

オプティカルフローに応じた非円形視野制限による VR酔い軽減手法

萱場 大貴^{†1} 宮下 芳明^{†1}

概要: 「VR酔い」はオプティカルフローによって発生することが知られている。対策として、画面の一部を覆い隠す視野制限手法が用いられている。これまで、視野角の範囲を狭める手法や、円形視野を移動させオプティカルフローの大きい箇所を覆い隠す手法が存在する。本稿では、オプティカルフローが大きい箇所をよりの確に覆い隠すため、非円形に視野を制限するシステムを開発した。さらに、ユーザ実験を行った結果、VR酔いの軽減と、従来手法と比較して空間探索能力の向上が見られた。一方、視野形状の変化が一部ユーザの臨場感を損なうことが示唆された。

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及により、バーチャルリアリティ (VR) は 360 度動画の視聴やゲームなどのエンタテインメントまで活用が広がっている。一方で、HMD での VR 体験時に発生しやすい「VR酔い」は VR 普及における大きな障壁となっている。

VR酔いは、視覚情報による自己運動感覚であるベクシオンと、前庭感覚や体性感覚とのずれによって発生するとされている [1]。また、ベクシオンは画面の動きの大きさであるオプティカルフローによって引き起こされる。特に周辺視野はオプティカルフローに敏感である。

そこで、VR酔い対策として周辺視野の視覚情報を制限する手法が用いられている。特に、VR酔いを起こしやすいシーンにのみ動的に視野角制限をする手法は有効的である [2]。そのため、図 1 に示すように、Google Earth VR などの人気のあるコンテンツや、Population One などの様々な VR ゲームで使用されている [3]。一方で、視野制限手法は VR 空間における探索能力の低下、ユーザが受ける臨場感の低下を引き起こすことが問題となっている。

本稿では、オプティカルフローが大きい箇所を狙った非円形の視野制限手法を提案する。これにより、従来手法よりも視野を維持できると考えられる。そのため、VR酔い軽減効果を維持しつつ、臨場感と空間探索能力の低下を軽減することが期待される。

本稿では、非円形視野制限の実装を行い、ユーザを対象とした実験を行った。その結果、VR酔い軽減効果と、視

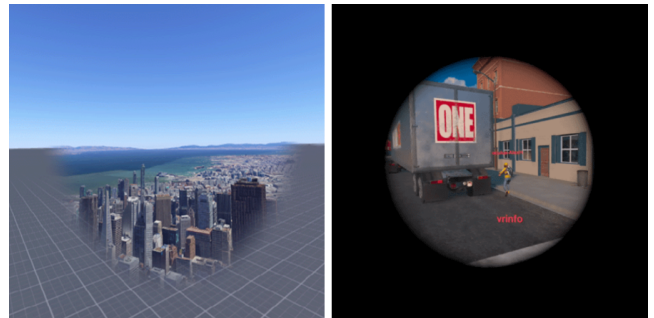


図 1 視野制限の例。

線移動の増加、探索タスク完了時間の短縮が見られた。一方、複数のユーザから、特に画面下方向の視野形状の変化が気になるという問題点が挙げられた。

2. 関連研究

2.1 VR酔い

VR酔いは、乗り物酔いに似た現象であり、めまい、吐き気、眠気、方向感覚の喪失など様々な症状を引き起こす [4]。成人の最大 67% が VR酔いを経験することから、VR の普及を妨げる大きな要因であると考えられる。また、VR酔いのしやすさは個人差が大きいことが知られている [5]。一方で、乗り物酔いのしやすさや、VR 体験に対する慣れと関係があることが知られている。

VR酔いの原因について、eye movement theory や postural instability theory, sensory conflict theory という説が存在する [1]。1 つ目は視覚情報のオプティカルフローによって発生する、急速な眼球運動が酔いを引き起こすという説である。2 つ目は姿勢の不安定性が酔いを引き起こすという説である。3 つ目はオプティカルフローに由来す

^{†1} 現在、明治大学
Presently with Meiji University

る自己運動感覚であるベクシオンと、前庭感覚や体性感覚とのずれによってVR酔いが引き起こされるという説である。これらの説は対立するものではなく、互いに影響し合っていると考えられている。本研究は、sensory conflict theoryに基づくVR酔い軽減手法を提案する。

オプティカルフローの大きさはVR酔いと相関があるが、定量化するのは難しい[6]。VR酔いのしやすさは個人差が大きいためである。そのため、VR酔い軽減システムは、ユーザごとの酔いやすさに応じたチューニングが推奨されている。

2.2 VR酔い軽減手法

sensory conflict theoryに基づく手法は、主にオプティカルフローを低減する方法をとる。例として、ベクシオンを引き起こしやすい、コントローラを用いたプレイヤーの移動を、連続的でなく瞬間移動で行うテレポーションが存在する[7]。また、旋回操作時、画面全体にぼかしを加える手法[8]や、被写界深度ぼかしを加える手法が提案されている[9]。他にも、オプティカルフローをベクシオンを打ち消す方向に可視化する手法[10]が存在する。これらの手法はVR酔いを抑制する代わりに、ユーザ体験を損なうことが問題となっている。

2.3 視野制限手法

人間の周辺視野は、オプティカルフローに敏感であることが知られている[11]。そこで、画面の周辺部を覆い隠す視野制限手法が用いられている。これにより、周辺視野への視覚刺激を抑え、ベクシオンとそれに伴うVR酔いを抑制することができる[12]。しかし、視野が狭まることでVR空間の探索能力の低下[13]、ユーザが受ける臨場感の低下につながる。また、ユーザが受ける速度感にも影響を与える可能性が示されている[14]。

これらの欠点を補うため、酔いやすいシーンでのみ適用される、動的な視野角制限手法が存在する。Fernandesらは、酔いやすさをVRゲームにおけるプレイヤーの速度、角速度から取得した。これは、VR酔い軽減のための動的な視野角制限に関する最初の研究である[2]。動的な視野制限は人気のVRコンテンツであるGoogle Earth VRで、VR酔いを軽減するコンフォートモードとして用いられている。他にも様々なVRゲームで用いられている。

視野角制限の欠点を最小限にするため、様々な動的視野制限手法が検討されている。Adhanomらは、ユーザの視線位置を視野中心とした視野制限手法を提案した[15]。Feiらは、視野角制限の際に、足元の視野を維持する手法を提案した[16]。これらの手法は、別のVR酔い軽減手法と組み合わせて使用することが期待されている。

さらに視野範囲を維持する手法として、Adaptive FOV Restrictorが存在する[17]。これは本稿における提案手法

と同じ、オプティカルフローの大きい箇所のみを覆い隠す手法である。楕円視野の径と中心位置を変化させることで視野制限する。欠点として、視野が円形であるため、VR空間によっては、オプティカルフローの大きい箇所を的確に制限できないことが挙げられている。

3. 提案手法：非円形視野制限

VR酔いは、画面のオプティカルフローの大きさに起因するベクシオンにより引き起こされることが知られている。そこで本稿では、オプティカルフローの大きい範囲を的確に覆い隠すため、非円形に視野制限する手法を提案する。図2は、非円形視野制限のシステムの概略図である。

3.1 装置

HTC VIVE Pro Eye ヘッドセット（解像度：2880 × 1600 pixels, 水平視野角：110°, リフレッシュレート：90Hz, 自由度：6DOF）向けに実装した。PCはALIENWARE m17 R2（CPU: intel Core i7-9750H, 2.60GHz, RAM: 16.00 GB, GPU: NVIDIA GeForce RTX 2070, OS: Windows 10 Home）である。アプリケーションはUnity2021.3.1f1で実装した。

3.2 オプティカルフローの計算

密なオプティカルフローであるHorn-Schunck法を用いた。実装にあたり、Unityのcompute shaderを利用した。また、十分なリフレッシュレートを確保するため、5ピクセルごとに処理を行った。

オプティカルフローの計算にあたり、画面を16×16に分割し、256のグリッドにした。オプティカルフローの計算は、各画素のオプティカルフローを計算し、グリッドごとに平均値を求める。これが設定する閾値を超えた場合、オプティカルフローが大きいグリッドとして設定される。このオプティカルフローが大きいグリッドを覆い隠すように、次節で述べる視野制限マスクが制御される。

3.3 視野制限マスク

視野制限に用いる画像（視野制限マスク）を図3に示す。UnityのSprite Shape Controllerで実装した。これは画像をベジエ曲線で制御するツールである。視野制限マスクは、円中心側にぼかしを加え、ユーザの気をそらしにくい設計とした。不透明度は線形変化する。ぼかしの大きさは、視野角を20°覆い隠す設計とした。

実装上の問題として、ベジエ曲線の制御により、ぼかし部分の画像が重なることでアーティファクトが発生してしまう。これはユーザの気をそらす要因となる。そこで、半透明の画像が重なったとき、より透明度の大きい画素を優先してレンダリングするシェーダを適用した。

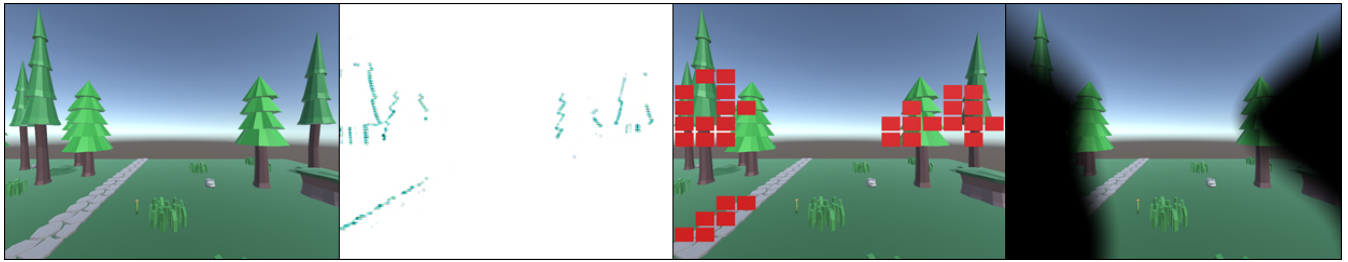


図2 非円形視野制限のシステムの概略図. 左から順に, 主観視点の映像, 前進時のオプティカルフローが大きい画素, オプティカルフローが大きいグリッド, 非円形視野制限.

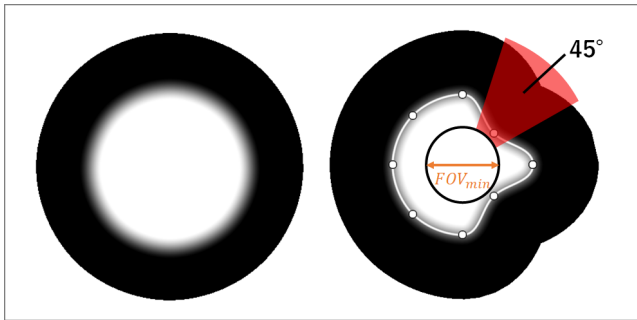


図3 (左) 変形前の視野制限マスク. (右) 変形後. 赤領域は制御点が8個のときの, 制御点の変域を示す. FOV_{min} は最小視野角を示す.

3.3.1 制御点の変域

各制御点の変域は, 制御点が n 個のとき, 弧度が $360^\circ/n$ の扇形の領域である. 図3に, 制御点が8個のときの領域を示す. その中で, 最小視野角 (FOV_{min}) の範囲外かつ, 最も視野制限マスクの中心に近い, オプティカルフローが大きいグリッドを覆い隠すように移動する. 今回, FOV_{min} は 45° に設定した. これは Google Earth VR などのコンテンツでよく用いられる値である.

3.3.2 制御点の移動

制御点の移動はイージングされ滑らかに補間される. その速さ C_{rate} は式1で定義される.

$$C_{rate} = \begin{cases} 1 (FOV \geq 95^\circ) \\ C_{rate} \times \frac{FOV}{95^\circ} (FOV_{min} < FOV < 95^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

FOV は各制御点の座標を, 視野中心との距離として表したものである. $C_{rate} = 1$ のとき, 0.3秒で補間が終了する速さである. 視野角が 95° 以上の視野制限は, Fernandesらの実験により, ユーザに気づかれないことが示されている [2]. そのため, 移動速度を速めた. 95° 以下の視野角では, 中心視野に近いほど, 視野制限の変化が目立ちやすくユーザ体験を損なう. そこで中心視野に近いほど, 移動速度を遅めた.

3.3.3 制御点の数

制御点の数は, 任意の値に設定できる. 図3は制御点が8つの例である. 数が大きいほど, オプティカルフローの大きいグリッドを, よりの確に制限できる. 一方で, 各制

御点が移動するときの視野形状変化が細くなる. これは, ユーザの気を逸らす可能性がある. 本研究では, 少人数を対象とした予備調査を行い, 8個に決定した.

4. ユーザ実験

4.1 デザイン

視野制限条件は以下の3つである.

- 視野制限なし
- 視野角制限
- 非円形視野制限

本手法と同じ, オプティカルフローに適応した視野制限である, Adaptive FOV Restrictor は条件に加えなかった. 著者による追実装と予備調査を行ったところ, 本実験で用いる VR 空間において, オプティカルフローの軽減効果が見られなかったためである.

また, 実験は被験者内計画で行われた. 試行順序はラテン方格法で行われた.

4.2 視野角制限の実装

本実験では, オプティカルフローの大きさに応じて視野角制限を行うシステムとした [18]. FOV はオプティカルフローが大きいグリッド数の割合で決定される (式2).

$$FOV = \begin{cases} FOV_{max} - A \times \frac{G_{flow}}{G_{max}} (FOV > FOV_{min}) \\ FOV_{min} (FOV \leq FOV_{min}) \end{cases} \quad (2)$$

FOV_{max} は, 視野制限マスクの制御点の初期位置であり, 全ての制御点がこの値をとるとき, 視野に影響を及ぼさない. A は調節用のパラメータである. 本稿では, 全グリッド数のうち $2/3$ が大きいグリッドであるとき, 最小視野角となるように設定した. G_{flow} はオプティカルフローが大きいグリッドの数である. G_{max} は全グリッド数である 256 から, 視野制限を行わない中心視野領域にあたる 24 を除く, 232 を示す.

4.3 タスク

VR 空間を探索し, チェックポイントを通過するタスクを行った. 実験に用いた VR 空間を図4に示す. Free Low Poly Nature Forest アセットを利用し制作した [19].

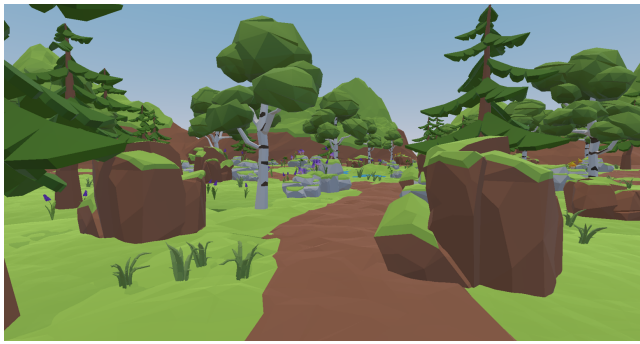


図 4 VR 空間の様子.



図 5 チェックポイント (左下) と、チェックポイントが VR 空間上に出現する位置.

操作はコントローラのスティックで行い、参加者は前後左右移動と、水平方向の旋回が可能であった。速度はスティックを傾ける大きさにより変化した。

チェックポイントは VR 空間の中で目立つ赤色の柱である。VR 空間には常にチェックポイントが 1 つ存在し、到達すると、新しいチェックポイントが出現する。チェックポイントと、その出現位置を図 5 に示す。

また、チェックポイントに 5 回到達する度に、不快感に関する質問が表示された。「現在の気分はどうか?」という質問に対し、10 段階の数値で回答を行う。1 は実験開始時の状態、10 は中止したいことを示す。10 が回答されたとき、直ちに実験を中止させた。これは VR 酔いに関する研究で用いられる手法である [5]。50 個のチェックポイントに到達し、アンケートに回答すると、タスクは終了となった。なお、チェックポイント数、現在のチェックポイント到達数は明示しなかった。これは参加者が実験を完遂するため、無理をする可能性を排除するためである。

4.4 実験手順

最初に、年齢や性別、酔いややすさに関するアンケートに回答させた。その後、実験に関する説明をし、体調に応じていつでも実験を中止できること、実験に支障はないことを伝えた。その後、HMD を装着し、アイトラッキングと瞳孔間距離のキャリブレーションを行った。HMD を外し、ノート PC のディスプレイを使い、タスク説明、コントロー

ラでの操作説明を行った。コントローラ入力と旋回方向は参加者が変更できた。また、HMD のヘッドトラッキングによる移動に対応しているが、できる限りコントローラ操作でタスクを行うことを説明した。その後、ノート PC のディスプレイでチュートリアルを行った。5 つのチェックポイントを通過し、アンケートに回答させ、操作とタスク内容を理解していることを確認した。その後、実験前アンケートを記入させた後、HMD を装着させ、タスク開始となった。タスクは座位で行われた。タスク終了後、HMD を外すことを指示し、体調に不安がなければ、すぐに実験後アンケートに回答させた。回答が終わると、1 回目の実験は終了となった。2 回目以降は、HMD のキャリブレーションと、実験前後アンケート、タスクのみ行った。

実験間は、VR 酔いの影響を考慮し、最低 1 時間の休憩をとった。実験は 1 週間行われ、参加者はその内に 3 度、実験室に訪れた。実験 1 回目は最大 25 分、2 回目以降は最大 15 分、合計 55 分で終了した。

4.5 仮説

実験における仮説は以下の通りである。

- H1 非円形視野制限と視野角制限は、視野制限なし条件よりも VR 酔いを軽減させる。
- H2 非円形視野制限は、視野角制限よりも臨場感を向上させる。
- H3 非円形視野制限は、空間探索能力を向上させる。

4.6 取得するデータ

H1 を示すために、酔いの程度を評価する。本実験では 2 つの指標を用いる。1 つ目は、SSQ アンケートである [4]。2 つ目は、タスク中の質問に対する 10 段階の数値による回答 (不快スコア) である。

H2 を示すために、ユーザが受ける臨場感を調査する。評価は IPQ アンケートによって行う [20]。

H3 を示すために、2 つの指標を用いる。1 つ目は視線位置の分散である。分散が大きいつき、自由な視線移動ができ、空間探索能力が向上した可能性が示される。2 つ目は、探索タスク完了までの時間である。短時間で終わるほど、空間探索能力が高いと考えられる。

さらに視野制限に対するユーザの反応を、独自に編集した Visual Questionnaire で評価する [2]。その内容を以下に示す。「移動操作中、VR 空間を見やすかった (VQ1)」「視界が明るくなったり暗くなったりした (VQ2)」「視界が広くなったり狭くなったりした (VQ3)」「視界の変化は気づきやすかった (VQ4)」「(VQ4 に気づいた場合) 今後もこのシステムを使いたい (VQ5)」「視界の変化により、仮想環境はどのように快適になりましたか? または、快適になりませんでしたか? (VQ6)」「視界の変化により、仮想環境はどのように楽しくなりましたか? または、楽しく

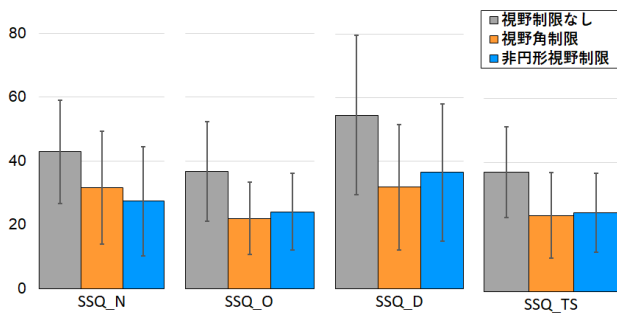


図 6 SSQ アンケートの結果.

なくなりましたか? (VQ7)」。VQ1 から VQ5 の回答は 1「全くそう思わない」から 7「とてもそう思う」の数値で行った。VQ4 と VQ5 は、視野制限に関する質問であるため、視野制限なし条件では回答対象外とした。また、VQ1 は独自に追加したものであり、Fei らの実験を参考にした [17]。さらに、任意回答の自由記述アンケートを行った。

5. 結果

タスクを中断したのは 36 試行中 7 試行であった。中断したタスクを含む全試行のデータを集計した。中断したのはいずれも女性の実験参加者であった。

分析は参加者毎の各条件の平均値を用いて行った。いずれのデータに対しても、Shapiro-Wilk 検定により正規性を確かめた。正規性が認められた場合、Levene 検定により等分散性を確かめた。等分散性が認められた場合、繰返しのある分散分析を行った。主効果が見られた場合、tukey の方法で多重比較を行った。グラフ中のエラーバーは標準誤差、* は $p < 0.05$ を示す。

5.1 実験参加者

参加者は 12 名 (男性 9 名, 女性 3 名) であった。年齢は 21 歳から 25 歳であった。全員が正常な視力であることを確認した。安全上の理由から、酔いが生じたときの症状が重い自覚がある場合、実験には参加しないことを指示した。さらに、事前に酔いやすさに関するアンケートを行った [5]。その結果をもとに、酔いやすさが同程度の参加者が同じ実験順序にならないように配慮した。

5.2 VR 酔い

5.2.1 SSQ アンケート

SSQ アンケートの結果を図 8 に示す。分析の結果、全ての指標に対して主効果は見られなかった。(SSQ_N は $F_{2,22} = 0.954$, $p < 0.395$, SSQ_O は $F_{2,22} = 1.359$, $p < 0.271$, SSQ_D は $F_{2,22} = 1.079$, $p < 0.352$, SSQ_TS は $F_{2,22} = 1.161$, $p < 0.326$)。

5.2.2 不快スコア

不快スコアの分析は 2 通り行った。タスク終了時、中断

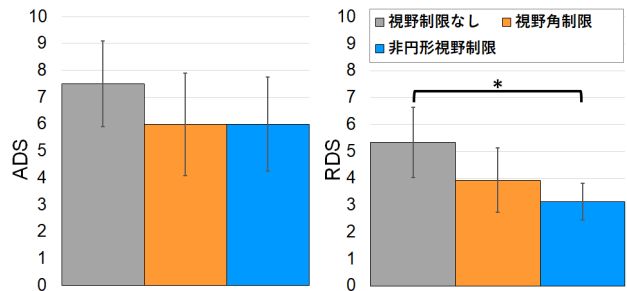


図 7 (左) 不快スコアの最終値 (ADS). (右) 時間を考慮した不快スコア (RDS).

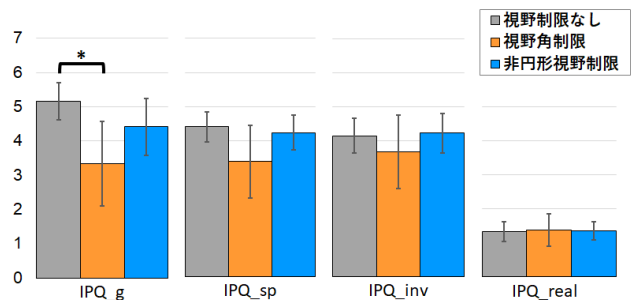


図 8 IPQ アンケートの結果.

時の不快スコア (ADS) と、時間を考慮した不快スコア (RDS) である。Fernandes らの方法を参考に行った [2]。

ADS の結果を図 7 (左) に示す。分析の結果、主効果は見られなかった ($F_{2,22} = 0.980$, $p < 0.386$)。

RDS の結果を図 7 (右) に示す。これは、実験中の酔いの変化と、酔っていた時間を考慮できる方法である。RDS の計算は式 3 で行われる。

$$RDS = \frac{\sum_{0 \leq k \leq t_{stop}} DS_k + (t_{max} - t_{stop} + 1) DS_{stop}}{t_{max}} \quad (3)$$

t_{stop} は、各参加者のタスク完了時間 (秒) である。 DS_k は、各秒 k における不快度スコアである。 t_{max} は、すべての参加者のタスク完了時間の中での最大値である。外れ値を除き、 $t_{max} = 426.08$ であった。 DS_{stop} は、タスク完了時、またはタスク中断時の不快スコアである。

分析の結果、主効果が見られた ($F_{2,22} = 4.145$, $p = 0.025$)。多重比較を行ったところ、視野制限なし条件と非円形視野制限の間でのみ有意差が見られ ($p = 0.02$)、それ以外では見られなかった (視野制限なしと視野角制限では $p = 0.179$, 視野角制限と非円形視野制限では $p = 0.568$)。

5.3 臨場感

IPQ アンケートの結果を図 8 に示す。

IPQ_g は等分散性が見られず、Welch 検定を行ったところ、主効果が見られた ($F_{2,22} = 4.041$, $p = 0.027$)。Games-Howell の方法で多重比較を行ったところ、視野制限なしと、視野角制限の間で有意差が見られ ($p = 0.04$)、その

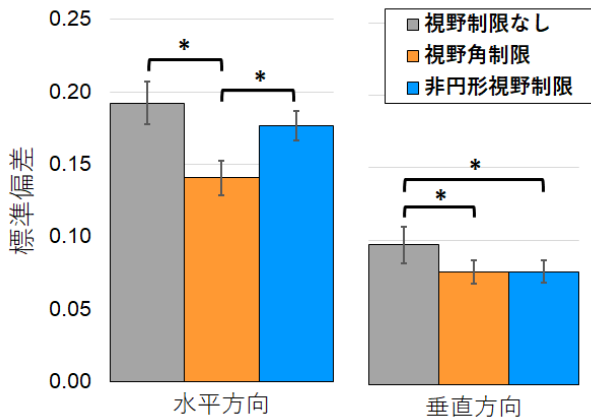


図9 (左) 水平方向の視線位置の標準偏差。(右) 垂直方向の視線位置の標準偏差。

他のペアでは見られなかった(視野角制限と非円形視野制限では $p = 0.336$, 視野制限なしと非円形視野制限では $p = 0.309$).

IPQ_sp, IPQ_inv は, 主効果は見られなかった (IPQ_sp は $F_{2,22} = 2.222$, $p = 0.124$, IPQ_inv は $F_{2,22} = 0.621$, $p = 0.544$).

IPQ_real は正規性が認められなかったため, Kruskal-Wallis 検定を行った. その結果, 主効果は見られなかった ($p = 0.869$).

5.4 空間探索能力

5.4.1 視線位置

参加者ごとのタスク完了時間の最小値を求め, それ以前の視線データを分析に用いた. これはタスク間でデータ数を統一するためである. 分析に用いたデータは各条件で合計 20044 データであった.

視線データの分析には, 視線位置の分散を用いる. 水平方向, 垂直方向の標準偏差を図9に示す.

水平方向について, 主効果が確認された ($F_{2,22} = 18.334$, $p < 0.001$). 多重比較を行ったところ, 視野制限なしと, 非円形視野制限の間に有意差は見られなかった ($p = 0.186$). その他のペア間には見られた ($p < 0.001$).

垂直方向について, 主効果が確認された ($F_{2,22} = 4.690$, $p = 0.016$). 多重比較を行ったところ, 視野角制限と, 非円形視野制限の間に有意差は見られなかった ($p = 0.999$). その他のペア間には見られた(視野制限なしと視野角制限は $p = 0.03$, 視野制限なしと非円形視野制限は $p = 0.034$).

5.4.2 タスク完了時間

タスク完了時間について, Smirnov-Grubbs 検定を行ったところ, 外れ値が見られた. 実験終了後, 該当参加者は, なるべく早くタスクを行うことを失念していたことが確認されたため, 分析から除いた. さらに, 参加者が実験を中断したタスクの時間を除き, 分析を行った.

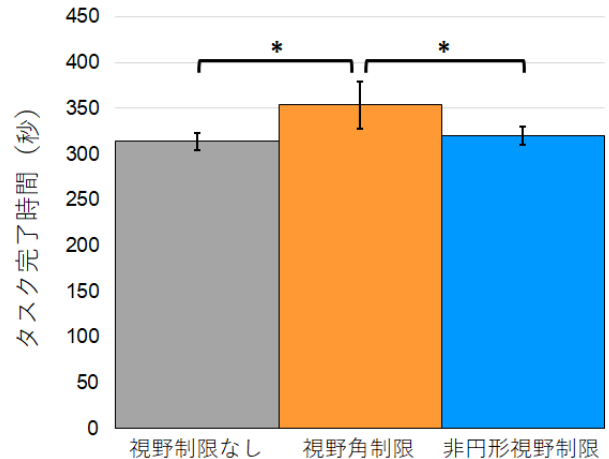


図10 タスク完了時間. 外れ値は除いた.

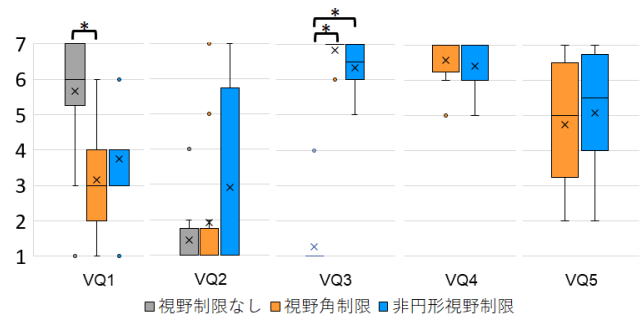


図11 Visual Questionnaire の結果.

タスク完了時間を図10に示す. 分析の結果, 主効果が見られた ($F_{2,22} = 5.632$, $p = 0.01$). 多重比較を行ったところ, 視野制限なし条件と非円形視野制限では有意差が見られず ($p < 0.874$), その他のペアでは見られた(視野制限なしと視野角制限で $p = 0.14$, 視野角制限と非円形視野制限のとき $p = 0.37$).

5.5 Visual Questionnaire

Visual Questionnaire の結果を図11に示す.

VQ1 から VQ3 について分析する. いずれも正規性が認められなかったため, Kruskal-Wallis 検定を行った. 結果, VQ1 ($p = 0.003$) と VQ3 ($p < 0.001$) において主効果が見られた. VQ2 は見られなかった ($p = 0.398$). ボンフェローニ補正による多重比較を行った. VQ1 は, 視野制限なしと視野角制限のペアで有意差があった ($p < 0.001$). VQ3 は, 視野制限なしと視野角制限のペア ($p < 0.001$) と, 視野制限なしと非円形視野制限のペア ($p < 0.001$) の間に有意差があった.

VQ4 はいずれの手法でも高い数値が回答された. つまり, 参加者はいずれの視野制限手法も気づきやすいことが示された. VQ5 は正規性が認められたため, 対応のある t 検定を行ったところ, 有意差は見られなかった.

VQ6, VQ7 の自由記述アンケートについて, 非円形視

野制限に関する意見を一部抜粋して記載する。ポジティブな意見として、視野が広いことでタスクを行いやすいことが挙げられた。ネガティブな意見として、特に下方向の視野形状の変化が参加者の気を逸らすことが挙げられた。

6. 考察

6.1 VR 酔い

ユーザ実験より、SSQ アンケートや ADS に有意差が見られなかった。一方、視野制限なしと比較して、RDS が減少した。つまり、部分的に H1 が支持され、非円形視野制限の VR 酔い軽減効果が示された。

一方で、3つの指標のうち2つで有意差が見られなかったことから、酔い軽減効果はさほど強くない可能性があると考えられる。その原因は、旋回操作時に適切な視野制限ができなかったことにあると考えた。本実験の探索タスクは、空間探索能力を調査するために、高い頻度の旋回操作を要する設計であった。旋回は、平行移動に比べて酔いが発生しやすいことが示されており [6]、実際に多くの参加者が旋回時の酔いの悪化を報告した。すなわち、VR 酔い軽減システムは、旋回操作には敏感に反応するべきである。しかし、非円形視野制限はオプティカルフローに応じて動作する。そのため、旋回時もオプティカルフローが閾値を下回る場合、視野制限が起きなかった。

対策として、オプティカルフローの閾値について、オプティカルフローの大きさだけでなく、向きを考慮することが挙げられる。旋回操作を検出した際は閾値を下げ、さらに制御点の移動を速くすることで、より強い VR 酔い軽減効果が期待される。

また、VR 酔い軽減効果がある視野角制限について、本実験ではその効果が見られなかった。この原因も、タスクの旋回操作の頻度にあると考えた。視野範囲が狭まることで、チェックポイントの発見が困難になり、旋回操作の時間が増加したことが原因と考えられる。

6.2 臨場感への影響

H2 を示す明確な証拠は見つからなかった。その原因として、非円形の視野形状変化が一部ユーザにとって悪影響であったことが挙げられる。つまり、非円形視野制限は、VR 酔い軽減効果と視野の広さを両立する代わりに、視野形状の違和感から臨場感を低下させることが示唆された。一方、本実験で、視野形状変化が気にならず、視野角制限よりも肯定的な意見を述べた参加者にとって、非円形視野制限は有効な手法となる可能性がある。

一方で、視野形状の変化が不快であったユーザには、非円形視野制限のシステムのパラメータを調節する必要がある。視野制限には、最小視野角や、制御点の移動速度などのパラメータが存在する。これは VR 酔い軽減効果と臨場感のトレードオフのバランスを決定する。そのため、ユー

ザごとに調節する必要がある。

また、特に下方向の視野形状変化について3人の参加者が言及した。本稿では、視野制限マスクの制御点の移動をイージングし、できる限りユーザの気を逸らさない設計をした。だが、視野制限をする方向について考慮する必要があったと考えられる。下方向が気になる原因は2つ考えられる。1つは、人間の視野特性である。視野は円形ではなく、下方向への視野角が広い [21]。また、視野制限によって足元が見えなくなることで不安を覚えるユーザは多い [16]。そこで、視野制限をする方向ごとに、異なるイージングや最小視野角を検討する必要がある。このように、非円形視野制限に特有のパラメータの調節が必要である。

さらに、視野形状の変化が気になったことについて、既存手法との融合により解消できる可能性がある。例えば、下方向の視野を維持する視野制限手法と融合すれば、視野形状変化による問題を解決できる可能性がある [16]。また、視野制限ではなく、非円形のぼかしを加える手法も考えられる。ぼかしは、視野制限よりも VR 酔い軽減効果が小さいが、臨場感を維持できる手法である [8]。それにより、視野形状の変化が気になりにくくなる可能性がある。

6.3 空間探索能力への影響

非円形視野制限は、視野角制限よりもタスク完了時間を短縮させた。この結果は H3 を支持し、非円形視野制限による空間探索能力の向上を示唆している。

非円形視野制限のとき、視野角制限よりもタスク完了時間を短縮した要因は2つ考えられる。

1つは、非円形視野制限による視野の拡大である。新しいチェックポイントの出現位置が、非円形視野制限では視野領域内となり、視野角制限では視野制限される領域となる状況があった。その際、視野角制限では、チェックポイントを探す時間が発生し、タスク完了時間が増加した。なお、非円形視野制限において、チェックポイントは自身のオプティカルフローで視野制限される対象である。しかし、視野制限は即時でなく、視野制限マスクの制御点の移動速度によるため、参加者は出現を確認できた。

もう1つは、非円形視野制限の旋回時における動作である。視野角制限は、旋回時に視野全体が狭まる。それにより視野内にチェックポイントが現れても、見逃すことがしばしば確認された。一方で非円形視野制限は、旋回時に一部の視野が制限されないことがあり、チェックポイントを見逃すことが少なかった。以上の要因で、差が生まれたと考えられる。しかし、6.1 節で述べたように、旋回時の視野の広さが VR 酔いを引き起こした可能性は懸念点である。

視線移動について考察する。非円形視野制限は、視野角制限に比べ水平方向の視線移動を増加させた。本実験におけるチェックポイントは縦に長い棒状オブジェクトであったため、チェックポイントを探す際、垂直方向の視線移動

は重要ではない。つまり、拡大した視野はチェックポイントを探すために活用され、探索能力の向上をもたらしたと考えられる。

7. おわりに

7.1 結論

VR 酔い対策として用いられる視野角制限は、臨場感や空間探索能力の低下といった問題が存在する。本稿では、オプティカルフローが大きい箇所をよりの確に制限する、非円形視野制限を提案した。ユーザ実験を行い、VR 酔い、臨場感、空間探索能力について評価を行った。その結果、非円形視野制限は、VR 酔い軽減効果と、視野角制限と比較して空間探索能力を向上させることを示した。一方で、特に画面下方向の視野形状の変化が、一部ユーザの臨場感を損なう可能性が示された。

7.2 制約と展望

本研究の制約として、実験参加者が少なかったことが挙げられる。VR 酔いは、個人差や性差が大きいことが知られている [5]。そのため、より多数のユーザを対象にしたさらなる調査が必要である。また、本手法はオプティカルフローに応じたシステムである。そのため、輝度変化が激しいといった、オプティカルフローの算出が困難な VR 空間では適用が難しい。

本実験により、視野形状の変化が、一部ユーザの気を逸らすことが分かった。解決には、視野制限のシステムのパラメータ調節や、既存手法との融合が有効な可能性がある。今後、ユーザを対象とした実験によりその効果を調査する。

参考文献

- [1] LaViola, J. J.: A Discussion of Cybersickness in Virtual Environments, Vol. 32, No. 1, Association for Computing Machinery, pp. 47–56 (2000).
- [2] Fernandes, A. S. and Feiner, S. K.: Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification, *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 201–210 (2016).
- [3] Inc, B. V.: Population One, Steam (online), available from (https://store.steampowered.com/app/691260/POPULATION_ONE/) (accessed 2023-01-30).
- [4] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. and Lilienthal, M. G.: Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220 (1993).
- [5] Rebenitsch, L. and Owen, C.: Individual Variation in Susceptibility to Cybersickness, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 309–317 (2014).
- [6] Terenzi, L. and Zaal, P.: Rotational and Translational Velocity and Acceleration Thresholds for the Onset of Cybersickness in Virtual Reality, *AIAA Scitech 2020 Forum* (2020).
- [7] Bozgeyikli, E., Raij, A., Katkooori, S. and Dubey, R.: Point & Teleport Locomotion Technique for Virtual Reality, *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp. 205–216 (2016).
- [8] Budhiraja, P., Miller, M. R., Modi, A. K. and Forsyth, D. A.: Rotation Blurring: Use of Artificial Blurring to Reduce Cybersickness in Virtual Reality First Person Shooters, Vol. abs/1710.02599 (2017).
- [9] Carnegie, K. and Rhee, T.: Reducing Visual Discomfort with HMDs Using Dynamic Depth of Field, Vol. 35, No. 5, pp. 34–41 (2015).
- [10] Park, S. H., Han, B. and Kim, G. J.: Mixing in Reverse Optical Flow to Mitigate Vection and Simulation Sickness in Virtual Reality, *CHI '22*, pp. 189–200 (2022).
- [11] Webb, N. and Griffin, M.: Eye movement, vection, and motion sickness with foveal and peripheral vision, Vol. 74, pp. 622–625 (2003).
- [12] Lin, J. J.-W., Duh, H. B. L., Abi-Rached, H., Parker, D. E. and Iii, T. A. F.: Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment, *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2002*, pp. 164–171 (2002).
- [13] Venturino, M. and Wells, M. J.: Head Movements as a Function of Field-of-View Size on a Helmet-Mounted Display, Vol. 34, No. 19, pp. 1572–1576 (1990).
- [14] 萱場大貴, 宮下芳明: VR レースゲームでの動的なトンネルリングによる速度感と酔いの調査, *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集*, Vol. 2021, pp. 208–213 (2021).
- [15] Adhanom, I. B., Navarro Griffin, N., MacNeilage, P. and Folmer, E.: The Effect of a Foveated Field-of-view Restrictor on VR Sickness, *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 645–652 (2020).
- [16] Wu, F., Bailey, G. S., Stoffregen, T. and Suma Rosenberg, E.: Don't Block the Ground: Reducing Discomfort in Virtual Reality with an Asymmetric Field-of-View Restrictor, *Proceedings of the 2021 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, No. 2, pp. 1–10 (2021).
- [17] Wu, F. and Suma Rosenberg, E.: Adaptive Field-of-View Restriction: Limiting Optical Flow to Mitigate Cybersickness in Virtual Reality, *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '22, No. 28, pp. 1–11 (2022).
- [18] Lim, Kyungmin and Lee, J., Won, K., Kala, N. and Lee, T.: A novel method for VR sickness reduction based on dynamic field of view processing, Vol. 25, pp. 331–340 (2021).
- [19] Poly, P.: Free Low Poly Nature Forest, unity Asset Store (online), available from (<https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/landscapes/free-low-poly-nature-forest-205742>) (accessed 2023-01-30).
- [20] igroup: igroup presence questionnaire (IPQ), (online), available from (<http://www.igroup.org/pq/ipq/index.php>) (accessed 2023-01-30).
- [21] Seya, Y., Nakayasu, H. and Yagi, T.: Useful Field of View in Simulated Driving: Reaction Times and Eye Movements of Drivers, Vol. 4, No. 4, pp. 285–298 (2013).