

眼球運動から VR 酔いの発生は特定できるのか？ Do eye movements detect virtual-reality sickness?

平田 貴士^{1, a} 川合 伸幸^{1, 2, 3, b}
Takashi Hirata and Nobuyuki Kawai

1. 名古屋大学大学院 情報学研究科 心理・認知科学専攻,
2. 中部大学 創発学術院, 3. 科学技術振興機構 CREST

1. Cognitive and Psychological Sciences, Graduate School of Informatics, Nagoya University

2. Academy of Emerging Sciences, Chubu University, 3. CREST, Japan Science and Technology Agency

^a hirata.t@cog.human.nagoya-u.ac.jp, ^b kawai@is.nagoya-u.ac.jp

概要

視覚情報により誘発される自己運動感覚「ベクシオン」の発生は VR 酔いの原因の 1 つとして考えられており、ベクシオンの発生を検出することで VR 酔いを未然に防げることが期待されている。本研究では、ベクシオンの発生を検出する指標として眼球運動に着目し、VR 映像視聴中の眼球運動とベクシオンを測定した。その結果、ベクシオン知覚時の眼球運動の追従精度は、未知覚時に比べて悪いことが示され、眼球運動からベクシオンの発生を検出できる可能性が示唆された。

キーワード：VR 酔い、ベクシオン、視運動性後眼振、視運動性眼球運動

1. 背景

今日では Apple Vision Pro をはじめとする Virtual Reality (VR) ゴーグルが普及している。VR 映像は高い臨場感を引き出す反面、吐き気やめまいといった VR 酔いを引き起こすリスクがある。VR 酔いが発生する原因の 1 つとして、視覚情報により誘発される自己運動感覚「ベクシオン」が考えられている[1]。ベクシオンは、網膜に映るオプティカルフロー刺激によって誘発される身体の運動感覚である。ベクシオンを強く感じるほど、映像視聴中に発生する酔いをより強く感じる事が報告されている[2]。VR 酔いの発生原因の 1 つとしてベクシオンが考えられていることから、ベクシオンの発生を客観的に検出することで VR 酔いを未然に防げる可能性がある。

ベクシオンの発生を客観的に検出する指標として眼球運動が挙げられる。プラネタリウムで投影された星々が一樣に右から左に動くような映像を観察し突如映像が消失すると、視覚情報が無いにも関わらず、眼は映像内の動きと同方向にしばらく動き続ける。この眼球運動は視運動性後眼振 (optokinetic afternystagmus: OKAN) と呼ばれ、ベクシオンを感じるほど OKAN の持続時間が長いことが知られている[3]。この知見により、OKAN の持続時間からベクシオンを感じやすい

ヒトとそうでないヒトを区別できることが考えられる。しかし、OKAN は映像視聴後に生じる眼球運動であるため、リアルタイムでのベクシオン検出の指標として適切ではない。

視野全体が一樣に動きベクシオンが誘発される映像を視聴するときには、視運動性眼球運動 (optokinetic response: OKR) が発生する。OKR は、車窓から見る流れる風景のような、中心窩のみならず視野全体の情報が動くときにその動きを追従する反射性の眼球運動である。先行研究により、白黒のストライプが移動する映像を視聴した際に発生する酔いは、映像視聴中の眼球運動の速度が映像の移動速度よりも遅いときほど強いことが示されている[4]。この知見から、ベクシオン発生時の OKR の追従精度は、ベクシオン未発生時に比べて悪い可能性がある。ベクシオンの発生有無によって OKR の追従精度が異なる場合、OKR からベクシオンの発生を検出できる可能性が考えられるが、このことについてはよくわかっていない。

視野全体が一樣に動く映像をしばらく観察すると、OKR での追従はターゲットの動きを予測するかのように変化する。この予測的に追従する OKR は予測性 OKR と呼ばれる。予測性 OKR は、OKR と異なりターゲットの移動方向が切り替わる直前から、追従方向が切り替わる眼球運動である。予測性 OKR の獲得と OKAN の発現には共通の神経機構が関わっており、予測性 OKR が顕著に現れるほど OKAN の持続時間が長いことが示されている[5]。前述した通り、ベクシオンを感じるほど OKAN の持続時間が長いことから[1]、ベクシオンを感じるほど予測性 OKR がより顕著に生じる可能性がある。

本研究では、先行研究で明らかにされていない、VR 映像視聴時の眼球運動とベクシオンの発生の関係を調べ、眼球運動を指標としたベクシオン発生の検出可否の可能性を探る。ベクシオンの発生と眼球運動の関係を調べるために、本研究では Head Mounted Display

(HMD) を用いてベクシオンが誘発される映像を提示し、ベクシオンの発生と映像視聴中の眼球運動を計測した。

2. 方法

2.1 参加者と実験環境

名古屋大学に所属する14名(男性9人, 女性5人)が実験に参加した。すべての参加者は、座位の姿勢でVR映像を提示するHMD (VIVE Pro Eye, HTC VIVE) を装着した。計測中の頭部動揺を抑制するために顎台を用いた。また、ベクシオン知覚の有無を調べるためのテンキーを参加者の利き手側に設置した。参加者の眼球運動はサンプリング周波数120 Hzで記録された。

2.2 視覚刺激映像

HMDで表示するVR映像は、3D開発プラットフォームUnity (Unity Technologies) を用いて作成された。VR空間内には、半径5mの全円柱スクリーンを設置した。円柱スクリーンには、白黒のモザイク画像が提示され、重力軸を中心にyaw方向に30 deg/s時計回り (clock wise: CW) もしくは半時計回り (counter clock wise: CCW) に回転した。VR空間において参加者は、円柱スクリーン内部の中心に位置し (図1A), CWもしくはCCW方向に回転する白黒のモザイク画像を観察した。

2.3 実験構成

本研究では、ベクシオンを計測する実験1とOKRおよび予測性OKRを測定する実験2で構成されている。すべての参加者において実験は、実験1, 2の順で実施した。実験1と2の間には5分間の休憩を設けた。

2.3.1 実験1

実験1では回転する白黒モザイク画像を視聴しているときのベクシオンを計測した。提示される白黒モザイク画像は、30 deg/sでCW方向に150秒間回転し続けた (図1B)。ベクシオンを感じている間は、常に利き手中指に配置されたキーを入力し続けるよう参加者に指示した。

2.3.2 実験2

実験2では、回転する白黒モザイク画像を視聴しているときに発生するOKRと予測性OKRを計測した。予測性OKRの獲得および獲得の有無を確かめるため

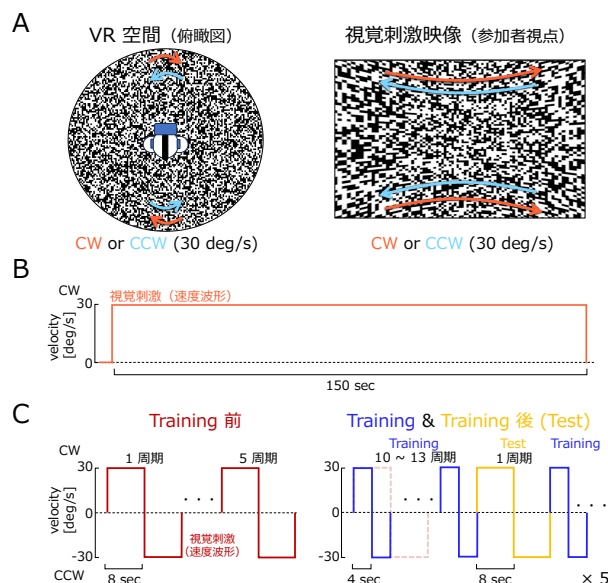


図1. A: 円柱スクリーン内の俯瞰図 (左) と参加者視点の刺激映像 (右). B: 実験1で提示した視覚刺激の速度波形 (橙色). C: 実験2で提示した視覚刺激の速度波形 (赤: Training 前, 青: Training, 黄: Training 後).

に、実験2はTraining前, Training, Training後 (Test) で構成された (図1C)。計測は、Training前, Training, Training後の順で実施した。

Trainingでは、OKRの計測および予測性OKRの獲得を目的とし、4秒CW, 4秒CCW方向にモザイク画像が30 deg/s回転する映像を提示した。4秒CW, 4秒CCWを1周期として、Trainingでは合計50周期提示した。Trainingを通じて参加者は、4秒CW, 4秒CCWの周期で回転するモザイクを予測的に追従する予測性OKRを獲得する。

Training前と後は、Trainingによる予測性OKR獲得の有無を確かめるために実施した。Training前と後では、Trainingで提示されたモザイク画像の2倍の回転周期である、8秒CW, 8秒CCWで30 deg/s回転するモザイク画像を提示した。Training前では、8秒CW, 8秒CCWを1周期として5周期提示した。Training後のTestでは、Trainingの11, 23, 35, 50周期目の後に1周期提示した。

Trainingを通じて予測性OKRが獲得された場合、Training後のTestではTrainingで提示された4秒CW, 4秒CCWの回転を予測するようなOKRが現れる。具体的には、Test開始4秒付近で追従方向を切り替えるようなOKRが発生する (図2左)。一方、予測性OKRが現れないTraining前では、回転方向が切り替わってから追従方向が切り替わるOKRが発生する (図2右)。Trainingにおいて予測性OKRが獲得されなかった場合、

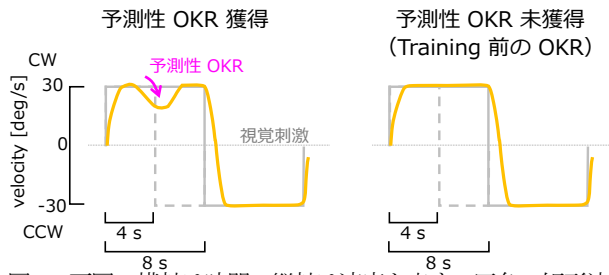


図 2. 両図の横軸は時間、縦軸は速度を表す。灰色の矩形波はモザイク画像の回転速度を表す。左：予測性 OKR が獲得された際に現れる Training 後の OKR のイメージ (黄色)。右：予測性 OKR が獲得されなかった際に現れる Training 後の OKR および Training 前に現れる OKR のイメージ (黄色)。

Test では Training 前と類似した OKR が現れることになる。

実験 2 の Training と Test において参加者は、実験 1 と同様にベクシオンを感じているときは常にテンキーを入力し続けた。

2.4 解析方法

本実験に参加した 14 名のうち 2 名は、実験 2 の計測途中で気分が悪くなったため計測を中断した。本研究では、計測を中断した 2 名を除いた 12 名を解析対象とした。実験 1 と 2 で得られたテンキーの入力のデータおよび眼球運動の位置データは、MATLAB (Mathworks, USA) に読み込み、オフラインで解析した。実験 1 で得られたテンキーの入力データから、キーが入力された合計時間を算出しベクシオン知覚時間を求めた。実験 2 で得られた眼球運動の位置データは、1 回微分し速度に変換した。その後、速度閾値による desaccading アルゴリズムを用いて、眼球運動に含まれる saccade 部分を全て除去し OKR の部分のみを抽出した。

2.5.1 OKR の追跡精度の定量化

実験 2 で計測した OKR の追従精度を定量化するために、眼球速度をモザイク画像の回転速度 (30 deg/s) で割った OKR ゲインを算出した。OKR ゲインが 1 のとき OKR の速度と画像の回転速度が一致していることを意味する。各参加者において、実験 2 の Training で計測された OKR から OKR ゲインを算出した。Training では回転映像が 50 周期提示されるため、参加者 1 人あたり 50 標本の OKR ゲインが算出される。OKR ゲイン算出後、Training の各周期において、ベクシオンが知覚されていた区間と知覚されていない区間に OKR ゲインを分類し、ベクシオン知覚有無における全参加者の

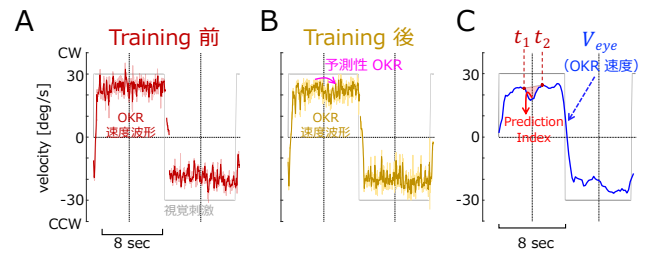


図 3. すべての図の横軸は時間、縦軸は回転速度を表す。灰色の矩形波はモザイク画像の回転速度を意味する。A：参加者 A の実験 2 Training 前 (赤) の OKR の平均結果。B：参加者 A の実験 2 Training 後 (黄) の OKR 平均結果。C：実験 2 Training 後の OKR 波形。赤色部分は Prediction Index を表す。

平均 OKR ゲインを算出した。

2.5.2 予測性 OKR の定量化

実験 2 のモザイク画像の回転速度の時系列データから、回転方向が切り替わるタイミングを検出し、Training 前と後それぞれの OKR の速度波形を 1 周期ごとに抽出した。図 3A と B に実験参加者 A の Training 前 (A, 赤) と Training 後の Test (B, 黄) で抽出された 5 周期分の OKR の平均結果を示す。Training 前の平均 OKR の波形は、桃色矢印が示すように視覚刺激の波形と並行している。対して Training 後の Test の平均 OKR 波形では、視覚刺激の動きだし 4 秒付近で OKR の速度が低下しその後速度が上昇していることが示された (図 3B)。この結果から、Training において、実験参加者は予測性 OKR を獲得したことが考えられる。本研究では、Test で見られた予測性 OKR を定量化するために、Prediction Index を次式のように求めた。

$$\text{Prediction Index} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (V_{eye}(t_1) - V_{eye}(t_2)) dt}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

OKR の速度波形 V_{eye} を 1 回微分することで躍度を求め、躍度のピークとなる時刻をそれぞれ t_1, t_2 と置く。Prediction Index は図 3C の赤色で塗られた面積を時間で割ったものとなる。

3. 結果

3.1 ベクシオンの知覚時間と予測性 OKR

ベクシオンの発生と予測性 OKR の関係を確かめるために、実験 1 で計測したベクシオンの知覚時間と実験 2 Training 後の予測性 OKR から算出した Prediction Index の相関を調べた (図 4A)。その結果、ベクシオン

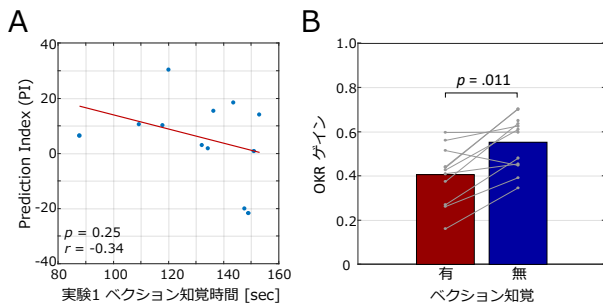


図4. A: ベクシヨン知覚時間と予測性OKRの関係。横軸は実験1で計測されたベクシヨンの知覚時間, 縦軸は実験2のTraining後で計測された予測性OKRを定量化したPrediction Indexの値を表す。青点は参加者個人ごとの結果を意味する。B: ベクシヨン知覚有無におけるTraining時のOKRゲイン。赤色の棒グラフはベクシヨンを知覚したとき, 青色はベクシヨンを知覚していないときのOKR平均ゲインを表す。知覚時間とPrediction Indexに有意な相関は見られなかった ($r = -0.34, p = 0.25$)。

3.2 ベクシヨン知覚有無におけるOKRゲイン

実験2 Trainingにおいて, ベクシヨンが知覚されているときとそうでないときの平均OKRゲインを比較した結果, ベクシヨンを知覚している区間のOKRゲインは知覚していないときに比べて有意に低いことが示された (図4B; $p = 0.01$)。

4. 考察

実験2のTrainingにおいて, ベクシヨンを知覚有無におけるOKRゲインを比較した結果, ベクシヨンが知覚されているときのOKRゲインは, 知覚されていないときに比べて低い結果が示された (図4B)。OKRゲインが低いことは, ベクシヨン知覚中のOKRの眼球速度と刺激の移動速度の差がベクシヨンを知覚していないときに比べて大きいことを意味する。この結果は, 眼球運動の速度と刺激の移動速度の差が大きいほど映像視聴中の酔いが強くなることを示した, 先行研究と一致している[4]。本研究では, ベクシヨンの知覚有無においてOKRのゲインが異なることを示したが, OKRのゲインが低下することでベクシヨンが知覚されたのか, ベクシヨンが知覚されたことでゲインが低下したのかを結論づけることができない。

先行研究では, 予測性OKRが顕著に現れるヒトほどOKANの持続時間が長いことを示している[5]。また, ベクシヨンをより知覚するヒトほどOKANの持続時間が長いことも報告されている[2]。これらの知見から,

本研究ではベクシヨンを知覚するヒトほど予測性OKRが顕著に現れることを予想していた。しかし, 予測性OKRを定量化したPrediction Indexとベクシヨンの知覚時間を比較した結果, 両者に有意な相関はみられなかった (図4A)。ベクシヨンの知覚とOKANの持続時間を調べた先行研究[3]では, 参加者が主観的に感じるベクシヨンの強さをベクシヨンの指標として計測していた。対して本研究では, ベクシヨンの強さではなくベクシヨンの知覚時間を計測していた。このことから, ベクシヨンの強さと予測性OKRを定量化したPrediction Indexの関係を調べた場合, ベクシヨンをより強く知覚するヒトほど予測的に視標を追従する可能性が考えられる。

本研究では, ベクシヨン知覚時のOKRによる追従精度がベクシヨンを知覚していないときに比べて低いことを示した。この結果から, OKRによる追従精度からベクシヨンの発生を検出できる可能性が示唆された。しかし, 前述した通り, 追従精度の低下とベクシヨン発生の因果関係は明らかではない。今後の研究では, ベクシヨンの発生直前と直後のOKRの追従精度を比較し因果関係を確かめる必要がある。また, VR酔いを未然に防ぐ手段として, OKRを指標としたベクシヨン発生の検出が有効であるかについても今後の実験で調べる必要がある。

文献

- [1] Hettlinger, Lawrence J., et al. "Vection and simulator sickness." *Military psychology* 2.3 (1990): 171-18
- [2] Nooij, Suzanne AE, et al. "Vection is the main contributor to motion sickness induced by visual yaw rotation: Implications for conflict and eye movement theories." *PloS one* 12.4 (2017): e0175305.
- [3] Nooij, Suzanne AE, Paolo Pretto, and Heinrich H. Bühlhoff. "More vection means more velocity storage activity: a factor in visually induced motion sickness?." *Experimental brain research* 236 (2018): 3031-3041.
- [4] Guo, C. T., and R. H. Y. So. "Effects of foveal retinal slip on visually induced motion sickness: a pilot study." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 56, No. 1. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2012.
- [5] Y. Matsuzawa, R. Baker, Y. Hirata, "Human predictive optokinetic eye movement is correlated with the presence of velocity storage: Demonstration in a virtual reality environment", Society for Neuroscience 2017 Annual Meeting, No.109.06, Washington D.C., 2017.

本研究は, JST CREST「生体マルチセンシングシステム究明と活用技術の創出」事業の補助を受けて行われた。