

縮小方向及び加速・減速する映像刺激によって発生する 視覚誘導性自己運動感覚が重心動揺に与える影響

三谷将洋^{*1}, 高雄元晴^{*2}

The influence of vection generated by video stimuli involving shrinkage direction and acceleration/deceleration on body sway

Masahiro Mitani, Motoharu Takao
(received Oct. 29, 2024 & accepted Nov. 9, 2024)

Abstract

This study investigates the impact of visual stimuli involving shrinkage direction and acceleration/deceleration on vection and postural sway. Vection, or visually induced self-motion perception, has been previously evaluated using subjective measures, which are often affected by individual differences. This research aims to establish more objective criteria by analyzing postural sway through center of pressure parameters such as sway length and sway area. A virtual reality environment (VR) was created using Unity, where participants were exposed to various types of optical flow stimuli. Specifically, this study examined the effects of moving optical flow in the shrinkage direction and stimuli involving acceleration and deceleration. The results indicated that shrinkage direction and deceleration visual stimuli significantly impacted postural sway, with sway area and sway length serving as effective indicators of vection. These findings suggest that objective measures of postural sway can reliably assess vection, providing valuable insights for applications in VR and simulator systems.

Keywords: Vection, postural sway, optical flow, visual stimuli, shrinkage direction, acceleration, deceleration, center of pressure, virtual reality (VR), motion sickness

1. 緒論

視覚誘導性自己運動感覚（ベクション）は、視覚的な運動刺激によって実際には動いていないにもかかわらず、自分の身体が動いているかのように感じる錯覚現象である。このベクションは日常生活でも観察されることがあり、代表的な例として「トレイン・イリュージョン」が挙げられる。これは、自分が乗っている電車が静止している際に隣の電車が動き出すと、自分の電車が動き出したかのように錯覚する現象である。この現象は、視覚情報が人間の運動感覚に大きな影響を与えることを示している。

近年、仮想現実（VR）やシミュレーター技術の発展に伴い、ベクションはリアリティや没入感を高める要因として注目されている。しかし、ベクションの強さが増すと、VR 酔い（VIMS: Visually Induced Motion Sickness）と呼ばれる不快な症状も発生しやすくなる。VR 酔いは、視覚情報と前庭感覚や体性感覚との不一致に起因し、特に視覚的運動刺激が強くなると酔いの発生率が高まることが知られている。酔いとベクションの関係は、ベクションが強く誘発される状況下で酔いのリスクが増大することが確認されているが、酔いは必ずしもベクションの存在に依存するわけではない。酔いの発生には、個人差や感覚の不一致が影響を及ぼす要因として挙げられる（Keshavarz et al. 2015）。

これまでのベクションに関する研究では、主観的な感覚に基づく指標（ベクションの強度、潜時、持続時間）を利用してき

た。しかし、このような主観的評価は個人差が大きく、データの信頼性に限界があるため、近年ではより客観的な評価方法が求められている。その一つとして、重心動揺を用いた評価が注目されている。重心動揺とは、身体の平衡を保とうとする際に生じる微妙な揺れであり、視覚刺激が加わることでその揺れの程度が変化することが知られている。特に、拡大方向の映像刺激が提示された場合、重心動揺の軌跡長が増加し、この現象がベクションの発生と強く関連していることが確認されている（Tanahashi et al. 2007）。

関（2020）は、オプティカルフロー観測時におけるベクションの発生を重心動揺の軌跡長と外周面積によって客観的に評価する方法を提案した。この研究において彼は、拡大方向の映像刺激に対して重心動揺の軌跡長が、縮小方向の映像刺激では外周面積が有効な指標となることを示唆した。この研究は、主観的評価から脱却し、ベクションを客観的に評価するための重要な基盤となった。

その後、神（2022）は拡大方向の映像刺激に対してさらに詳細な分析を行い、軌跡長を用いることでベクションの有無を二値的に評価することは可能であると示唆した。また、映像刺激への順応までの時間や映像刺激が軌跡長に与える影響を評価するために必要な時間についても検討を行った。しかし、これまでの研究は拡大方向の映像刺激に焦点を当てており、縮小方向や加速・減速といった動的な視覚刺激がベクションに与える影響については十分に検討されていない。

本研究では、縮小方向および加速・減速する映像刺激がベク

* 1 修士課程, 東海大学工学研究科電気電子工学専攻

* 2 教授, 東海大学情報理工学部情報科学科

ションに与える影響を、重心動揺の外周面積と軌跡長という客観的指標を用いて評価することを目的としている。具体的には、異なる種類の視覚的運動刺激が、重心動揺の外周面積や軌跡長にどのように反映されるかを定量的に分析し、これまでの研究を発展させることで、ベクションが重心動揺に与える影響についてより深い研究を行う。

2. 方法

2.1 被験者

本実験には、心身ともに健康であり、課題の遂行に支障のない視力(矯正視力を含む)と色判断が可能な視覚を有する 15 名の大学生が被験者として参加した(男性 15 名, 年齢幅 20~23 才)。

2.2 実験環境

本実験では、3 次元仮想環境の作成には Unity (Unity Technologies) を使用し、被験者には Vive Pro Eye (99HARJ006-00, HTC) のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着させ、オブティカルフローを提示した。Fig.1 は仮想環境を示しており、半径 100m、奥行 600m の円柱型空間で構成し、この空間内には 1 辺が 1m の立方体を 2000 個ランダムに配置した。ただし、Fig.2 で示すように、被験者と立方体が接触させないため、中央から半径 3m の範囲には立方体が配置されないように調整を行った。また、実験ごとの映像刺激に一貫性を保つため、すべての実験で同じ乱数シード値を使用して配置を統一した。

実験中、これらの立方体は視覚的刺激として移動し、端に到達すると反対側の端から再度出現する仕組みにした。被験者が空間内を移動する際、距離感を感じ取れるように、仮想空間には Fog の設定が施されており、約 100m までの範囲では立方体は鮮明に見えるが、200m 離れた地点では完全に視認できなくなった。また、100m から 200m の範囲では距離に応じて立方体が次第に暗く見えづらくなるような設定にした。

重心動揺の計測には、バランス Wii ボード (RVL-021, 任天堂) を使用し、重心動揺の測定は日本平衡神経科学会運営委員会が作成した検査基準(鈴木 1995) に則り行った。

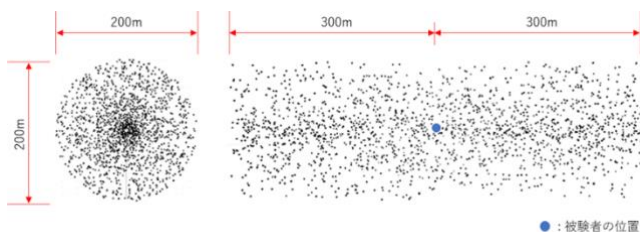


Fig.1 生成空間と被験者の位置

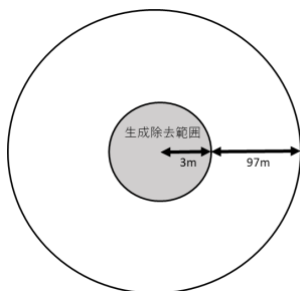


Fig.2 生成除外範囲

2.3 実験手順

はじめに、被験者に実験の所要時間と実験中の注意事項を説明した後、被験者は Wii ボード上に乗し、HMD を装着し、VIVE コントローラー(99HAFR002-00, HTC)を利き手に持たせた。被験者は実験中、正面を向いてもらい、ベクションを感じている間は VIVE コントローラーのトリガーを引かせた。

本実験では 1 回 60 秒の映像を計 12 回提示した。はじめに、何も表示しない映像を提示することで被験者が仮想環境に適応させた。第一実験として、平常時の重心動揺を計測するために静止した視覚刺激での計測を行った。第二実験として、等速かつ縮小方向のオブティカルフローでの計測を異なる速度で計 5 回行った。速度は順に 20(m/s), 40(m/s), 60(m/s), 80(m/s), 100(m/s)で計測した。第三実験として、加速および減速する刺激映像によるオブティカルフローでの計測を異なる速度で計 5 回行った。このオブティカルフローの方向は拡大方向とした。映像前半 30 秒間は速度 0(m/s)から等加速度で加速を行い、実験開始から 30 秒後に最高速度に到達するよう設定した。映像後半 30 秒間は最高速度から等加速度で減速を行い、実験終了時点で速度 0(m/s)に到達するよう設定した。最高速度は順に 20(m/s), 40(m/s), 60(m/s), 80(m/s), 100(m/s)で計測した。日本平衡神経科学会運営委員会では、重心動揺の計測は通常 60 秒間とされているが、困難な場合は明記したうえで 30 秒間の計測データを利用可能と記載した(鈴木 1995)。また、同研究室の神遼河は「拡大方向のオブティカルフロー観測時において平常時の 30 秒の軌跡長と対象とする刺激を提示した際の 30 秒間の軌跡長を比較することでもベクションの有無を二値的に評価することは可能であると示唆された」と示した(神 2022)。本研究では被験者に心理的負担や疲労がかかる可能性を考慮し、加速・減速の計測をそれぞれ 30 秒間で連続して行った。この短縮により、被験者の負担を軽減しつつデータを取得した。

2.4 データ解析

計測した 60 秒間の重心位置の時系列データから軌跡長および外周面積を算出する手法として、過去の研究で利用された WBBSS Analysis (兵頭 2024 確認) のアルゴリズムを採用した。時系列データに対しては、100Hz でリサンプリングを行い、さらに遮断周波数 10Hz のバターワースフィルタを適用してノイズを除去した。各実験のデータが正規分布に従うかどうかを確認するために、正規性の検定(Shapiro-Wilk 検定)を実施した。その結果、第三実験(加速・減速)における速度 20(m/s) のデータにおいて正規性が確認されなかった(Table.1; $p=0.003$)。このため、本研究ではノンパラメトリック検定に基づく比較を行った。外周面積と軌跡長は複数の時間分割で算出され、平常時のデータとの間で有意差が存在するかを確認するために、Wilcoxon の符号順位検定を用いて検証を行った。

Table.1 60 秒間外周面積の正規分布検定

	Shapiro-Wilk		
	統計量	自由度	有意確率
速度0	0.903	15	0.106
速度20	0.871	15	0.035
速度40	0.917	15	0.175
速度60	0.894	15	0.078
速度80	0.933	15	0.299
速度100	0.899	15	0.092
最高速度20	0.791	15	0.003
最高速度40	0.94	15	0.381
最高速度60	0.874	15	0.038
最高速度80	0.942	15	0.406
最高速度100	0.94	15	0.382

3. 結果

3.1 縮小方向オプティカルフロー

まず、平常時（速度 0m/s）と各速度のデータを比較検定した。第二実験（縮小方向オプティカルフロー）の 60 秒間の外周面積を Fig.3、軌跡長を Fig.4 に示す。外周面積に関しては速度 0(m/s)と速度 40(m/s)間 ([0-40]: $p=0.57$) では有意差は確認されないが、その他の速度で有意差が確認された ([0-20]: $p=0.046$, [0-60]: $p=0.004$, [0-80]: $p=0.002$, [0-100]: $p=0.017$)。一方、軌跡長では速度 80(m/s)および 100(m/s)において有意差が確認された([0-80]: $p=0.012$, [0-100]: $p=0.035$)。

次に、前半 30 秒と後半 30 秒にわたったデータに基づいて検定を行い、結果の外周面積を Fig.5、軌跡長を Fig.6 に示す。前半 30 秒間の外周面積では、速度 80(m/s)と速度 100(m/s)で有意差がみられた([0-80]: $p=0.047$, [0-100]: $p=0.036$)。後半 30 秒間の外周面積では、すべての速度で有意差が確認された ([0-20]: $p=0.008$, [0-40]: $p=0.009$, [0-60]: $p=0.001$, [0-80]: $p=0.027$, [0-100]: $p=0.002$)。前半 30 秒間の軌跡長では、すべての速度で有意差が確認されなかった。後半 30 秒間の軌跡長では、すべての速度で有意差が確認された ([0-20]: $p=0.009$, [0-40]: $p=0.005$, [0-60]: $p=0.003$, [0-80]: $p=0.009$, [0-100]: $p=0.005$)。

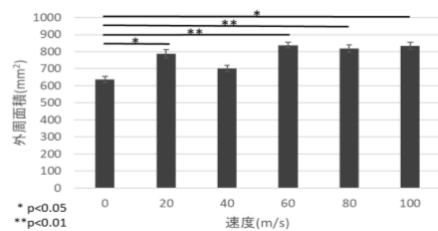


Fig.3 第二実験 60 秒間の外周面積

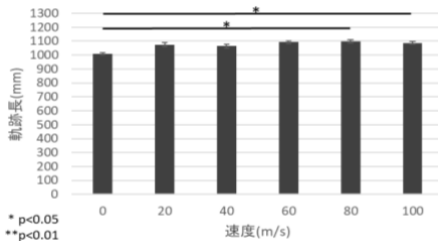


Fig.4 第二実験 60 秒間の軌跡長

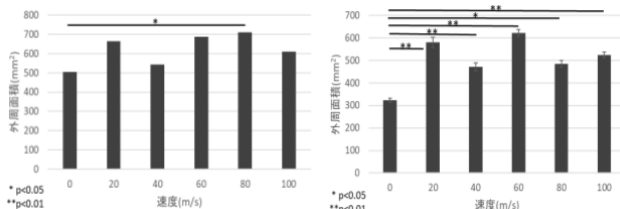


Fig.5 第二実験 30 秒間の外周面積 (左:前半,右:後半)

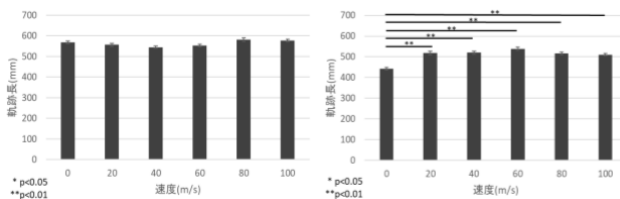


Fig.6 第二実験 30 秒間の軌跡長 (左:前半,右:後半)

3.2 加速・減速する映像刺激によるオプティカルフロー

縮小方向と同様に平常時（速度 0m/s）と各速度の検定を行った．第三実験は加速と減速を分けて 30 秒間のデータで検定を行い，外周面積を Fig.7，軌跡長を Fig.8 に示す．加速映像においての外周面積では，速度 80(m/s)でのみ有意差が確認された（[0-80]: $p=0.047$ ）．減速映像において外周面積では，すべての速度で有意差を確認された（[0-20]: $p=0.005$, [0-40]: $p=0.005$, [0-60]: $p=0.002$, [0-80]: $p=0.0008$, [0-100]: $p=0.001$ ）．加速映像においての軌跡長では有意差が確認されなかった．減速映像の軌跡長では外周面積同様に，すべての項目で有意差が確認された（[0-20]: $p=0.002$, [0-40]: $p=0.005$, [0-60]: $p=0.001$, [0-80]: $p=0.002$, [0-100]: $p=0.003$ ）．

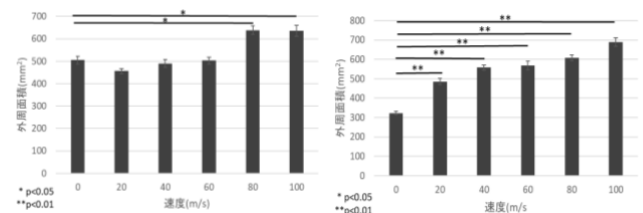


Fig.7 第三実験 30 秒間の外周面積 (左:加速,右:減速)

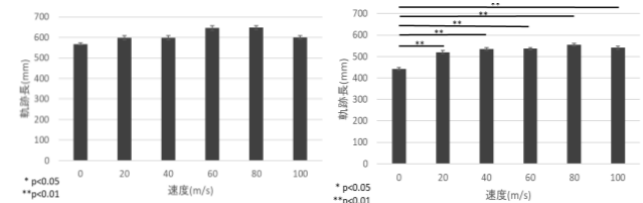


Fig.8 第三実験 30 秒間の軌跡長 (左:加速,右:減速)

3.3 15秒間の重心動揺

1 分間の重心動揺の変化を確認するため、15 秒ごとに分割し、各ブロックで検定した。第二実験の外周面積、第二実験の軌跡長、第三実験の外周面積、第三実験の軌跡長での p 値を Table.2 に示す。

第二実験では、外周面積と軌跡長の両方で 0~15 秒間、15~30 秒間で有意差は確認されなかった。しかし、外周面積 30~45 秒間、45~60 秒間ではすべての速度で有意差が確認され、軌跡長についても 30~45 秒間ではすべての速度で有意差が確認され、45~60 秒間では速度 60(m/s)及び 80(m/s)の二項目で有意差が確認された。

第三実験では、外周面積と軌跡長の両方で 0~15 秒間のすべてでも速度で有意差が確認されず、15~30 秒間では速度 80(m/s) で有意差が確認されるものの、それ以外の速度では有意差が確認されなかった。30~45 秒間、45~60 秒間では、外周面積と軌跡長の両方ですべての速度で有意差が確認された。

Table.2 15秒分割した外周面積および軌跡長 (A:第二実験の外周面積, B:第二実験の軌跡長, C:第三実験の外周面積, D:第三実験の軌跡長, 水色 $p<0.05$, 青色 $p<0.01$)

A 第二、外周						B 第二、前趾					
20m/s	40m/s	60m/s	80m/s	100m/s		20m/s	40m/s	60m/s	80m/s	100m/s	
0-15s	0.28	0.46	0.91	0.281	0.691	0-15s	0.334	0.334	0.334	0.865	0.334
15-30s	0.57	0.776	0.233	0.281	0.069	15-30s	0.427	0.496	0.334	0.427	0.088
30-45s	0.031	0.00098	0.008	0.012	0.005	30-45s	0.0199	0.006	0.02	0.0199	0.017
45-60s	0.017	0.047	0.0008	0.012	0.0125	45-60s	0.112	0.112	0.006	0.0268	0.078

C 第三、外周						D 第三、前趾					
20m/s	40m/s	60m/s	80m/s	100m/s		20m/s	40m/s	60m/s	80m/s	100m/s	
0-15s	0.496	0.865	0.334	0.394	0.532	0-15s	0.691	0.82	0.307	0.334	0.865
15-30s	0.191	0.427	0.233	0.027	0.173	15-30s	0.14	0.307	0.0535	0.031	0.156
30-45s	0.036	0.0106	0.001	0.0199	0.005	30-45s	0.008	0.031	0.002	0.017	0.017
45-60s	0.003	0.005	0.005	0.008	0.001	45-60s	0.005	0.002	0.011	0.002	0.006

4. 考察

4.1 ベクシオンが重心動揺により評価可能であるか

重心動揺の外周面積と軌跡長が、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であるかを検討する。縮小方向オブティカルフローを提示した第二実験では、外周面積において速度 40(m/s) (Fig.3) 以外のすべての速度で有意差を確認される。したがって、縮小方向オブティカルフロー観測時において外周面積を用いることで、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であると示唆される。

また、軌跡長においては速度 80(m/s), 100(m/s) (Fig.4) で有意差が確認される。これは、映像刺激が強くなることでベクシオンが強く感じられるため、軌跡長が大きくなったことを示唆している (Seno & Palmisano 2018)。したがって、映像刺激が強い場合には、縮小方向オブティカルフロー観測時の軌跡長でも有意差が確認でき、ベクシオンの有無を二値的に評価できる可能性が考えられる。

加速・減速する映像刺激によるオブティカルフローを提示した第三実験は、映像後半である減速映像において外周面積、軌跡長共にすべての速度で有意差が確認される。この結果は、減速する映像刺激によるオブティカルフロー観測時において外周面積および軌跡長を用いることでベクシオンの有無を二値的に評価することは可能であると示唆している。

4.2 映像刺激が影響を与えたと評価するために必要な時間

拡大方向オブティカルフローを提示した実験を行った神 (2022) は、15~30 秒間および 30~45 秒間で有意差を確認した。神は、0~15 秒ほどは映像刺激による影響は個人差に依存するところが大きく、15~30 秒、30~45 秒の 30 秒間は映像刺激に順応しつつある状態となり、45~60 秒では順応が完了しつつあるために、平常時の軌跡長と比較しても有意差が確認されなかったと述べている。本研究の 15 秒間に分けて検定をした結果では、すべての 30~45 秒間において有意差が確認され、45~60 秒間においても第二実験の軌跡長以外ではすべての項目で有意差が確認された (Table.2)。

第二実験の 15~30 秒間で有意差が確認されなかった理由として、縮小方向オブティカルフローは拡大方向よりも重心動揺への影響が小さく、そのため映像に順応しつつあり個人差は小さくなるまでの時間が長くなったと考えられる。また、第三実験の 15~30 秒間で外周面積と軌跡長で有意な差が確認できない理由として、第三実験開始時点で被験者が 7 分以上直立状態であり疲労が蓄積しており個人差が大きくなったことが考えられる。さらに、第三実験は実験開始時の速度が 0(m/s) から加速しているため、映像刺激が徐々に強まる段階では有意差が検出されにくくなった可能性がある。

したがって、縮小方向オブティカルフローにおいて映像刺激が外周面積に影響を与えたと評価するためには、順応に約 30 秒要するため、約 45~60 秒間が適切な計測時間であると示唆される。減速する映像刺激によるオブティカルフローでは、約 45~60 秒間の計測時間があれば有意な外周面積および軌跡長での差を確認できると示唆される。今後、減速する映像刺激によるオブティカルフローの 30 秒計測が可能であるか、加速する映像刺激によるオブティカルフローの適切な計測時間には、追加の実験が必要である。

5. 結論

本研究は映像刺激によるベクシオンが重心動揺に与える影響のさらなる研究として、縮小方向オブティカルフロー及び加速・減速する映像刺激によるオブティカルフローを提示した際の外

周面積と軌跡長について研究を行った。その結果、縮小方向オブティカルフローでは外周面積において、減速する映像刺激によるオブティカルフローでは外周面積と軌跡長において、ベクシオンの有無を二値的に評価することが可能であると示唆される。また、映像刺激を強くすることで縮小方向オブティカルフローの軌跡長でも評価することが可能であると推測される。さらに、縮小方向オブティカルフローでは映像刺激へ順応するのに約 30 秒要することから、30 秒計測ではなく 60 秒計測が適切であると示唆される。

6. 謝辞

本研究を行なうにあたり、被験者として協力していただいた皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- Keshavarz, B., Riecke, B. E., Hettinger, L. J., & Campos, J. L. (2015). Vection and visually induced motion sickness: How are they related?, *Frontiers in Psychology*, 6: 472.
- 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
- Seya, Y & Shinoda, H. (2018). Relationship between vection and motion perception in depth. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80: 2008–2021.
- 関隼涼. (2020). Virtual Reality 環境下における重心動揺を指標とした視覚誘導性自己運動感覚の評価. 東海大学大学院工学部工学研究科電気電子工学専攻 修士論文
- 神遼河. (2022). 拡大方向の映像刺激によって発生する視覚誘導性自己運動感覚が重心動揺に与える影響, 東海大学大学院 工学研究科電気電子工学専攻 修士論文
- 鈴木淳一. (1995). 重心動揺検査の Q&A, 手引き, 日本平衡神経科学会運営委員会, *Equilibrium Research*, 55: 64-77
- 兵頭勇己. 各種パラメータの計算方法について https://researchmap.jp/blogs/blog_entries/view/112495/73ce14692d136ab25274892f9e15a618?frame_id=513522, (参照 2024-09-18)