



VR 映像におけるオプティカルフロー変動量が VR 酔いに与える影響

Study on the Effects of Temporal Variations in Optical Flow in VR Videos on VR Sickness

竹下一希¹⁾, 宮地英生²⁾

Itsuki TAKESHITA¹, Hideo MIYACHI²

1) 東京都市大学 環境情報学研究科 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西 3-3-1, g2483013@tcu.ac.jp)

2) 東京都市大学 情報システム学科 (〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西 3-3-1, miyachi@tcu.ac.jp)

概要: 本研究は、Optical Flow の時間的変化量と VR 酔いの関係を定量的に検証することを目的とした。6 名の被験者に等速条件・緩急条件の VR 映像を提示し、SSQ により酔い反応を評価した。総合スコアに有意差はなかったが、失見当識スコアは緩急条件で高く、空間認知への影響が示唆された。

予測因子としての有効性には今後のさらに被験者数を増やした実験が必要である。

キーワード: VR 酔い, サイバー酔い, オプティカルフロー, Simulator Sickness Questionnaire(SSQ)

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、仮想現実 (Virtual Reality: VR) 技術の急速な発展により、VR コンテンツはエンターテインメント分野にとどまらず、業務支援、教育、遠隔会議など、実用的な領域へと応用範囲を広げている。これに伴い、VR コンテンツにおけるユーザー体験の質は、従来以上に重要な検討課題となっている。その中でも、未だ明確な発生原因や解決策が確立されていない VR 酔い (VR sickness) は、依然として深刻な問題である。VR 酔いは、めまい、発汗、吐き気、平衡感覚の異常などの症状を引き起こし、ユーザー体験を著しく損なう可能性がある。そのため、近年では酔いにくい VR コンテンツの設計が強く求められている。しかし、現状 VR 酔いの評価には、Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) による主観的評価または、重心動揺、眼球運動、皮膚電気活動などの生理的指標を用いた被験者実験が必要とされる。これらの手法は、被験者の確保や実験環境の整備に多大な時間・コストを要するため、VR コンテンツの開発現場において迅速な評価手段とは言い難い。こうした背景から近年では、VR 映像に内在する視覚的・構造的特徴量に着目し、VR 酔いのリスクを事前に定量的に予測する手法の研究が進められている。このような量的指標に基づくアプローチにより、開発段階から VR 酔いの発生リスクを効率的に評価することが可能となり、酔いを低減するコンテンツ設計を支援できると期待されている。VR 酔いのリスクを開発段階で予測できれば、快適で持続的な

VR 体験の開発が可能となる。

1.2 VR 酔い

VR 酔いの発生メカニズムは、未だ完全には解明されていない。しかしこれまでに、いくつかの有力な仮説が提唱されており、代表的なものとして感覚混同説 (Sensory Conflict Theory) [1]がある。この理論では、視覚から得られる情報と前庭覚や体性感覚などの他の感覚器官からの情報に食い違いが生じた際、脳がこの矛盾を適切に処理できず、結果として自律神経系の失調を引き起こして VR 酔いが発生するとするものである。この理論に基づくと、視覚刺激によって誘発される自己移動感覚 (Vection) を低減させることが VR 酔いの軽減につながると考えられる。実際に視界にマスクをかけることで VR 酔いを軽減できたと報告されている[2]。したがって、Vection を誘発する要因を VR 視界内から定量的に抽出・評価することができれば、VR コンテンツにおける酔いの程度を客観的に評価する指標の構築が可能となる。

1.3 先行研究

視覚刺激のうち Vection 誘発の主要因として、観測者とシーン間で時間的に連続する 2 枚の画像間において生じる光学的な動き (Optical Flow, 以下 OF) が注目されている。Wu and Suma Rosenberg らは、VR 視界内のオプティカルフローが強い部分を検出して視野制限を行うことで、VR 酔いの軽減に成功したと報告している[3]。また、Seno ら (2018) は、視覚映像内の OF への曝露時間が長いほど、主観的に報告されるベクシオンの強さが増加することを、

アニメーション映像および単純な視覚刺激を用いた 2 つの実験により示した。これらの結果から、VR 映像内の OF が誘発される Vection の強さに関与し、VR 酔いの一因であることが示唆される。そのため、実際に OF を VR 酔いの指標として活用する研究が進められている。Lee (2017) らは、3 種類の異なる移動方式を用いた VR コンテンツを作成し、14 名の被験者に体験させた。そして、各被験者のプレイ映像から算出した OF と、SSQ 評価結果との相関を分析している。結果、VR 映像内の各フレームにおける画面全体の OF ベクトルの大きさを累積した積算強度 (Accumulated Intensity) が SSQ スコアと中程度の相関を示し、VR 酔いの予測因子として有効であることが示された[4]。

1.4 本研究の目的

先行研究により、OF の強度が VR 酔いの発生に関与していることが明らかになっている。しかし、既存の研究では主に映像全体の動きの累積量に着目しており、動きの時間的変化パターンについては十分に検討されていない。そこで本研究では、OF の時間的な変化量に着目する。Bonato らの研究では、速度が一定である Vection よりも、速度が頻繁に変化する不規則な Vection の方が、VR 酔いの誘発につながりやすいことを報告している[3]。これは、人間の前庭感覚系が加速度変化に対して高い感受性を有しており、視覚刺激の急激な変化が感覚統合系に過剰な負荷を与えることが、酔いの一因となるためと考えられる。したがって、VR 映像においても視界の動きの変化量が VR 酔いに影響を与えると考えられる。本研究の目的は、OF の時間的変化量と VR 酔いとの関係を定量的に明らかにし、当該変化量の VR 酔いの予測因子としての有効性を検証することである。

2. 実験

本実験では、6 名の被験者 (大学生, 20 歳~24 歳) を対象とした。被験者には、OF の時間的変化量に差異のある 2 種類の VR 映像を 5 分間視聴させた。また、映像視聴前後に SSQ を回答させ、主観的な VR 酔いの程度を評価した。

2.1 仕様器具

VR 映像はゲームエンジン Unity を用いて構築した。また、デバイスは、VIVE 社製の一体型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) である Vive Focus Vision を使用した。

2.2 OF 算出法

従来の画像ベースによるオプティカルフロー算出手法 (例: Lucas-Kanade 法や Horn-Schunck 法) とは異なり、Unity 環境内の 3 次元空間情報と視点移動情報を活用して OF を算出した。本手法では、カメラの動きと空間座標に基づいてフレーム間のスクリーン上の特徴点移動を追跡し、OF ベクトルを導出する。以下にその具体的な手順を示す。

2.2.1 OF 算出アルゴリズム

Unity 空間で 5 分間にわたり 60Hz でカメラ映像を取得し、5 つの処理を繰り返すことで、5 フレーム単位の OF を算出した。

(1)特徴点の抽出

Unity カメラが描画する画面から Harris コーナー検出アルゴリズムを用いて特徴点画素を抽出する。

(2)特徴点の座標記録

抽出された各特徴点について、スクリーン座標 (2 次元) と Unity 空間上に対応する 3 次元座標を記録する。

(3)視点の移動

Unity カメラを次のフレームにおける位置へ移動させる (視点の更新)。

(4)移動後のスクリーン座標の再計算

手順 2 で記録した 3 次元空間座標を用いて、移動後のカメラ視点におけるスクリーン上の座標を再計算 (再投影)。

(5)OF ベクトルの算出

移動前後のスクリーン座標の差分を取り、各特徴点ごとに OF ベクトルを算出。

2.3 提示映像

提示する VR 映像は、仮想空間内 (図 1) において、カメラが 8 の字軌道 (図 1 青線) に沿って上下運動を伴いながら移動する様子を記録したものである。2 種類の映像ともに Unity 上で作成され、1 周 30 秒、1 周あたり 4 回の上下運動を行う構成とし、これを 10 周繰り返すことで、全体で 5 分間の映像となるよう設計した。提示映像は以下の 2 種類である。

2.3.1 等速映像 (Constant-Speed Condition)

この映像では、カメラは 8 の字軌道上を xz 平面方向常に一定の速度で移動するように制御される。具体的には、1 周あたり 30 秒となるように時刻 t を一定の角速度で更新し、空間上の移動速度が時間に対して均等になるよう設計した。これにより、視点移動に伴う OF の強度変化は最小限に抑えられる。

2.3.2 緩急映像 (Acceleration-by-Height Condition)

この映像では、軌道上の y 軸方向 (上下動) に合わせてカメラの移動速度が周期的に加減速する。高さが最も高くなる地点で速度が最も遅く、最も低くなる地点で速度が最も速くなるように、空間速度を滑らかに変化させた。この制御により、軌道全体の移動距離や周回時間を等速条件と揃えつつ、OF の時間的な変化量に違いをもたせている。両映像は、移動軌道・移動距離・周回時間を統一したうえで、被験者が受ける OF 総量を等しくしつつ、OF の時間的変動特性のみを操作することを目的としている。

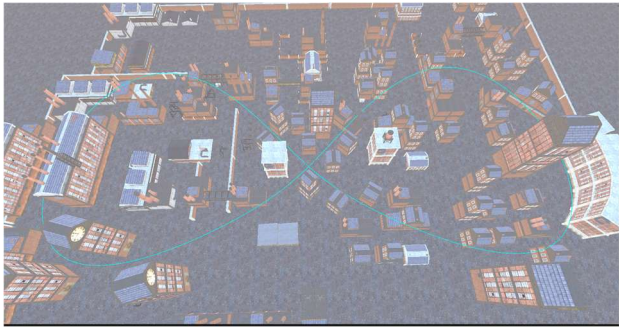


図 1：映像作成に使用した仮想空間

2.4 各映像の OF 分析

等速映像、緩急映像の 1 周分の OF 解析を実施した結果を図 2 に示す。両条件ともに約 6-7 秒間隔で周期的な変動パターンを示した。これは 8 の字軌道の 1 周につき 4 回の上下運動に対応するものと考えられる。また、全映像における平均 OF ベクトルの変化量は、緩急条件で 18.16pixel、等速条件で 11.09pixel となり、緩急条件が等速条件の約 1.6 倍の変化量があるとわかった。

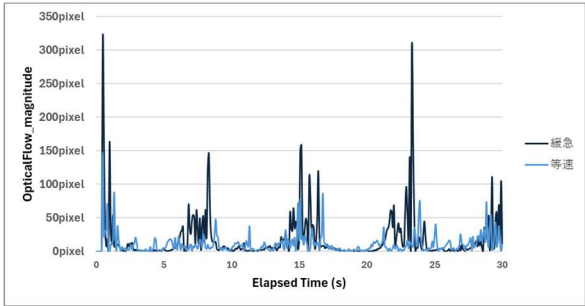


図 2：映像 1 周分の OF 変化量推移

2.5 実験手順

被験者 6 名 (A, B, C, D, E, F) を対象とし 2 種類の映像を異なる順序で視聴させる実験を実施した。視聴順序による影響を統制するため、被験者を 2 群に分けた。第 1 群 (A, B, D) は等速映像から緩急映像の順で視聴し、第 2 群 (C, E, F) は緩急映像から等速映像の順で視聴した。

2.6 評価法

各映像視聴後の VR 酔いの程度は、Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [4]を用いて評価した。SSQ は 16 項目の自覚症状を 4 段階で評価する標準化された質問紙であり、VR 環境での酔い評価に広く使用されている。

3. 結果

各映像条件における SSQ スコアを表 1、表 2 に失見当識スコアの箱ひげ図を図 3 に示す。

3.1 総合スコア

等速条件と緩急条件の総合スコアの傾向は、被験者毎に異なった。被験者 A, B, D においては緩急条件よりも等速条件でスコアが高く、それぞれ 11.22 から 33.66, 44.88 から 71.06, 41.14 から 48.62 へと増加した。一方、被験者

C, E, F においては等速条件よりも緩急条件でスコアが高く、それぞれ 59.84 から 18.7, 37.40 から 0.00, 29.92 から 18.7 へと減少した。

3.2 悪心(Nausea)

緩急条件では被験者 A (0.00) を除く 5 名で症状が観察され、特に被験者 D (66.78), 被験者 C (57.24) で高いスコアを示した。等速条件では被験者 E (0.00) で症状が全く観察されなかった。等速条件は緩急条件と比べてスコアが低い傾向を示した。

3.3 眼精疲労(Oculomotor)

眼精疲労については、等速条件において被験者 B(111.36) が最も高いスコアを示し、緩急条件での同被験者のスコア (45.48) を大きく上回った。しかし、被験者 C, D, F においては緩急条件の方が高い値を示した。

3.4 失見当識(Disorientation)

失見当識症状は緩急条件において顕著に現れ、被験者 C (97.44), 被験者 B (83.52), 被験者 D (55.68) で高いスコアが記録された。等速条件では全体的に低い値となり、被験者 E (0) では症状が全く観察されなかった。

表 1：緩急条件映像 SSQ スコア

被験者	Nausea (悪心)	Oculomotor (眼精疲労)	Disorientation (失見当識)	TotalScore (総合)
A	0.00	15.16	13.92	11.22
B	47.7	45.48	83.52	44.88
C	57.24	68.22	97.44	59.84
D	66.78	37.9	55.68	41.14
E	47.7	37.9	13.92	37.40
F	38.16	30.32	41.76	29.92

表 2：等速条件映像 SSQ スコア

被験者	Nausea (悪心)	Oculomotor (眼精疲労)	Disorientation (失見当識)	TotalScore (総合)
A	15.16	41.76	33.66	33.66
B	53.06	111.36	71.06	71.06
C	7.58	55.68	18.7	18.7
D	45.48	55.68	48.62	48.62
E	0.00	0.00	0.00	0.00
F	22.74	13.92	18.7	18.7

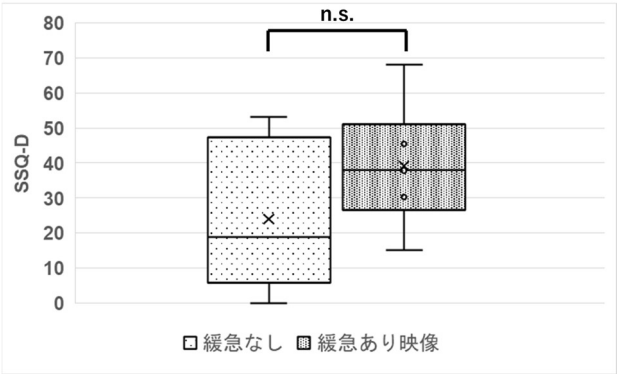


図 3：SSQ-D（失見当識）スコア箱ひげ図

4. 考察

4.1 映像条件による影響の差異

緩急条件と等速条件のVR映像を提示し、SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) に基づいて被験者 6 名の酔い反応を分析した結果、総合スコア (Total Score) においては、緩急条件 ($M=37.40$, $SD=19.50$) と等速条件 ($M=31.79$, $SD=25.23$) の間で統計的有意差は認められなかった ($t(5) = 0.70$, $p = .519$)。また、各下位尺度の分析では、悪心 (Nausea) および眼精疲労 (Oculomotor) スコアにおいて条件間で明確な傾向は示されず、個人差が支配的であった。

一方、失見当識 (Disorientation) スコアは、緩急条件 ($M = 50.71$, $SD = 34.04$) が等速条件 ($M = 31.79$, $SD = 25.23$) よりも高い傾向を示し、約 60% の増加が観察されたが統計的有意差には至らなかった。

4.2 視聴順序の影響

本実験結果における重要な考察点として、視聴順序による慣れ効果と順序効果が挙げられる。グループ 1 (等速→緩急) では、初回の等速条件で高いスコアを示し、2 回目の緩急条件で相対的に低いスコアを示した。これは映像視聴に対する慣れが症状の軽減に寄与した可能性を示唆している。一方、グループ 2 (緩急→等速) では、初回の緩急条件で高いスコアを示し、2 回目の等速条件で相対的に低いスコアを示した。これは緩急条件による初期の強い刺激が、後の等速条件への適応を促進した可能性が考えられる。しかし、被験者 E (グループ 2) は等速条件で全症状において 0 スコアを示しており、単純な慣れ効果だけでは説明できない個人差の存在も示唆される。このことから、視聴順序の影響と個人の感受性の両方が結果に影響を与えていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、VR 映像中の各フレームにおけるオプティカルフローベクトルの時間的変化量に着目し、その変動が VR 酔いに与える影響を定量的に検討した。被験者実験の結果、総合的な酔いスコア (SSQ) においては条件間に有意な差は認められなかったものの、失見当識 (Disorientation) スコアにおいて緩急条件での増加傾向が確認された。また、視聴順序による慣れや個人差が結果に影響を与えている可能性も示唆された。以上の結果から、オプティカルフローの変化量が VR 酔いの一因となり得る可能性は示されたが、その有効性を検証するには、より大規模なサンプルを用いた追加研究が必要であると考えられる。

5.1 研究の限界

本研究にはいくつかの限界が存在する。第一に、サンプルサイズの制限が挙げられる。本研究は 6 名の被験者により実施されたが、統計的な検定力が限定的である。より信頼性の高い結果を得るためには、より大規模な被験者群での検証が必要である。第二に、実験設計における順序効果の統制が不十分である。本研究では被験者をグループ 1

(等速→緩急) とグループ 2 (緩急→等速) に分けたが、完全なカウンターバランス設計を採用していない。視聴順序の影響を厳密に評価するためには、被験者を無作為に 2 つの視聴順序群に割り当てる実験設計が必要である。第三に、映像パラメータの詳細な分析が不足している。本研究では等速条件と緩急条件の比較を行ったが、具体的な加速度、角速度、視野角などの映像特性と症状の関連性については詳細な分析を行っていない。

5.2 今後の展望

今後の改善点として、第一に、より大規模な被験者群による追試験の実施が不可欠である。今回は 6 名の学生を対象に実験を行ったが OF 変化量と VR 酔いの関係を調べるには被験者数が不十分だと考える。第二に、個人差を考慮した層別化分析や、映像酔い感受性の事前評価に基づく被験者選択の導入が有効と考えられる。これらの改善により、OF の時間的変化量と VR 酔いの関係をより確実に解明できると期待される。

参考文献

- [1] Reason, J. T. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mismatch model. *Journal of the royal society of medicine*, 71(11), 819-829.
- [2] Fernandes, A. S., & Feiner, S. K. (2016, March). Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In 2016 IEEE symposium on 3D user interfaces (3DUI) (pp. 201-210). IEEE.
- [3] Bonato, F., Bubka, A., Palmisano, S., Phillip, D., & Moreno, G. (2008). Vection change exacerbates simulator sickness in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 17(3), 283-292.
- [4] Lee, J. Y., Han, P. H., Tsai, L., Peng, R. D., Chen, Y. S., Chen, K. W., & Hung, Y. P. (2017). Estimating the simulator sickness in immersive virtual reality with optical flow analysis. In *SIGGRAPH Asia 2017 Posters* (pp. 1-2).
- [5] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220.