watanabe, 2000; Lestienne et al., 1977)、密度 (Lubeck, Bos, & Stins, 2015)、速度 (Kuno, Kawakita, Kawakami, Miyake, & Watanabe, 1999) などに対するベクシヨンと VEPR の変化パターンは類似している。また、ベクシヨンはオプティックフローの呈示中に生起と消失を繰り返す場合があり、ベクシヨンの生起時は消失時に比べて VEPR が増大する (Freitas Júnior & Barela, 2004; Michel Guerraz & Bronstein, 2008; Tanahashi, Ujike, Kozawa, & Ukai, 2007; Thurrell & Bronstein, 2002)。更に 2010 年以降では、安静立位時における重心動揺量が個人のベクシヨン強度を予測することも報告されている (Apthorp, Nagle, & Palmisano, 2014; Palmisano, Apthorp, Seno, & Stapley, 2014; Palmisano, Arcioni, & Stapley, 2018)。

こうした先行研究から、姿勢応答を用いた VR 体験の臨場感評価が可能となることが期待される。ベクシヨンの潜時 (数秒から十数秒) に比べて姿勢応答の潜時 (1 秒以内) は短く (Previc, 1992; Previc &

Mullen, 1991), 主観報告に比べて自己運動に関する信号に対して鋭敏であることが考えられる。こうした特性は、誘発刺激の強度が低い場面での評価に有効であると考えられる。しかしながら、姿勢応答とベクシヨンがどの程度一貫しているのかについては、多面的な検討が不足している。例えば、オプティックフローのサイズや速度といった物理的な刺激強度ではなく、物理的強度が条件間で等しいにもかかわらず主観的な刺激強度が異なるような場面を設定し、ベクシヨンと姿勢応答への影響を検討する必要がある。

VR 体験の評価指標として姿勢応答を用いる場合、リアルタイムでベクシヨン強度を推定し、推定結果に応じて刺激強度を調整するような場面も想定される。しかしながら、これまでの研究は実験条件によるベクシヨンと姿勢応答の変化を比較しており、ベクシヨンの主観報告における個人内のゆらぎや個人間のばらつきがどの程度姿勢応答に反映されるかについてはあまり検討されてこなかった。(Apthorp et al., 2014)は拡大・縮小オプティックフローにおいて、個人の VEPR の大きさとベクシヨンの相関を検討したが、複数あるベクシヨンの指標の内、一部においてのみ正の相関が認められた。この実験では VEPR とベクシヨンを分けて測定しており、同時測定の場合にはより高い相関が期待される。

1.6. 自己傾斜感覚の応用可能性と身体動揺

自己運動感覚は自己身体に関する動的な空間認識であると捉えることができる。一方で、自己身体に関する静的な空間認識も、動的な感覚と併せて空間認識を構成する。VRにおける Presence の概念に立ち返ると、Presence を構成する「自己存在感」は自己身体感覚を基盤とする（安藤，2011）。Presence を評価する際には、動的な自己運動感覚と共に静的な自己身体感覚も考慮すべきであると考えられる。

自己身体の傾きの感覚（自己傾斜感覚）は、こうした静的な自己身体感覚の一つである。自己運動感覚と同様に、自己傾斜感覚は多感覚情報から形成される。前庭の耳石器や全身の固有受容器、内臓受容器は重力加速度から身体の傾きを検出する（Kheradmand & Winnick, 2017; Trousselard, Barraud, Nougier, Raphel, & Cian, 2004）。また、直接的な重力加速度だけでなく、視野全体の傾きからも自己身体の傾きを推定することができる。視覚的な傾きは自己傾斜感覚に影響を与えることが知られており（Cian, Esquivié, Barraud, & Raphel, 1995; Ebenholtz & Benzschawel, 1977; Sigman, Goodenough, & Flannagan, 1979）、視覚情報の重要性が示唆される。

自己傾斜感覚の測定には、モニタ上の線分やジョイスティックなどのプローブを垂直に調整する課題が用いられる（Bringoux et al., 2009; Wenderoth, 1974; Witkin & Asch, 1948）。こうした課題はベク

ションの主観報告に比べれば回答基準が明確だが、やはり実験者効果などのバイアスに注意する必要がある、より客観的な指標の導入が望ましい。

姿勢制御は静的な視覚情報からも行われる。いくつかの研究から、傾いた背景の呈示によって観察者の身体が背景と同方向に傾くことが報告されている (M. Guerraz et al., 2001; Isableu, Ohlmann, Crémieux, & Amblard, 1997; Ohmura et al., 2017; Tsuruhara & Kaneko, 2006)。これは、視覚的に推定された重力方向に体軸を合わせて姿勢の安定化を試みる働きによるものと考えられる。こうした姿勢応答は、より客観的な身体傾斜感覚の指標となる可能性がある。しかしながら、視覚的な傾きと姿勢応答の詳細な関係性については十分な検討がなされていない。

1.7. 本論文の目的

本論文では、VR 体験の評価指標として姿勢応答の利用を目指し、VR 体験中の姿勢応答とベクションおよび自己傾斜感覚の関係性を検討した。まず研究 1 では、オプティックフローの上下視野の効果を検討した。研究 1 は、これまで検討されてきたオプティックフローサイズや速度といった物理的な刺激強度とは異なり、生態学的な観点からベクションと VEPR への影響を検討する狙いがあった。研究 2 では、

日常的な風景の傾きに対して生じる自己傾斜感覚と姿勢応答を測定し、自己傾斜感覚と姿勢応答が同様の反応パターンを示すかどうか、また各個人の反応が自己傾斜感覚と姿勢応答の間で一貫しているかどうかを検討した。更に研究3では、実生活での使用を想定し、座位におけるベクシオンと VEPR を検討した。

多くの研究では、身体動揺は足圧中心 (Center of foot Pressure; CoP) や身体各部位のモーショントラッキングにて測定されるが、本研究では頭部運動のみを測定した。頭部運動を対象とした理由の一部には、HMD に頭部トラッキングが予め備わっており利便性が高いことや、現状利用可能な機器の制約などもあるが、主な理由は参加者に自身の身体動揺を過度に意識させず、より自然な姿勢応答を測定するためであった。また、頭部運動のみの測定でも十分信頼性のあるデータが得られると考えられる。いくつかの研究では CoP と頭部運動を同時に測定しており、少なくとも等速の回転運動 (Tanahashi et al., 2007) や平行運動 (Michel Guerraz & Bronstein, 2008) においては CoP の軌跡と頭部運動はほぼ同等であった。また著者らによる予備実験 (未発表) でも、放射オプティックフローに対する CoP と頭部運動が同様の軌跡を取ることが確認されている。より重要な点として、オプティックフロー強度が高い場合には上肢の動きによって VEPR の大きさを調整することが報告されており (Kawakita et al., 2000; Kuno et al.,

1999), 上肢の一部である頭部運動は, 身体動揺における視覚刺激の影響を検討する上で適切な指標の一つであると考えられる.

第 2 章

研究 1 姿勢応答における上下視野の影響

2.1. 研究背景

視覚情報処理の能力は上下視野間で異なり，全般的に下視野での視覚処理が上視野に比べて優れる．こうした特性には生態学的な背景があると考えられており，身体近傍空間 (Danckert & Goodale, 2001; Previc, 1990; Zito, Cazzoli, Müri, Mosimann, & Nef, 2016) や歩行運動との関連性 (Dobkins & Rezac, 2004; Gibson, 1950; Previc, 1998; Skrandies, 1987) が示唆されている．歩行運動との関連については，地面に近い物体は物理的に静止している可能性が高く，歩行時における自己運動の参照対象として信頼性が高いと考えられている (Gibson, 1950)．過去の研究では，上肢 (Danckert & Goodale, 2001)，下肢 (Graci, 2011; Timmis, Bennett, & Buckley, 2009) における視覚運動制御，視覚刺激に対する脳活動量 (Amenedo, Pazo-Alvarez, & Cadaveira, 2007; Kremláček, Kuba, Chlubnová, & Kubová, 2004; Skrandies, 1987)，網膜神経節細胞の分布 (Croner & Kaplan, 1995; Curcio & Allen, 1990)，注意課題の成績 (Dobkins & Rezac, 2004; He, Cavanagh, & Intriligator, 1996)，形状知覚 (Schmidtman, Logan, Kennedy, Gordon, & Loffler, 2015)，時空間知覚 (Carrasco, Wei, Yeshurun, &

Orduña, 1998; Carrasco, Williams, & Yeshurun, 2002; Previc, 1990; Talgar & Carrasco, 2002), そして運動知覚 (Bilodeau & Faubert, 1997; M. Edwards & Badcock, 1993; Lakha & Humphreys, 2005; Raymond, 1994; Zito et al., 2016)において下視野の優位性が報告されている。ただし一部の研究では, 奥行き知覚における上視野の優位性が報告されている (Levine & McAnany, 2005).

自己運動感覚 (i.e. ベクシヨン;) (Fischer & Kornmüller, 1930)においても下視野優位性が報告されている (D'Avossa & Kersten, 1996; B. E. Riecke, 2010; Sato, Seno, Kanaya, & Hukazawa, 2007; Telford & Frost, 1993; Trutoiu, Mohler, Schulte-Pelkum, & Bühlhoff, 2009). 例えば Tamada & Seno (2015)では, 床面へのオプティックフロー投射により, 十分な強度のベクシヨンと姿勢応答が誘発された。彼らは同時に, オプティックフローの呈示サイズと速度の影響を, 先行研究と同様に示した (Berthoz, Pavard, & Young, 1975; Brandt et al., 1973; Lestienne et al., 1977). 下視野へのオプティックフロー呈示は上視野に比べて強いベクシヨンを誘発することがいくつかの研究で報告されている (Sato et al., 2007; Telford & Frost, 1993). また, 進行方向の推定課題では, 下視野へのオプティックフロー呈示の方が上視野に比べて成績が良い (D'Avossa & Kersten, 1996).

ベクシヨンと同様に, 姿勢制御における下視野の優位性が示唆され

ているが (Gibson, 1950; Previc, 1998), 実験的には未検討である。いくつかの研究では, オプティックフローの床面投射が VEPR において最も効果的であるという仮定の下で実験が行われたが, 直接的には視野の効果を検討していない (Baumberger, Isableu, & Flückiger, 2004; Flückiger & Baumberger, 1988; Tamada & Seno, 2015)。Flückiger & Baumberger (1988)は, 床面に投射したオプティックフローによる VEPR を測定し, トンネル状のオプティックフローを使用した別の実験結果と比較した (Lestienne et al., 1977)。その結果, Flückiger & Baumberger (1988)の結果は, Lestienne et al. (1977)の結果よりも短い反応時間で VEPR を誘発したことが示唆された。しかしながら, 両者の実験条件の間には, オプティックフローのテクスチャパターン, 速度, 加速度, 呈示サイズといった多くの違いがあり, VEPR における上下視野の効果は未だに不明瞭のままである。

本研究では, 下視野に呈示されたオプティックフローが姿勢制御において強い影響を与えるかどうかを直接的に検討した。この目的のために, オプティックフローを上下視野に呈示した際の頭部運動およびベクションを測定した。本研究では, 自己運動における下視野の生態学的重要性 (Gibson, 1950)に基づき, 下視野に呈示されたオプティックフローは上視野に呈示された場合に比べて強い VEPR を誘発するという仮説を立てた。オプティックフローを全視野に呈示する条件も設

定し，半視野呈示条件との比較を行うことで，下視野条件が全視野条件に比べてどの程度影響力があるかを検討した．またベクションも測定し，VEPR とベクションの一貫性を調査した．

2.2. 方法

2.2.1. 実験参加者

成人男女 9 名が実験に参加した（男性 5 名，女性 4 名，平均年齢 22.11 歳，標準偏差（SD）= 1.69）．参加者は全員京都大学の学生であった．いずれの参加者も裸眼，またはコンタクトで矯正した正常視力を有した．眼鏡によって上下視野に歪みが生じる可能性を考慮し，眼鏡使用者は対象から除外した．参加者に前庭疾患の既往歴がないことを事前に確認した．実験手続きは事前に京都大学の倫理審査委員会の承認を得た上で，実験開始前に実験目的を説明し，ヘルシンキ宣言に基づき書面にて実験参加の同意を得た．

2.2.2. 実験装置

視覚刺激呈示には HMD（Oculus Rift CV1）を使用した．HMD は 1 対の有機 EL ディスプレイを有し，片眼につき $1,080 \times 1,200$ ピクセルの解像度，90 Hz のリフレッシュレート，約 110° の対角視野で映像が表示された．両眼レンズの距離は参加者の瞳孔間距離に合わせて調整された．Rift のヘッドトラッキングシステムを用いて，50 Hz のサ

ンプリング周波数で HMD の位置と方位が記録された。実験は Windows 10 (Microsoft, Redmond, WA, USA) を搭載した PC で制御し、Xbox One コントローラ (Microsoft) で参加者の反応を取得した。

2.2.3. 刺激

VR 空間内の視覚刺激は Unity エンジン 5.3.1 (Unity Technologies, San Francisco, CA, USA) にて作成された。VR 空間には、黒い背景上に 1,500 個の白球 (Unity 上の設定で直径 0.1 m) がランダムに配置された。配置構造は実験条件によって異なり、全視野条件では白球はシーン全体に散らばり、上下視野条件では、それぞれ上視野、下視野の範囲に白球が配置された (図 2-1)。白球の個数は全ての視野条件で等しく、全視野条件に比べて半視野条件はオプティックフローの密度が高かった。白球から回避する身体反応を防ぐため、参加者の視点から半径 2 m 以内には白球が配置されなかった。実験中は、一人称視点のバーチャルカメラが前方または後方に向かって秒速 9.4 m で VR 空間を等速移動することで、拡大・縮小するオプティックフローが両眼ディスプレイに表示された。白球は視点から奥行き 0.01-22 m の範囲に表示され、表示範囲を超えた白球は反対側の境界面からランダムな位置に再表示された。その結果、ディスプレイ上には常に約 520 個の白球が表示された。白球の大きさは視点からの距離によって異なり、網膜上で 0.5° から 2.4° の範囲で変化した。

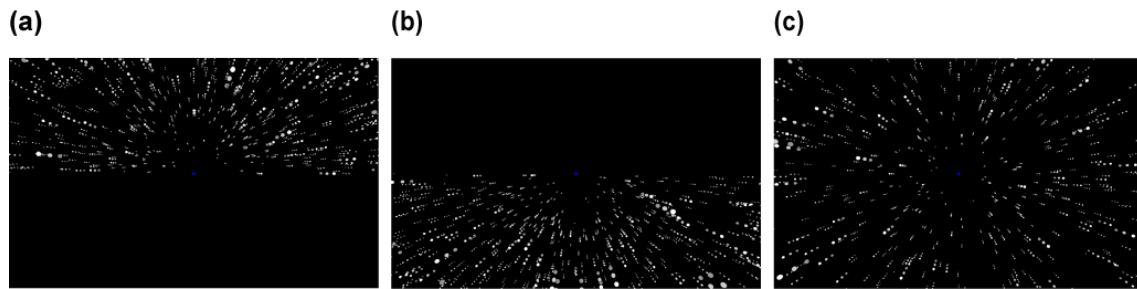


図 2-1. 実験刺激. 拡大または縮小するオプティックフローが上視野 (a), 下視野 (b), 全視野 (c)に呈示された.

2.2.4. 手続き

視野統制

本実験の前に、各参加者に対して上下視野に呈示する刺激サイズの統制を行った。参加者はスツールに座って HMD を装着し、画面中央の矢印 (2.8°) を注視した。矢印は上下いずれかの方角を指し、画面の上端あるいは下端のいずれか一方から、水平視野全体を覆う白い帯状のターゲット刺激が呈示された。ターゲットはカメラの視点から 0.2 m 前方、0.3 m 上方に呈示され、オンセット直後に秒速 0.01 m/s で画面中央に向かって垂直に移動した。実験参加者は、ターゲットが視界に入った時にボタンを押すように指示された。ターゲットの出現位置 (上端・下端) は 1 試行毎に交代し、出現位置毎に 15 試行繰り返された。課題終了後、反応があった時点のターゲット位置を出現位置毎に平均し、画面中央に近い方のターゲット位置を基準に、本実験で用いるバーチャルカメラの上下に目隠し板を設置した。上下視野の統制手

続きが完了した後、参加者は靴を履いたまま立ち上がり、ゲームコントローラを両手で持ち、両足を揃えて直立姿勢を維持するように指示された。参加者が指示に従い直立姿勢を取った後、本実験が開始された。

本実験

本実験は1ブロックにつき12試行で構成され、3ブロック繰り返された。各ブロックには2つの運動方向条件（拡大・縮小）と3つの視野条件（全視野・上視野・下視野）の組み合わせで構成された6条件が2試行ずつ含まれた。これを3ブロック繰り返し、各実験条件は計6回繰り返された。刺激の呈示順序はブロック内で無作為化された。参加者が実験手続きに慣れるまで練習課題を行った後、本課題を開始した。

前試行の影響を取り除くため、各試行は黒い背景で5秒間のインターバル後に開始された。インターバル終了後、ディスプレイの中心に固定された白丸（ 1.8° ）とVR空間の中央に固定された白丸（ 3.3° ）が表示された。参加者は頭部を動かすことでディスプレイに固定された白丸をVR空間に固定された白丸に重ね合わせ、これにより顔の向きを正面に合わせた。ディスプレイの白丸がVR空間の白丸から 1° 以内の距離にある状態が3秒続いた後、次の試行が自動的に開始された。黒い背景で2-3秒のランダムな遅延の後、オプティックフロー刺激が10秒間呈示された。実験参加者はディスプレイ中央の青い十字点

(1.3°)を注視し続けるように指示された。刺激呈示後、参加者は刺激観察中全体のベクシヨンの主観的強度を報告した。評定は0から100の範囲で行われ、0は刺激呈示時間全体を通して静止感覚が保たれたこと、100は非常に強いベクシヨンが生起したことを意味した (Seno, Ito, Sunaga, & Nakamura, 2010)。顔が正面を向いた状態を保つため、参加者の頭部角度が3°以上正面から逸脱した場合は、ヘッドホンからビープ音で警告し、頭部を正面に戻すように指示した。外部環境の音を遮断するため、刺激呈示中は約62 dB SPLのピンクノイズをヘッドホンから流し続けた。

2.3. 結果

ベクシヨンと頭部運動のデータについて、反復測定分散分析にてオプティックフロー方向と視野の主効果および交互作用が検討された。多重比較を実施する際は、Shafferの方法によって有意水準を調整した。多重比較の結果の報告には調整済み p 値を用いた。以上の分析には、統計解析ソフトウェア「R」のライブラリである「ANOVA 君」(<http://riseki.php.xdomain.jp/index.php?ANOVA%E5%90%9B>)を用いた。

2.3.1. ベクシヨン評定

図 2-2 に、各実験条件における主観的強度の参加者間平均を示す。

主観的強度について、オプティックフロー方向 ($F(1, 8)=6.17, p=.038, \eta^2=0.021$)と視野 ($F(2, 16)=23.85, p<.001, \eta^2=0.303$)の主効果は共に有意であった。2 要因の交互作用は有意ではなかった ($F(2,16)=1.23, p=.318, \eta^2=0.005$)。多重比較の結果、下視野条件は上視野条件よりも、全視野条件は上視野および下視野条件に比べて主観的強度が大きいことが示された (上視野対下視野: $t(8)=3.62, p=0.007$; 上視野対全視野: $t(8)=6.53, p=0.001$; 下視野対全視野: $t(8)=3.50, p=0.008$)。

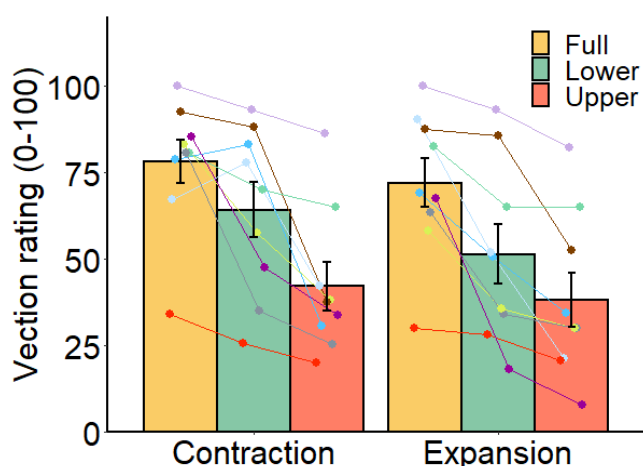


図 2-2. 各視野条件とオプティックフロー方向条件におけるベクシヨンの主観的強度の平均。エラーバーは標準誤差を表す。折れ線は個人の評定値を示す。

2.3.2. 頭部運動

各試行における、刺激呈示直後から 10 フレーム (200 ミリ秒)までの頭部運動データは分析から除外した。刺激オンセット時の初期頭部位置に対する位置変化を参加者間で平均し、図 2-3 に示した。また BCa

(bias-corrected and accelerated: Efron, 1987)法を用いたブートストラップにて、各時点の頭部位置における 95%信頼区間を算出し、図 2-3 にプロットした。図 2-3 より、縮小刺激に対しては前方への頭部運動、拡大刺激に対してはわずかに後方への頭部運動が見られた。更に、縮小刺激において、下視野条件と全視野条件では上視野条件に比べて大きな前方頭部運動が生じる傾向が認められた。また拡大・縮小刺激共に、頭部位置変化は刺激呈示時間の前半でピークに達し、その後は時間経過に伴い信頼区間が増加する傾向が見られた。頭部位置の継時変化をより明確に可視化するため、初期位置からの頭部位置の逸脱について、各時点、各実験条件の下で t 値を算出した (図 2-4)。その結果、刺激呈示前半で t 値が増大し、後半では徐々に小さくなる傾向が見られた。こうした傾向は、オプティックフローに対する身体傾斜に伴い、前庭感覚や固有受容感覚等の非視覚的な感覚からの身体傾斜の信号が増大し、直立姿勢への再調整が行われた結果であると考えられる。そこで、頭部運動データを刺激呈示時間の前半 5 秒、後半 5 秒に分割し、それぞれに対して分析を行った。この分析手続きは事後的に決定されたものである。

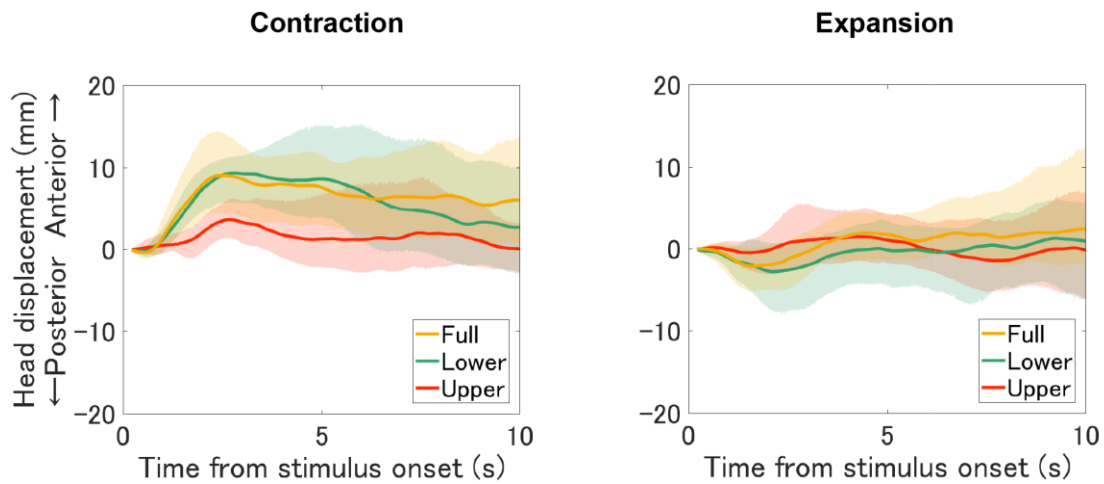


図 2-3. 各視野条件とオプティックフロー方向条件における頭部の前後位置. 実線は各時点で平均した頭部位置を表す. 実線の上下にまたがる網掛け部は各時点における 95%信頼区間を示す. 縦軸の正負はそれぞれ, 初期位置に対する前方向と後方向の頭部位置変化を表す.

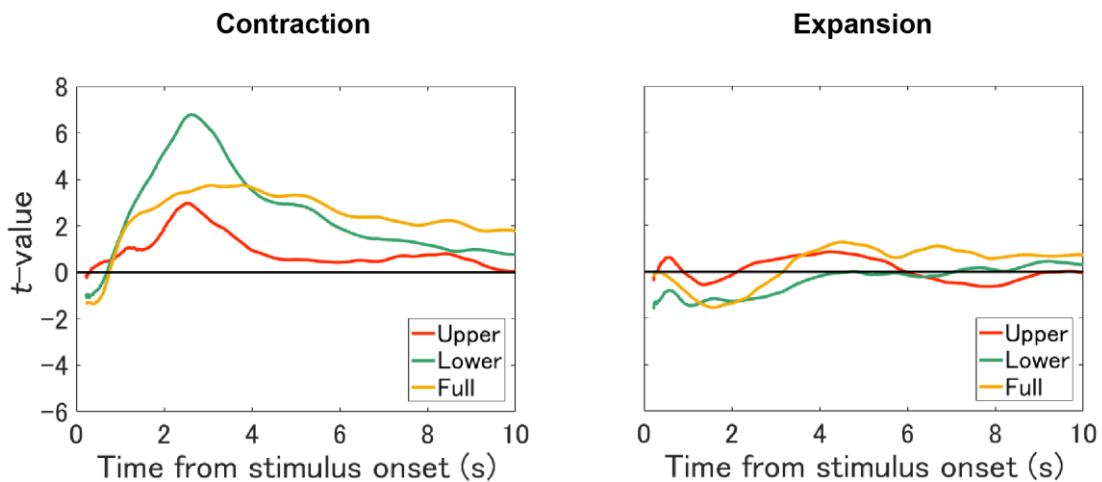


図 2-4. 各視野条件とオプティックフロー方向条件における, 頭部の初期位置と比較した t 値の継時変化. 縦軸の正負はそれぞれ前方向と後方向への頭部位置変化を表す.

各試行における, 全体的な頭部位置の偏位を, オプティックフロー呈示中の頭部位置変化の平均として計算した. 頭部偏位は以下の式で

定義された。

$$\text{頭部偏位} = \frac{1}{N} \sum_n^N x_n \quad (2-1)$$

式 2-1 において、 x は各時点の頭部位置、 N は 1 試行の頭部位置データのサンプル数を表す。

更に、頭部偏位の絶対値を試行毎に算出し、頭部位置変動量の指標とした。これらの指標を算出後、各参加者について実験条件毎に指標を平均した。

図 2-5 に、試行前後半それぞれについて、頭部偏位の参加者間平均を示す。試行前半の頭部偏位について分散分析を実施した結果、オプティックフロー方向の有意な主効果が得られ、拡大・縮小刺激間で頭部偏位の方が異なることが示された ($F(1, 8)=8.14, p=.021, \eta^2=0.262$)。その一方で、視野の主効果は有意ではなかった ($F(2, 16)=1.78, p=.200, \eta^2=0.024$)。また、オプティックフロー方向と視野の間に有意な交互作用が得られた ($F(2, 16)=6.07, p=.011, \eta^2=0.089$)。追加分析の結果、全視野条件 ($F(1, 8)=6.78, p=.031, \eta^2=0.374$) と下視野条件 ($F(1, 8)=10.21, p=.013, \eta^2=0.476$) でオプティックフロー方向の有意な単純主効果があったが、上視野条件では有

意ではなかった ($F(1, 8)=0.57, p=.474, \eta^2=0.021$). また, 縮小刺激では有意な視野の単純主効果が得られたが ($F(2, 16)=7.45, p=.005, \eta^2=0.225$), 拡大刺激では有意ではなかった ($F(2, 16)=1.14, p=.345, \eta^2=0.054$). 縮小刺激条件における視野条件間の多重比較の結果, 下視野条件と全視野条件は上視野条件よりも前方への頭部偏位が大きいことが明らかになった ($t(8)=4.20, p=.009; t(8)=2.75, p=.025$). 一方で, 下視野条件と全視野条件の間に有意差はなかった ($t(8)=0.26, p=.803$). 試行後半の頭部偏位についても試行前半と同様に分散分析を実施した結果, 視野の主効果が有意であり ($F(2, 16)=4.25, p=.033, \eta^2=0.036$), オプティックフロー方向 ($F(1, 8)=2.82, p=.132, \eta^2=0.059$) および 2 要因の交互作用 ($F(2, 16)=0.473, p=.632, \eta^2=0.010$) は有意ではなかった. 多重比較の結果, 全視野条件が上視野条件よりも頭部偏位が大きいことが示されたが ($t(8)=3.02, p=.049$), 上視野条件と下視野条件 ($t(8)=1.88, p=.097$), 全視野条件と下視野条件 ($t(8)=1.08, p=.313$) の間に有意差はなかった.

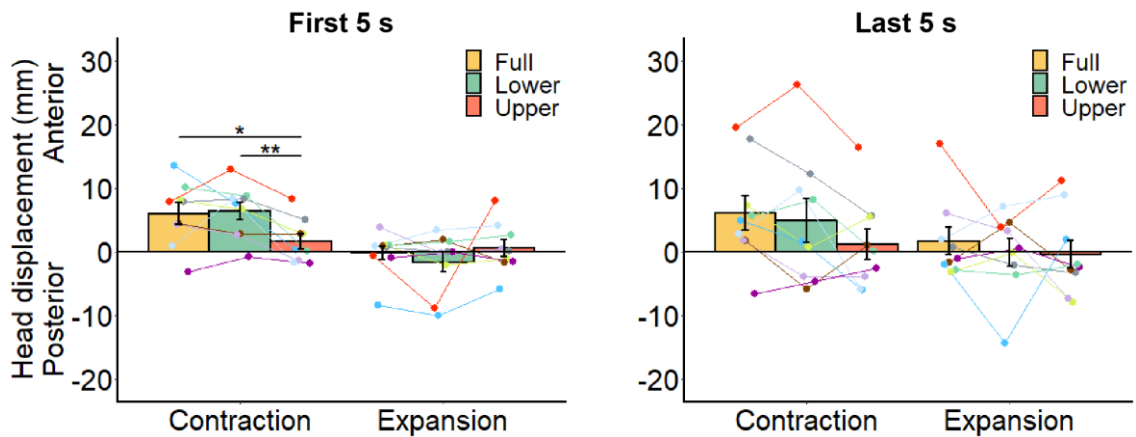


図 2-5. 各視野条件とオプティックフロー方向条件における頭部偏位の平均. 頭部偏位は試行の前半 5 秒と後半 5 秒に分けて算出された. エラーバーは標準誤差を表す. 折れ線は個人の結果を示す. * $p < .05$, ** $p < .01$.

図 2-6 に、試行前後半それぞれについて、頭部偏位の絶対値の参加者間平均を示す。試行前半の頭部偏位絶対値について分散分析を実施した結果、オプティックフロー方向の主効果は有意であったが ($F(1, 8) = 10.58$, $p = .012$, $\eta^2 = 0.134$)、視野の主効果は有意ではなかった ($F(2, 16) = 2.37$, $p = .125$, $\eta^2 = 0.060$)。また、2 要因の有意な交互作用が得られた ($F(2, 16) = 8.27$, $p = .003$, $\eta^2 = 0.080$)。全視野条件 ($F(1, 8) = 18.46$, $p = .003$, $\eta^2 = 0.364$) と下視野条件 ($F(1, 8) = 9.12$, $p = .017$, $\eta^2 = 0.185$) ではオプティックフロー方向の単純主効果が有意だったが、上視野条件では有意ではなかった ($F(1, 8) = 0.02$, $p = .891$, $\eta^2 = 0.001$)。また、縮小刺激では視野の単純主効果が有意だったが ($F(2, 16) = 5.52$, $p = .015$, $\eta^2 = 0.241$)、拡大刺激では有意ではなかった ($F(2, 16) = 0.76$, $p = .482$, $\eta^2 = 0.026$)。縮小刺激条件における視野条件間の

多重比較の結果，下視野条件と全視野条件は上視野条件に比べて頭部偏位の絶対値が大きいことが示されたが ($t(8)=3.44, p=.026$; $t(8)=2.52, p=.036$)，下視野条件と全視野条件の間に有意差はなかった ($t(8)=0.13, p=.904$)。試行後半の頭部偏位絶対値についても試行前半と同様に分散分析を実施した結果，オプティックフロー方向 ($F(1, 8)=2.35, p=.164, \eta^2=0.048$)と視野 ($F(2, 16)=0.40, p=.679, \eta^2=0.006$)の主効果，および2要因の交互作用はいずれも有意ではなかった。しかしながら，縮小刺激では下視野条件と全視野条件の頭部偏位絶対値が上視野条件に比べて大きいなど，全体的な傾向は試行前半と一致した。

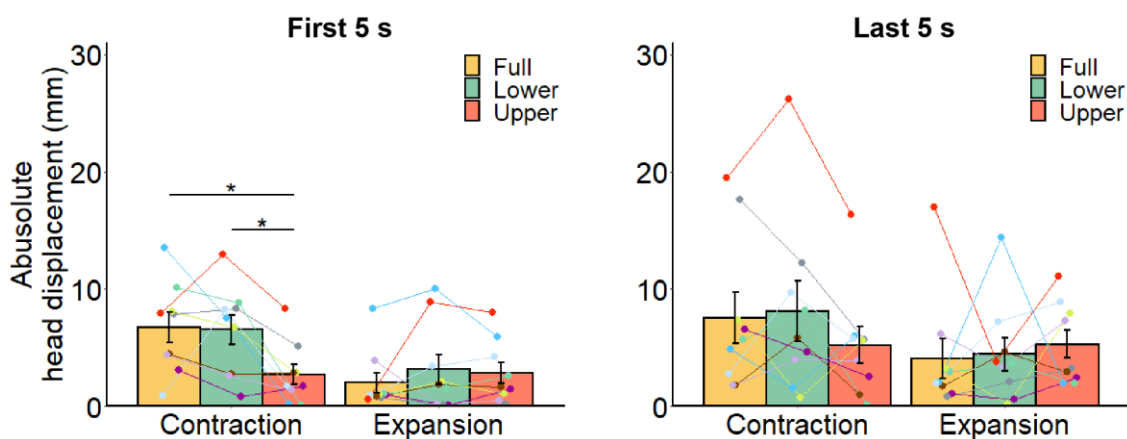


図 2-6. 各視野条件とオプティックフロー方向条件における頭部偏位絶対値の平均。頭部偏位絶対値は試行の前半 5 秒と後半 5 秒に分けて算出された。エラーバーは標準誤差を表す。折れ線は個人の評定値を示す。* $p<.05$ 。

2.3.3. 頭部運動とベクシヨンの相関

個人の頭部偏位とベクシヨン強度の関係を検討するため，各オプテ

ティックフロー方向，視野条件において相関分析を実施した．しかしながら，いずれの条件においても有意な相関は見られなかった（図 2-7）．

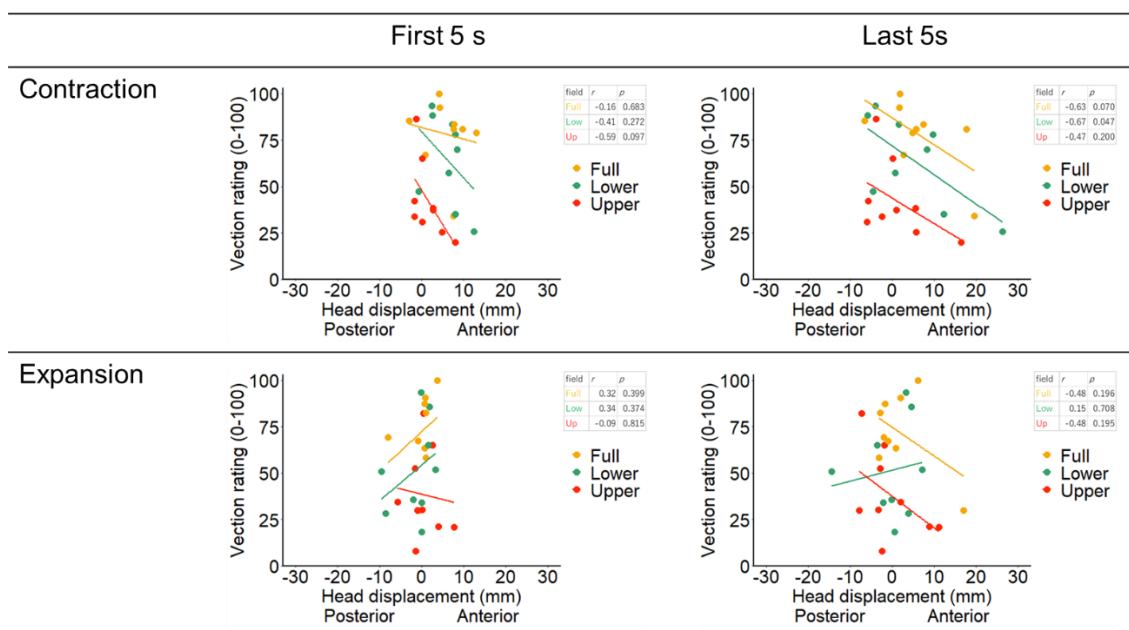


図 2-7. 各視野条件とオプティックフロー方向条件における，個人の頭部偏位とベクション評定の相関．頭部偏位は試行の前半 5 秒と後半 5 秒に分けて算出された．

2.4. 考察

2.4.1. 研究 1 のまとめ

本研究では，下視野に呈示されたオプティックフローが姿勢制御において強い影響を有するかどうかを検討した．この仮説は多くの先行研究で示唆されてきたが（Agathos, Bernardin, Baranton, Assaiante, & Isableu, 2017; Baumberger et al., 2004; Flückiger & Baumberger, 1988; Gibson, 1950; Pevic, 1998; Tamada & Seno, 2015），これまでに実験的な検討は行われなかった．本研究から，縮小刺激では，下視

野に呈示されたオプティックフローは上視野に呈示された場合よりも大きな頭部運動を誘発することが示された。また、頭部運動におけるオプティックフロー方向の効果は全視野条件と下視野条件のみで有意であるという結果も得られた。これらの結果から、姿勢制御において下視野の視覚情報が強い影響を有するという仮説が支持された。これらの主要な結果に加え、本研究では先行研究と同様に、下視野に呈示されたオプティックフローによって、上視野に呈示された場合よりも強いベクシオンが生じることが示された (Sato et al., 2007; Telford & Frost, 1993)。

2.4.2. 下視野の生態学的役割

姿勢制御における下視野の影響は、生態学的観点から解釈が可能である (Gibson, 1950; Previc, 1998)。地面の近くに位置する物体は直立姿勢では下視野に投射されるが、地面付近の物体は常に静止している可能性が高く、そのため下視野から得た視覚運動は自己運動の手がかりとして信頼性が高い (Gibson, 1950)。過去の研究ではこのような生態学的妥当性が主張されてきたが、上下視野間の直接的な比較は行われていなかった (Agathos et al., 2017; Baumberger et al., 2004; Flückiger & Baumberger, 1988; Gibson, 1950; Previc, 1998; Tamada & Seno, 2015)。本研究は、姿勢制御における下視野視覚情報の生態学的妥当性を実験的に支持する結果となった。上視野のオプティックフロ

ーが姿勢応答をむしろ抑制している可能性も考えられるが、全視野条件のベクシオンが下視野条件よりも強かった結果を踏まえると、上視野は単純に姿勢制御への影響が弱いとみなす方が適切であると考えられる。

頭部運動における下視野の優位性は、地面に関連した生態学的妥当性だけでなく、オプティックフローと身体の距離が関係している可能性が考えられる。本研究では、参加者の視点を中心に白球を配置した。この場合、下側のオプティックフローと参加者の下肢の距離は、上側のオプティックフローと頭頂の距離よりも小さくなる。オプティックフローの上下の距離が VEPR に与える影響は検討されていないが、いくつかの研究では、オプティックフローの水平距離が短いほど姿勢制御への影響が大きいことが報告されている (Barela, Sanches, Lopes, Razuk, & Moraes, 2011; Godoi & Barela, 2008; Kapoula & Lê, 2006; Lê & Kapoula, 2006; Moraes, De Freitas, Razuk, & Barela, 2016; Moraes, Lopes, & Barela, 2009)。今後の研究ではオプティックフローと身体の距離も考慮した検討が必要である。

2.4.3. 網膜座標と環境座標

本研究で示された下視野の優位性がどのような座標系に基づくのかは不明瞭である。地面を想起するオプティックフローが自己運動の手がかりとして信頼性が高いことに起因するならば (Gibson, 1950), 網

膜中心座標における下視野というより、環境中心座標における下側のオプティックフローがベクシオンや姿勢応答を促進すると考えられる。本研究では立位で実験を行い、網膜中心座標と環境中心座標の縦軸が一致していた。そこで追加実験として、側臥位の参加者に対して半視野のオプティックフローを呈示し、2つの座標軸が直交する状況で下視野の優位性を検討した (Fujimoto & Ashida, 2020; 図 2-8)。この実験では身体全体の向きを操作したため、身体中心座標の変化とも捉えることができるが、ここでは、網膜座標系と呼称する。なお、側臥位では姿勢応答が測定できないため、この実験ではベクシオンのみを測定対象とした。

実験の結果、立位・側臥位条件共に、下視野条件は上視野条件に比べてベクシオンが強く、網膜中心座標の重要性が示された (図 2-9)。これは、基礎的な視覚情報処理における下視野の鋭敏性を反映したものであると考えられる (Previc, 1998)。これらの下視野優位性は、自己身体や地面が、知覚と運動において頻繁に参照されるという生態学的な背景の下で発達した可能性がある。一方で、座位の下視野条件は側臥位の下視野条件よりもベクシオン評定が高く、網膜中心座標と環境中心座標の一致がベクシオンを促進することが示唆された。また側臥位条件において、右側臥位の右視野、左側臥位の左視野条件は反対の視野条件に比べてベクシオン評定が高く、環境中心座標における下

側へのオプティックフロー呈示がベクシオンを促進することが示唆された（図 2-10）。これらの結果から，環境中心座標における「地面」側のオプティックフローがベクシオンを促進することが示された。この追加実験ではベクシオンのみを測定したが，姿勢応答においても同様の特性がある可能性が考えられる。

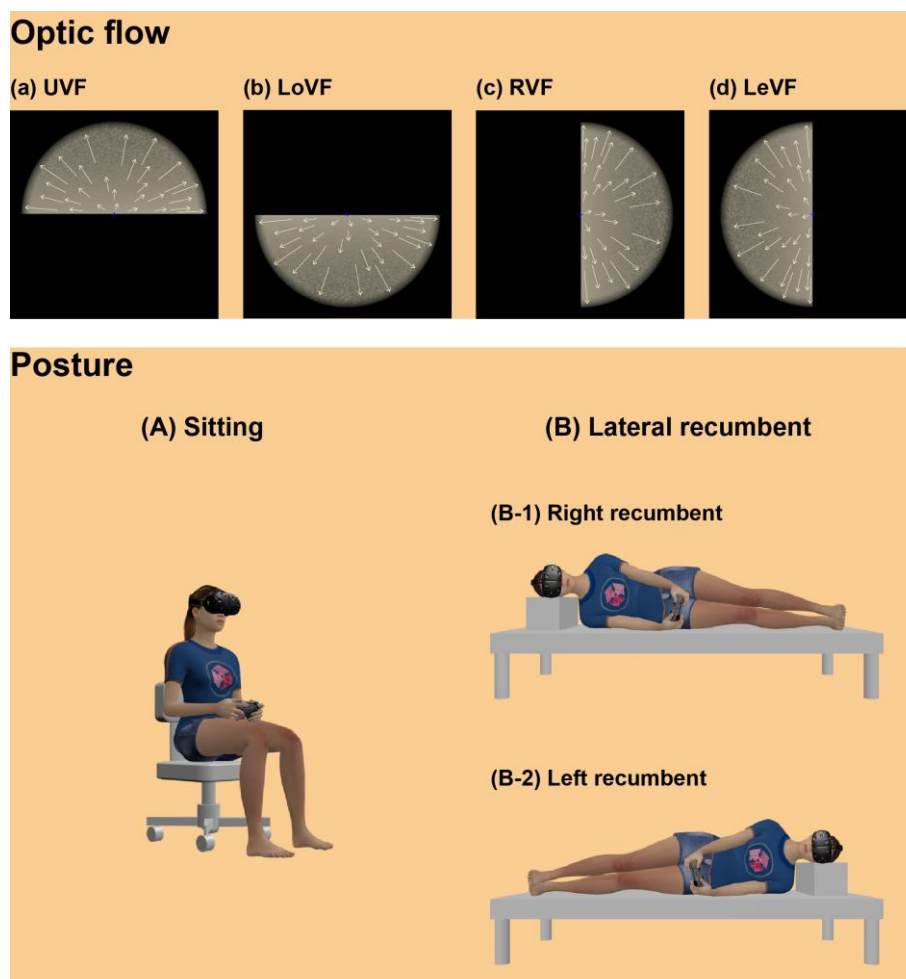


図 2-8. 視覚刺激（上図）と観察姿勢（下図）。オプティックフローが(a)上，(b)下，(c)右，左(d)の視野に呈示された。参加者は (A)座位，(B)側臥位姿勢で刺激を観察した。参加者の半数は (B-1)右側臥位，もう半数は (B-2)左側臥位で側臥位条件の課題に取り組んだ。

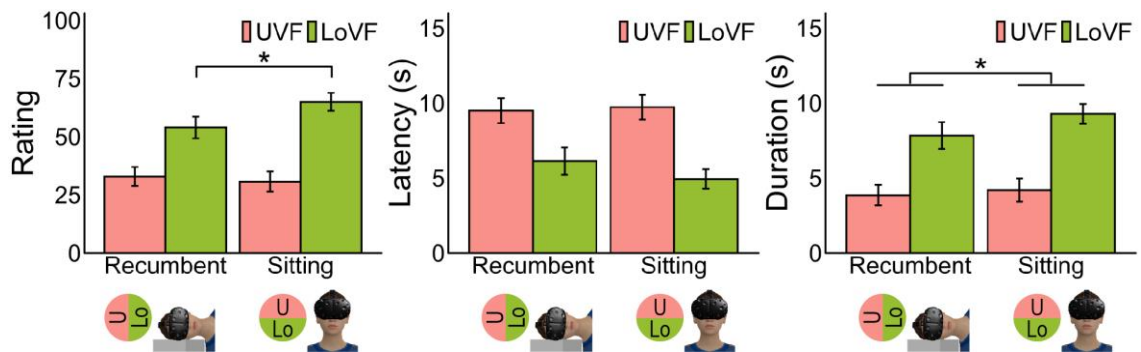


図 2-9. 各姿勢条件と視野条件におけるベクシオン指標の平均。エラーバーは標準誤差を表す。* $p < .05$

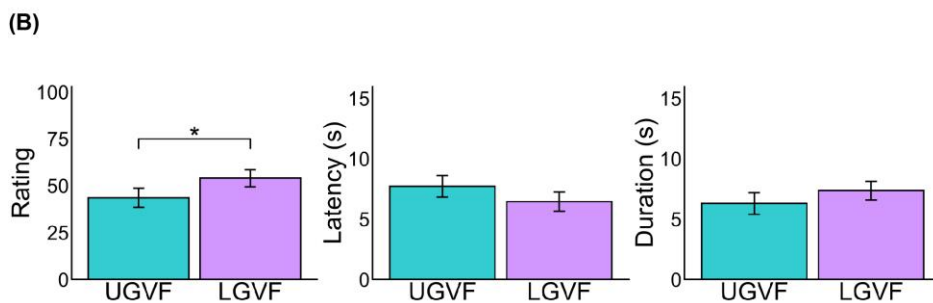
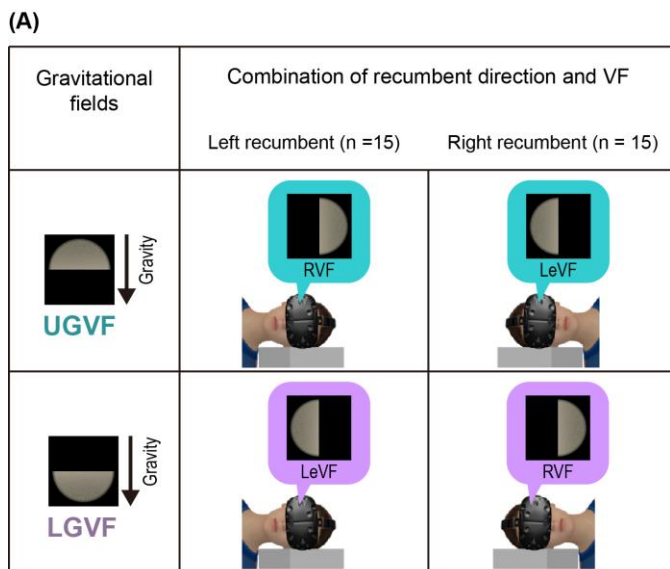


図 2-10. (A) 側臥位条件における上側重力視野 (Upper gravity visual field; UGVF) と下側重力視野 (Lower gravity visual field; LGVF) の図示と (B) UGVF と LGVF におけるベクシオン指標の平均値。右側臥位における右視野条件および左側臥位における左視野条件を LGVF, 反対の視野を UGVF と定義した。エラーバーは標準誤差を表す。* $p < .05$

2.4.4. 注意の影響

姿勢制御における下視野の優位性には上下視野間の注意のバイアスが関与する可能性が考えられる (Dobkins & Rezac, 2004; He et al., 1996). 二重課題が VEPR (Kuno et al., 1999) とベクシヨン (Seno, Ito, & Sunaga, 2011) の双方を抑制することから, 本研究で示された下視野の優位性は, 下視野への注意配分が上視野に比べて大きかったことに起因する可能性がある. ただし, 過去に報告されてきた注意のバイアスは知覚におけるバイアスと混同されている可能性が指摘されている (Carrasco et al., 1998, 2002; Talgar & Carrasco, 2002). ベクシヨンにおいても, 2 種類のオプティックフローが同時呈示された時には, 注意を向けていない方のオプティックフローに対してベクシヨンが生じるという, 前述の報告とは一見対立する結果も報告されている (Kitazaki & Sato, 2003). こうした研究間の相違は, 前者は認知資源, 後者は空間的注意といった, それぞれ注意の異なる側面に着目していることが原因と考えられる. 注意が VEPR やベクシヨンを促進するかどうか, 下視野の優位性が注意と関連しているかについては, 注意の様々な側面を考慮した更なる検討が必要である.

2.4.5. 拡大・縮小刺激間の非対称性

本研究の姿勢応答の結果において, 拡大刺激で視野の有意な効果が得られなかった. こうした傾向は Holten et al., (2013) の実験でも報

告されている。Holten et al., (2013)はオプティックフローの剛性と速度がVEPRに与える影響を検討し、縮小刺激ではこれらの影響を示したが、拡大刺激では影響が見られなかった。Wei et al., (2010)も同様に、オプティックフロー速度がVEPRに及ぼす影響を検討したが、縮小刺激に比べて拡大刺激では、オプティックフロー速度の効果は限定的であった。拡大刺激でオプティックフローの影響が乏しいことを説明する仮説は主に2つ考えられる。まず、縮小刺激に比べて拡大刺激の検出感度が低いことに起因する可能性が考えられる (M. Edwards & Badcock, 1993; M. Edwards & Ibbotson, 2007; Raymond, 1994)。ただし、拡大刺激の方が感度に優れるという報告もあり (Ball & Sekuler, 1980; Shirai & Yamaguchi, 2004)、拡大・縮小刺激間の知覚的非対称性について議論が続いている点に留意が必要である。2つ目の可能性として、直立姿勢から前方向に傾斜する場合に比べて、後方向への傾斜は可動域が小さいという生体力学的観点からも拡大・縮小間の非対称性を説明できる (M. Edwards & Ibbotson, 2007; Holten et al., 2013; Lestienne et al., 1977; Palmisano, Pinniger, Ash, & Steele, 2009)。拡大刺激で視野の有意な効果が得られなかったのは、後方の可動域が小さく、精密な姿勢制御が困難であったことに起因する可能性がある。拡大刺激において、視野間で姿勢制御信号が同等であったのか、あるいは生体力学的制約によって姿勢反応が抑制されたのかは今回の結

果から直接的には示されていない。しかしながら、ベクシオンでは拡大刺激であっても視野の有意な効果を得たことから、後者の可能性がより尤もらしいと考えられる。

2.4.6. 試行後半の頭部運動

図 2-4, 2-5 に示されたように、試行後半では頭部運動に参加者間のばらつきが見られた。これは固有受容感覚・前庭感覚から知覚された身体傾斜に対する補正反応の個人差を表していると考えられる。身体バランスの制御は視覚、前庭感覚、固有受容感覚の動的なフィードバックによって行われ、各感覚信号の信頼性に基づいてモダリティ間の重みづけが行われる (Goodworth, Mellodge, & Peterka, 2014; L. Nashner & Berthoz, 1978; Peterka, 2002; Peterka & Benolken, 1995; Peterka & Loughlin, 2004)。試行後半における頭部運動の個人差は、身体傾斜に伴う動的な重みづけプロセスの個人差を反映した可能性が考えられる。

2.4.7. ベクシオンと VEPR

これまでの研究から、ベクシオンと VEPR の間に共通する神経基盤の存在が示唆されている。例えば、ベクシオン知覚中の身体動揺は非知覚時に比べて増大する (Freitas Júnior & Barela, 2004; Tanahashi et al., 2007; Thurrell & Bronstein, 2002)。また、安静立位時の身体動揺指標から個人のベクシオン強度を予測できることが示唆されている

(Apthorp et al., 2014; Palmisano et al., 2014, 2018). 更に, オプティックフローの面積 (Kawakita et al., 2000), 速度 (Kuno et al., 1999; Lestienne et al., 1977), 密度 (Lubeck et al., 2015)といったパラメータの操作に対するベクシオン強度と VEPR の変化が一致することが報告されている.

本研究では, ベクシオンにおける視野の効果は部分的に頭部運動の結果と一致した. 先行研究と同様に, 下視野に呈示されたオプティックフローは上視野に比べて強いベクシオンを誘発した (Sato et al., 2007; Telford & Frost, 1993). ベクシオンの結果と同様に, 下視野条件では上視野条件に比べて大きい頭部運動を誘発したが, このような視野の効果は縮小刺激における試行前半の時間領域で統計的に支持された. 今回部分的に示されたベクシオンと頭部運動の一致は, ベクシオン強度と VEPR の相関を示した過去の報告と合致する (Kawakita et al., 2000; Kuno et al., 1999; Lestienne et al., 1977; Lubeck et al., 2015).

下視野条件と全視野条件の比較では, ベクシオンと頭部運動の結果に差異が認められた. 全視野条件が下視野条件に比べて強いベクシオンを誘発した結果は, 刺激の呈示面積の増大に伴いベクシオン強度が増大した過去の報告と一致する (Brandt et al., 1973; Nakamura, 2001). しかしながら, 頭部運動指標においては, 下視野条件と全視野

条件の間に統計的有意差は認められなかった。この結果は、姿勢制御において下視野の影響がベクシヨンに比べて大きいことに起因するかもしれない。一方で、身体傾斜における安定性限界により、頭部偏位に天井効果が生じたためである可能性が考えられる。いずれにせよ、下視野条件と全視野条件の比較においてベクシヨンと頭部運動の指標間に差異があったことから、姿勢制御と自己運動感覚の情報処理は部分的には異なることが示唆される (Previc, 1992; Previc & Mullen, 1991).

先行研究と同様に、本研究では、拡大・縮小刺激間の非対称性はベクシヨン (Berthoz et al., 1975; Bubka, Bonato, & Palmisano, 2008; Ito & Shibata, 2005; Seno et al., 2010; Shirai, Endo, Tanahashi, Seno, & Imura, 2018)と頭部運動 (Holten et al., 2013; Lestienne et al., 1977; Palmisano et al., 2009)の両方で一貫して認められた。今回支持された拡大・縮小刺激間の非対称性には、自己運動経験の関与が指摘されている (Bubka et al., 2008)。感覚統合システムは過去の感覚体験を曝露歴 (Exposure History)として蓄積しており、新たに経験した感覚を過去の経験と都度比較していると考えられている (Held, 1961)。Bubka et al., (2008)によれば、前方向への移動の経験により、拡大オプティックフローと前進方向の前庭刺激が連合され、その結果、前庭刺激を伴わない拡大オプティックフローに対してはベクシヨンが抑制され

るというメカニズムが提案されている。一方で、日常生活において後方向への移動経験は乏しい傾向にあり、曝露歴が蓄積されにくい。その結果、縮小オプティックフローに対してはベクシヨンの抑制が弱くなり、拡大オプティックフローに比べて強いベクシヨンが生じると考えられる。同様のメカニズムは、VEPRでの拡大・縮小刺激間の非対称性においても想定される (Holten et al., 2013; Palmisano et al., 2009)。

拡大・縮小刺激間の非対称性には、視運動性眼振 (Optokinetic Nystagmus: OKN)の関与も指摘されている。ベクシヨンとOKNは前庭神経核等の領域で共通に処理されることが示唆されており (Brandt et al., 1974), 両者の反応の一致が報告されている (Brandt et al., 1974, 1973; Flanagan, May, & Dobie, 2002; Schor, Lakshminarayanan, & Narayan, 1984; Seya, Shinoda, & Nakaura, 2015)。Senoら(2009, 2010)の一連の研究によれば、鼻側網膜に投射された耳-鼻方向の視運動は、それ以外の網膜位置、視運動方向の組み合わせに比べてベクシヨンを促進する。このような視運動刺激は、縮小オプティックフロー呈示時にも網膜に投射される。同様の視運動刺激がOKNも促進することから (Murasugi, Howard, & Ohmi, 1986), OKNと共通の処理機構がベクシヨンにおける拡大・縮小刺激間の非対称性に関与する可能性が指摘されている (Seno et al., 2010)。本研究ではOKNとVEPRの関係

性は検討対象としていないが、今回示された頭部運動における拡大・縮小刺激間の非対称性にも、ベクシヨンと同様に OKN の関与が考えられる。

2.5. 結論

本研究から、下視野に呈示されたオプティックフローが上視野に比べて大きい頭部運動反応を誘発することが示された。頭部運動の結果と同様に、上視野条件に比べて下視野条件で強いベクシヨンが生じた。本結果から、ベクシヨンと同様に、姿勢制御においても生態学的妥当性の重要性が示唆された。

第3章

研究2 風景の傾きに対する姿勢調整

3.1. 研究背景

視覚的な姿勢制御は、動的な視覚情報だけでなく静的な視覚情報によっても行われる。人間は風景から重力方向を推定することができる。推定された重力方向に体軸を合わせることは姿勢の安定化に寄与する。実際に、視覚的な傾きが姿勢制御に影響を与えうることがいくつかの研究で報告されている (M. Guerraz et al., 2001; Isableu et al., 1997; Ohmura et al., 2017; Tsuruhara & Kaneko, 2006)。しかしながら、視覚的な傾きに対して姿勢応答がどのような反応を示すかについては十分な検討がなされておらず、傾きの知覚との比較もなされていない。

垂直知覚が姿勢制御機構と共通の空間座標表現を有していると仮定すると、垂直知覚のモデルを姿勢制御にも適用できる可能性がある。主観的垂直はロッドを垂直に調整する課題によって測定され、調整されたロッドの方位は主観的視覚垂直 (Subjective visual vertical: SVV) と呼ばれる。SVV は視覚的な傾きに影響を受ける場合があり、特に四角いフレームの傾きによって SVV が垂直から逸脱する現象をロッドフレーム錯視と呼ぶ (Witkin & Asch, 1948)。ロッドフレーム錯視は

ロッドの傾きだけでなく、観察者の身体が傾いて感じられる錯覚も誘発する (Cian et al., 1995; Ebenholtz & Benzschawel, 1977; Sigman et al., 1979). こうした錯覚現象は、観察者の環境座標における垂直軸がフレームの傾き方向に逸脱することで生じると考えられている (Dassonville & Reed, 2015; Ebenholtz & Benzschawel, 1977; Sigman et al., 1979).

ロッドフレーム錯視の錯視量はフレーム角度に対して線形には増加せず、 90° 周期で正弦波様に変化する (Alberts, de Brouwer, Selen, & Medendorp, 2016; Beh, Wenderoth, & Purcell, 1971; Oltman, 1968; Vingerhoets, De Vrijer, Van Gisbergen, & Medendorp, 2009). これは、正方形のフレーム自体が 90° 毎に相似形になることを踏まえれば自然であるように見える. しかしながら、実際にはこうした SVV の錯視は四角いフレームだけでなく単一線分を用いた場合にも生じ (Li & Matin, 2005b, 2005a), その錯視量の周期はフレームと同様に 90° である (Vingerhoets et al., 2009). フレームの各辺の角度を独立に操作した実験から、ロッドフレーム錯視は実際には単一線分から誘発される錯視の総和から成り立つことが示唆されている (Lunsford & Dannemiller, 2006). ロッドフレーム錯視の周期性に関するこれらの知見は、重力手がかりとしての線分の多義性から解釈が可能である. つまり、重力手がかりとして呈示された線分は、重力に対して平行で

あるか、または直交する可能性が高く、線分の角度に応じ平行・直交の可能性が相対的に増減することでロッドフレーム錯視に周期性が生じると考えられる。Mittelstaedt (1983, 1986)は、こうした周期的な SVV 変化が視覚的な垂直軸、重力軸、観察者の身体軸の合成ベクトルで表現されることを示した。フレーム角度に対する SVV の変化についてはこのように詳細に検討されているが、姿勢応答においても SVV と同様の周期性が得られるかどうかは明らかではない。

日常的なシーンにおける傾きは実際には多義的であり、複数種類の傾き手がかりが存在する (Haji-Khamneh & Harris, 2009; Harris, Dyde, & Jenkin, 2007; Harris, Jenkin, Dyde, & Jenkin, 2011; Mittelstaedt, 1986)。Mittelstaedt (1986)は、視覚手がかりをシーン傾斜の倍数成分の総和で表現し、各周期が SVV に与える寄与を検討した。その結果、1, 2, 4 倍周期成分の寄与が高いことが示された。Harris et al. (2007)はこの3つの周期成分をそれぞれフレームベクトル (4 倍 [90°] 周期)、水平線ベクトル (2 倍 [180°] 周期)、極性ベクトル (1 倍 [360°] 周期)と意味付けた。フレームベクトルはシーン内の線分の方位から得られる空間の傾きであり、多くの線分が重力に対して平行あるいは直交するという仮定に支えられていると考えられる。水平線ベクトルはシーン内の水平線から得られる空間の傾きであるが、水平線が可視化されていない状況でも水平線ベクトルの寄与が認められ

る場合がある (Haji-Khamneh & Harris, 2009). 極性ベクトルは家具や車といった日常物体から得られる空間の傾きであり, 重力方向に沿って物体が正立するという事前知識に基づいて推定されると考えられる. Harris et al. (2007)や Haji-Khamneh et al. (2009)が定義するこれらの視覚手がかりは, SVV ではなく主観的上方 (Perceptual upright: PU)の測定で導入された点に留意する必要がある. SVV (Mittelstaedt, 1986)と PU (Haji-Khamneh & Harris, 2009; Harris et al., 2007)は共にベクトル合成モデルで表現されるが, PUは文字認識課題によって測定され, 物体認知過程に関連すると考えられる. こうした多層的な視覚手がかりは SVV や PU に影響を与えることが報告されているが, 姿勢制御システムに対してどの程度影響するかは不明である.

そこで, 研究 2 では, 日常的なシーンにおける姿勢応答と SVV を測定し, シーンの傾きに対する姿勢応答の特性を検討した. 実験から得たデータは Mittelstaedt のベクトル合成モデルで近似し (Dyde, Jenkin, & Harris, 2006; Haji-Khamneh & Harris, 2009; Harris et al., 2007; Mittelstaedt, 1986), 得られたパラメータの値から各視覚手がかりの実質的・相対的寄与を検討した. また姿勢応答と SVV の相関分析を行い, シーンの傾斜により知覚された身体傾斜 (Cian et al., 1995; Ebenholtz & Benzschawel, 1977; Sigman et al., 1979)が姿勢の補償反

応を引き起こすかどうかを検討した。

3.2. 方法

3.2.1. 実験参加者

前庭疾患の既往歴がない京都大学の学生 16 名が参加した（男性 8 名，女性 8 名，平均年齢 21.88 歳，SD = 2.03）。いずれの参加者も裸眼，またはコンタクトで矯正した正常視力を有した。研究 1 同様，実験開始前に実験目的を説明し，書面にて実験参加の同意を得た。

3.2.2. 実験装置

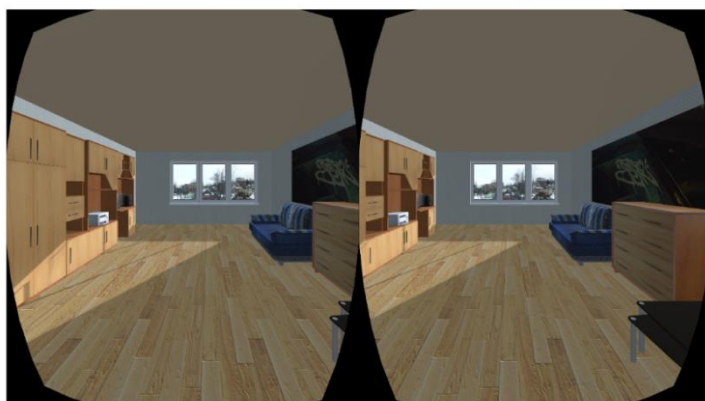
視覚刺激呈示には HMD (Oculus Rift CV1) を使用した（研究 1 参照）。Rift のヘッドトラッキングシステムにて HMD の位置と方位が記録された。実験は Windows 10 を搭載した PC で制御し，Xbox One コントローラで参加者の反応を取得した。

3.2.3. 刺激

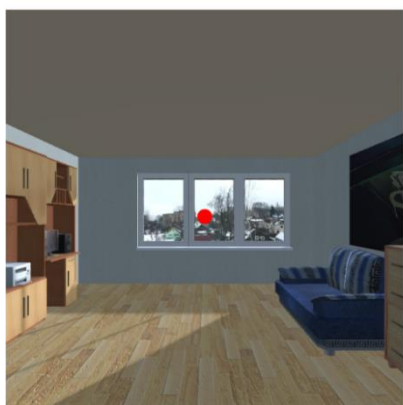
VR 空間内の視覚刺激は Unity エンジン 5.3.1 にて作成され，両眼視差を伴って呈示された。VR 上で，家具を配置した部屋のシーンを両眼視差付きで呈示した（図 3-1）。部屋の寸法は幅 17.5m，高さ 7m，奥行き 25m に設定された。VR 上のカメラは高さ 4m の位置に，壁に背を向けて設置された。シーンは -165° から 180° の範囲でロール軸に傾いて呈示され， 15° の間隔で 24 水準の傾き条件を有した。半数の試

行ではレイアウトが反転したシーンを呈示した。頭部運動測定課題ではシーンの中央に注視点が呈示され、3Hzの頻度で赤、緑、青、黄色のいずれかの色にランダムに切り替わった。ロッド調整課題では注視点の代わりに緑色の線分（ロッド）が呈示された。ロッドの初期角度は試行毎にランダムに選択された。

(a) VR Display



(b) Head measurement



(c) Rod adjustment



図 3-1. (a)HMD を通して呈示された VR 内の部屋。頭部運動測定では (b)、参加者は部屋中央の点が赤く点滅した回数をカウントした。ロッド調整課題では (c)、参加者は部屋中央のロッドの角度を垂直に調整した。図において、点とロッドの表示は強調されている。

3.2.4. 手続き

姿勢応答と知覚課題が相互に影響する可能性を考慮し、頭部運動測定と SVV 測定は分けて行った。

頭部運動測定では、参加者は靴を脱いで両足を揃えて立ち、コントローラを身体の前で保持した。刺激の呈示順序はブロック内で無作為化された。各試行でシーンが 10 秒間表示され、参加者はその間に注視点の色が赤色に変化した回数をカウントした。シーンの呈示中に、HMD のトラッキングシステムにて参加者の頭部運動が記録された。シーン終了後、参加者はコントローラにてカウントの結果を報告した。試行間には 10 秒間のインターバルが設けられた。インターバル中には黒い背景の中央に「休憩」と書かれた白い文字が呈示された。インターバル終了後、参加者は頭部を正面に調整してから次の試行を開始した（研究 1, 2.2.4.手続きを参照）。1 ブロックが終了する度に、参加者は十分な休憩を取ってから次のブロックを開始した。頭部運動測定は 1 ブロックにつき 12 試行で構成され、計 8 ブロック行われた。各ブロックには 24 の傾斜条件の内 12 条件がランダムに選択され、全ブロックを通して各条件が 4 回ずつ繰り返された。

ロッド調整課題では、参加者は椅子に座り、膝にコントローラを載せて課題に取り組んだ。各試行で、参加者はコントローラを用いてロッドの角度を垂直に調整した。調整が完了すると、参加者はコントロ

ーラのボタンを押して次の試行に取り組んだ。ロッド調整課題では 1 ブロックにつき各傾斜条件が無作為に 1 回ずつ呈示され、24 試行で構成されたブロックが計 4 ブロック繰り返された。

頭部運動測定とロッド調整課題の順序は参加者間でカウンターバランスが取られた。参加者が実験手続きに慣れるまで、本実験と同じ内容の練習課題を行った後、本実験を開始した。実験は 2 日にかけて実施され、各回の所要時間はおよそ 1 時間程度であった。

3.2.5. データ解析

頭部運動測定では、シーン呈示中に HMD から得られたロール軸の平均回転角度を試行毎に算出した。ロッド調整課題では、重力上の垂直に対するロッド角度の誤差を試行毎に算出し、SVV 誤差とした。

3.2.6. モデル

ベクトル合成モデル (Dyde et al., 2006; Mittelstaedt, 1983, 1986) を用いて、頭部運動と SVV における視覚手がかりの影響を推定した。このモデルでは、主観的垂直を重力ベクトル、体軸ベクトル、視覚手がかりベクトルの合成で表現した (式 3-1)。

$$\mathbf{s} = \mathbf{g} + \mathbf{b} + \mathbf{v} \quad (3-1)$$

式 3-1 において、 \mathbf{s} は主観的垂直ベクトル、 \mathbf{g} は重力ベクトル、 \mathbf{b} は体

軸ベクトル， \mathbf{v} は視覚手がかりベクトルを表し，右辺の各ベクトル長は手がかりの相対的寄与を表す．本研究はロール軸の主観的垂直のみを対象とするため，ベクトルは水平軸と垂直軸の2次元で表現された．本研究では直立姿勢で実験を行ったため，重力ベクトルと体軸ベクトルは常に平行であった．そのため，これらのベクトルを単一の単位ベクトルとした（式 3-2）．

$$\mathbf{g} + \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

式 3-2 の右辺において，第 1 要素は水平，第 2 要素は垂直の成分を表す．

本研究では視覚手がかりベクトルを周期の異なる 3 つのベクトルに分解し，4 倍周期のベクトルをフレームベクトル，2 倍周期のベクトルを水平線ベクトル，1 倍周期のベクトルを極性ベクトルと定義した．そこで， \mathbf{v} を式 3-3 のように展開した．

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{v}_f + \mathbf{v}_h + \mathbf{v}_p \\ &= w_f \begin{pmatrix} \cos 4\theta \\ \sin 4\theta \end{pmatrix} + w_h \begin{pmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{pmatrix} + w_p \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3-3)$$

式 3-3 において， \mathbf{v}_f ， \mathbf{v}_h ， \mathbf{v}_p はフレームベクトル，水平線ベクトル，極性ベクトルを表し， w_f ， w_h ， w_p は各視覚手がかりベクトルの相対

的寄与を表す。 θ はシーンの傾斜角度を示す。ここで、式 3-2, 3-3 を式 3-1 に代入し、

$$\mathbf{s} \begin{pmatrix} s_h \\ s_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_f \cdot \cos 4\theta + w_h \cdot \cos 2\theta + w_p \cdot \cos \theta \\ 1 + w_f \cdot \sin 4\theta + w_h \cdot \sin 2 \cdot \theta + w_p \cdot \sin \theta \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

とした。式 3-4 を用いて、 \mathbf{s} で表現されるベクトルが垂直ベクトルとなす角を、タンジェントの逆関数によって算出した。更に、主観的垂直の全体的な偏りを想定し、パラメータ α として導入した。そのため、本モデルは 3 つの視覚手がかりベクトルの長さとの全体的な偏位の 4 パラメータを有し、式 3-5 で表された。

$$\varphi = \alpha + \tan^{-1} \frac{s_h}{s_v} \quad (3-5)$$

式 3-5 において、 φ は頭部の傾き、または SVV 誤差を表す。

このモデルを本研究の結果に当てはめ、パラメータを推定した。推定には R パッケージの *lme4* (Bates, Mächler, Bolker, & Walker, 2015) に含まれる *nlmer* 関数を使用し、非線形混合モデルとして推定した。ベースラインの個人差を考慮し、 α をランダム効果として扱った。

更に、R の *nls* 関数を用いて個人毎のパラメータを推定し、パラメータ間の比較および相関分析を行った。

3.3. 結果

2名の参加者は1日目のみ実験に参加したため、頭部運動測定、ロッド調整課題のいずれも半数の試行のみ完了した。これらのデータも、全試行完了したデータ同様にパラメータ推定に使用された。

3.3.1. 視覚手がかりの実質的寄与

図 3-2 に、シーン傾斜に対する頭部回転と SVV 誤差をプロットした。各プロットにおける曲線はモデル推定の結果を表す。表 3-1 に、推定されたパラメータの値を記した。各視覚手がかりが実質的に推定に寄与したかどうかを検討するために、R パッケージの *ggstatsplot* (Patil, 2021) に含まれる *ggcoefstats* 関数を用いて各パラメータに対して 1 標本 *t* 検定を行った。その結果、 w_f , w_h , w_p はいずれも有意に頭部運動と SVV 誤差に影響を与えたことが示された (表 4-1)。 α の効果は有意ではなかった。

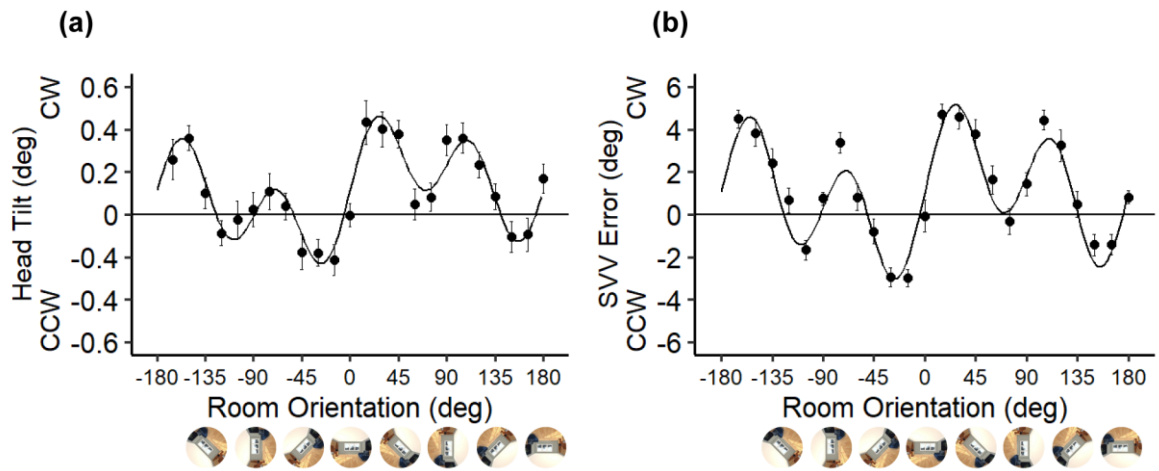


図 3-2. シーンの傾きに対する頭部回転 (a)と SVV 誤差 (b)の平均. SVV 誤差における縦軸の正負は, 重力上の垂直方向とロッドの調整角度の差を表す. エラーバーは標準誤差を示す. 曲線はベクトル合成モデルの推定結果を表す.

表 3-1. パラメータの推定値および 1 標本 t 値検定の結果.

	推定値	t (df)	p
頭部回転			
w_f	3.50E-03	10.25 (1434)	< .001
w_h	2.18E-03	6.40 (1434)	< .001
w_p	2.14E-03	6.27 (1434)	< .001
α	2.01E-03	1.85 (1434)	.064
SVV 誤差			
w_f	4.77E-02	20.50 (1434)	< .001
w_h	2.63E-02	11.25 (1434)	< .001
w_p	1.36E-02	5.83 (1434)	< .001
α	1.87E-02	1.76 (1434)	.078

3.3.2. 視覚手がかりの相対的寄与

個人毎に得た頭部回転と SVV 誤差のパラメータについて、視覚手がかりの種類（フレーム、水平線、極性）と課題の種類（頭部運動、ロッド調整）を要因とした 2 要因分散分析を実施した。その結果、視覚手がかり ($F_{2,30} = 25.57, p < .001, \eta^2 = 0.115$) と課題 ($F_{1,15} = 44.05, p < .001, \eta^2 = 0.382$) の有意な主効果が得られた。また視覚手がかりと課題の有意な交互作用が得られた ($F_{2,30} = 20.27, p < .001, \eta^2 = 0.098$)。追加分析の結果、SVV 誤差 ($F_{2,30} = 23.05, p < .001, \eta^2 = 0.346$) と頭部回転 ($F_{2,30} = 3.51, p = .043, \eta^2 = 0.095$) の両方において視覚手がかりの有意な単純主効果が見られた。また、全ての視覚手がかりにおいて課題の有意な単純主効果が得られた（フレーム: $F_{1,15} = 80.15, p < .001, \eta^2 = 0.725$; 水平線: $F_{1,15} = 16.23, p = .001, \eta^2 = 0.358$; 極性: $F_{1,15} = 8.84, p = .001, \eta^2 = 0.221$)。SVV 誤差における視覚手がかり間の多重比較の結果、フレーム手がかりは水平線手がかり ($t_{15} = 3.50, p = .003, d = 0.977$) および極性手がかり ($t_{15} = 7.50, p < .001, d = 1.880$) に比べて SVV への寄与が大きいことが示された。また、極性手がかりは水平線手がかりと比べて寄与が小さく ($t_{15} = 2.89, p = .011, d = 0.591$)、3 種類の手がかりの中で最も寄与が小さいことが示された。一方で、頭部回転における視覚手がかり間の多重比較では、フレームと水平線 ($t_{15} = 2.63, p = .057, d = 0.605$)、フレー

ムと極性手がかり ($t_{15} = 2.46, p = .057, d = 0.739$)の差は有意傾向に留まり，水平線と極性手がかり間には有意差が見られなかった ($t_{15} = 0.04, p = .965, d = 0.015$).

3.3.3. 頭部回転と SVV 誤差の相関

頭部回転と SVV 誤差の関係を検討するため，各視覚手がかりのパラメータについて，個人毎に算出した推定結果を用いて個人間の相関を分析した (表 3-2). しかしながら，フレーム，水平線，極性手がかりのいずれにおいても有意な相関は認められなかった.

表 3-2. 頭部回転と SVV 誤差における個人間の相関.

	r	p
w_f	0.075	0.784
w_h	-0.157	0.561
w_p	0.208	0.440

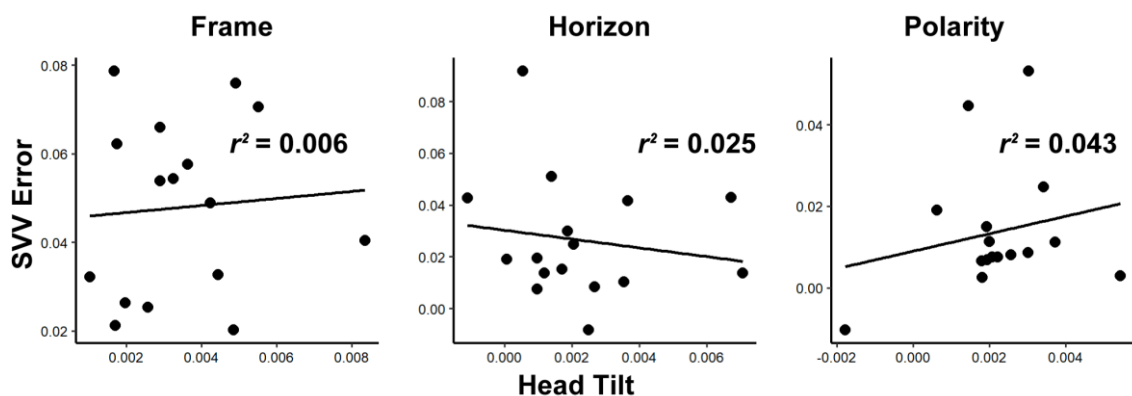


図 3-3. 頭部回転と SVV 誤差における個人間の相関. 点プロットの各データは参加者毎に推定されたパラメータを表す.

3.4. 考察

3.4.1. 研究 2 のまとめ

研究 2 では、シーンの傾きに対する頭部回転と SVV を測定した。その結果、頭部回転と SVV 誤差の両方において 3 種類の視覚手がかり（フレーム、水平線、極性）の実質的寄与が認められた。SVV 誤差ではフレーム手がかりが最も相対的寄与が高く、極性手がかりの相対的寄与は最も小さかった。頭部回転でも SVV 誤差と類似の応答パターンが見られたが、視覚手がかり間の相対的寄与に有意差は認められなかった。また、頭部回転と SVV 誤差の間には、個人間の有意な相関は見られなかった。

3.4.2. 視覚手がかりの実質的寄与

頭部回転（M. Guerraz et al., 2001; Isableu et al., 1997; Ohmura et al., 2017; Tsuruhara & Kaneko, 2006）および SVV 誤差（Alberts et al., 2016; Beh et al., 1971; Oltman, 1968; Vingerhoets et al., 2009）に対するフレーム手がかりの効果は過去の研究と一貫する。過去の研究では頭部回転における視覚傾斜の影響は 20° 前後のフレーム角度を対象に検討されていたが、本研究の網羅的なシーン傾斜の検討から、シーン傾斜に対する周期的な頭部回転の変化が示された。

本研究で見られたフレーム手がかりの影響は、生態学的要因に起因する可能性が考えられる。自然風景には水平・垂直線分が多く分布す

る (Coppola, Purves, McCoy, & Purves, 1998; Switkes, Mayer, & Sloan, 1978; Van Der Schaaf & Van Hateren, 1996). こうした自然風景の性質を利用した, シーン内の方位分布から重力方向を推定する視覚処理システムが本結果から示唆される.

シーン内に明示的な水平線がないにもかかわらず, 本研究では頭部回転と SVV 誤差の両方において水平線手がかりの寄与が認められた. この結果には, 呈示された部屋の縦横比が関与する可能性が考えられる. (Harris, Jenkin, Jenkin, Dyde, & Oman, 2010)は, ロール軸に傾いた部屋を呈示し, 部屋の壁から支持面 (足を乗せる面)を選択する課題を実施した. その結果, 視野を占める面積が大きい面ほど支持面として選択されやすいことが明らかになった. 本研究で呈示した部屋は横長の直方体であったため, 床および天井が支持面として認識されやすく, 暗示的な水平線手がかりとして機能した可能性が考えられる. 過去の研究では, ロッドフレーム錯視は線分の傾きの総和で表現され, フレーム構造の効果は小さいと考えられてきた (Li & Matin, 2005a, 2005b; Lunsford & Dannemiller, 2006). 水平線手がかりの効果を支えるメカニズムを明らかにするために, フレームの縦横比など, 視覚刺激の構造的な要因を検討する必要がある.

極性手がかりの影響からは物体認知過程の関与が示唆される. SVV 誤差における物体認知の影響は過去の研究でも報告されており, 本研

究結果と一貫する (Cian, Raphel, & Barraud, 2001). Cian et al. (2001) は、時計の文字盤の配列を時計回りまたは反時計回りにずらした図形をフレームとしてロッドフレーム課題を行い、こうした認知的な垂直方向のずれに対してロッドフレーム錯視が生じたことを報告した。Cian et al. (2001)では調整法による SVV 測定を行ったため、意識的な垂直方向の推定によってロッドの調整がなされた可能性があるが、本研究では頭部回転において極性手がかりの効果が見られたことから、より自動的な情報処理過程が垂直方向の脳内表現を支える可能性が示唆される。また、極性手がかりは個々の物体だけでなく、シーンの全体的なレイアウトからも得られる。シーン内の物体を個別に検討するには膨大な時間が必要となるのに対し、シーンの概要 (gist) はごく短時間で把握できる (Friedman, 1979; Oliva, 2005; Oliva & Torralba, 2006)。極性手がかりが物体認知とシーン知覚によって処理されるとすれば、シーン知覚による処理は迅速に実行され、物体認知による処理はシーン知覚に遅れて実行されると考えられ、極性手がかりの段階的な処理が示唆される。今後の研究では、極性手がかりにおける物体認知とシーン知覚の寄与を分離すると共に、その時間特性を検討する必要がある。

3.4.3. 視覚手がかりの相対的寄与

SVV 誤差の結果では、フレームベクトル、水平線ベクトル、極性ベ

クトルの順に相対的寄与が大きかった。一方で Harris et al. (2007)や Haji-Khamneh & Harris (2009)は PU における極性ベクトルの中心的な寄与を報告しており、本研究とは一貫しない。本研究と先行研究では使用したシーンの内容が異なるが、どちらも日常的な室内の様子を描写しており、視覚刺激の違いに起因する結果の差異であるとは考えにくい。また、Mittelstaedt (1986)は SVV 推定における極性手がかりの寄与に個人差および試行間のばらつきがあることを指摘しており、本研究の結果と一貫している。むしろ、本研究と先行研究の齟齬は、SVV と PU を推定する際の方略の違いに起因する可能性が考えられる (Dyde et al., 2006)。PU の測定には多義的なシンボルである「p」を使用し、ランダムな角度に傾いたシンボルが「p」と「d」のどちらに認識されるかについて選択課題を行う (Dyde et al., 2006)。この課題のシンボルは極性を有するため、参加者はシーンに分布する他の極性手がかりを積極的に参照することでシンボルの同定を行った可能性がある。一方で、ロッド調整課題のターゲット刺激は極性のないロッドであるため、極性手がかりを参照する必要性が比較的低かったと考えられる。極性のないロッド調整課題では、シーンに分布する線分を参照する方略の方がより直接的であり、フレーム手がかりの寄与率が高い要因となったと考えられる。Dyde et al. (2006)が示唆したように、SVV は物理的な視覚情報と強く結びついて身体運動を制御し、PU は

物体認知との関連が深い可能性がある。なお、視覚手がかりの相対的寄与は家具の有無 (Harris et al., 2007) や屋内・屋外の違いなどの様々な要因によって変動し得るため、本研究および Haji-Khamneh & Harris (2009) で報告された視覚手がかり間の相対的寄与の順序自体は、日常風景全体に一般化されるものではないことに留意する必要がある。

Dyde et al. (2006) が SVV と身体運動制御の関連性を示唆した一方で、本研究では頭部回転における視覚手がかりの相対的寄与は SVV とわずかに異なるパターンを示し、垂直知覚と運動制御の処理過程は部分的に異なることが示唆された。頭部回転における視覚手がかりの相対的寄与には有意な差が見られなかった一方で、SVV では明確な手がかり間の相対的寄与の差が認められた。今回見られた頭部回転と SVV の差異は、SVV と PU の差異と同様に課題毎の方略の違いに起因する可能性がある。直立姿勢の維持には抗重力筋の活動が必要となるため、物体の極性から得られる上方の手がかりが積極的に参照された一方で、ロッド調整課題では極性を参照する必要性が低かったと考えられる。人間を含む霊長類は、課題の性質に応じて網膜座標 (Wandell, Dumoulin, & Brewer, 2007)、眼球座標 (Cohen & Andersen, 2002; Hallett & Lightstone, 1976)、自己身体座標 (Duhamel, Colby, & Goldberg, 1992; Kravitz, Saleem, Baker, & Mishkin, 2011; Sasaki,

Anzai, Angelaki, & DeAngelis, 2020; Snyder, Grieve, Brotchie, & Andersen, 1998; Zhang, Heuer, & Britten, 2004), 身体部位座標 (Duhamel, Colby, & Goldberg, 1998; Fogassi et al., 1996; Graziano & Gross, 1993), 環境座標 (Kheradmand & Winnick, 2017; Kravitz et al., 2011; Sasaki et al., 2020; Snyder et al., 1998)などの座標表現を柔軟に切り替えることができる。本研究で示唆された頭部回転, SVV, PUの差異から, 課題の性質に応じて環境座標系内の垂直軸が変化する可能性が示唆される。

3.4.4. 姿勢制御と SVV の関係性

頭部回転と SVV の推定パラメータには有意な個人間の相関が認められなかった。この結果は, シーン傾斜によって知覚された身体傾斜 (Cian et al., 1995; Ebenholtz & Benzschawel, 1977; Sigman et al., 1979)が姿勢の補償反応を引き起こすという仮説と一致しない。この結果は, 頭部運動測定とロッド調整課題における身体姿勢の違いに起因する可能性がある。研究2では頭部運動測定は立位, ロッド調整課題は座位で行われた。足首の関節は身体の傾斜に対して敏感であるが (R. Fitzpatrick & McCloskey, 1994), 足首関節からの姿勢情報は座位姿勢時には得られない。SVVにおける視覚手がかりの寄与が頭部回転よりも大きかった結果は, 感覚再重みづけ仮説に基づく (L. Nashner & Berthoz, 1978; Peterka, 2002), 座位時には立位に比べて固

有受容感覚の手がかりが有効ではなかったことによるものと考えられる。一方で、姿勢制御における固有受容感覚の重みづけには大きな個人差がある (Kluzik, Horak, & Peterka, 2005)。頭部回転の結果には、個人毎に異なる固有受容感覚の影響が含まれると考えられ、これにより頭部回転と SVV の間に明瞭な相関が見られなかった可能性が考えられる。

3.4.5. 正立風景の選好と眼球回旋運動

頭部回転と SVV 誤差ともに、正立風景 (0°) 周辺において急峻なバイアスの増大が見られた。この結果は、各視覚手がかりのベクトル方向が 0° 付近で収束する、ベクトル合成モデルの性質と一致する。一方で、シーン知覚における正立風景への選好が関与している可能性も考えられる。fMRI の研究によれば、風景に選択的な視覚野が、正立風景に対して鋭敏に反応することが報告されている (Epstein, Higgins, Parker, Aguirre, & Cooperman, 2006; Nasr & Tootell, 2012)。シーン知覚における正立からの逸脱に対する強い反応が、今回見られた 0° 周辺におけるバイアスの増大に反映されたことが考えられる。

眼球回旋運動は、典型的には身体の傾きに応じて生じるが (Dieterich & Brandt, 2019)、傾いた静止風景に対して生じることもある (Goodenough, Sigman, Oltman, Rosso, & Mertz, 1979; Hughes, 1973; Pansell, Sverkersten, & Ygge, 2006; Sverkersten, Ygge, &

Pansell, 2009). 回旋により網膜像のねじれが生じ、知覚、姿勢制御上のバイアスをもたらした可能性がある。本研究では眼球運動を測定しなかったため、眼球回旋運動と知覚・姿勢反応の関係は明確ではないが、今後検討の必要がある。

また、眼球回旋運動が正立風景周辺におけるバイアスの増大に関与しているかもしれない。しかしながら、45°付近の刺激角度で回旋がピークに留まるのに対し (Pansell et al., 2006), 今回得られた頭部回転および SVV 誤差では 30°付近で反応がピークに達し、その後は減衰した。こうした反応曲線の不一致を踏まえると、眼球回旋運動が正立風景の選好に関わることは考えにくい。

3.5. 結論

研究 2 では、風景に含まれる複数の傾き手がかりに姿勢応答と SVV が影響を受けることが示された。本研究の結果から、線分の知覚や物体/シーンの認知などの複合的な視覚処理過程が姿勢制御に関与することが示唆された。姿勢応答と SVV における各視覚手がかりの相対的寄与は、全体的には一貫していたが、極性手がかりの寄与率は姿勢応答の方が SVV に比べて高く、これらの指標の相関も認められなかった。この結果から、姿勢制御と垂直知覚で表現される垂直軸はわずかに異なることが示唆される。

第4章

研究3 座位・立位における姿勢応答の違い

4.1. 研究背景

家庭用の VR コンテンツは、多くの場合座った姿勢での使用を想定している。しかしながら、VEPR の知見は主に立位で得られており、座位における姿勢応答は検討が進んでいない。座位では身体バランスの安定性や固有受容感覚の入力が立位に比べて変化し、ベクシオンに影響が及ぶ場合がある (Guterman, Allison, Palmisano, & Zacher, 2012)。そのため、座位では立位とは VEPR の特徴が異なる可能性がある。立位では足首関節や脚の筋肉からの入力によって身体動揺が検出され (R. Fitzpatrick & McCloskey, 1994)、直立姿勢を維持するように姿勢調整が行われる (Dietz, Gollhofer, Kleiber, & Trippel, 1992; Lee & Lishman, 1975)。座位ではこうした感覚入力の代わりに、臀部や大腿の固有受容感覚に基づき姿勢調整が行われる (Genthon & Rougier, 2006)。このように座位と立位では入力される固有受容感覚が異なるが、座位においても視覚情報が姿勢制御に影響を及ぼす可能性がある。Mizuno, Shindo, Kuno, Kawakita, & Watanabe (2001)は参加者に対し、バランスが不安定な椅子に着座させた状態でオプティックフローを呈示し、その結果、オプティックフローの時間周波数に対

応した身体動揺を報告している。しかしながら、家庭用の VR 機器で想定されるような、安定した座位姿勢でも同様に姿勢応答が誘発されるかは検討されていない。

そこで研究 3 では、座位・立位における VEPR とベクションを検討した。本研究では視覚刺激として、拡大または縮小する放射オプティックフローおよび左右いずれかに運動する平行オプティックフローをそれぞれ HMD で呈示し、呈示中の頭部運動を測定した。

4.2. 方法

4.2.1. 実験参加者

成人男女 19 名が実験に参加した（男性 8 名，女性 11 名，平均年齢 21.09 歳，SD = 1.55）。参加者は全員京都大学の学生であった。いずれの参加者も裸眼，または視力矯正により正常視力を有した。参加者に前庭疾患の既往歴がないことを事前に確認した。実験手続きについて事前に京都大学の倫理審査委員会の承認を得た上で，実験開始前に実験目的を説明し，ヘルシンキ宣言に基づき書面にて実験参加の同意を得た。

4.2.2. 実験装置

視覚刺激呈示には HMD (Oculus Rift CV1) を使用した。HMD は 1 対の有機 EL ディスプレイを有し，片眼につき $1,080 \times 1,200$ ピクセル

の解像度，90 Hz のリフレッシュレート，約 110° の対角視野で映像が表示された．両眼レンズの距離は参加者の瞳孔間距離に合わせて調整された．Rift のヘッドトラッキングシステムを用いて，50 Hz のサンプリング周波数で HMD の位置と方位が記録された．実験は Windows 10 を搭載した PC で制御し，Xbox One コントローラで参加者の反応を取得した．

4.2.3. 刺激

VR 空間内の視覚刺激は Unity エンジン 5.3.1 で作成された．VR 空間には，黒い背景上に 1,500 個の白球（Unity 上の設定で直径 0.1 m）がランダムに配置された．VR 空間内の白球サイズは 0.1 m に設定された．白球の配置構造は，後述のようにオプティックフローの移動方向によって異なった．

奥行き方向の自己運動を呈示する場合，半径 25 m，奥行き 22 m の円柱状に白球が配置された（図 4-1）．白球から回避する身体反応を防ぐため，円柱の中心から半径 2 m 以内には白球が配置されなかった．VR 上のカメラが円柱の一方の底面に配置され，もう一方の底面の方角を映した．カメラは円柱の軸に沿って前方または後方に秒速 9.4 m の速度で等速移動した．その結果，画面には拡大または縮小する放射状のオプティックフローが呈示された．白球は視点から奥行き 0.01-22 m の範囲に表示され，表示範囲を超えた白球は反対側の境界面から

ランダムな位置に再表示された。その結果、ディスプレイ上には常に約 520 個の白球が表示された。白球の大きさは視点からの距離によって異なり、網膜上で 0.5° から 2.4° の範囲で変化した。これらの刺激設定は(Bubka et al., 2008)に準拠した。

横方向の自己運動を呈示する場合、半径 25 m、奥行き 50m の半円柱状に白球が配置された。奥行き方向のオプティックフローと同様に、円柱の中心から半径 2 m 以内には白球が配置されなかった。カメラは円柱軸の中間に配置され、円柱の曲面方向を映した。カメラは円柱の軸に沿って左右いずれかの方向に秒速 9.4 m の速度で等速移動した。その結果、画面には右または左方向に動く平行オプティックフローが呈示された。白球は視点から左右 25 m の範囲に表示され、表示範囲を超えた白球は反対側の境界面からランダムな位置に再表示された。その結果、ディスプレイ上には常に約 456 個の白球が表示された。奥行き方向の表示範囲は視点から 0.01-22 m であった。白球の大きさは視点からの距離によって異なり、網膜上で 0.5° から 3.2° の範囲で変化した。これらの視覚刺激は全て両眼視差によって立体視で呈示された。

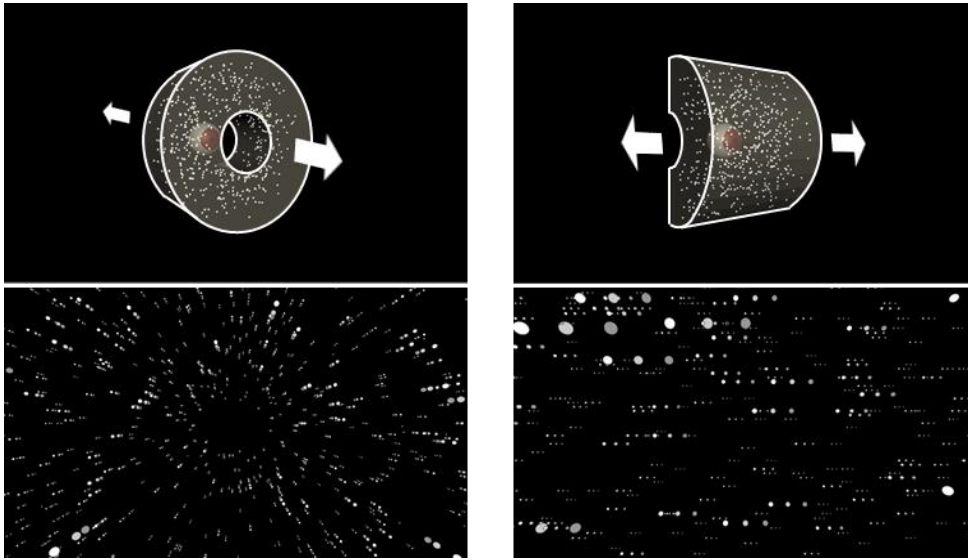


図 4-1. 視覚刺激の空間構造 (上)と呈示されたオプティックフロー (下). 上図に描かれた目は VR 上のカメラの位置と向きを表す. 放射オプティックフローでは (左), カメラは円柱構造の軸に沿って前後いずれかに移動した. 平行オプティックフローでは (右), カメラは左右いずれかに移動した.

4.2.4. 手続き

VR 体験による疲労を考慮し, 各実験条件につき 2 試行のみ繰り返された. 本実験は 1 ブロックにつき 8 試行で構成され, 2 ブロック繰り返された. 各ブロックには 4 つの運動方向条件 (拡大・縮小・右・左)が 2 試行ずつ含まれた. 2 ブロックの内 1 ブロックでは, 参加者はスツールに着座し, 両手で持ったゲームコントローラを膝に載せて課題を遂行した. もう片方のブロックでは, 参加者は両足を揃えて立ち, コントローラを身体の前で保持した. いずれのブロックでも参加者は靴を履いていた. 刺激の呈示順序はブロック内で無作為化され, 座位・

立位ブロックの順序は参加者間でカウンターバランスが取られた。参加者が実験手続きに慣れるまで、1 ブロック目と同じ姿勢条件で練習課題を行った後、本課題を開始した。教示、練習を含めて、実験は 1 時間以内に終了した。

前試行の影響を取り除くため、試行間には 30 秒間のインターバルが設けられた。インターバル終了後、参加者は頭部を正面に調整してから次の試行を開始した（研究 1, 2.2.4.手続きを参照）。黒い背景で 1 秒間の遅延の後、オプティックフロー刺激が 30 秒間呈示された。オプティックフロー呈示中、参加者はベクシオンが生じている間、コントロールのボタンを押し続けた。参加者は実験中に直立姿勢を保つように指示を受けた。顔が正面を向いた状態を保つため、参加者の頭部角度が 3° 以上正面から逸脱した場合は、ヘッドホンからビープ音で警告し、頭部を正面に戻すように指示した。外部環境の音を遮断するため、刺激呈示中は約 62 dB SPL のピンクノイズをヘッドホンから流し続けた。

刺激呈示後、参加者は刺激呈示中に感じられたベクシオンの主観的強度を 0 から 100 の範囲で報告した。評定の基準は (Bubka et al., 2008) に準拠した。主観的強度が 0 の場合、刺激呈示時間全体を通して静止感覚が保たれ、静止した参加者の周囲を白球が移動するように感じられたことを意味した。主観的強度が 100 の場合は自己運動感覚が生じ、

静止した白球の間を参加者が移動するように感じられたことを意味した。主観的強度の報告後、参加者はベクシヨンの方向を報告した。ベクシヨン方向の選択肢は放射・平行オプティックフローで異なり、放射オプティックフローでは前方向・やや前方向・どちらでもない・やや後方向・後方向の選択肢から、平行オプティックフローでは左方向・やや左方向・どちらでもない・やや右方向・右方向の選択肢から報告が行われた。

4.3. 結果

4.3.1. 頭部運動

実験で得た前後軸と左右軸の頭部運動をそれぞれ分析した。オプティックフローに対する姿勢応答を検討するため、放射オプティックフローでは前後軸、平行オプティックフローでは左右軸の頭部運動を分析対象とした。

刺激オンセット前 1 秒間における頭部位置の平均をベースラインとして、刺激呈示中の頭部位置を参加者間で平均し、図 4-2 に示した。また BCa (bias-corrected and accelerated)法を用いたブートストラップにて、各時点の頭部位置における 95%信頼区間を算出し、図 4-2 にプロットした。図 4-2 左上より、座位では、拡大刺激に対しては前方への頭部運動、縮小刺激に対してはわずかに後方への頭部運動が見ら

れた。対照的に，立位条件では，縮小刺激に対して前方の頭部運動，拡大刺激に対してわずかに後方への頭部運動が見られた（図 4-2 左下）。立位条件では，頭部位置の変化は試行前半でピークに達し，その後は時間経過に伴い信頼区間が増加する傾向が見られた。平行オプティックフロー条件の頭部運動も放射オプティックフロー条件と類似のパターンを示し，座位ではオプティックフローと反対方向，立位では同方向の頭部運動が生じる傾向にあった。なお，オプティックフローと直交する軸では，上述のような頭部運動の偏位は見られなかった。全体として，座位・立位間でオプティックフローに対する姿勢応答方向が反転する傾向が認められた。

上述した頭部運動の交互作用を統計的に検討するため，クラスター並べ替え分析（cluster-based permutation analysis）を放射・平行オプティックフロー条件毎に実施した（Maris & Oostenveld, 2007）。頭部位置の平均などの要約統計量を用いた分析に比べて，クラスター並べ替え検定では時系列データを条件間で直接的に比較するため，要約統計量を用いた分析で生じる多重比較の問題や恣意的な時間窓の選択が生じない利点がある。分析は下記の手続きで実施された。まず，各時点の頭部位置データに対して対応のある両側 t 検定を実施し，2 条件間の比較における t 値を算出した。次に，検定で有意水準（ $p < .05$ ）に達した時点を対象に，有意な時点が連続した場合はそれらの t 値を

合計した。この手続きで算出されたクラスターが試行内に複数存在した場合は、最大のクラスターを以後の分析に使用した。次に、頭部運動データを条件間で無作為にシャッフルした後、上記の手続きに従い最大クラスターを算出した。このような無作為な並べ替えを 10,000 回繰り返し、偶然に生じるクラスターサイズの分布を得た。最後に、元のデータで算出されたクラスターサイズが無作為なクラスターよりも有意に大きいかどうかを検討した。2 条件の頭部運動データが同じ確率過程から生成されたものであることを帰無仮説とし、元データのクラスターサイズが無作為なクラスター分布の 95%以上 (α 水準 = 0.05)であった場合、帰無仮説を棄却した。本研究では、初めにオプティックフロー方向と姿勢の交互作用についてクラスター並べ替え検定を実施し、その後、各姿勢条件におけるオプティックフロー方向間の比較を行った。

クラスター並べ替え検定の結果、放射オプティックフローではオプティックフロー方向と姿勢条件の間に有意な交互作用が認められた ($p < .01$)。追加分析の結果、座位 ($p < .05$)と立位 ($p < .05$)共に、拡大・縮小刺激間の頭部位置に有意差があった。平行オプティックフローにおいても、オプティックフロー方向と姿勢の間に有意な交互作用があった ($p < .05$)。追加分析の結果、座位 ($p < .05$)と立位 ($p < .05$)共に、左右オプティックフロー間の頭部位置に有意差があった。

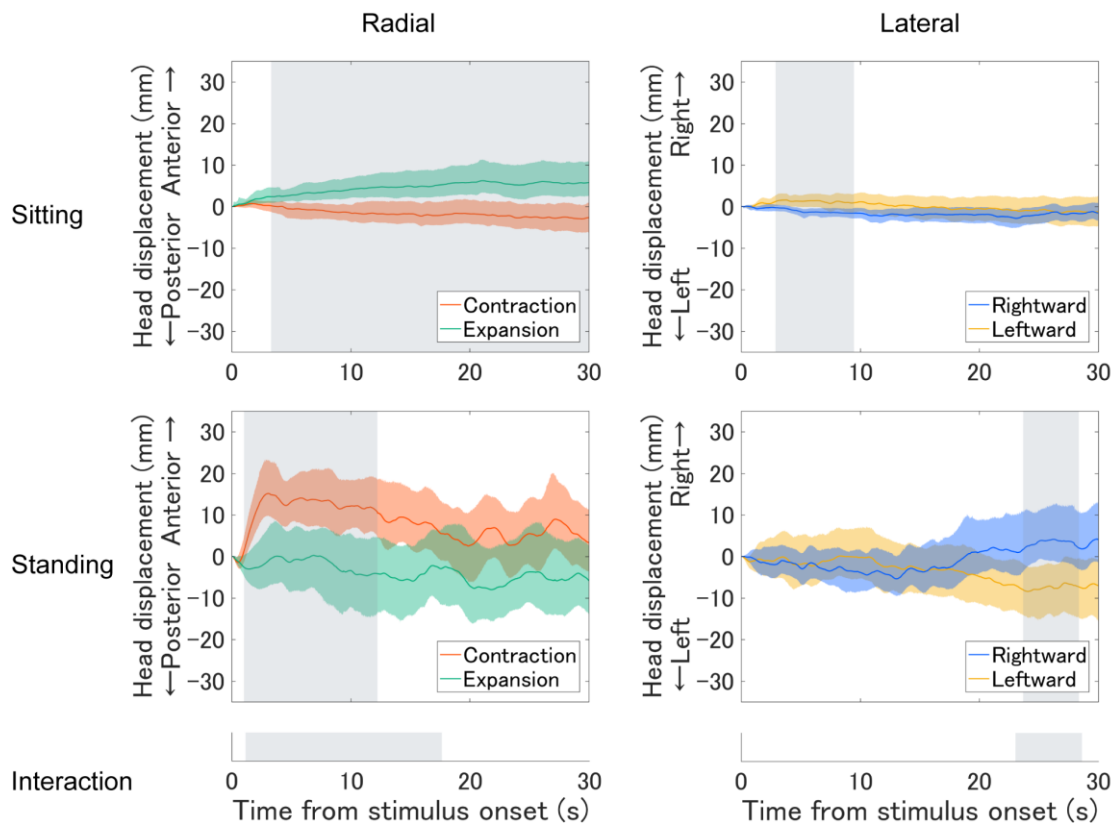


図 4-2. 各姿勢条件とオプティックフロー方向条件における頭部位置の変化. 上図と中図はそれぞれ座位と立位の頭部位置を表す. 左図は放射オプティックフローの結果を示し, 縦軸の正負はそれぞれ前方向と後方向の頭部位置変化を表す. 右図は平行オプティックフローの結果を示し, 縦軸の正負はそれぞれ右方向と左方向の頭部位置変化を表す. 実線は各時点で平均した頭部位置を表す. 実線の上下にまたがる網掛け部は各時点における 95%信頼区間を示す. 上図と中図におけるグレーの網掛け部は, 各姿勢条件におけるオプティックフロー方向についてクラスター並べ替え検定を行い, その結果得た有意なクラスターの範囲を表す. 下図の網掛け部は, オプティックフロー方向と姿勢条件の交互作用についてクラスター並べ替え検定を行い, その結果得た有意なクラスターの範囲を表す.

頭部運動の大きさを検討するため, 図 4-3a に, 1 試行内における頭部運動の SD の参加者間平均を示す. 放射オプティックフローでは前後軸, 平行オプティックフローでは左右軸の頭部運動について SD を

算出した。放射オブテックフローでは、姿勢条件の主効果は有意であったが ($F(1, 18)=60.74, p<.001, \eta^2=0.511$), オブテックフロー方向の主効果は有意ではなかった ($F(1,18)=0.003, p=.957, \eta^2<0.001$)。また、2 要因の交互作用は有意ではなかった ($F(1, 18)=0.034, p=.856, \eta^2<0.001$)。平行オブテックフローも同様に、姿勢条件の主効果は有意であったが ($F(1, 18)= 44.40, p<.001, \eta^2=0.411$), オブテックフロー方向の主効果 ($F(1,18)=0.02, p=.903, \eta^2<0.001$) および 2 要因の交互作用 ($F(1,18)=1.15, p=.298, \eta^2=0.005$) は有意ではなかった。

頭部運動の時間的な変動をより詳細に検討するため、フラクタル解析の手法である Detrended Fluctuation Analysis (DFA) を追加分析として実施した (Duarte & Sternad, 2008; Duarte & Zatsiorsky, 2001; Peng, Havlin, Stanley, & Goldberger, 1995)。図 4-3b に、DFA から得た指数 α の参加者間平均を実験条件毎に示す。 α の算出には、*MATLAB Central* コミュニティの *File Exchange* で公開されたスクリプトを用いた (Wenye, 2021)。SD と同様に、 α は試行毎に算出し、各参加者の各条件内で平均した。放射オブテックフローでは前後軸、平行オブテックフローでは左右軸の頭部運動について α を算出した。 α は全ての実験条件で 1 から 1.5 の間に収まり、自己相関と非定常性を示した (Hardstone et al., 2012; Peng et al., 1995)。放射オブテ

ティックフローでは、姿勢の主効果は有意であったが ($F(1, 18) = 4.92$, $p = 0.040$, $\eta^2 = 0.064$), オプティックフロー方向の主効果は有意ではなかった ($F(1, 18) = 0.50$, $p = .491$, $\eta^2 = 0.004$). また、2 要因の交互作用は有意ではなかった ($F(1, 18) = 0.14$, $p = .713$, $\eta^2 = 0.001$). 平行オプティックフローも同様に、姿勢の主効果は有意であったが ($F(1, 18) = 5.26$, $p = .034$, $\eta^2 = 0.078$), オプティックフロー方向の主効果 ($F(1, 18) = 3.76$, $p = .068$, $\eta^2 = 0.039$) および 2 要因の交互作用 ($F(1, 18) = 1.64$, $p = .216$, $\eta^2 = 0.011$) は有意ではなかった. 以上の分析の結果、放射・平行オプティックフロー共に、立位条件の α が座位条件よりも低く、1 に近い値を示すことが明らかになった. このことから、立位では座位に比べて強いフラクタル構造を有することが示唆された. この結果は、SD から示唆されるように、立位の身体動揺の大きさと複雑性を反映する可能性が考えられる.

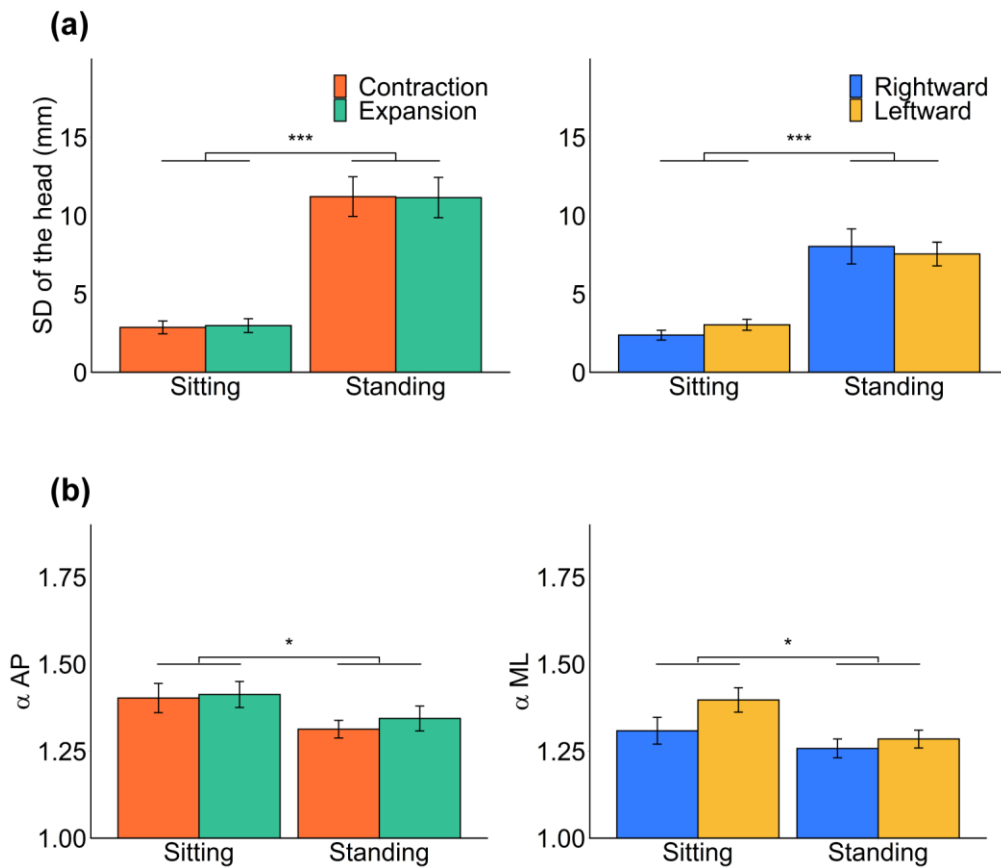


図 4-3. 各姿勢条件とオプティックフロー方向条件における頭部位置の SD (a) と Detrended Fluctuation Analysis (DFA) の α 成分 (b). エラーバーは標準誤差を表す. $*p < .05$, $***p < .001$.

頭部運動データを用いた一連の分析の結果、姿勢条件によってオプティックフローに対する頭部運動反応が異なることが示された。特筆すべき結果として、座位では VR 上でシミュレートされた自己運動と同方向に、立位では反対方向に頭部が移動することが明らかになった。また、SD や DFA の指標から、立位は座位に比べて頭部運動の動揺が大きいことが示された。

4.3.2. ベクシヨソ

頭部運動と同様に，放射・平行オプティックフロー条件毎にベクシヨソの分析を行った．1名の参加者については，機器の操作ミスによりベクシヨソの潜時および持続時間を取得できなかったため，該当する分析から除外した．

図 4-4a に，潜時の参加者間平均を実験条件毎に示す．放射オプティックフローでは，姿勢の主効果 ($F(1, 17)=1.62, p=.220, \eta^2=0.010$)，オプティックフロー方向の主効果 ($F(1,17)=0.02, p=.901, \eta^2=0.000$) および 2 要因の交互作用 ($F(1,17)= 0.11, p=.747, \eta^2=0.001$) はいずれも有意ではなかった．平行オプティックフローでも同様に，姿勢の主効果 ($F(1, 17)=0.35, p=.560, \eta^2=0.003$)，オプティックフロー方向の主効果 ($F(1,17)= 0.54, p=.474, \eta^2=0.002$) および 2 要因の交互作用 ($F(1,17)=0.86, p=.367, \eta^2=0.003$) はいずれも有意ではなかった．

図 4-4b に，持続時間の参加者間平均を実験条件毎に示す．放射オプティックフローでは，姿勢の主効果 ($F(1, 17)=0.26, p=.614, \eta^2=0.002$)，オプティックフロー方向の主効果 ($F(1,17)=0.48, p=.496, \eta^2=0.004$) および 2 要因の交互作用 ($F(1,17)=0.29, p=.597, \eta^2=0.002$) はいずれも有意ではなかった．平行オプティックフローでも同様に，姿勢の主効果 ($F(1, 17)=0.03, p=.862, \eta^2=0.000$)，オプテ

ティックフロー方向の主効果 ($F(1,17)=0.42, p=.523, \eta^2=0.002$)および 2 要因の交互作用 ($F(1,17)=1.14, p=.301, \eta^2=0.003$)はいずれも有意ではなかった。

図 4-4c に、主観的強度の参加者間平均を実験条件毎に示す。放射オプティックフローでは、姿勢の主効果 ($F(1, 18)=1.36, p=.259, \eta^2=0.012$)、オプティックフロー方向の主効果 ($F(1,18)= 0.11, p=.740, \eta^2=0.001$)および 2 要因の交互作用 ($F(1,18)=0.10, p=.758, \eta^2=0.001$)はいずれも有意ではなかった。平行オプティックフローでも同様に、姿勢の主効果 ($F(1, 18)=0.18, p=.675, \eta^2=0.002$)、オプティックフロー方向の主効果 ($F(1,18)=0.31, p=.586, \eta^2=0.002$)および 2 要因の交互作用 ($F(1,18)=0.42, p=.524, \eta^2=0.001$)はいずれも有意ではなかった。

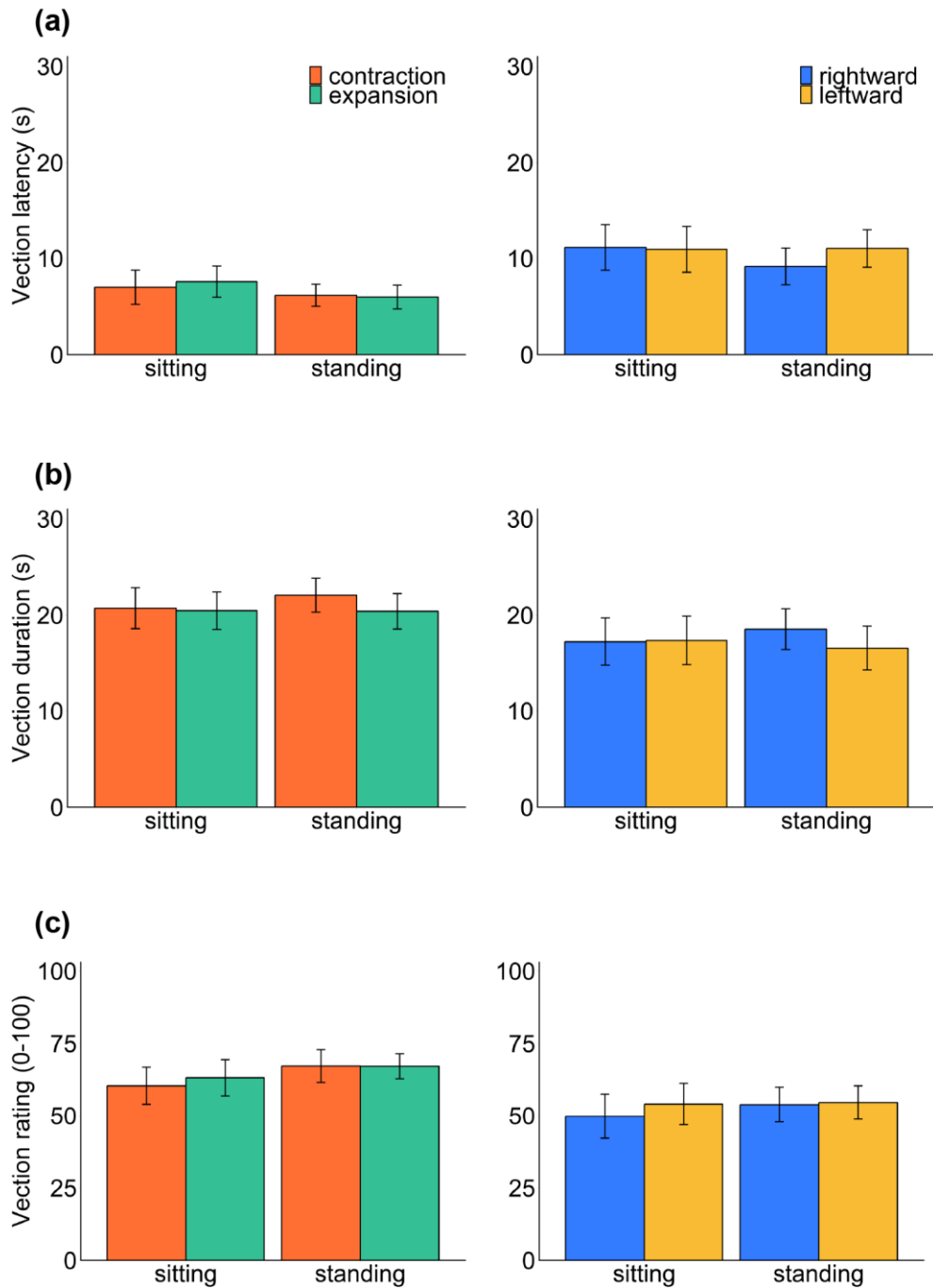


図 4-4. 各姿勢条件とオプティックフロー方向条件におけるベクション潜時 (a), 持続時間 (b)および主観的強度 (c)の平均。エラーバーは標準誤差を表す。

放射オプティックフローと平行オプティックフローのベクション強度を比較するため、ベクション潜時、持続時間、主観的強度を放射・

平行オブテックフロー内で参加者毎に平均した (図 4-5). その結果, 3 つのベクシオン指標全てにおいて, 放射オブテックフローは平行オブテックフローに比べて強いベクシオンを誘発したことが示された (潜時: $t(17)=-3.33$, $p=.004$, $d=-0.461$; 持続時間: $t(17)=2.97$, $p=.009$, $d=0.407$; 主観的強度: $t(17)=2.84$, $p=.011$, $d=0.539$).

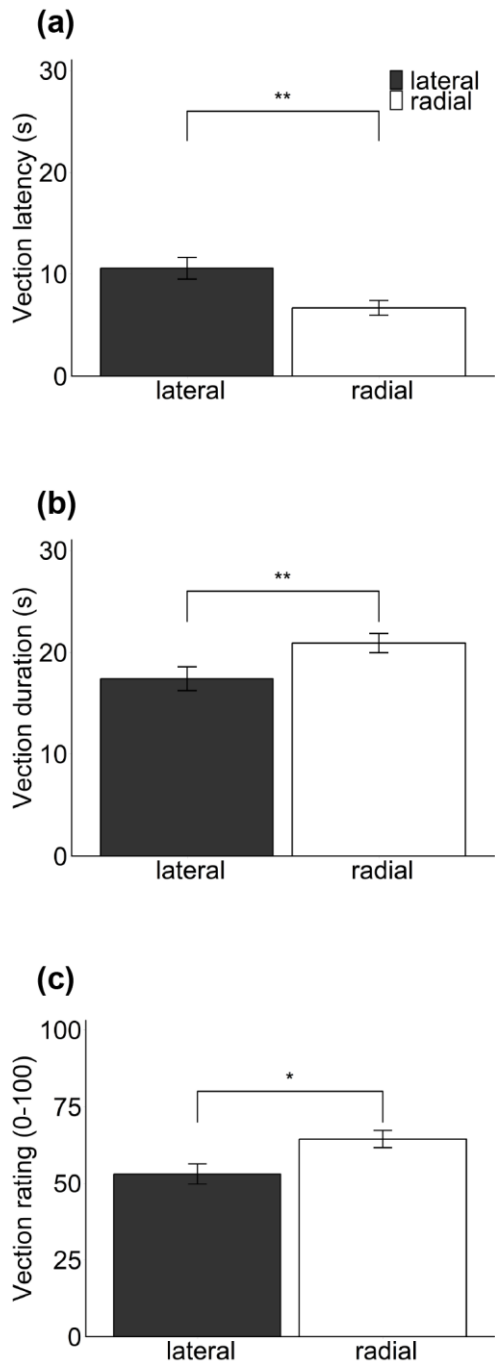


図 4-5. 放射・平行オプティックフローにおけるベクションの潜時 (a), 持続時間 (b)および主観的強度 (c). エラーバーは標準誤差を表す. * $p < .05$, ** $p < .01$.

一連の分析の結果, 放射・平行オプティックフロー間の比較を除き, どの実験条件間でも著しいベクション強度の差異は認められなかつ

た。これにより、頭部運動の結果で示された座位・立位間の頭部運動方向の違いがベクシオン強度の差異を反映している可能性は低いと考えられる。一方で、頭部運動の結果はベクシオン強度の違いではなくベクシオンの方向の違いを反映している可能性が考えられる (Kuno et al., 1999)。しかしながら、参加者が報告した各条件のベクシオン方向は、座位・立位共に、想定される自己運動方向と一致した (図 4-6)。

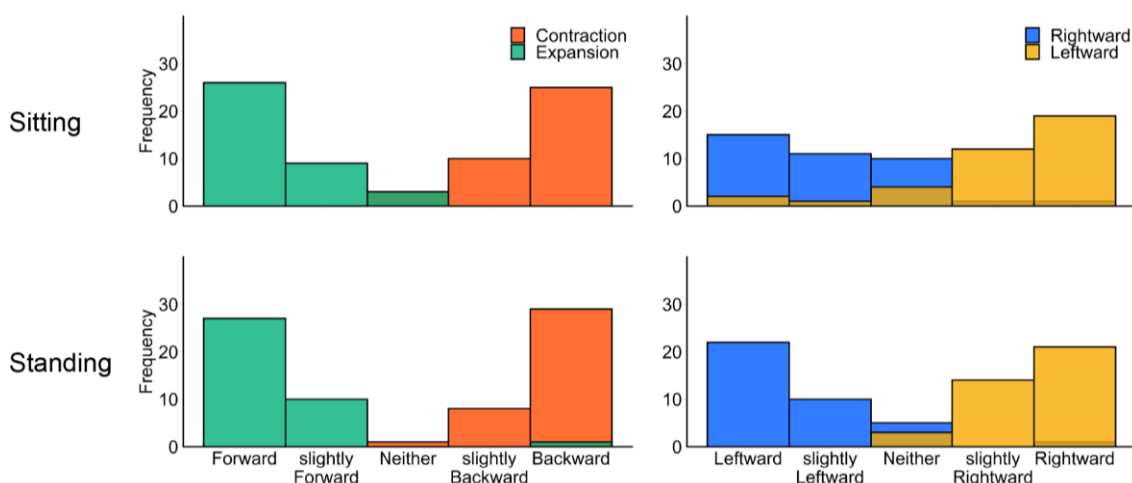


図 4-6. 各姿勢条件とオプティックフロー方向条件におけるベクシオンの知覚方向の分布。

4.3.3. 頭部運動とベクシオンの相関

頭部運動反応の程度とベクシオン強度の関係性を検討するため、各試行の平均頭部位置と各ベクシオン指標 (潜時・持続時間・主観的強度)の相関分析を実施した (図 4-7, 表 4-1)。相関分析の繰り返しによるファミリーワイズエラーを修正するため、Holm-Bonferroniの方法

によって有意水準を調整した。しかしながら、いずれの実験条件・ベクション指標との組み合わせにおいても、頭部運動指標との間に有意な相関は認められなかった。ただし、この結果は相関分析におけるサンプルサイズの不足によるものである可能性を留意する必要がある。

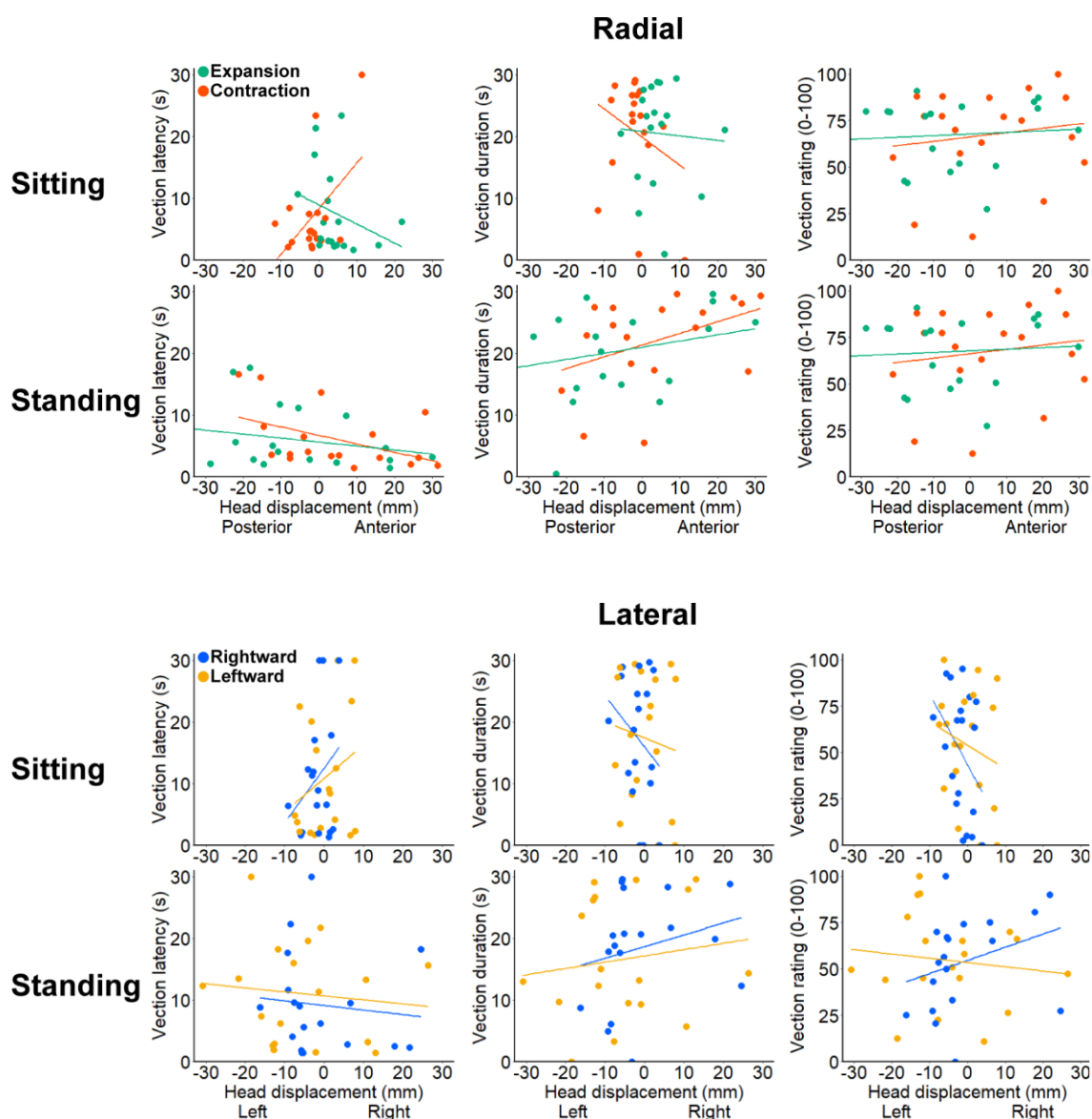


図 4-7. 各オプティックフロー方向における、個人の頭部偏位平均とベクション(潜時, 持続時間, 主観的強度)の相関.

表-1. 各姿勢条件とオプティックフロー方向条件における平均頭部位置とベクション(潜時, 持続時間, 主観的強度)の相関係数.

	拡大		縮小	
	座位	立位	座位	立位
主観的強度	0.000	0.083	-0.081	0.156
潜時	-0.284	-0.227	0.509	-0.458
持続時間	-0.055	0.235	-0.262	0.415
	右		左	
	座位	立位	座位	立位
主観的強度	-0.372	0.303	-0.211	-0.126
潜時	0.287	-0.105	0.281	-0.110
持続時間	-0.257	0.242	-0.126	0.146

4.4. 考察

4.4.1. 研究3のまとめ

研究3では, 座位・立位時のベクションおよびVEPRを検討した。実験の結果, 座位・立位間でベクションに違いは認められなかったが, 一方で頭部運動の方向には差異が認められた。立位条件では先行研究と同様に, 誘発されたベクションの方向と反対に頭部が移動した(Berthoz et al., 1979; Dichgans & Brandt, 1978; Lee & Aronson, 1974; Lee & Lishman, 1975; Lestienne et al., 1977; Lishman & Lee, 1973)。一方で座位条件では, これまで立位で報告されてきた姿勢応答とは異

なり，ベクションと同方向の頭部移動が生じた。

上記の主要な結果に加え，本研究ではいくつかの興味深い結果を得た。まず，頭部動揺のパターンは実験条件によって異なった。立位条件では，放射オプティックフローに対する頭部運動は刺激呈示直後に顕著だったのに対し，平行オプティックフローに対する頭部運動は試行後半で増大した。また，こうした頭部運動は DFA の結果が示すように非定常的であった。本研究では試行全体の頭部位置の傾向に着目して議論を行うが，実際には試行中に頭部位置が一時的に反転する場合もあった。今後の研究で，姿勢応答の時間的ダイナミクスに着目した検討を行う必要がある。

4.4.2. 放射・平行オプティックフローに対する頭部運動

座位条件における頭部運動は，従来提起されてきた VEPR の誘発メカニズムと対立する。立位で検討されてきた VEPR は，視覚的に想起される転倒を補償し，直立姿勢を維持するための反応であると考えられてきた (Lestienne et al., 1977; Lishman & Lee, 1973)。転倒を防止する場合は知覚された自己運動と反対に身体を傾ける反応が適応的であるが，座位条件では自己運動と同方向に頭部移動が生じ，自己運動を補償しない。そのため，座位における頭部運動は，直立姿勢維持を目的とした姿勢制御システムとは異なる機序から生じた可能性が考えられる。今後の研究では，座位における姿勢応答の発生メカニズ

ムを直接的に検討する必要がある。

座位条件の結果を説明する仮説として、視覚—前庭感覚間の対立の関与が考えられる。静止状態でのオプティックフロー呈示下では、自己運動を想起する視覚情報と静止状態を示唆する前庭感覚との間に対立が生じ、しばしば映像酔いを誘発する (Keshavarz, Riecke, Hettinger, & Campos, 2015)。本研究の参加者は、ベクションと同方向に実際に身体運動を行うことで前庭感覚と視覚を一致させ、映像酔いの軽減を試みていた可能性が考えられる。感覚間の不一致を解消する姿勢応答は、従来の直立姿勢維持のための姿勢応答とは独立の処理過程が想定されるが、それぞれの必要に応じて優勢な反応が異なる可能性が考えられる。頭部運動の SD が示すように、立位は座位に比べて安定性が低く、直立姿勢を維持する必要性が高まる。一方で、安定した座位条件では直立姿勢を維持する必要性が低く、感覚間の不一致を解消する反応が優勢になったと解釈できる。

座位条件では縮小刺激、立位条件では拡大刺激に対して後方の頭部運動が生じたが、どちらの頭部運動も、反対方向の視覚刺激に対する前方の頭部運動に比べて小さかった。立位で検討された過去の研究では、前方向に身体傾斜する場合に比べて、後方向への傾斜は可動域が小さいという要因から拡大・縮小間の身体動揺の非対称性を説明している (M. Edwards & Ibbotson, 2007; Lestienne et al., 1977)。こうし

た生体力学的説明は座位においても適用可能である。

放射一立位条件では頭部運動反応が刺激呈示直後に生じたのに対し、平行一立位条件では試行後半で頭部運動が顕著になり、放射・平行オプティックフロー間で頭部運動反応の立ち上がりが異なる結果となった。この結果には放射・平行条件間におけるベクシオン強度の違いが関与する可能性がある。ベクシオン強度を高める視覚刺激に対しては姿勢応答も増大する (Kawakita et al., 2000; Kuno et al., 1999; Lestienne et al., 1977)。本研究では平行オプティックフローは放射オプティックフローに比べてベクシオン強度が小さく、姿勢応答の立ち上がりに影響した可能性が考えられる。

4.4.3. ベクシオンの結果について

本研究では、姿勢条件間でベクシオン強度の違いは認められなかった。この結果は、座位条件で立位に比べてベクシオン強度が増大した Guterman et al. (2012)の報告と一致しない。本研究と先行研究の不一致は実験環境の差異に起因する可能性が考えられる。Guterman et al. (2012)の実験では、覗き窓を通して比較的小さい視角 (39°)で視覚刺激を呈示したため、刺激の輪郭の動きから身体動揺が自覚され、立位条件でベクシオンが減衰した可能性がある。一方で本研究では比較的大きい視角 (110°)で刺激呈示を行ったため、立位でも身体動揺が自覚されず、姿勢間でベクシオン強度に差異が生じなかったと考えらえ

る。

4.5. 結論

研究 3 から，座位の姿勢応答がベクションと同方向に生じ，立位時の応答方向に対して反転することが明らかになった．立位の姿勢応答は，オプティックフローから想起される自己運動，その先の転倒を防ぐ意義があると考えられてきた．安定性が高い座位の姿勢応答は立位時の姿勢制御システムとは異なる機序を持つ可能性が考えられる．一方で，座位においても姿勢応答が誘発されたことから，一般の VR コンテンツを評価する際に姿勢応答が有効であることが示唆される．

第 5 章 総合考察

5.1. 研究 1-3 のまとめ

本論文の目的は、VR 体験中の自己身体に関する空間認識と姿勢応答の関係性を明らかにすることであった。本研究では、VR 環境下でオプティックフローまたは静止風景を呈示し、ベクシオンまたは主観的垂直の報告課題と共に頭部運動の測定を行った。本研究で得られた結果は以下のとおりである。

研究 1 では、下視野に呈示されたオプティックフローが上視野呈示に比べて大きい姿勢応答を誘発することが示された。ベクシオンも同様に下視野呈示条件で促進された。ただし、頭部運動における下視野呈示の効果が明確に見られたのは姿勢応答が生じやすい縮小オプティックフローの呈示下に限定され、且つ呈示直後の数秒間だけであった。

研究 2 では、日常的な室内シーンの傾斜角度に対する頭部回転と SVV を複数の周期成分の合成によってモデル化した。その結果、各周期成分の相対的な振幅の大きさは頭部回転と SVV で一貫していた。具体的には、シーン傾斜角度の 4 倍周期成分（フレーム手がかり）が最も寄与が大きく、2 倍周期成分（水平線手がかり）がそれに続き、1 倍周期成分（極性手がかり）の寄与が最も小さい傾向にあった。しかしなが

ら、視覚手がかり間の相対的寄与の違いは SVV の方がより明確であった。

研究 3 では、オプティックフローに対する姿勢応答の方向が、座位条件では立位条件の応答方向に対して反転することが明らかになった。その一方で頭部運動と同時に測定されたベクシヨンの方向や強度は姿勢条件に影響されなかった。

5.2. 刺激強度に対する知覚と姿勢応答の一貫性

これらの結果から、自己身体に関する空間認識に強い影響を与える視覚刺激は自動的な姿勢制御にも大きく影響することが示された。本研究の結果は、オプティックフローのサイズ (Kawakita et al., 2000; Lestienne et al., 1977)、密度 (Lubeck et al., 2015)、速度 (Kuno et al., 1999) などに対するベクシヨンと VEPR の変化パターン的一致を報告した過去の研究と一貫する。過去の研究では物理的な刺激強度との関係性を検討したのに対し、研究 1 では物理的な刺激強度が統制された条件で上下視野の効果を検討し、条件間のベクシヨンの違いが姿勢応答と一致することが示された。また研究 2 では視覚的な傾きに対する頭部回転と SVV において、各周期成分の相対的寄与が一貫していることが示された。本研究で示された相対的寄与は文字認識課題を用いて検討された過去の研究結果とは異なる結果となった (Haji-

Khamneh & Harris, 2009; Harris et al., 2007). 類似した室内風景を用いた場合でも課題内容に応じて相対的寄与が変化し得ることから、物理的な刺激強度そのものではなく、SVVに強い影響を与える特定の視覚要素が姿勢応答にも強く影響することが示唆された。

研究 1, 2 と併せて、自己身体に関わる空間認識に強い影響を与える視覚刺激は、物理的な刺激強度に関わらず、姿勢応答に与える影響が大きいと考えられる。このことから、自己運動知覚において用いられる視覚情報は姿勢制御でも共通して利用されることが示唆される。この示唆を踏まえると、視覚入力から自己身体に関する情報のある程度抽出・処理し、自己運動知覚と姿勢制御に伝達する中間過程が想定される。また応用面では、VR コンテンツがどの程度ベクシオンを生起しやすいか、あるいは主観的垂直に影響を与え得るかを評価する際に、姿勢応答を用いることが有効であると考えられる。

5.3. 姿勢応答とベクシオンの差異

研究 1 から 3 のいずれにおいても、主観指標と姿勢応答の間に有意な個人間の相関は認められず、個人レベルでの VR 体験指標における姿勢応答の限界が明らかになった。この結果は、ベクシオンと VEPR の個人差に有意な相関が見られた過去の報告と一致しない (Apthorp et al., 2014)。Apthorp et al. (2014)では身体動揺測定とベクシオン測

定を個別に実施した一方で、本研究の研究 1, 3 では同時計測を行った。姿勢測定中にベクシオンを意識することで、姿勢応答とベクシオン評定が互いに干渉し合い、単純な相関では説明できない結果となった可能性が考えられる。また、自律的な身体動揺に影響する要因には身長、体重、性別など、視覚以外の要因も多数含まれ、これらの要因を標準化する必要があると考えられる (J. Kim et al., 2012; Tharani, Vedha Varshini, Senthil Nathan, Nohan Kumar, & Kamatchi, 2019)。

研究 3 で報告されたように、座位で測定を行う場合、立位とは姿勢応答の方向が異なる場合がある。ベクシオンには座位・立位間の変化が認められず、座位における姿勢応答がどのようなメカニズムの下で生じるかは未だ明確でない。映像酔いに関連する反応である可能性が考えられるが (第 4 章)、生起機序の解明には更なる検討を要する。

5.4. 今後の展望

5.4.1. 非線形的指標の導入

本論文では姿勢応答の指標として頭部位置の偏位方向と偏位量を中心に扱ってきた。これらは共に線形の指標であるが、一般的に生体データは非線形的であり、カオス性がある (Collins & De Luca, 1993; Duarte & Zatsiorsky, 2000; Kirchner, Schubert, Schmidtbleicher, & Haas, 2012; Peng et al., 1995; Riley, Balasubramaniam, & Turvey,

1999). 身体動揺の非線形性を考慮し、非線形的な分析である DFA や stabilogram diffusion analysis (SDA), 再帰定量化解析 (Recurrence Quantification Analysis: RQA)を用いることで、ベクシヨンや自己傾斜感覚の推定精度の向上が期待される。

5.4.2. 個人差の再検討

本研究では指標の個人差に明確な相関が見られなかった。本論文では線形回帰を用いて主観指標と姿勢応答の関係性を検討したが、非線形な関係がある可能性も考えられる。今後の研究では先行研究に沿った環境で実験を行った上で、非線形回帰による個人差の検討が必要である。また、主観指標と姿勢応答の関係が個人毎に異なる可能性も考慮し、階層モデルの導入によって個人の主観指標を推定できる可能性がある。

5.5. 結論

本論文から、ベクシヨンや SVV 誤差を増大させる視覚的要因が姿勢応答にも影響を与えることが示され、自己身体に関わる知覚過程と姿勢制御過程において共通の視覚情報を利用していることが示唆された。この結果から、各 VR コンテンツがどの程度ベクシヨンを引き起こしやすいか、また主観的垂直にどの程度影響するかを評価する際に姿勢応答指標を使用することが有効であると考えられる。一方で、本

研究における姿勢応答指標はベクシヨンや主観的垂直の個人差を直接的に反映しなかったことから，各個人の VR 体験を推定するには注意が必要である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、指導教員の蘆田宏教授（京都大学文学研究科）には心から感謝の意を申し上げます。私は2015年に京都大学文学部を卒業した後、故郷である静岡の会社に就職しました。その2年後、心理学研究への熱意を胸に携え、修士課程学生として再び蘆田研究室の一員に加えていただきました。快く送り出してくれた会社の上司や同僚の期待に応えるため、進学後は熱心に実験に励みましたが、思うような結果が出ない日々が続き、「こころ」を対象にした研究の難しさを実感しました。最初の論文は査読がなかなか通らず、先生と共に大変な苦難を経験しましたが、二人三脚で執筆に取り組み、最終的に3編の論文を出版することができました。このうち2編は研究1、研究3として本論文に和訳を掲載し、残りの1編の概要を、研究1の一部として考察に記載しました。また、現在は研究2の成果を論文誌に投稿中です。これら全ての研究成果は蘆田先生のお力添えなしには成し遂げられませんでした。実験室の使い方から実験計画の立案、実験結果の解釈、論文の書き方まで、未熟な私に一から指導していただき、本当にありがとうございました。

また、心理学教室の黒島妃香先生、森口佑介先生、Duncan Wilson先生、藤田和生先生（京都大学文学研究科）、板倉昭二先生（同志社大

学赤ちゃん学研究センター), James R. Anderson 先生 (京都大学文学研究科), 堀裕亮先生 (東京大学)の各先生, および研究室の大学院生の皆様からは日頃より, 多様な視点からご指導いただきました. 私にとっての大学院演習は, 自分自身の考えを整理すると同時に, 新たな視点が広がる貴重な機会であり, 頂いたコメントが次の研究のきっかけとなった場面も度々ありました. ご支援いただいた皆様には感謝を申し上げるとともに, 今後も絶えず研鑽を重ねていきたいと思ひます.

最後に, 常に私自身が望むような生き方, 研究生活ができるように支えてくれた家族に心から感謝します. 長い学生生活の間, 大変心労をかけたと思ひます. 未だ駆け出しの私ですが, これからも見守っていただけたらと思ひます.

令和 4 年 2 月 藤本(谷)花音

研究業績

研究 1 に関わる研究論文

- 1) Fujimoto, K. & Ashida, H. (2019). Larger Head Displacement to Optic Flow Presented in the Lower Visual Field. *I-Perception*, 10(6). DOI: 10.1177/2041669519886903
- 2) Fujimoto, K. & Ashida, H. (2020b). Roles of the Retinotopic and Environmental Frames of Reference on Vection. *Frontiers in Virtual Reality*, 1(November), 1–11. DOI: 10.3389/frvir.2020.581920

研究 2 に関わる研究論文

- 3) Fujimoto, K. & Ashida, H. (2021). Postural adjustment as a function of scene orientation. *PsyArXiv Preprints*. DOI: 10.31234/osf.io/8wzyt
- 4) Fujimoto, K. & Ashida, H. (in press). Postural adjustment as a function of scene orientation. *Journal of Vision*.

研究 3 に関わる研究論文

- 5) Fujimoto, K. & Ashida, H. (2020a). Different Head-Sway Responses to Optic Flow in Sitting and Standing With a Head-Mounted Display. *Frontiers in Psychology*, 11(October), 1 – 8. DOI: 10.3389/fpsyg.2020.577305

その他

【国際会議における発表 [全て査読有, ポスター]】

- 6) Fujimoto, K. & Ashida, H. Asymmetric effects of stereoscopic depth on simultaneous lightness contrast. ECVF Liverpool, UK, Aug, 2015.

- 7) **Fujimoto, K.** & Ashida, H. Relationship betweenvection and head displacement in sitting and standing postures. APCV Osaka, Japan, Jury, 2019.
- 8) **Fujimoto, K.** & Ashida, H. Effects of retinotopic and gravitational frames on visually induced self-motion perception. The 5th NTU-Kyoto University International Symposium of Human Science, Taipei, Taiwan, December, 2019.
- 9) **Fujimoto, K.** & Ashida, H. Postural adjustment as a function of the spatial frame tilt. VSS2021 (Annual meeting of the Vision Sciences Society), Online, May, 2021.
- 10) Kuraguchi, K., **Fujimoto, K.** & Taniguchi, K. Effects of cute adult and baby faces on evoking approaching behavior as measured by involuntary body sway. ECV2021 (43rd European Conference on Visual Perception), Online, August, 2021.

【国内学会・シンポジウム等における発表 [全て査読なし]】

<ポスター>

- 11) **藤本花音**, 蘆田宏. 周辺ドリフト錯視を利用したベクションにおけるフリッカリングの効果. 心の先端研究ユニット「こころの若手研究者交流大会」, 京都, 2017年6月.
- 12) **藤本花音**, 蘆田宏. 周辺ドリフト錯視によるベクションにおけるフリッカーの効果. 日本視覚学会 2017年夏季大会, 島根, 2017年9月.
- 13) **藤本花音**, 蘆田宏. フリッカーする周辺ドリフト錯視がベクション強度および身体動揺に与える影響. 日本視覚学会 2018年冬季大会, 東京, 2018年1月.
- 14) **藤本花音**, 蘆田宏. 視覚的な傾斜に対する姿勢調整における固有受容感覚の影響, 日本視覚学会 2021年冬季大会, オンライン開催, 2021年1月.
- 15) **藤本花音**, 蘆田宏. 視覚的空間参照枠の傾斜角度が立位姿勢調整に与える影響. こころの先端研究ユニット「こころの若手研究者交流大会」, オンライン開催, 2021年2月.
- 16) 藏口佳奈, **藤本花音**, 谷口康祐. かわいい顔は接近行動を喚起する

のか：顔画像観察時の重心動揺を指標とした検討．日本心理学会第85回大会，PI-006，オンライン開催，2021年9月．

<口頭発表>

- 17) 藤本花音，蘆田宏．ベクシヨンの前後方向異方性における上下呈示視野の効果，電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 (HIP)，信学技報 vol. 118，no. 262，HIP2018-62，pp. 23-26，京都，2018年10月．
- 18) 藤本花音，蘆田宏．座位姿勢下と立位姿勢下におけるオプティックフローへの異なる姿勢反応，電子情報通信学会 ヒューマン情報処理研究会 (HIP)，信学技報 vol. 118，no. 493，HIP2018-87，pp. 25-28，高知，2019年3月．
- 19) 蘆田宏，藤本花音．[招待講演] HMD を用いた視覚性自己運動感覚と姿勢制御の実験研究，電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会 (HIP)，信学技報，vol. 120，no. 375，HIP2020-85，pp. 57-60，2021年2月．

【競争的研究資金】

- 20) 日本学術振興会科学研究費（特別研究員奨励費）「視覚誘導性自己運動感覚における自己身体の役割の包括的解明」令和2年度～令和3年度，研究代表者：藤本花音，研究経費総額：170万円．

以上

引用文献

- Agathos, C. P., Bernardin, D., Baranton, K., Assaiante, C., & Isableu, B. (2017). Drifting while stepping in place in old adults: Association of self-motion perception with reference frame reliance and ground optic flow sensitivity. *Neuroscience*, *347*, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.01.044>
- Alberts, B. B. G. T., de Brouwer, A. J., Selen, L. P. J., & Medendorp, W. P. (2016). A Bayesian account of visual-vestibular interactions in the rod-and-frame task. *ENeuro*, *3*(5). <https://doi.org/10.1523/ENEURO.0093-16.2016>
- Amenedo, E., Pazo-Alvarez, P., & Cadaveira, F. (2007). Vertical asymmetries in pre-attentive detection of changes in motion direction. *International Journal of Psychophysiology*, *64*(2), 184–189. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2007.02.001>
- Apthorp, D., Nagle, F., & Palmisano, S. (2014). Chaos in balance: Non-linear measures of postural control predict individual variations in visual illusions of motion. *PLoS ONE*, *9*(12), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113897>
- Ball, K., & Sekuler, R. (1980). Human vision favors centrifugal motion. *Perception*, *9*(3), 317–325. <https://doi.org/10.1068/p090317>
- Barela, J. A., Sanches, M., Lopes, A. G., Razuk, M., & Moraes, R. (2011). Use of monocular and binocular visual cues for postural control in children. *Journal of Vision*, *11*(10), 1–8. <https://doi.org/10.1167/11.12.10>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Baumberger, B., Isableu, B., & Flückiger, M. (2004). The visual control of stability in children and adults: Postural readjustments in a ground optical flow. *Experimental Brain Research*, *159*(1), 33–46. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-1930-1>
- Beh, H. C., Wenderoth, P. M., & Purcell, A. T. (1971). The angular function of rod-and-frame illusion. *Perception & Psychophysics*, *9*(4), 353–355. <https://doi.org/10.3758/BF03208694>
- Berthoz, A., Lacour, M., Soechting, J. F., & Vidal, P. P. (1979). The Role of Vision in the Control of Posture During Linear Motion. *Progress in Brain Research*, *50*(C), 197–209. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(08\)60820-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(08)60820-1)
- Berthoz, A., Pavard, B., & Young, L. R. (1975). Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linearvection) basic characteristics and visual-vestibular interactions. *Experimental Brain Research*, *23*(5), 471–489. <https://doi.org/10.1007/BF00234916>
- Bilodeau, L., & Faubert, J. (1997). Isoluminance and chromatic motion perception throughout the visual field. *Vision Research*, *37*(15), 2073–2081. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00012-6)
- Brandt, T., Dichgans, J., & Büchele, W. (1974). Motion habituation: Inverted self-motion perception and optokinetic after-nystagmus. *Experimental Brain Research*, *21*(4), 337–352. <https://doi.org/10.1007/BF00237897>
- Brandt, T., Dichgans, J., & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, *16*(5), 476–491. <https://doi.org/10.1007>

/BF00234474

- Bringoux, L., Bourdin, C., Lepecq, J. C., Sandor, P. M. B., Pergandi, J. M., & Mestre, D. (2009). Interaction between reference frames during subjective vertical estimates in a tilted immersive virtual environment. *Perception, 38*(7), 1053–1071. <https://doi.org/10.1068/p6089>
- Britton, T. C., Day, B. L., Brown, P., Rothwell, J. C., Thompson, P. D., & Marsden, C. D. (1993). Postural electromyographic responses in the arm and leg following galvanic vestibular stimulation in man. *Experimental Brain Research, 94*(1), 143–151. <https://doi.org/10.1007/BF00230477>
- Bubka, A., Bonato, F., & Palmisano, S. (2008). Expanding and contracting optic-flow patterns and vection. *Perception, 37*(5), 704–711. <https://doi.org/10.1068/p5781>
- Bubka, A., & Bonato, F. (2010). Natural visual-field features enhance vection. *Perception, 39*(5), 627–635. <https://doi.org/10.1068/p6315>
- Carrasco, M., Wei, C., Yeshurun, Y., & Orduña, I. (1998). Do attentional effects differ across visual fields? *The Perception, 27*, 1_suppl: p.24.
- Carrasco, M., Williams, P. E., & Yeshurun, Y. (2002). Covert attention increases spatial resolution with or without masks: Support for signal enhancement. *Journal of Vision, 2*(6), 4. <https://doi.org/10.1167/2.6.4>
- Cian, C., Esquivié, D., Barraud, P. A., & Raphel, C. (1995). Respective contribution of orientation contrast and illusion of self-tilt to the rod-and-frame effect. *Perception, 24*(6), 623–630. <https://doi.org/10.1068/p240623>
- Cian, C., Raphel, C., & Barraud, P. A. (2001). The role of cognitive factors in the rod-and-frame effect. *Perception, 30*(12), 1427–1438. <https://doi.org/10.1068/p3270>
- Cohen, Y. E., & Andersen, R. A. (2002). A common reference frame for movement plans in the posterior parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience, 5*(12), 511–521. <https://doi.org/10.1038/nrn873>
- Collins, J. J., & De Luca, C. J. (1993). Open-loop and closed-loop control of posture: A random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Experimental Brain Research, 95*(2), 308–318. <https://doi.org/10.1007/BF00229788>
- Coppola, D. M., Purves, H. R., McCoy, A. N., & Purves, D. (1998). The distribution of oriented contours in the real world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 95*(7), 4002–4006. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.7.4002>
- Croner, L. J., & Kaplan, E. (1995). Receptive fields of P and M ganglion cells across the primate retina. *Vision Research, 35*(1), 7–24. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)E0066-T](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)E0066-T)
- Curcio, C. A., & Allen, K. A. (1990). Topography of ganglion cells in human retina. *Journal of Comparative Neurology, 300*(1), 5–25. <https://doi.org/10.1002/cne.903000103>
- D'Avossa, G., & Kersten, D. (1996). Evidence in human subjects for independent coding of azimuth and elevation for direction of heading from optic flow. *Vision Research, 36*(18), 2915–2924. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(96\)00010-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(96)00010-7)
- Danckert, J., & Goodale, M. A. (2001). Superior performance for visually guided pointing in the lower visual field. *Experimental Brain Research, 137*(3–4), 303–308. <https://doi.org/10.1007/s002210000653>
- Dassonville, P., & Reed, S. A. (2015). The Two-Wrongs model explains perception-action dissociations for illusions driven by distortions of the egocentric reference frame. *Frontiers in Human Neuroscience, 9*(MAR). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00140>

- Day, B. L., Séverac Cauquil, A., Bartolomei, L., Pastor, M. A., & Lyon, I. N. (1997). Human body-segment tilts induced by galvanic stimulation: A vestibularly driven balance protection mechanism. *Journal of Physiology*, *500*(3), 661–672. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1997.sp022051>
- DeAngelis, G., & Angelaki, D. (2012). Visual–Vestibular Integration for Self-Motion Perception. In M. MM & W. MT (Eds.), *The Neural Bases of Multisensory Processes*. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92839/>
- Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control. In R. Held, H. Leibowitz, & H.-L. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology perception, vol VIII*. (pp. 755–804). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46354-9_25
- Dieterich, M., & Brandt, T. (2019). Perception of verticality and vestibular disorders of balance and falls. *Frontiers in Neurology*, *10*(APR), 172. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00172>
- Dietz, V., Gollhofer, A., Kleiber, M., & Trippel, M. (1992). Regulation of bipedal stance: dependency on “load” receptors. *Experimental Brain Research*, *89*(1), 229–231. <https://doi.org/10.1007/BF00229020>
- Dobkins, K., & Rezac, A. (2004). Attentional weighting: A possible account of visual field asymmetries in visual search? *Spatial Vision*, *17*(4), 269–293. <https://doi.org/10.1163/1568568041920203>
- Dodge, R. (1923). Thresholds of Rotation. *Journal of Experimental Psychology*, *6*(2), 107–137. <https://doi.org/10.1037/h0076105>
- Duarte, M., & Sternad, D. (2008). Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, *191*(3), 265–276. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1521-7>
- Duarte, M., & Zatsiorsky, V. M. (2000). On the fractal properties of natural human standing. *Neuroscience Letters*, *283*(3), 173–176. [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(00\)00960-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(00)00960-5)
- Duarte, M., & Zatsiorsky, V. M. (2001). Long-range correlations in human standing. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, *283*(1–2), 124–128. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(01\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(01)00188-8)
- Duhamel, Colby, C., & Goldberg, M. (1992). The updating of the representation of visual space in parietal cortex by intended eye movements. *Science*, *255*(5040), 90–92. <https://doi.org/10.1126/science.1553535>
- Duhamel, J. R., Colby, C. L., & Goldberg, M. E. (1998). Ventral intraparietal area of the macaque: Congruent visual and somatic response properties. *Journal of Neurophysiology*, *79*(1), 126–136. <https://doi.org/10.1152/jn.1998.79.1.126>
- Dyde, R. T., Jenkin, M. R., & Harris, L. R. (2006). The subjective visual vertical and the perceptual upright. *Experimental Brain Research*, *173*(4), 612–622. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0405-y>
- Ebenholtz, S. M., & Benzsawel, T. L. (1977). *The rod and frame effect and induced head tilt as a function of observation distance. Perception & Psychophysics* (Vol. 22).
- Edwards, A. S. (1946). Body sway and vision. *Journal of Experimental Psychology*, *36*(6), 526–535. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20279299>
- Edwards, M., & Badcock, D. R. (1993). Asymmetries in the sensitivity to motion in depth: a centripetal bias. *Perception*, *22*(9), 1013–1023. <https://doi.org/10.1068/p221013>
- Edwards, M., & Ibbotson, M. R. (2007). Relative sensitivities to large-field

- optic-flow patterns varying in direction and speed. *Perception*, 36(1), 113–124. <https://doi.org/10.1068/p5626>
- Efron, B. (1987). Better bootstrap confidence intervals. *Journal of the American Statistical Association*, 82(397), 171–185. <https://doi.org/10.1080/01621459.1987.10478410>
- Eklund, G. (1972). General features of vibration-induced effects on balance. *Uppsala Journal of Medical Sciences*, 77(2), 112–124. <https://doi.org/10.1517/03009734000000016>
- Epstein, R. A., Higgins, J. S., Parker, W., Aguirre, G. K., & Cooperman, S. (2006). Cortical correlates of face and scene inversion: A comparison. *Neuropsychologia*, 44(7), 1145–1158. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.10.009>
- Fernandez, C., & Goldberg, J. M. (1976). Physiology of peripheral neurons innervating otolith organs of the squirrel monkey. II. Directional selectivity and force response relations. *Journal of Neurophysiology*, 39(5), 985–995. <https://doi.org/10.1152/jn.1976.39.5.985>
- Fischer, H. M., & Kornmüller, A. E. (1930). Optokinetic ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und opto-kinetischer Nystagmus. *Journal Für Psychologie Und Neurologie*, 41, 273–308.
- Fitzpatrick, R., & McCloskey, D. I. (1994). Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans. *The Journal of Physiology*, 478(1), 173–186. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1994.sp020240>
- Fitzpatrick, Richard, Burke, D., & Gandevia, S. C. (1994). Task - dependent reflex responses and movement illusions evoked by galvanic vestibular stimulation in standing humans. *The Journal of Physiology*, 478(2), 363–372. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1994.sp020257>
- Flanagan, M. B., May, J. G., & Dobie, T. G. (2002). Optokinetic nystagmus, vection, and motion sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 73(11), 1067–1073. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12433229>
- Flückiger, M., & Baumberger, B. (1988). The perception of an optical flow projected on the ground surface. *Perception*, 17(5), 633–645. <https://doi.org/10.1068/p170633>
- Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L., Luppino, G., Matelli, M., & Rizzolatti, G. (1996). Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of Neurophysiology*, 76(1), 141–157. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.76.1.141>
- Freitas Júnior, P. B., & Barela, J. A. (2004). Postural control as a function of self- and object-motion perception. *Neuroscience Letters*, 369(1), 64–68. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.07.075>
- Friedman, A. (1979). Framing pictures: The role of knowledge in automatized encoding and memory for gist. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108(3), 316–355. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.108.3.316>
- Fujimoto, K., & Ashida, H. (2020). Roles of the Retinotopic and Environmental Frames of Reference on Vection. *Frontiers in Virtual Reality*, 1(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.581920>
- Genthon, N., & Rougier, P. (2006). Does the Capacity to Appropriately Stabilize Trunk Movements Facilitate the Control of Upright Standing? *Control*, 10(3), 232–243. <https://doi.org/10.1123/mcj.10.3.232>
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Godoi, D., & Barela, J. A. (2008). Body sway and sensory motor coupling adaptation in children: Effects of distance manipulation. *Developmental*

- Psychobiology*, 50(1), 77–87. <https://doi.org/10.1002/dev.20272>
- Goodenough, D. R., Sigman, E., Oltman, P. K., Rosso, J., & Mertz, H. (1979). Eye torsion in response to a tilted visual stimulus. *Vision Research*, 19(10), 1177–1179. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90015-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(79)90015-4)
- Goodworth, A. D., Mellodge, P., & Peterka, R. J. (2014). Stance width changes how sensory feedback is used for multisegmental balance control. *Journal of Neurophysiology*, 112(3), 525–542. <https://doi.org/10.1152/jn.00490.2013>
- Graci, V. (2011). The role of lower peripheral visual cues in the visuomotor coordination of locomotion and prehension. *Gait and Posture*, 34(4), 514–518. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.07.003>
- Grand View Research. (2021). Virtual Reality Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Semi & Fully Immersive, Non-immersive), By Device (HMD, GTD), By Component (Hardware, Software), By Application, And Segment Forecasts, 2021 - 2028. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/virtual-reality-vr-market>
- Graziano, M. S. A., & Gross, C. G. (1993). A bimodal map of space: somatosensory receptive fields in the macaque putamen with corresponding visual receptive fields. *Experimental Brain Research*, 97(1), 96–109. <https://doi.org/10.1007/BF00228820>
- Guerraz, M., Yardley, L., Bertholon, P., Pollak, L., Rudge, P., Gresty, M. A., & Bronstein, A. M. (2001). Visual vertigo: Symptom assessment, spatial orientation and postural control. *Brain*, 124(8), 1646–1656. <https://doi.org/10.1093/brain/124.8.1646>
- Guerraz, Michel, & Bronstein, A. M. (2008). Mechanisms underlying visually induced body sway. *Neuroscience Letters*, 443(1), 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.07.053>
- Guterman, P. S., Allison, R. S., Palmisano, S., & Zacher, J. E. (2012). Influence of head orientation and viewpoint oscillation on linear vection. In *Journal of Vestibular Research: Equilibrium and Orientation* (Vol. 22, pp. 105–116). <https://doi.org/10.3233/VES-2012-0448>
- Haji-Khamneh, B., & Harris, L. R. (2009). How long do intrinsic and extrinsic visual cues take to exert their effect on the perceptual upright? *Vision Research*, 49(16), 2131–2139. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.06.003>
- Hallett, P. E., & Lightstone, A. D. (1976). Saccadic eye movements towards stimuli triggered by prior saccades. *Vision Research*, 16(1), 99–106. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90083-3)
- Hardstone, R., Poil, S. S., Schiavone, G., Jansen, R., Nikulin, V. V., Mansvelder, H. D., & Linkenkaer-Hansen, K. (2012). Detrended fluctuation analysis: A scale-free view on neuronal oscillations. *Frontiers in Physiology*, 3 NOV. <https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00450>
- Harris, L. R., Dyde, R., & Jenkin, M. (2007). The relative contributions of the visual components of a natural scene in defining the perceptual upright [Abstract]. *Journal of Vision*, 7(9), 303–303. <https://doi.org/10.1167/7.9.303>
- Harris, L. R., Jenkin, M., Dyde, R. T., & Jenkin, H. (2011). Enhancing visual cues to orientation. Suggestions for space travelers and the elderly. *Progress in Brain Research*, 191, 133–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53752-2.00008-4>
- Harris, L. R., Jenkin, M. R. M., Jenkin, H. L. M., Dyde, R. T., & Oman, C. M. (2010). Where's the floor? *Seeing and Perceiving*, 23(1), 81–88. <https://doi.org/10.1163/187847510X490826>
- He, S., Cavanagh, P., & Intriligator, J. (1996). Attentional resolution and t

- he locus of visual awareness. *Nature*, 383(6598), 334–337. <https://doi.org/10.1038/383334a0>
- Held, R. (1961). Exposure history as a factor in maintaining stability of perception and coordination. *Journal of Nervous and Mental Diseases*, 132, 26–32.
- Holten, V., Donker, S. F., Verstraten, F. A. J., & Van Der Smagt, M. J. (2013). Decreasing perceived optic flow rigidity increases postural sway. *Experimental Brain Research*, 228(1), 117–129. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3543-z>
- Hughes, P. C. (1973). The influence of the visual field upon the visual vertical in relation to ocular torsion of the eye (Doctoral dissertation, University of Oklahoma). *Dissertation Abstracts International*, 33(10-B), 4686.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Crémieux, J., & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Experimental Brain Research*, 114(3), 584–589. <https://doi.org/10.1007/PL00005667>
- Ito, H., & Shibata, I. (2005). Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity. *Vision Research*, 45(4), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.11.009>
- Kapoula, Z., & Lê, T.-T. (2006). Effects of distance and gaze position on postural stability in young and old subjects. *Experimental Brain Research*, 173(3), 438–445. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0382-1>
- Kavounoudias, A., Roll, R., & Roll, J. P. (2001). Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *Journal of Physiology*, 532(3), 869–878. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.0869e.x>
- Kavounoudias, Anne, Roll, R., & Roll, J. P. (1998). The plantar sole is a “dynamometric map” for human balance control. *NeuroReport*, 9(14), 3247–3252. <https://doi.org/10.1097/00001756-199810050-00021>
- Kawakita, T., Kuno, S., Miyake, Y., & Watanabe, S. (2000). Body sway induced by depth linear vection in reference to central and peripheral visual field. *The Japanese Journal of Physiology*, 50(3), 315–321. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.50.315>
- Keshavarz, B., Hettlinger, L. J., Vena, D., & Campos, J. L. (2014). Combined effects of auditory and visual cues on the perception of vection. *Exp Brain Res*, 232, 827–836. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3793-9>
- Keshavarz, B., Riecke, B. E., Hettlinger, L. J., & Campos, J. L. (2015). Vection and visually induced motion sickness: how are they related? *Frontiers in Psychology*, 6(8), 890–898. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00472>
- Kheradmand, A., & Winnick, A. (2017). Perception of upright: Multisensory convergence and the role of temporo-parietal cortex. *Frontiers in Neurology*, 8(OCT), 552. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00552>
- Kim, J., Kwon, Y., Chung, H. Y., Kim, C. S., Eom, G. M., Jun, J. H., & Park, B. K. (2012). Relationship between body factors and postural sway during natural standing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(6), 963–968. <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0125-0>
- Kirchner, M., Schubert, P., Schmidtbleicher, D., & Haas, C. T. (2012). Evaluation of the temporal structure of postural sway fluctuations based on a comprehensive set of analysis tools. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 391(20), 4692–4703. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.05.034>
- Kitazaki, M., & Sato, T. (2003). Attentional modulation of self-motion perc

- ception. *Perception*, 32(4), 475–484. <https://doi.org/10.1068/p5037>
- Kluzik, J. A., Horak, F. B., & Peterka, R. J. (2005). Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface. *Experimental Brain Research*, 162(4), 474–489. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-2124-6>
- Kravitz, D. J., Saleem, K. S., Baker, C. I., & Mishkin, M. (2011). A new neural framework for visuospatial processing. *Nature Reviews Neuroscience*. <https://doi.org/10.1038/nrn3008>
- Kremláček, J., Kuba, M., Chlubnová, J., & Kubová, Z. (2004). Effect of stimulus localisation on motion-onset VEP. *Vision Research*, 44(26), 2989–3000. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.07.002>
- Kuno, S., Kawakita, T., Kawakami, O., Miyake, Y., & Watanabe, S. (1999). Postural adjustment response to depth direction moving patterns produced by virtual reality graphics. *The Japanese Journal of Physiology*, 49(5), 417–424. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.49.417>
- Lackner, J. R. (1977). Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 48(2), 129–131. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/860972>
- Lakha, L., & Humphreys, G. (2005). Lower visual field advantage for motion segmentation during high competition for selection. *Spatial Vision*, 18(4), 447–460. <https://doi.org/10.1163/1568568054389570>
- Lê, T.-T., & Kapoula, Z. (2006). Distance impairs postural stability only under binocular viewing. *Vision Research*, 46, 3586–3593. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.06.018>
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, 15(3), 529–532. <https://doi.org/10.3758/BF03199297>
- Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, 1, 87–95.
- Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1977). Vision—The most efficient source of proprioceptive information for balance control. *Agressologie*, 18, 83–94. Retrieved from <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1976-27111-001>
- Lepecq, J. C., Giannopulu, I., & Baudonniere, P. M. (1995). Cognitive effects on visually induced body motion in children. *Perception*, 24(4), 435–449. <https://doi.org/10.1068/p240435>
- Lestienne, F., Soechting, J., & Berthoz, A. (1977). Postural readjustments induced by linear motion of visual scenes. *Experimental Brain Research*, 28(3–4), 363–384. <https://doi.org/10.1007/BF00235717>
- Levine, M. W., & McAnany, J. J. (2005). The relative capabilities of the upper and lower visual hemifields. *Vision Research*, 45(21), 2820–2830. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.04.001>
- Li, W., & Matin, L. (2005a). The rod-and-frame effect: The whole is less than the sum of its parts. *Perception*, 34(6), 699–716. <https://doi.org/10.1068/p5411>
- Li, W., & Matin, L. (2005b). Visually perceived vertical (VPV): Induced changes in orientation by 1-line and 2-line roll-tilted and pitched visual fields. *Vision Research*, 45(15), 2037–2057. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.01.014>
- Lishman, J. R., & Lee, D. N. (1973). The autonomy of visual kinaesthesia. *Perception*, 2(3), 287–294. <https://doi.org/10.1068/p020287>
- Lubeck, A. J. A., Bos, J. E., & Stins, J. F. (2015). Interaction between depth order and density affects vection and postural sway. *PLoS ONE*, 10(12), e0144034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144034>

- LUND, S., & BROBERG, C. (1983). Effects of different head positions on postural sway in man induced by a reproducible vestibular error signal. *Acta Physiologica Scandinavica*, *117*(2), 307–309. <https://doi.org/10.1111/1/j.1748-1716.1983.tb07212.x>
- Lunsford, M. A., & Dannemiller, J. L. (2006). Additive effects in a rod-and-frame illusion estimated by response classification. *Journal of Vision*, *6*(4), 366–378. <https://doi.org/10.1167/6.4.6>
- Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods*, *164*(1), 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.03.024>
- Mast, F. W., Berthoz, A., & Kosslyn, S. M. (2001). Mental imagery of visual motion modifies the perception of roll-vection stimulation. *Perception*, *30*(8), 945–957. <https://doi.org/10.1068/p3088>
- Mittelstaedt, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Naturwissenschaften*, *70*(6), 272–281. <https://doi.org/10.1007/BF00404833>
- Mittelstaedt, H. (1986). The subjective vertical as a function of visual and extraretinal cues. *Acta Psychologica*, *63*(1), 63–85. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(86\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0001-6918(86)90043-0)
- Mizuno, Y., Shindo, M., Kuno, S., Kawakita, T., & Watanabe, S. (2001). Postural control responses sitting on unstable board during visual stimulation. In *Acta Astronautica* (Vol. 49, pp. 131–136). [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00089-3](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00089-3)
- Moraes, R., De Freitas, P. B., Razuk, M., & Barela, J. A. (2016). Quality of visual cue affects visual reweighting in quiet standing. *PLoS ONE*, *11*(3), 1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150158>
- Moraes, R., Lopes, A. G., & Barela, J. A. (2009). Monocular vision and increased distance reducing the effects of visual manipulation on body sway. *Neuroscience Letters*, *460*(3), 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.05.078>
- Murasugi, C. M., Howard, I. P., & Ohmi, M. (1986). Optokinetic nystagmus: The effects of stationary edges, alone and in combination with central occlusion. *Vision Research*, *26*(7), 1155–1162. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(86\)90049-0](https://doi.org/10.1016/0042-6989(86)90049-0)
- Murata, K., Seno, T., Ozawa, Y., & Ichihara, S. (2014). Self-Motion Perception Induced by Cutaneous Sensation Caused by Constant Wind. *Psychology*, *05*(15), 1777–1782. <https://doi.org/10.4236/psych.2014.515184>
- Nakamura, S. (2001). The perception of self-motion induced by central and peripheral visual stimuli moving in opposite directions. *Japanese Psychological Research*, *43*(3), 113–120. <https://doi.org/10.1111/1468-5884.00167>
- Nashner, L., & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, *150*(2), 403–407. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(78\)90291-3](https://doi.org/10.1016/0006-8993(78)90291-3)
- Nashner, L. M., & Wolfson, P. (1974). Influence of head position and proprioceptive cues on short latency postural reflexes evoked by galvanic stimulation of the human labyrinth. *Brain Research*, *67*(2), 255–268. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(74\)90276-5](https://doi.org/10.1016/0006-8993(74)90276-5)
- Nasr, S., & Tootell, R. B. H. (2012). A cardinal orientation bias in scene-selective visual cortex. *Journal of Neuroscience*, *32*(43), 14921–14926. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2036-12.2012>
- Nilsson, N. C., Nordahl, R., Sikström, E., Turchet, L., & Serafin, S. (2012). Haptically Induced Illusory Self-motion and the Influence of Context of Motion. In P. Isokoski & J. Springare (Eds.), *Haptics: Perception*,

- Devices, Mobility, and Communication. EuroHaptics 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7282* (pp. 349–360). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31401-8_32
- Nooij, S. A. E., Pretto, P., Oberfeld, D., Hecht, H., & Bülthoff, H. H. (2017). Vection is the main contributor to motion sickness induced by visual yaw rotation: Implications for conflict and eye movement theories. *PLoS ONE*, *12*(4), e0175305. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175305>
- Nordahl, R., Nilsson, N. C., Turchet, L., & Serafin, S. (2012). Vertical illusory self-motion through haptic stimulation of the feet. In *2012 IEEE VR Workshop on Perceptual Illusions in Virtual Environments, PIVE 2012* (pp. 21–26). <https://doi.org/10.1109/PIVE.2012.6229796>
- Ogawa, M., & Seno, T. (2014). Vection is modulated by the semantic meaning of stimuli and experimental instructions. *Perception*, *43*(7), 605–615. <https://doi.org/10.1068/p7639>
- Ohmura, Y., Yano, S., Katsuhira, J., Migita, M., Yozu, A., & Kondo, T. (2017). Inclination of standing posture due to the presentation of tilted view through an immersive head-mounted display. *Journal of Physical Therapy Science*, *29*(2), 228–231. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.228>
- Oliva, A. (2005). Gist of the Scene. In L. Itti, G. Rees, & J. Tsotsos, K. (Eds.), *Neurobiology of Attention* (pp. 251–256). Amsterdam: Elsevier Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012375731-9/50045-8>
- Oliva, A., & Torralba, A. (2006). Chapter 2 Building the gist of a scene: the role of global image features in recognition (pp. 23–36). [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)55002-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)55002-2)
- Oltman, P. K. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. *Perceptual and Motor Skills*, *26*(2), 503–506. <https://doi.org/10.2466/pms.1968.26.2.503>
- Palmisano, S., Allison, R. S., Schira, M. M., & Barry, R. J. (2015). Future challenges for vection research: Definitions, functional significance, measures, and neural bases. *Frontiers in Psychology*, *6*(FEB), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00193>
- Palmisano, S., Apthorp, D., Seno, T., & Stapley, P. J. (2014). Spontaneous postural sway predicts the strength of smooth vection. *Experimental Brain Research*, *232*(4), 1185–1191. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-3835-y>
- Palmisano, S., Arcioni, B., & Stapley, P. J. (2018). Predicting vection and visually induced motion sickness based on spontaneous postural activity. *Experimental Brain Research*, *236*(1), 315–329. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5130-1>
- Palmisano, S., & Chan, A. Y. C. (2004). Jitter and size effects on vection are immune to experimental instructions and demands. *Perception*, *33*(8), 987–1000. <https://doi.org/10.1068/p5242>
- Palmisano, S., & Gillam, B. (1998). Stimulus Eccentricity and Spatial Frequency Interact to Determine Circular Vection. *Perception*, *27*(9), 1067–1077. <https://doi.org/10.1068/p271067>
- Palmisano, S., Pinniger, G. J., Ash, A., & Steele, J. R. (2009). Effects of simulated viewpoint jitter on visually induced postural sway. *Perception*, *38*(3), 442–453. <https://doi.org/10.1068/p6159>
- Pansell, T., Sverkersten, U., & Ygge, J. (2006). Visual spatial clues enhance ocular torsion response during visual tilt. *Experimental Brain Research*, *175*(3), 567–574. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0574-8>
- Patil, I. (2021). Visualizations with statistical details: The “ggstatsplot” approach. *Journal of Open Source Software*, *6*(61), 3167. <https://doi.org/10.21105/joss.03167>

- Paulus, W. M., Straube, A., & Brandt, T. (1984). Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain: A Journal of Neurology*, *107* (Pt 4(4), 1143–1163. https://doi.org/10.1007/978-3-211-78775-5_4
- Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos*, *5*(1), 82–87. <https://doi.org/10.1063/1.166141>
- Peterka, R. J. (2002). Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology*, *88*(3), 1097–1118. <https://doi.org/10.1152/jn.2002.88.3.1097>
- Peterka, R. J., & Benolken, M. S. (1995). Role of somatosensory and vestibular cues in attenuating visually induced human postural sway. *Experimental Brain Research*, *105*(1), 101–110. <https://doi.org/10.1007/BF00242186>
- Peterka, R. J., & Loughlin, P. J. (2004). Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control. *Journal of Neurophysiology*, *91* (1), 410–423. <https://doi.org/10.1152/jn.00516.2003>
- Previc, F. H. (1990). Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: Its ecological origins and neurophysiological implications. *Behavioral and Brain Sciences*, *13*(3), 519–542. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00080018>
- Previc, F. H. (1992). The effects of dynamic visual stimulation on perception and motor control. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, *2*(4), 285–295.
- Previc, F. H. (1998). The Neuropsychology of 3-D Space. *Psychological Bulletin*, *124*(2), 123–164. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.2.123>
- Previc, F. H., & Mullen, T. J. (1991). A comparison of the latencies of visually induced postural change and self-motion perception. *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation*, *1*(3), 317–323.
- Raymond, J. E. (1994). Directional anisotropy of motion sensitivity across the visual field. *Vision Research*, *34*(8), 1029–1037. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90007-8)
- Riecke, B. E. (2009). Cognitive and higher-level contributions to illusory self-motion perception (“vection”): Does the possibility of actual motion affect vection?(Spatio-temporal integration of multimodal sensations, Symposium 2 at the 27th Annual Meeting). *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, *28*(1), 35–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.14947/psychono.KJ00005878681>
- Riecke, B. E. (2010). Compelling Self-Motion Through Virtual Environments Without Actual Self-Motion – Using Self-Motion Illusions (‘Vection’) to Improve VR User Experience. In J.-J. Kim (Ed.), *Virtual Reality*. InTech.
- Riecke, B. E., Feuereissen, D., & Rieser, J. J. (2008). Auditory self-motion illusions (“circular vection”) can be facilitated by vibrations and the potential for actual motion. In *Proceedings of the 5th symposium on Applied perception in graphics and visualization - APGV '08* (p. 147). <https://doi.org/10.1145/1394281.1394309>
- Riecke, B. E., & Schulte-Pelkum, J. (2013). Perceptual and Cognitive Factors for Self-Motion Simulation in Virtual Environments: How Can Self-Motion Illusions (“Vection”) Be Utilized? In F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos, & A. Lécuyer (Eds.), *Human Walking in Virtual Environments* (p. 27–54). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8432-6_2

- Riecke, B. E., Schulte-Pelkum, J., Avraamides, M. N., Heyde, M. Von Der, & Bülthoff, H. H. (2006). Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception*, *3*(3), 194–216. <https://doi.org/10.1145/1166087.1166091>
- Riecke, B., Västfjäll, L., Larsson, P., & Schulte-Pelkum, J. (2005). Top-Down and Multi-Modal Influences on Self-Motion Perception in Virtual Reality. In S. G. (Ed.), *11th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2005)* (pp. 1–10). Mahwah, NJ, USA: Erlbaum: Erlbaum.
- Riley, M. A., Balasubramaniam, R., & Turvey, M. T. (1999). Recurrence quantification analysis of postural fluctuations. *Gait and Posture*, *9*(1), 65–78. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(98\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(98)00044-7)
- Sakamoto, S., Osada, Y., Suzuki, Y., & Gyoba, J. (2004). The effects of linearly moving sound images on self-motion perception. *Acoustical Science and Technology*, *25*(1), 100–102. <https://doi.org/10.1250/ast.25.100>
- Sasaki, R., Anzai, A., Angelaki, D. E., & DeAngelis, G. C. (2020). Flexible coding of object motion in multiple reference frames by parietal cortex neurons. *Nature Neuroscience*, *23*(8), 1004–1015. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-0656-0>
- Sato, T., Seno, T., Kanaya, H., & Hukazawa, H. (2007). The ground is more effective than the sky - The comparison of the ground and the sky in effectiveness for vection. In *Proceedings of ASIAGRAPH 2007* (pp. 103–108). Shanghai. Tokyo (Japan): Virtual Reality Society of Japan.
- Schmidtman, G., Logan, A. J., Kennedy, G. J., Gordon, G. E., & Loffler, G. (2015). Distinct lower visual field preference for object shape. *Journal of Vision*, *15*(5)(18), 1–15. <https://doi.org/10.1167/15.5.18>
- Schor, C. M., Lakshminarayanan, V., & Narayan, V. (1984). Optokinetic and vection responses to apparent motion in man. *Vision Research*, *24*(10), 1181–1187. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90173-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90173-1)
- Schulte-Pelkum, J., Riecke, B., & Bülthoff, H. (2004). Vibrational cues enhance believability of ego-motion simulation. In *International Multisensory Research Forum (IMRF 2004)*. Barcelona, Spain.
- Schulte-Pelkum, J., Riecke, B., von der Heyde, M., & Bülthoff, H. (2003). Circular vection is facilitated by a consistent photorealistic scene. In G. E. (Ed.), *PRESENCE 2003: The 6th Annual International Workshop on Presence* (p. 37). Aalborg, Denmark: Aalborg University: Aalborg University. Retrieved from [https://astro.temple.edu/~lombard/ISPR/Proceedings/2003/Schulte-Pelkum,Riecke,von der Heyde, Bulthoff.pdf](https://astro.temple.edu/~lombard/ISPR/Proceedings/2003/Schulte-Pelkum,Riecke,von%20der%20Heyde,Bulthoff.pdf)
- Seno, T., & Fukuda, H. (2012). Stimulus meanings alter illusory self-motion (vection)-experimental examination of the train Illusion. *Seeing and Perceiving*, *25*(6), 631–645. <https://doi.org/10.1163/18784763-00002394>
- Seno, T., Ito, H., & Sunaga, S. (2009). The object and background hypothesis for vection. *Vision Research*, *49*(24), 2973–2982. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.09.017>
- Seno, T., Ito, H., & Sunaga, S. (2011). Attentional load inhibits vection. *Attention, Perception & Psychophysics*, *73*(5), 1467–1476. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0129-3>
- Seno, T., Ito, H., Sunaga, S., & Nakamura, S. (2010). Temporonasal motion projected on the nasal retina underlies expansion-contraction asymmetry in vection. *Vision Research*, *50*(12), 1131–1139. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.03.020>
- Seno, T., & Sato, T. (2009). Positional and directional preponderances in vection. *Exp Brain Res*, *192*, 221–229. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1575-6>

- Seno, T., Sawai, K. ichi, Kanaya, H., Wakebe, T., Ogawa, M., Fujii, Y., & Palmisano, S. (2017). The Oscillating Potential Model of Visually Induced Vection. *I-Perception*, *8*(6). <https://doi.org/10.1177/2041669517742176>
- Seno, T., Yamada, Y., & Ihaya, K. (2011). Narcissistic people cannot be moved easily by visual stimulation. *Perception*, *40*, 1390–1392. <https://doi.org/10.1068/p7062>
- Seya, Y., Shinoda, H., & Nakaura, Y. (2015). Up-down asymmetry in vertical vection. *Vision Research*, *117*, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.10.013>
- Shirai, N., Endo, S., Tanahashi, S., Seno, T., & Imura, T. (2018). Development of Asymmetric Vection for Radial Expansion or Contraction Motion: Comparison Between School-Age Children and Adults. *I-Perception*, *9*(2), 204166951876119. <https://doi.org/10.1177/2041669518761191>
- Shirai, N., & Yamaguchi, M. K. (2004). Asymmetry in the perception of motion-in-depth. *Vision Research*, *44*(10), 1003–1011. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2003.07.012>
- Sigman, E., Goodenough, D. R., & Flannagan, M. (1979). Instructions, Illusory Self-Tilt and the Rod-and-Frame Test. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *31*(1), 155–165. <https://doi.org/10.1080/14640747908400715>
- Skrandies, W. (1987). The upper and lower visual field of man: electrophysiological and functional differences. In H. Autrum, D. Ottoson, E. R. Perl, R. F. Schmidt, H. Shimazu, & W. D. Willis (Eds.), *Progress in Sensory Physiology* (Vol. 8, pp. 1–93). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-71060-5_1
- Snyder, L. H., Grieve, K. L., Brotchie, P., & Andersen, R. A. (1998). Separate body- and world-referenced representations of visual space in parietal cortex. *Nature*, *394*(6696), 887–891. <https://doi.org/10.1038/29777>
- St George, R. J., Day, B. L., & Fitzpatrick, R. C. (2011). Adaptation of vestibular signals for self-motion perception. *Journal of Physiology*, *589*(4), 843–853. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.197053>
- Sverkersten, U., Ygge, J., & Pansell, T. (2009). Drift of visually induced optostatic torsion. *Strabismus*, *17*(2), 82–89. <https://doi.org/10.1080/09273970902952816>
- Switkes, E., Mayer, M. J., & Sloan, J. A. (1978). Spatial frequency analysis of the visual environment: Anisotropy and the carpentered environment hypothesis. *Vision Research*, *18*(10), 1393–1399. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(78\)90232-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(78)90232-8)
- Talgar, C. P., & Carrasco, M. (2002). Vertical meridian asymmetry in spatial resolution: visual and attentional factors. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 714–722. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12613674>
- Tamada, Y., & Seno, T. (2015). Roles of size, position, and speed of stimulus in vection with stimuli projected on a ground surface. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *86*(9), 794–802. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4206.2015>
- Tanahashi, S., Ujike, H., Kozawa, R., & Ukai, K. (2007). Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *4*, 39. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-39>
- Telford, L., & Frost, B. J. (1993). Factors affecting the onset and magnitude of linear vection. *Perception & Psychophysics*, *53*(6), 682–692. <https://doi.org/10.3758/BF03211744>

- Tharani, G., Vedha Varshini, M. G., Senthil Nathan, C. V., Nohan Kumar, G., & Kamatchi, K. (2019). Correlation between body weight and postural Control in healthy individuals using sway meter. *Obesity and Metabolism*, *16*(2), 36–41. <https://doi.org/10.14341/omet10110>
- Thurrell, A. E. I., & Bronstein, A. M. (2002). Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses. *Experimental Brain Research*, *147*(4), 558–560. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1296-1>
- Timmis, M. A., Bennett, S. J., & Buckley, J. G. (2009). Visuomotor control of step descent: Evidence of specialised role of the lower visual field. *Experimental Brain Research*, *195*(2), 219–227. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1773-x>
- Trousselard, M., Barraud, P. A., Nougier, V., Raphel, C., & Cian, C. (2004). Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Cognitive Brain Research*, *20*(3), 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.03.008>
- Trutoiu, L. C., Mohler, B. J., Schulte-Pelkum, J., & Bühlhoff, H. H. (2009). Circular, linear, and curvilinear vection in a large-screen virtual environment with floor projection. *Computers and Graphics (Pergamon)*, *33*(1), 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2008.11.008>
- Tsuruhara, A., & Kaneko, H. (2006). Effects of motion, implied direction and displacement of a large-visual-stimulus on postural control. *Optical Review*, *13*(5), 371–379. <https://doi.org/10.1007/s10043-006-0371-4>
- Väljamäe, A. (2009). Auditorily-induced illusory self-motion: A review. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2009.07.001>
- Van Der Schaaf, A., & Van Hateren, J. H. (1996). Modelling the Power Spectra of Natural Images: Statistics and Information Visual system Power spectrum Spatial frequency Contrast Orientation INTRODUCTION. *Vision Res*, *36*(17), 2759–2770.
- Vingerhoets, R. A. A., De Vrijer, M., Van Gisbergen, J. A. M., & Medendorp, W. P. (2009). Fusion of visual and vestibular tilt cues in the perception of visual vertical. *Journal of Neurophysiology*, *101*(3), 1321–1333. <https://doi.org/10.1152/jn.90725.2008>
- Virtual Reality Society. (n.d.). History Of Virtual Reality. Retrieved from <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>
- Waespe, W., & Henn, V. (1977). Neuronal activity in the vestibular nuclei of the alert monkey during vestibular and optokinetic stimulation. *Experimental Brain Research*, *27*(5), 523–538. <https://doi.org/10.1007/BF00239041>
- Wandell, B. A., Dumoulin, S. O., & Brewer, A. A. (2007). Visual field maps in human cortex. *Neuron*, *56*(2), 366–383. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.012>
- Warren, W. H., Morris, M. W., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *14*(4), 646–660. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.14.4.646>
- Wei, K., Stevenson, I. H., & Körding, K. P. (2010). The uncertainty associated with visual flow fields and their influence on postural sway: Weber's law suffices to explain the nonlinearity of vection. *Journal of Vision*, *10*(14), 1–10. <https://doi.org/10.1167/10.14.1>
- Wenderoth, P. M. (1974). *The distinction between the rod-and-frame illusion and the rod-and-frame test*. *Perception* (Vol. 3).
- Wenye, G. (2021). Detrended Fluctuation Analysis. MATLAB Central File Exchange. Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>

- change/19795-detrended-fluctuation-analysis
- Witkin, H. A., & Asch, S. E. (1948). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, *38*(6), 762–782. <https://doi.org/10.1037/h0053671>
- Wong, S. C. P., & Frost, B. J. (1981). The effect of visual-vestibular conflict on the latency of steady-state visually induced subjective rotation. *Perception & Psychophysics*, *30*(3), 228–236. <https://doi.org/10.3758/BF03214278>
- Wright, W. G., DiZio, P., & Lackner, J. R. (2006). Perceived self-motion in two visual contexts: dissociable mechanisms underlie perception. *Journal of Vestibular Research : Equilibrium & Orientation*, *16*(1–2), 23–28. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16917165>
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, *1*(1), 127–132. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>
- Zhang, T., Heuer, H. W., & Britten, K. H. (2004). Parietal area VIP neuronal responses to heading stimuli are encoded in head-centered coordinates. *Neuron*, *42*(6), 993–1001. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.06.008>
- Zito, G. A., Cazzoli, D., Müri, R. M., Mosimann, U. P., & Nef, T. (2016). Behavioral Differences in the Upper and Lower Visual Hemifields in Shape and Motion Perception. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *10*(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2016.00128>
- 内閣府. (n.d.). Society 5.0. Retrieved from https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- 内閣府. (2016). 第5期科学技術基本計画. Retrieved from <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
- 安藤広志. (2011). 臨場感の構成要素. In 日本バーチャルリアリティ学会 (編), 舘暲 (監修), 佐藤誠 (監修), & 廣瀬道孝 (監修) (Eds.), *バーチャルリアリティ学* (pp. 221–225). 東京: コロナ社.
- 日本ネット経済新聞. (2021, October 21). 〈VRコマース〉「体験」「利便性」を両立／ソニー、ニトリも仮想店舗開設. 日本ネット経済新聞. Retrieved from <https://www.bci.co.jp/netkeizai/article/9643>
- 日本経済新聞. (2021, March 23). 大日本印刷、VRやARで街を「構築」 販促などに応用. 日本経済新聞. Retrieved from <https://www.nikkei.com/article/DGXZQODZ230V90T20C21A3000000/>
- 自治体通信Online. (2020). 自治体×VR・実施事例【自治体事例の教科書】. Retrieved from https://www.jt-tsushin.jp/article/casestudy_vr_case/