

低速なオプティカルフローの追加提示による VR 酔い軽減の提案

若山 瑞季^{†a)} 三武 裕玄[†] 長谷川 晶一[†]

Proposal for VR sickness reduction by additional low speed optical flow

Mizuki WAKAYAMA^{†a)}, Hironori MITAKE[†], and Shoichi HASEGAWA[†]

あらまし HMD を長時間装着していると VR 酔いと呼ばれる症状が現れることがある。VR 酔いを軽減する先行研究の多くは視界を制限するものだった。本論文の目的は、視界を制限せずに VR 酔いを軽減することである。VR 酔いの原因のひとつに感覚矛盾説がある。本論文では感覚矛盾を小さくするためにオプティカルフローを映像に加えることで酔いを軽減する手法を提案する。実験では、ランダムドットを用いた映像を使用した。被験者は映像を観察しながらベクションを評価し、実験終了後に SSQ に関するアンケートに回答した。本論文では移動速度に対して同方向低速度のオプティカルフローを映像に追加することで VR 酔いを軽減した。

キーワード VR 酔い, オプティカルフロー, ベクション, SSQ

1. はじめに

長時間ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着していると目眩、頭痛、吐き気、ふらつきなどの症状が現れることがある。この症状を VR 酔いという。VR 酔いの原因の一つとして挙げられるのが感覚矛盾説 [1] である。この説は視覚と前庭感覚に矛盾があり、過去の経験と予測が食い違うことにより酔いが発生するという説である。

VR 酔いを引き起こしやすい行動の一つに VR 空間内における移動が挙げられる。VR の中で移動する際、オプティカルフローを観察することでベクション (視覚誘導性自己運動感覚) を得る。しかし実際に移動しているわけではないので前庭感覚から得られる加速度は変化しない。このため VR 酔いの原因となる感覚矛盾が発生しやすい。

VR の中での移動における VR 酔いを軽減するための先行研究の多くは視界を制限するものであり、没入感を阻害していた。そこで本研究では視界を制限せずに VR 酔いを軽減することを目的とする。そのために「オプティカルフローを映像に追加することでベク

ションを軽減し、VR 酔いを軽減できるのではないか」という仮説を設定した。この仮説を検証するために速度およびコントラストを変化させたオプティカルフローを追加した映像を複数視聴し、結果を比較した。

2. 関連研究

本節ではまず VR 酔いの原因に関する研究を紹介した後、現在どのような対策がとられているのかについて解説する。

2.1 原因

VR 酔いの原因はいくつか考えられる。その一つが視覚と前庭間隔に矛盾があり、過去の経験と予測が食い違うことにより酔いが発生するという感覚矛盾説 [1] である。また姿勢が不安定になることにより酔いが発生するという姿勢不安定説 [2] や視運動性眼振により酔いが引き起こされるという眼球運動説 [3] などもある。

これらの理論は必ずしも排他的というわけではなくそれぞれの理論が特定の状況下で起こりうるものであり、また相互に影響し合うこともある。

2.2 視界の制限

VR 空間における移動は感覚矛盾を起こしやすいため VR 酔いを引き起こしやすい行動の一つに挙げられる。VR 空間における移動による VR 酔いを軽減するための研究として、VR 空間内での視界を制限することで VR 酔いを軽減するという手法が存在する。例え

[†] 東京工業大学工学院, 神奈川

Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku Yokohama, Kanagawa, Japan

a) E-mail: pip.mizuki@gs.haselab.net

DOI:10.14923/transj.??????????

ばトンネリング[4]という手法は移動中のみ視野を狭めることでVR酔いの軽減ができることが報告されている。また視界内に動かない独立した背景[5][6]を表示することでVR酔いの軽減に成功した研究がある。しかしこれらの方法は視界を制限する範囲が大きく、没入感を損ねると考えられる。

2.3 映像の制限

どのような映像がVR酔いを引き起こしやすいのかについても研究が行われている。例えばVRの中で自分がキャラクターを操作できるかどうかで酔いのレベルが変わるという研究がある[7][8][9][10][11]。ただし映像の制限は自由にコンテンツを作ることができず、表現の幅が狭くなる。

2.4 感覚矛盾を小さくする

VR酔いの原因の一つである感覚矛盾を小さくすることでVR酔いの軽減を行う手法に関しても先行研究が存在する。感覚矛盾を小さくするためにはベクションを小さくする、前庭感覚や体性感覚を再現するなどの方法が考えられる。

中山らは映像に合わせて前庭電気刺激により前庭感覚を再現する[12]ことでVR酔いから回復する時間を短くすることに成功した。Leeらはユーザーの足踏みを検知してVRの中での移動と同期させることでVR酔いを軽減できることを明らかにした[13]。SarahらはVRの中で移動する際、映像に同期して移動時に生じる気流と座面の揺れを提示することでVR酔いの軽減に成功した[14]。しかしこれらの方法は電気刺激や足踏みの検知のためにHMD以外の装置を必要とする。

3. 提案手法

本研究では映像にオプティカルフローを追加してベクションを低下させ、感覚矛盾を小さくすることでVR酔いを軽減する手法を提案する。追加するオプティカルフローに関しては川島らの研究[15]に着目した。この研究では同方向に動く二種類の速度が異なるオプティカルフローを同時に観察した時、速度差が大きい場合は遅い方のオプティカルフローがベクションの決定に大きく寄与し、速度差が小さい場合はベクションはオプティカルフローの密度比の線形和によって決定されたことを報告している。この結果から「移動速度よりも低速度で動くオプティカルフローを映像に追加することでベクションが低下し、VR酔いを軽減できるのではないか」という仮説を立てた。この手法では視界の制限が少ないため、この研究の目的となる「没

入感を損なわずにVR酔いを軽減する」を達成できるのではないかと考えた。類似した研究として笹山らの手法[16]がある。この研究では実世界の風景を模擬したVR空間内での移動中、映像に対して逆方向に動くオプティカルフローを追加し、VR酔いを軽減することに成功している。

このことから予備実験として

- 単一の速度のみのオプティカルフローが表示される映像

- 同方向低速度のオプティカルフローが単一のオプティカルフローと同時に表示される映像

- 逆方向低速度のオプティカルフローが単一のオプティカルフローと同時に表示される映像

の3種類の映像を観察した後SSQを評価し、比較を行った。その結果同方向及び逆方向低速度のオプティカルフローを追加した映像は単一のオプティカルフローのみの映像と比較するとどちらもベクションは軽減されたが、二種類のオプティカルフローを同時に見る不快感からSSQのスコアは高くなった。そこで低速度のオプティカルフローへの目移りを防ぐため追加するオプティカルフローの色を黒色に変え、再度予備実験を行った。なおオプティカルフローの輝度や映像のコントラストは先行研究によりSSQの増減とは無関係であると考えられる[17]。再予備実験の結果、単一のオプティカルフローが表示される映像観察後のSSQのスコアよりも黒色低速度のオプティカルフローを追加した映像観察後のSSQのスコアが低くなった。ただしこの予備実験は被験者が1人であったため被験者を増やして本実験を行った。

4. 実験

本節では実験内容について説明する。また5.節では実験の結果、6.節では分析結果、7.節では考察を記述する。

4.1 目的

単一のオプティカルフローに対して同方向低速度または逆方向低速度のオプティカルフローを追加した際の酔いの変化を調査する。

4.2 実験手順

実験には健康な成人男女8名が参加した。映像の提示にはOculus Quest 2(水平視野角104度、垂直視野角98度[18])を使用した。被験者はOculus Quest 2を装着し両手にOculus Touchを持って立位で90秒間視覚刺激を観察した。被験者には映像観察中にベクション

を評価するよう指示した。映像を8種類用意し、被験者は映像を観察後SSQに回答し、十分な休憩をとった後実験を再開した。

4.3 視覚刺激

映像はUnity2020.3.11f1を用いて作成した。視覚刺激として黒の単色背景の中で半径0.1mのランダムドットが半径100m、高さ80mの半円筒空間を鉛直軸を中心に回転する映像を90秒間提示した。被験者は半円筒空間の高さ40m、鉛直軸から水平方向に10m離れた位置に立った。映像開始時にランダムドットを半円筒空間内に生成し、回転開始後は図1において灰色で示される空間外に達すると消滅した。0.1秒ごとに空間内のランダムドットの個数を確認し、不足分のランダムドットを新しく生成した。ただしほとんど動かないランダムドットを生成することと被験者の顔付近をランダムドットが通過することを避けるため、鉛直軸から0~2m及び9~11mの距離にはランダムドットを生成しなかった。ランダムドットの色は白色のもののRGBが(255, 255, 255)、黒色のもののRGBが(70, 70, 70)であった。条件によってドット群が1つもしくは2つ半円筒空間内に存在し、1つのドット群につき1200個のランダムドットを生成した。

実験前に赤色の注視点を表示し、被験者に実験中は注視点周辺を注視するよう指示した。ただし注視点によってVR酔いが軽減される[20]ことを防ぐため実験中は注視点を表示しなかった。実験開始前に注視点及び静止したランダムドットを表示し、実験を開始する瞬間に注視点を消去した。ランダムドットは注視点を消去した3秒後に鉛直軸に沿って回転を開始させた。ランダムドットが回転を始めてから90秒後に映像を終了させ、被験者にSSQを回答させた。

4.4 実験条件と視覚刺激の内容

表1に実験の条件に対応する映像の構成を示すドット群1の速さを30deg/s、ドット群2の速さを10deg/sとし、実験の要因としてドット群1,2の色の組み合わせとドット群2の回転方向を設定とした。低速度のオプティカルフローを映像に追加することでSSQが変化するかどうかを確認するためドット群2を表示しないもの、負の方向に回転するもの、正の方向に回転するものの3水準で変化させた。また追加するオプティカルフローは異色のものであるべきかどうか、またSSQの変化がオプティカルフローの色が変化したこと起因するものかどうかを確認するためドット群1,2の色の組み合わせを(白, 黒), (白, 白), (黒, 白)の3水

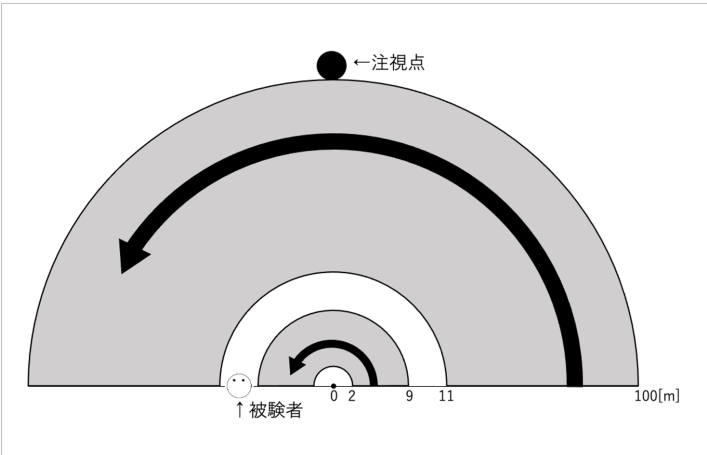


図1 VR空間内での被験者とランダムドット。矢印は正回転を示す。図の灰色で示される空間内をランダムドットが移動する。

準で変化させた。ただし(白白, 表示しない)条件は条件1と重複するため行わなかった。

順序効果の影響を考慮し、被験者ごとの各順序における条件の重複がないようにした。

表1 実験条件

		ドット群2の回転方向	
		(表示しない)	負 正
ドット群1, 2の色	白黒	1(基本条件)	2 3
	白白	行わない	4 5
	黒白	6	7 8

4.5 内観報告の方法

本項では内観報告の方法について解説する。

4.5.1 SSQ

酔いの評価を行うため映像を観察後、被験者にSSQ[19]への回答を依頼した。SSQは16個の質問に対してそれぞれどれくらい当てはまるのかを0~3の4段階で回答するアンケートであり酔いの程度を評価することができる。各質問はNausea(N: 吐き気), Oculomotor(O: 眼精疲労), Disorientation(D: ふらつき)のいずれかのカテゴリーに1個以上属しており各カテゴリーに属する質問のスコアの和に重み(N:9.54, O:7.58, D:13.92)をかけることでN, O, Dのスコアが求められる。また各カテゴリーに属する質問のスコアの和を合計したものに3.74の重みをかけることでTotal Score(TS)スコアが求められる。

4.5.2 ベクシオン

低速度のオプティカルフローを映像に追加することでベクシオンが軽減できているかどうかを確認するため、映像を観察中被験者はベクシオンを評価した。被

験者は実験前に基本条件の映像を 1 分間観察し、この時のベクションを 100 とするように指示した。また基本条件の映像は各条件の映像を再生する前に確認のため視聴することが可能であった。ベクションの入力には Oculus Touch を用いた。Oculus Touch を持った状態で右手首を回転させると入力値が 200~-200 の間で増減した。ベクションは 0.1 秒ごとに記録された。

実験開始前は注視点付近に現在の入力値が表示されたが、注視点によって VR 酔いが軽減される [20] ことを防ぐため実験中は入力値は表示されなかった。そのため現在入力している値の確認には音と振動を用いた。入力している値が 10 ずつ変化するたびに音を再生して通知した。また表 2 に従い、両手のコントローラーが振動した。コントローラーが 1 回振動するときは 0.1 秒間の振動をさせた。またコントローラーが 2 回振動する場合は 0.1 秒間の振動を行った後、0.1 秒の感覚を開けて再度 0.1 秒間の振動を振動した。

表 2 入力値と振動回数の対応

入力値	-200	-150	-100	-50	0	50	100	150	200
右手	2	1	1	1	2	1	1	1	2
左手	2	0	1	0	2	0	1	0	2

実験前に操作を確認するための時間を設け、被験者自身が十分操作に慣れたと判断した後実験を行った。

5. 結 果

5.1 全実験参加者の SSQ の平均

全実験参加者の SSQ の平均を図 2 に示す。

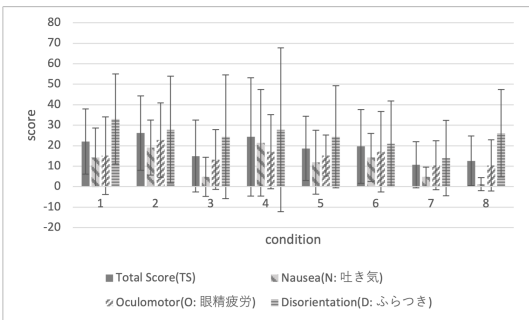


図 2 SSQ の全実験参加者についての平均

5.2 ベクション

各実験参加者の回答したベクションの時間平均を全実験参加についての平均を図 3 に示す。

6. 分 析

本節では二要因分散分析を行なった結果について説

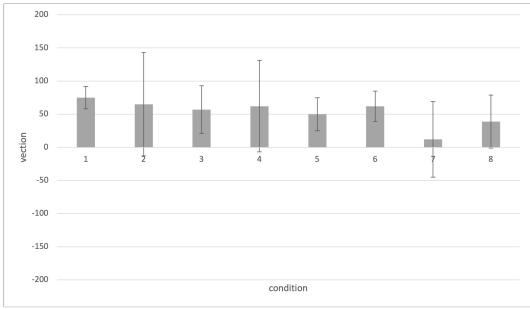


図 3 各実験参加者の回答したベクションの時間平均を全実験参加についての平均

明する。

6.1 SSQ

SSQ が変化しているかどうかと変化した要因について考えるために、条件をいくつかのグループに分けて二要因分散分析 ($\alpha = 0.05$) を行った。

6.1.1 条件 1368 について

単一のオプティカルフローに対して同方向低速度のオプティカルフローを追加した際の SSQ を比較するために条件 1368 の SSQ のスコアに対して二要因分散分析を行った。SSQ-TS、N、O、D のスコアに対して色およびドット群 2 の存在を要因とする二要因分散分析を行った結果得られた p 値を表 3 に示す。ドット群 2 の存在の要因により有意に SSQ-N が減少した ($p = 0.046$)。色要因および交互作用に有意差は得られなかった。

表 3 p 値: 要因 A: 色, 要因 B: ドット群 2 が存在するかどうか

		SSQ				ベクション
		TS	N	O	D	
要因	A	0.670	0.662	0.923	0.510	0.021
	B	0.283	0.046	0.411	0.878	0.370
	AB	1.000	0.402	0.405	0.186	0.940

6.1.2 条件 1267 について

単一のオプティカルフローに対して逆方向低速度のオプティカルフローを追加した際の SSQ を比較するために条件 1267 の SSQ のスコアに対して二要因分散分析を行った。SSQ-TS、N、O、D のスコアに対して色およびドット群 2 の存在を要因とする二要因分散分析を行った結果得られた p 値を表 4 に示す。色要因により有意に SSQ-TS、D が減少した ($p = 0.037$, 0.015)。また交互作用により SSQ-N、O が有意に変化した ($p = 0.033$, 0.049)。

表4 p 値: 要因 A: 色, 要因 B: ドット群 2 が存在するかどうか

		SSQ				ベクシオン
		TS	N	O	D	
要因	A	0.037	0.080	0.164	0.015	0.086
	B	0.761	0.613	0.948	0.598	0.261
	AB	0.067	0.033	0.049	0.836	0.258

6.1.3 条件 2345 について

単一のオプティカルフローに対して同方向低速度および逆方向低速度のオプティカルフローを追加した際の SSQ を比較するために条件 2345 の SSQ のスコアに対して二要因分散分析を行った。SSQ-TS, N, O, D のスコアに対して二要因分散分析を行った結果得られた p 値を表 5 に示す。ドット群 2 の回転方向の要因により有意に SSQ-N が減少した ($p = 0.033$)。ドット群 2 の色要因および交互作用に有意差は得られなかった。

表5 p 値, A: ドット群 2 の色, B: ドット群 2 の回転方向

		SSQ				ベクシオン
		TS	N	O	D	
要因	A	0.086	0.381	0.756	1.000	0.774
	B	0.139	0.033	0.244	0.626	0.599
	AB	0.581	0.542	0.366	1.000	0.871

6.2 ベクシオン

ベクシオンが変化しているかどうかと変化した要因について考えるために、条件をいくつかのグループに分け二要因分散分析 ($\alpha = 0.05$) を行った。

6.2.1 条件 1368 について

単一のオプティカルフローに対して同方向低速度のオプティカルフローを追加した際のベクシオンを比較するために条件 1368 の被験者の平均ベクシオンに対して二要因分散分析を行った。各被験者の平均ベクシオンに対して色およびドット群 2 の存在を要因とする二要因分散分析を行った結果を表 3 に示す。色要因により有意にベクシオンが減少した ($p = 0.021$)。ドット群 2 の存在および交互作用に有意差は得られなかった。

6.2.2 条件 1267 について

単一のオプティカルフローに対して逆方向低速度のオプティカルフローを追加した際のベクシオンを比較するために条件 1267 の被験者の平均ベクシオンに対して二要因分散分析を行った。各被験者の平均ベクシオンに対して色およびドット群 2 の存在を要因とする二要因分散分析を行った結果を表 4 に示す。全ての要因において有意差は得られなかった。

6.2.3 条件 2345 について

単一のオプティカルフローに対して同方向低速度および逆方向低速度のオプティカルフローを追加した際のベクシオンを比較するために条件 2345 の被験者の平均ベクシオンに対して二要因分散分析を行った。各被験者の平均ベクシオンに対して二要因分散分析を行った結果を表 5 に示す。全ての要因において有意差は得られなかった。

7. 考 察

条件 1368 の結果より映像に対して同方向低速度のオプティカルフローを追加することで SSQ-N が減少することがわかった。また色要因に有意差が見られなかったことから画面全体の輝度が低下したことが SSQ-N の減少の原因であるかどうかは確認できなかった。ただし平均ベクシオンにはドット群 2 の存在を要因とすることによる有意差が見られず、オプティカルフローを追加してベクシオンを軽減して SSQ を減少させるという当初の予想に反する結果となった。これは先行研究では直線運動を模したオプティカルフローを用いていたが本実験では回転運動を模したオプティカルフローを用いたためだと考えられる。

条件 1267 の結果より映像に対して逆方向低速度のオプティカルフローを追加する場合、画面全体の輝度が低下すると SSQ-TS, D が減少することがわかった。また交互作用により SSQ-N, O が有意に変化した。条件 2 が条件 1 に対して SSQ-N, O が増加しているのに対し、条件 7 は条件 6 に対して SSQ-N, O が減少した。

条件 2345 の結果より移動する映像に対して低速度のオプティカルフローを追加する場合、移動方向に対して逆方向のオプティカルフローよりも同方向のオプティカルフローを追加する方が SSQ-N が軽減できることがわかった。ただし平均ベクシオンには有意差が見られず、SSQ の減少がベクシオンの低下によるものかどうかは確認できなかった。

これらの結果より同方向低速度のオプティカルフローを追加することで SSQ-N が減少することがわかった。また追加するオプティカルフローのコントラストによる差は確認できなかった。

被験者ごとの個別のデータについて考えると 8 人の被験者の内の 1 人は 8 条件中基本条件を含む 6 条件で SSQ-TS のスコアが 0 となっており、この被験者に対して映像刺激が酔いを引き起こすのに不十分であった

ことがわかる。また基本条件の映像を 1 または 2 回目で観察した 2 人の被験者は、基本条件の映像に対してオブティカルフローを追加した条件である条件 2~5 の SSQ のスコアが基本条件の SSQ のスコアよりも高くなっている。一方前述の多くの条件で SSQ のスコアが 0 であった 1 名を除きその他の被験者にはこの傾向が見られなかった。これは疲労等の影響で後から観察した条件の方が SSQ のスコアが高くなりやすかったことが考えられ、順序効果の影響が見られた。

8. 今後の展望

本研究では回転中の移動速度に対して同方向低速度のオブティカルフローを映像に追加することで VR 酔いを軽減できることを示した。ランダムドットを用いた実験だったため、実世界を模擬した VR 空間でも同様の結果が得られるかは不明である。ただしこの手法を応用すれば実世界に近い VR 空間での移動においても VR 酔いを軽減できる可能性がある。例えば高速で空中を移動している映像に対して移動速度よりも低速で動く車といったオブジェクトを映像に追加することで VR 酔いを軽減できる可能性がある。

9. ま と め

本研究ではベクション軽減による VR 酔いの軽減のため回転方向とコントラストを変化させた低速度のオブティカルフローを映像に追加する手法を提案し、単一のオブティカルフローに対して同方向または逆方向低速度のオブティカルフローを追加した映像を観察してベクションと SSQ を比較した。

その結果コントラストに関係なく同方向低速度のオブティカルフローを映像に追加することで酔いを軽減できることがわかった。ただしオブティカルフローの追加によるベクションの変化は見られなかった。

今後は実世界に近い VR 空間でも移動速度に対して同方向低速度のオブティカルフローを映像に追加することで酔いを軽減できるのかどうかを検討する必要がある。

文 献

[1] J.T.Reason,Motion sickness adaptation:A neural mismatch model,Journal of the Royal Society of Medicine,71(11),pp.819-829,1978.
[2] G.E.Riccio and T.A.Stoffregen,An ecological theory of motion sickness and postural instability, Ecological Psychology,3(3),pp.195-240,1991.

[3] S.M.Ebenholtz,Motion sickness and oculomotor systems in virtual environments, Presence (Camb.) 1,pp.302-305,1992.
[4] 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),2016.
[5] Z.Cao,J.Jerald,and R.Kopper ,Visually-Induced Motion Sickness Reduction via Static and Dynamic Rest Frames,2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR),2018.
[6] J.D.Prothero,M.H.Draper,T.A.Furness,D.E.Parker,and M.J.Wells,The use of an independent visual background to reduce Simulator side-effects,Aviat Space Environ Med 70,pp.277-283,1997.
[7] X.Dong and T.A.Stoffregen,Postural activity and motion sickness among drivers and passengers in a console video game,Proc Hum Factors Ergon Soc Annu Meet 54(18),pp.1340-1344,2010.
[8] X.Dong,K.Yoshida, and T.A.Stoffregen,Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness,J Exp Psychol Appl 17(2),pp.128-138,2011.
[9] B.K.Jaeger and R.R.Mourant,Comparison of simulator sickness using static and dynamic walking simulators,In: Proceedings of the human factors and ergonomics society, Santa Monica,2001.
[10] S.Sharples,S.Cobb,A.Moody,and J.R.Wilson,Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems,Displays 29(2),pp.58-69,2008.
[11] Y.C.Chen,X.Dong,J.Hagstrom,T.A.Stoffregen,Control of a virtual ambulation influences body movement and motion sickness,In: BIO web of conferences the international conference skills,1,2011.
[12] 中山洋輔, 青山一真, 北尾太嗣, 齋藤真里, 長田浩二, 山岸和子, 安藤英由樹, 前庭電気刺激が VR 酔いに与える効果の検討, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会,2018.
[13] J.Lee,M.Kim,and J.Kim,A Study on Immersion and VR Sickness in Walking Interaction for Immersive Virtual Reality Applications,Symmetry 9, no. 5: 78,2017.
[14] S.D.Amour,J.E.Bos, and B.Keshavarz ,The efficacy of airflow and seat vibration on reducing visually induced motion sickness,Exp Brain Res. 235, pp.2811-2820,2017.
[15] 川島祐貴, 福田一帆, 金子寛彦, 内川恵二, 異なった速さをもつ 2 種類のオブティカルフローにより生起するベクションの速さ評価, 視覚の科学,33(4),pp.152-163,2012.
[16] 笹山琴由, 五味田啓, 加藤嘉明, 城和貴, 仮想風景における VR 酔い低減のための一手法, 情報処理学会論文誌数値モデル化と応用 (TOM),14(2),pp.13-23,2020.
[17] A.Shahal,W.Hemmerich,and H.Hecht,Brightness and contrast do not affect visually induced motion sickness in a passively-flown fixed-base flight simulator,Displays 44,pp.5-14,2016.
[18] HMD Geometry Database
<https://risa2000.github.io/hmdgdb/> (2022 年 1 月 18 日閲覧)
[19] R.S.Kennedy,N.E.Lane,and K.S.Berbaum,and M.G.Lilienthal,Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness,The International Journal of Aviation Psychology,3(3),pp.203-220,1993.
[20] N.A.Webb and M.J.Griffin,Optokinetic stimuli: motion sickness, visual acuity, and eye movements,Aviation,Space,and Environmental Medicine,73(4),pp.351-358,2002.

(xxxx 年 xx 月 xx 日受付)