



眼球運動の測定による VR 酔いの評価に関する研究

Evaluation of VR Sickness by Measuring Eye Movements

齋藤晃羅¹⁾, 杉田典大²⁾, 中田路大¹⁾, 小宮山拓見³⁾

Akira SAITO, Norihiro SUGITA, Rodai NAKADA, and Takumi KOMIYAMA

- 1) 東北大学大学院 医工学研究科 (〒 980 - 8579, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6, saito.akira.p5@dc.tohoku.ac.jp)
- 2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター (〒 980 - 8578, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3)
- 3) 東北大学工学部 電気情報物理工学科 (〒 980 - 8579, 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6)

概要:

VR 映像を視聴する際、吐き気や眼精疲労を引き起こす VR 酔いが問題となっている。本研究では VR 酔いの重症度を眼球運動の変化から客観的に評価することを目的とした。先行研究では、視運動性眼振やサッケードといった眼球運動が VR 酔いと関連している可能性が示唆されていたが、被験者が注視した領域にばらつきが存在し、眼球運動の解析が難しいという問題があった。よって本研究では被験者の視線の散乱を防ぐため、フィードバックを用いた視線誘導を行った。そのうえで水平方向に加減速しながら回転する VR 映像を作成し、視運動性眼振の速度や視線の縦横のばらつきなどの眼球運動パラメータと、VR 酔い症状の強さとの関連を調査した。その結果、視線の散乱度合いと垂直方向の変位が VR 酔いの強さと関連する可能性が示された。

キーワード： 眼球運動, VR 酔い, 視運動性眼振, SSQ, 生体指標

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality : VR) はコンピューター上で作成された映像をあたかも現実であるかのように体験できるという性質から、教育・医療・エンターテインメントなどの幅広い分野での活用が期待されている [1]。そのため今後 VR が発展するにつれて VR 映像を視聴する時間は増加すると予想される。

VR の利用中に発生する問題として VR 酔いがある。これは乗り物酔いをはじめとした動揺病の一種であり、主な症状として眩暈、吐き気、倦怠感や目の疲労がある [1]。この症状が起きやすい映像の例として、ジェットコースターに乗っているときのように目まぐるしく変化する映像や、より現実に近い解像度、質感をもった映像がある [2]。これは映像から得られる情報量が多いためと考えられており、情報量の削減による VR 酔いの抑制が図られている。現在の主な VR 酔いの抑制として、映像が急激に回転、変化する際に視野角を減少させたり、画面にぼかしや注視点を入れたりする手法がとられている [3] が、これらは VR 酔いが発生していない利用者に対しては VR 映像への没入感を損ねてしまう因子となり、VR 酔いが発生していない際には上記のような処理を行わないことが望ましい。

そのため VR 酔いの発生の有無を評価する手法が研究されている。代表的な手法は Kennedy ら [4] が考案した Simulator Sickness Questionnaire(SSQ) である。これは気分の悪さや胃のむかつきなどの 16 項目に 0(まったくない)

から 3(激しくある) の値で回答していくアンケートであり、VR 酔いの症状を悪心 (Nausea : N), 眼精疲労 (Oculomotor : O), 方向感覚失調 (Disorientation : D) といったサブスコアと、総合スコア (Total Score : TS) で評価することができる。しかしこれは主観的な評価になるほか、回答のために VR の利用を中断しなければならないという課題があるため、現在はリアルタイムかつ客観的に VR 酔いを評価できるよう、心電図や胃電位などといった生体指標を用いた研究が行われている [2]。中でも眼球運動は VR を視聴する際に装着するヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display : HMD) で測定できるという特性から、追加のデバイスを装着する必要がないという利点があるため VR 酔いを評価する有用な生体指標として期待されている。よって本研究では VR 映像視聴中の眼球運動を測定、解析することで、VR 酔いと相関のあるパラメータを調査する。

2. 原理

2.1 先行研究

眼球運動と VR 酔いの関連性を考察する際に重要となる要素として、視覚誘導性自己運動感覚(ベクシオン)と視運動性眼振 (Optokinetic Nystagmus : OKN) がある。ベクシオンとはある一方向に移動するような映像が知覚される際、その移動方向と逆方向に自身が移動している錯覚を感じる現象であり、停車している電車の中から隣の電車を見ている際に、隣の電車が動き始めると自身が動いていると錯

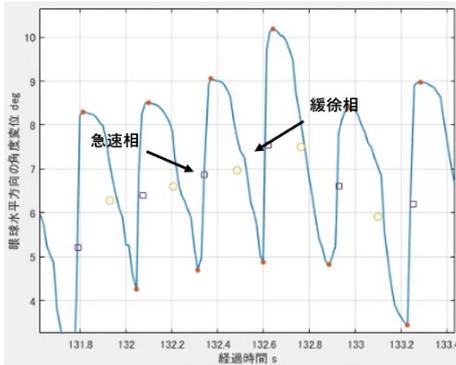


図 1: 視運動性眼振発生時の眼球角度時間変化

覚する状態が代表的な例である。一方、OKN はベクシオンが発生するような視覚情報が入力された際に、図 1 のように眼球が小刻みに往復運動を行う現象である。OKN はゆっくりと変化する景色を追従する緩徐相と、一方向に偏った眼球の位置を素早く元に戻す急速相とで構成されている。

Nooij らの研究 [5] ではベクシオンと OKN はどちらも VR 酔いに関連するとしている。ベクシオンによる VR 酔いの発生機序としては感覚不一致説が有力であり、これは自身が静止している状態でベクシオンを感じた際に、自分自身が運動する場合に受け取る感覚と VR 映像の視聴によって知覚された感覚が異なるため VR 酔いが発生するというものである。また OKN による VR 酔いの発生機序としては眼球運動理論が有力であり、これは眼球が活発に動いた際に迷走神経に負荷がかかり、神経の疲労から VR 酔いが発生するというものである [1]。

Nooij らはこのベクシオンと OKN のどちらが VR 酔いに対してより多くの影響を与えるかを調査するために、図 2 に示すような水平方向 (Yaw 方向) に回転する映像を用いて実験を行った。このときベクシオンもしくは OKN と、VR 酔いとの関連を調査するため、これらのうち片方のみを生じさせる映像を考案した。ベクシオンのみを体験させる条件では画面中央に注視点を配置し、眼球位置が変位することを抑制した。また OKN のみを体験させる条件では図 2 のように視野の中心領域と周辺領域で映像の移動方向を逆向きとし、これにより、被験者が知覚する映像の移動量を全体として相殺することでベクシオンが抑制されるとした。その結果、ベクシオンを抑制し OKN を発生させる映像の方が VR 酔いの症状が強くなることが分かった。一方で、ベクシオン抑制の条件において被験者は画面中央に視線が集中していなかった可能性があり、ベクシオンの影響を完全に消去できていない可能性があった。

Wibirama らの研究 [6] では映像視聴中の眼球運動と VR 酔いの関係を調べるため、視点移動が激しく VR 酔いを起こしやすい映像である一人称シューティング (First Person Shooting : FPS) ゲーム映像と対照映像となるレーシングゲーム映像を、プレイヤーと観戦者という 2 つの立場で視聴し、その時の眼球運動記録から、図 3 に示すような視線のヒートマップや、固視と呼ばれる眼球が 0.2 s ほど静止する

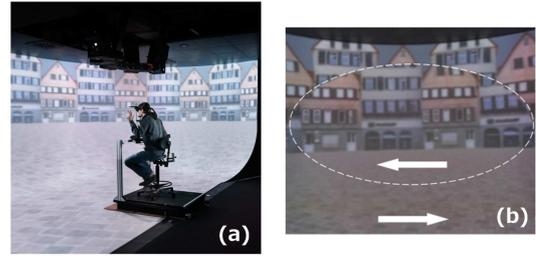


図 2: Nooij ら [5] の実験概要 (a): 実験環境. (b): ベクシオンの影響を抑制する映像。視野の中心と周辺で映像の移動方向を逆転させることで感じるベクシオンを減少させている。

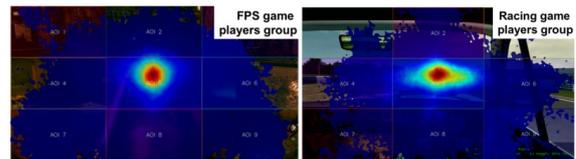


図 3: Wibirama ら [6] の実験における視線のヒートマップ。1 人称シューティングゲームを用いた映像の方がレースゲーム映像に比べて視線垂直方向のぶれが大きい。

運動の回数と合計時間を記録した。その結果、FPS 映像を観戦者として視聴する際に被験者は最も酔いを感じ、その時固視が発生する範囲は他の 3 条件よりも広く、特に垂直方向の変位が多かったことが分かった。このことから眼球が激しく動いたり、特に垂直方向に振動したりすると VR 酔いが強まる可能性が示唆された。しかし本実験においても被験者には画面中央を視聴するよう指示を行ったのみであり、画面中央以外の領域を見ることが VR 酔い重症化の因子となった可能性を排除できていないという課題があった。

2.2 本研究の意義

先行研究の結果から、注視点を設けた VR 映像において被験者の VR 酔いが軽減される可能性があり、被験者の視線が画面中央から散乱する頻度が増加すると VR 酔いの症状が強くなることも示唆された。このことから VR 酔いが発生しにくい人はそうでない人に比べて VR 映像視聴中の眼球運動が活発でない可能性があると考えた。そこで本研究では VR 酔いが発生している被験者とそうでない被験者を比較し、その眼球運動に差が現れるか調査した。

ここで先行研究では VR 映像の視聴中に、被験者が主に見る領域について制限を行っていなかった。Palmisano ら [7] は、VR 映像中で注視する領域が変化すると、被験者が知覚する映像の流れに変化が生じ、VR 酔いの重症度が変化すると報告している。そのため VR 映像の視聴中には被験者が見る領域は限定化することが望ましい。しかしこのとき注視点を設ける手法を用いると OKN などの眼球運動が抑制されてしまい、VR 酔いに関連する可能性がある眼球運動パラメータを取得できない可能性がある。そのため本研究では、VR 酔いと眼球運動の関連を調査する中で、被験者が注視する領域を限定しつつ、眼球運動を抑制しないタスクを考案した。

3. 実験

3.1 実験セットアップ

本研究では VR 映像提示中の眼球運動を計測することにより、VR 酔いを評価するのに適切な眼球運動の特徴量を調査した。このとき、VR 映像の視聴と眼球運動の測定に HMD である FOVE 0(株式会社 FOVE 製)を、VR 映像の作成に Unity(Ver : 2022.3.28f1)を用いた。

図 4 に本実験において被験者に提示した映像を示す。被験者は図 4 画面中央に提示されたリング内に視点を収めるよう事前に指示されている。リング内に視点が収まった状態で 1.25 s が経過するとリングが消失するが、その後も視点の測定は行われており、リングがあった領域外を 1.25 s 以上見ていた場合、再度リングが出現し被験者にリング内を見るよう促す。これにより、リング自体が注視点として機能してしまう時間を極力減らすようにした。また Essig らの報告 [8] から、OKN の振幅は大きい場合でも 8° 程度であることが分かっているため、OKN がこのリング内の領域で十分に発現できるようリング半径は画面中央から 9° 変位した位置とした。この映像により、被験者が VR 空間内において極端に中心から離れた領域を見る行為を抑制し、かつ注視点の凝視による眼球運動の低減も除去することができると考えた。また映像中の加減速回数の増加がより多くのベクションを体験させ、VR 酔いが重症化するという報告 [5] から、本実験では経過時間 t (s) に対して以下の式に示す規則的な回転速度 ω_f (deg/s) とより加減速が激しい回転速度 ω_r (deg/s) で回転する 2 種類の映像を作成した。このとき、 ω_r の回転速度で VR 映像を提示した際により VR 酔いが重症化すると予想した。

$$\omega_f = 60 + 20\sin(0.1\pi t) \quad (1)$$

$$\omega_r = 60 + 50\sin\left(\frac{1}{t}\sin(0.11\pi t)\right)\cos\left(\frac{1}{t}\sin(0.3\pi t)\right) + 40\sin(0.05t)\cos(0.13t) \quad (2)$$

3.2 実験手順

本実験の被験者は 20-24 歳の男性 12 名、女性 1 名の計 13 名である。被験者は初めに実験について説明がなされた後、前項で述べた 2 種類の映像をそれぞれ 2 回ずつ、ランダムな順番で計 4 回視聴した。1 回の視聴時間は 6 分であ

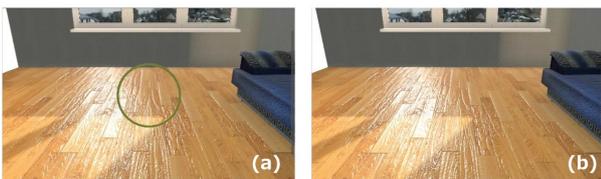


図 4: 実験で提示した映像 (a) 視線がリング外に存在する場合はリングが提示され、(b) 視線がリング内に戻った場合、リングが消失する。リング消失後、視線がリング外に出ると再度リングが出現する。

り、各視聴の間では 15 分以上の休息を設けた。映像視聴中は被験者の眼球運動を HMD から取得し、また各視聴の前後で SSQ による VR 酔いのスコアを取得した。

その後、取得した眼球運動データより以下のパラメータを抽出した。

- 視線水平方向角度の平均値と標準偏差 (deg)
- 視線垂直方向角度の平均値と標準偏差 (deg)
- 両目の焦点距離の平均値と標準偏差 (m)
- OKN 緩徐相速度の平均値と標準偏差 (deg/s : dps)
- OKN 急速相速度の平均値と標準偏差 (deg/s : dps)
- OKN の緩徐相、急速相が発生した時間及びしなかった時間 (s)
- タスク成功率 (視線がリング内にあった時間の割合)

実験後、VR 映像視聴後の SSQ 総合スコア (SSQ-TS) から被験者を VR 酔いが強かった群とそうではなかった群とに分け、2 つの群それぞれの眼球運動パラメータに対して wilcoxon の順位和検定を実施した。有意水準は 5% とし、有意差が現れた眼球運動パラメータについて 2 群での比較を行った。

4. 実験結果

実験に参加した 13 名の内、男性 2 名が実験続行不可能な程の VR 酔いを訴えたため、11 名の測定結果を解析した。

図 5 に、ある被験者の眼球運動の時間変化を示す。図 5 から、被験者の眼球角度変位が、水平、垂直方向ともに $\pm 10^\circ$ 程度以内に収まっていることが分かった。また、表 1 に本実験で得られた群ごとの眼球運動パラメータに wilcoxon の順位和検定を実施した結果を示す。表 1 から、眼球の水平方向の標準偏差及び、垂直方向の平均値と標準偏差に有意差があることがわかる。また図 6 に有意差が生じた眼球運動パラメータの群毎の平均を示す。図 6 から、眼球運動の水平、垂直方向の標準偏差については VR 酔いが強い群がそうでない群に比べて高く、垂直方向の平均値については VR 酔いが発生した群のほうが低くなった。尚、映像の回転速度の差異による SSQ スコアへの影響は見られなかった。

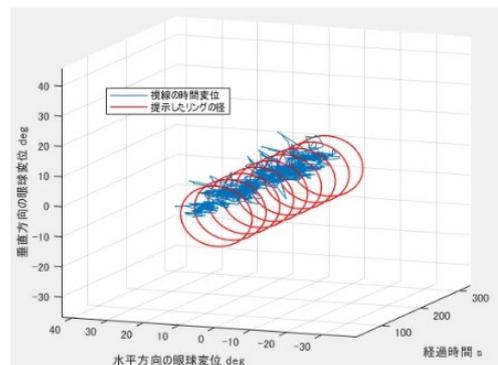


図 5: 眼球運動の時間変化

表 1: 眼球運動パラメータと SSQ-TS との有意差

値	SSQ-TS
水平方向平均値	n.s.
水平方向標準偏差	p < 0.05
垂直方向平均値	p < 0.05
垂直方向標準偏差	p < 0.05
焦点距離平均値	n.s.
焦点距離標準偏差	n.s.
緩徐相速度平均値	n.s.
緩徐相速度標準偏差	n.s.
急速相速度平均値	n.s.
急速相速度標準偏差	n.s.
緩徐相発生時間	n.s.
急速相発生時間	n.s.
眼振が発生していない時間	n.s.
タスク成功率	n.s.

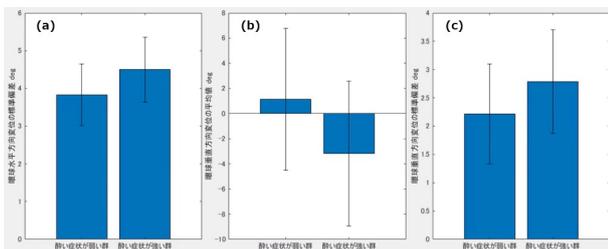


図 6: 有意差が生じた眼球運動パラメータ (a) 眼球水平方向標準偏差, (b) 眼球垂直方向平均値, (c) 眼球垂直方向標準偏差の平均値を 2 群で比較した結果

5. 考察

本実験から、VR 酔いの発生を客観的に評価する眼球運動パラメータとして、水平、垂直方向の標準偏差と垂直方向の平均値が有用である可能性が示唆された。このとき水平、垂直両方向における眼球運動の標準偏差の増加は視線がより広範囲に散乱していることを反映しており、眼球運動が活発になることによって VR 酔いの症状が強くなるという Wibirama らの報告と一致している。また眼球運動垂直方向の平均値は強い VR 酔いが発生した群の方が有意に低かった。これはコリオリ刺激 [9] という、VR 映像の視聴中に頭部を前後に傾げることで発生する刺激によるものと考えられるが、本来コリオリ刺激は頭部を傾げることによって誘発される刺激であり、本実験のように眼球を運動させることによって誘発されるかどうかは不明である。そのため眼球垂直方向の平均値の差による、VR 酔い強さの変化の原理については今後調査する必要がある。

本実験では VR 映像内に注視する領域を視線情報を用いて明滅させることで OKN の抑制を極力減らしつつ被験者の視線を中央に誘導することができた。しかし本実験ではリングの明滅自体が不自然な眼球運動を誘発し VR 酔いに影響を与えた可能性があることや、回転の軸を 2 軸、3 軸に増やした際にも眼球運動パラメータが VR 酔い評価に利用できるかが不明であった。そのため今後はより複雑な運動を行う VR 映像を用いることで、眼球運動が VR 酔いの評価に対して有用な指標であることを更に調査していく必要

がある。

6. おわりに

本実験では水平方向に回転する VR 映像を視聴した際の眼球運動を測定することで、VR 酔いを客観的に評価できるパラメータを調査した。実験の結果、眼球運動の標準偏差の大きさと垂直方向における変位が VR 酔いの強さと関連する可能性が示唆された。これは以前の報告結果を裏付けており、今後はより複雑な条件における眼球運動の調査や眼球運動情報を用いた動的な VR 酔いの抑制を行うことで、快適かつ没入感の高い VR 映像の作成を目指していく。

参考文献

- [1] 館暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝: パーチャルリアリティ学, 日本バーチャルリアリティ学会, pp.2-51(2011).
- [2] E. Chang, H. T. Kim and B. Yoo: "Virtual reality sickness: a review of causes and measurements.", International Journal of Human-Computer Interaction, vol.36, No.17, pp.1658-1682(2020).
- [3] A. S. Fernandes and S. K. Feiner: "Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification.", 2016 IEEE symposium on 3D user interfaces (3DUI), pp.201-210(2016).
- [4] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum and L. G. Michael: "Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness.", The international journal of aviation psychology, vol.3, No.3, pp.203-220(1993).
- [5] S. A. E. Nooij, P. Pretto, D. Oberfeld, H. Hecht and H. H. Bühlhoff: "Vection is the main contributor to motion sickness induced by visual yaw rotation: Implications for conflict and eye movement theories", PloS one, vol.12, No.4, e0175305(2017).
- [6] S. Wibirama, P. I. Santosa, P. Widyanani, N. Brilianto and W. Hafidh: "Physical discomfort and eye movements during arbitrary and optical flow-like motions in stereo 3D contents", Virtual Reality, vol.24, No.1, pp.39-51(2020).
- [7] S. Palmisano and J. Kim: "Effects of gaze on vection from jittering, oscillating, and purely radial optic flow", Attention, Perception, & Psychophysics, vol.71, No.8, pp.1842-1853(2009).
- [8] P. Essig, J. Müller and S. Wahl: "Parameters of Optokinetic Nystagmus Are Influenced by the Nature of a Visual Stimulus", Applied Sciences, vol.12, No.23, 11991(2022).
- [9] 井須 直紀: "コリオリ刺激の力学 I. コリオリ刺激時の半規管出力", Equilibrium Research, vol.58, No.6, pp.632-639(1999).