



左右カーブ走行における頭部運動の様子とVR酔いの研究

A Study on Head Movement Dynamics and VR Sickness during Left-Right Curve Driving

山田 未来¹⁾, 呉 謙²⁾, 金井 敦¹⁾
Mirai YAMADA, Ken GO, and Atsushi KANAI

1) 法政大学大学院 理工学研究科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2, mirai.yamada.8r@stu.hosei.ac.jp)
2) 法政大学 情報メディア教育研究センター (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2, qian.wu.87@hosei.ac.jp)

概要: 本研究では、頭部運動指標を用いたVR酔い予測モデルの構築を目指し、VR映像による左右カーブ走行時の頭部運動がVR酔い・疲労に関連するかを検討した。被験者14名がHMDを装着し、8字型自動走行コースを体験した後、HeadMotionLoggerでYaw・Pitch・Roll三軸の回転量を記録した。体験後にSSQおよびCSQ-VRを実施し、頭部回転量と各スコアの相関を解析したところ、Low群は全指標で平均回転量がHigh群を上回ったものの、統計的有意差は認められなかった。

キーワード: VR酔い/SSQ/頭部運動

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ(VR)はエンターテインメントをはじめ、教育、医療、訓練など様々な分野で応用が進んでいる。VR技術は仮想的な3次元空間を通じてユーザーに現実には存在しない環境や不可視のものを可視化する体験が可能であり、メタバースの流行や安価なヘッドマウントディスプレイ(Head-Mounted-Display, HMD)の普及により、多くの人々が手軽に高品質なVR体験を享受できるようになった。

一方で、視覚情報による自己運動感覚(ベクション)と前庭感覚や体性感覚とのずれから生じるVR酔いの問題が顕在化している[1]。特にオブジェクタルフロー(映像内の物体や景色の動きをベクトルで示す手法)によって誘発される急激な眼球運動は、レーシングゲームやローラーコースターなど高速かつ複雑な動きを伴うアプリケーションで顕著にVR酔いを引き起こす要因とされている。

ユーザー自身の頭部運動に着目した研究は少なく、その役割は十分に解明されていない。頭部をどの程度、どの方向へ動かすかがベクションと前庭情報のずれを緩和する可能性は示されているものの、定量的指標や実践的ガイドラインは確立されていない現状がある。本研究では、左右カーブを繰り返す8字型コースを走行するVR映像を用いて被験者の頭部三軸回転量(Yaw・Pitch・Roll)を詳細に記録し、これらの運動量がVR酔いおよび疲労指標(SSQ/CSQ-VR)とどのような関係を持つのかを定量的に明らかにする。その解析結果から酔いリスクをリアルタイムで推定できる頭部運動指標を抽出し、開発者が実装しやすい頭部動作ガイドラインを示すことで、頭部運動指標を活用したVR酔い予測モデルの構築と快適なVR体験設計に資する知見を提供することを目指す。

2. 関連研究

2.1 VR酔い

VR酔いは車酔いに似た症状を呈し、先行研究によりさまざまな特徴が報告されている。代表的な説明として感覚不一致理論と眼球運動理論が挙げられ、特に高速移動体験を伴うレースゲームでは本問題が顕著になる傾向がある。ゲーム内での急速な加速やカーブ、さらには急激な視覚的变化はユーザーの感覚を過度に刺激し、VR酔いを引き起こす主要因となる。加えて、VR環境における自然な身体動作と視覚入力との同期不足も不快感を増幅させる要因である。これらの要素は没入感を高める一方で不快な体験を招く可能性があるため、ゲームデザインと技術の両面から改善が求められている。そのため、VR技術の進展とともにユーザーの快適さを維持しながら没入感を提供する新しい手法の開発が不可欠であり、先行

研究では視覚刺激の強度調整など多様なアプローチが試みられてきた。

回転運動は酔いを誘発する主要因の一つとされ、特に yaw 方向の回転は症状に強く影響すると報告されている。しかし回転が酔いに及ぼす影響は様ではなく、回転速度に依存する側面がある。平野らの研究[2]では「等速運動において速度が 30–60 deg/s を超えてもVR酔いの程度は増加しない」と示されており、本研究の予備実験ではyaw方向の酔いを抑えるため、先行研究が示した範囲を超える速度設定を採用した。

またVR環境とVR酔いについて、藤木卓・市村幸子・寺嶋浩介・小清水貴子によるVRコンテンツの精度が現実感と酔いに与える影響についての研究[3]では、コンテンツ精度の向上に伴い現実感が高まるほどVR酔い評価が直線的に低下することが示されている。特にオブジェクト形状の複雑さよりも、貼付ける表面画像の質感が酔いを軽減に強く寄与すると報告されている。これに基づき、本研究のVR環境ではユーザーがワールド端を認識しないよう、自然に囲まれた谷間をサーキット会場として設計した。またサーキット内外にリアリティの高い木々を配置し、コース上には精細な草のテクスチャを用いることで没入感を高めつつ酔いを最小限に抑えるよう配慮した。

VR酔いの根本的な原因の一つは急速な眼球運動とされている。特に、VR空間における視覚情報の処理中に生じるオブジェクタルフローは、自然界では体験されない眼球の動きをユーザーに強いる。このため、ユーザーの脳が現実世界の動きとバーチャル環境の視覚情報の不一致を調和しようとする際に、不快な感覚が生じ、これがVR酔いの原因であるとされている。対策として視覚的な基準点となるレストフレームを表示するといった方法が用いられている[4]。固定されたオブジェクトをVR環境内に提示することで、ユーザーの脳はより安定した視覚的アンカーを持ち、急激な眼球運動を緩和する。また、ソフトウェアレベルでの解決策としては、オブジェクタルフローが強い時に画面にぼかしを加え、視覚的刺激を抑える方法が検討されている。このぼかしは、特に動きが速いシーンや複雑な環境において眼球運動を穏やかにし、VR酔いを軽減することが期待されている。

先行研究では、視野角の調整がVR酔いの軽減に効果的であることが示されている。明治大学の萱場大貴らによる研究[5]では、VR内での視野角を速度に合わせて動的にトーンリングする手法を提案し、直線コースを用いたレースゲームにおいて加速時に視野角を狭め、減速時に広げることでVR酔いを低減しつつ速度感を維持することに成功した。本研究では、これら

の酔いの軽減策の知見を踏まえつつ、左右カーブ走行時の頭部運動という身体的側面に注目し、ソフトウェア的対策とは異なる観点からVR酔い軽減を図る。

2.2 頭部運動とVR酔い

近年、頭部運動はVR酔いを左右する主要な行動指標として注目されている。Maneuverier[6]らは一人称視点のVRタスク中に取得した三軸回転データと自己相似性(DFA)で特徴量化し、クラスター解析を行った結果、回転量が小さい利用者群でSSQスコアが有意に高いことを報告した。また事前に測定したField Dependence-Independence(FDI)が酔い得点の約27%を単独で説明し、disorientation尺度が視運動課題の成績低下にも関与することを示した。この知見は酔いを避けようとして頭部回転を抑制する行動がむしろ症状を悪化させる可能性を示している。

Head Movement Interface(HMI)を用いて車両を操舵する仮想運転シミュレーションの有効性を検証した研究[7]では、頭部のyaw回転のみでハンドル操作を代替し、走行性能と快適性を比較した。被験者はジョイスティック操作より大きな頭部回転を必要としたものの、レーンキープ精度は同等以上であり、試行を重ねるにつれてSSQ得点が漸減した。さらに、回転振幅が過度に大きい参加者ほど酔いが悪化する傾向が示され、適度な頭部運動を伴うインタフェースが視覚・前庭の不一致を緩和し得ることが示唆された。

これらの研究は、頭部回転量の抑制や個人の感覚統合特性が酔い感受性を左右し得ること、そして頭部運動指標に生理・行動指標を組み合わせた多面的評価が有用であることを示している。

本研究では、左右カーブを含む8字型コース走行中の三軸頭部回転を高頻度で取得し、SSQとCSQ-VRに視線および心拍指標を組み合わせた多面的評価を実施する。先行研究の知見を踏まえ、適度な自発的頭部運動を促す設計と個人特性に応じたリアルタイム予測モデルを構築し、走行タスクにおけるVR酔いの低減と操作性能維持の両立を目指す。

2.3 VR酔いの評価指標

VR酔いの主観的評価には、Kennedyら[8]が開発したSimulator Sickness Questionnaire(SSQ)が最も広く用いられてきた。SSQは悪心・眼精疲労・失見当識の3下位尺度からなる16項目の質問票で、各症状の強度を4段階で評定し、加重得点によって総合スコアを算出する構造を採る。開発当初は航空・車両シミュレータ用に設計されたため、視覚依存の強いVR環境で頻発する症状構成との齟齬、質問数と計算手順による負担、4段階リッカート尺度による解像度の限界が指摘されている。

これらの課題を補う指標として、Kourtesisら[9]によって提案されたのがCybersickness in Virtual Reality Questionnaire(CSQ-VR)である。CSQ-VRはVR専用に設計された6項目・7段階リッカート尺度の質問票で、悪心/前庭・平衡感覚/眼球運動の3尺度を2項目ずつで簡潔に測定し、単純加算した合計点で酔いの程度を示す。開発研究ではSSQやVRSQと比較して内部一貫性と判別力が高く、回答時間も短縮できることが示され、VR環境における新たな標準指標として注目されている。

本研究では、VR体験の終了直後にSSQとCSQ-VRを連続して実施し、両尺度の結果を直接比較する。同時に、SSQが提供する総合評価とCSQ-VRが捉えるVR特有の結果を比較することで、頭部運動との関係を多面的に検証する。

2.4 予備実験

本研究に先立ち、VRレースゲームにおけるカーブ走行時の頭部傾斜がVR酔いに与える影響を調査する予備実験を実施した。被験者は25名で、頭部角速度を15, 30, 60 deg/sの3条件、車両の傾斜角度を0, 15, 30, 45°の四条件に設定した計12パターンを体験した。コースは左回りの円軌道で、車両が一定速度で等速走行する間、被験者は椅子に着座したままHMDを装着し、120秒間の走行後にSimulator Sickness Questionnaire(SSQ)を回答した。結果、角速度30deg/sでは15°

および30°の傾斜条件でSSQ総合得点が有意に低下し、中程度の速度下で15~30°程度の頭部傾斜がVR酔いを緩和し得る可能性が示唆された。ただし、本実験には三つの限界がある。第一に、コースが左回りの円軌道であったため、進行方向は常に左旋回であり、実際のレースゲームに見られる左右交互のカーブや直線区間が含まれていない。第二に、設定した傾斜角は車体(視点)を回転させるものであり、被験者自身の自発的な頭部運動を計測していないため、頭部の動きそのものと酔い症状の詳細な時間的関係を検討できなかった。第三に、評価指標はSSQのみであり、VR専用のCSQ-VRなどの尺度や生体指標を併用していない。

以上を踏まえ、本研究では左右カーブを繰り返す8字型コースを用いて、被験者の頭部回転量(Yaw・Pitch・Roll)を高頻度で記録するHeadMotionLoggerを作成、導入する。さらにSSQとCSQ-VRを同時に実施し、視線および心拍などの生体データを併用することで、頭部運動とVR酔い・疲労の因果関係を多面的に検証し、カーブ走行時に自然な頭部動作を誘導する指針とリアルタイム予測モデルの構築を目指す。

3. 実験

3.1 実験環境

本研究のデータは、PCVR環境を所有する一般ユーザーにオンライン協力を依頼し、各自の自宅から着席姿勢で体験してもらった形で収集した。参加者が使用したヘッドマウントディスプレイ(HMD)はQuest3やPico4など現行世代の市販機が中心であり、機種名は体験後のアンケートで自己申告を受けた。

VR環境はUnityで開発した八の字型サーキットで構成した。各円の半径は64m、道幅は20mとし、左右カーブが連続するため視点が周期的にYaw方向へ回転するよう設計している。

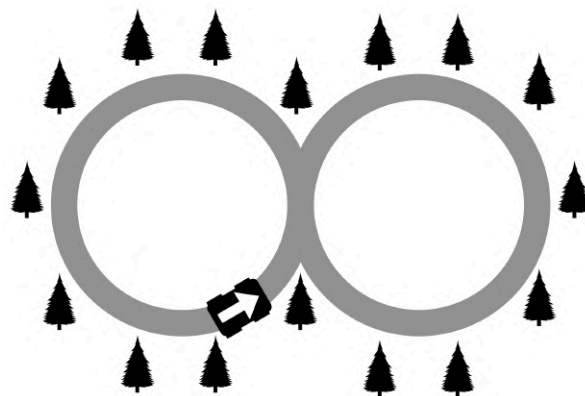


図1:サーキットの俯瞰図

路面には草テクスチャを貼付し、コース内外に木オブジェクトのみを配置した。遠景には霧効果を適用し、ワールド端が視界に入りにくい景観とした。走行は自動運転モードを採用し、車両モデルと速度を固定して全被験者が同一条件を体験できるようにした。

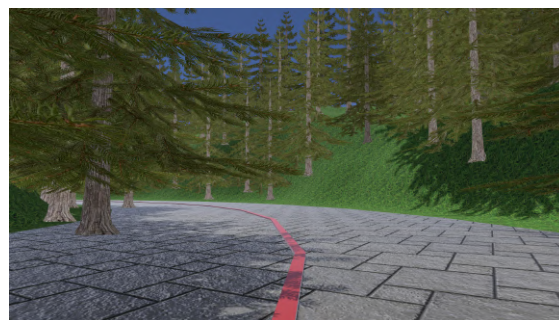


図2: 実験開始時の参加者の視点

頭部運動は自作したHeadMotionLogger(HML)で計測した

・HMLはHMDから取得した頭部の位置座標と姿勢情報を30Hzでサンプリングし、VR空間でのユーザの位置XYZとのYaw, Pitch, Rollの三軸回転角で、タイムスタンプ付きのCSV形式で保存した。

3.2 実験手順

VR体験開始前に、Googleフォームで年齢、性別、VR機器使用経験、乗り物酔い傾向、前夜の睡眠時間、当日の体調と回答と実験参加への同意を取得した。被験者はPCVR環境から八の字サーキットのあるVR空間へ参加し、事前の実験手順の説明動画とVR空間上の指示に従って2分間の自動走行を体験した。走行終了後にSSQとCSQ-VRに回答し、被験者のPCに生成されたログファイルを提出し実験を終了する。

4. 実験結果

4.1 SSQ-TSと頭部運動量

本研究ではSSQ-TSの中央値9.35を基準に被験者をHigh群(SSQ-TS ≥ 9.35 $n = 7$)とLow群(SSQ-TS < 9.35 $n = 7$)に二分し、それぞれの頭部回転総量を比較した。表1に各群の平均 $\pm$ SDを示す。Low群の平均回転量は全指標でHigh群を上回る傾向にあった。

表1: High/Low群の頭部回転総量(平均 $\pm$ 標準偏差)

	total_dYaw (deg)	total_dPitch (deg)	total_dRoll (deg)	total_dRotation (deg)
High	4569 $\pm$ 469	804 $\pm$ 528	442 $\pm$ 238	5815 $\pm$ 1210
Low	4761 $\pm$ 778	816 $\pm$ 406	453 $\pm$ 274	6030 $\pm$ 1429

t検定を用いて群間の比較を行ったが、いずれの軸でも有意差は認められなかった($p>0.05$)。さらに相関分析では $|r|<0.3$ と弱い相関にとどまり、統計的な関連は確認できなかった。

5. 考察

5.1 SSQ-TSと頭部運動量

本研究では、SSQ-TSの中央値9.35を境に分けたLow群においてHigh群より頭部回転総量が高い傾向が観察された。しかしながら、t検定および相関分析では統計的有意差や強い相関は認められなかった。考えられる要因として、被験者数の不足による検出力低下や、参加者間の個人差の大きさが挙げられる。また、本研究で算出した頭部運動量は三軸の回転角度の絶対値を単純累積したことと、逆方向に折り返すような急激な振り向きの回転と一方向に連続する緩やかな回転を区別できなかったことも影響したと考えられる。

6. おわりに

本稿では、左右カーブ走行時の頭部三軸回転量とVR酔い指標(SSQ/CSQ-VR)との関係を、HeadMotionLogger(HML

)を用いた高頻度のサンプリングによって定量的に検証した。結果として、酔いの程度が低いLow群で頭部運動量が高い傾向が示されたものの、統計的有意差は得られなかった。これは被験者数の不足や群分割基準の単純さ、回転角度の累積値のみを用いた指標設定によるものであり、本研究の限界として位置づけられる。またその他の限界として中央値による群分けの妥当性や、Yaw・Pitch・Roll各軸の特徴的な動きや時間変化を反映できない単純な指標設定が挙げられる。今後は被験者数を増やすとともに、より適切な閾値設定や群分け方法を検討し、頭部運動パターンを多角的に分類する解析手法を導入したい。また、CSQ-VRなど他の主観評価指標や生理指標と組み合わせた多面的評価を行うことで、頭部運動とVR酔いの関係性をより明確化することを目指す。

参考文献

[1] LaViola Jr, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. ACM Sigchi Bulletin, 32(1), 47-56.

[2] 平野翔, 木島竜吾. (2022). 他律的な視方向の回転運動とVR酔いの関係. 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2022.

[3] 藤木卓, 市村幸子, 寺嶋浩介, & 小清水貴子. (2012). VR コンテンツの精度が現実感と酔いに与える影響. 日本教育工学会論文集, 36(Suppl.), 73-76.

[4] Wienrich, C., Weidner, C. K., Schatto, C., Obremski, D., & Israel, J. H. (2018, September). A virtual nose as a rest-frame-the impact on simulator sickness and game experience. In 2018 10th international conference on virtual worlds and games for serious applications (VS-Games) (pp. 1-8). IEEE.

[5] 萱場大貴, & 宮下芳明. (2021). VR レースゲームでの動的なトンネ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, (2021), 208-213.

[6] Maneuvrier, A., Nguyen, N. D. T., & Renaud, P. (2023). Predicting VR cybersickness and its impact on visuomotor performance using head rotations and field (in) dependence. Frontiers in Virtual Reality, 4, 1307925.

[7] Saito, Y., Kawashima, K., & Hirakawa, M. (2020). Effectiveness of a head movement interface for steering a vehicle in a virtual reality driving simulation. Symmetry, 12(10), 1645.

[8] 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.

[9] Kourtesis, P., Linnell, J., Amir, R., Argelaguet, F., & MacPherson, S. E. (2023, January). Cybersickness in virtual reality questionnaire (csq-vr): A validation and comparison against ssq and vrsq. In Virtual Worlds (Vol. 2, No. 1). MDPI.