情報処理学会論文誌　数理モデル化と応用　Vol.14　No.2　13–23 (Mar. 2021)

仮想風景におけるVR酔い低減のための一手法

笹山 琴由[1,2,a)]　五味田 啓[2]　加藤 嘉明[2]　城 和貴[1]

受付日 2020年6月29日，再受付日 2020年10月26日，
採録日 2020年12月21日

概要：Virtual Reality（VR）酔いの原因の1つは，状況によっては視覚誘導性自己運動知覚（ベクション）を誘導するような感覚矛盾が生じることであると考えられている．多くの先行研究において，ベクションが低減したとき，VR酔いが低減することが確認されている．そこで，ベクションを低減するために，VR酔いを誘発する仮想風景に対し，仮想風景とは反対方向に動くランダムドットを表示する方法を提案する．被験者実験でSimulator Sickness Questionnaireを計測した結果，提案手法がない場合と比較して，VR酔い低減に有意傾向があることが分かった．

キーワード：VR酔い，ベクション，Simulator Sickness Questionnaire

A Method for Reducing VR Sickness in Virtual Landscapes

Kotoyu Sasayama[1,2,a)]　Kei Gomita[2]　Yoshiaki Kato[2]　Kazuki Joe[1]

Received: June 29, 2020, Revised: October 26, 2020,
Accepted: December 21, 2020

Abstract: It is thought that one of the causes of VR sickness is a sensory contradiction that induces vection in some situations. As an empirical phenomenon, it has been repeatedly observed that VR sickness decreases when vection intensity decreases. In order to decrease the vection intensity, we propose a method to display random dots that move in the opposite direction with the movement of the virtual landscape that induces VR sickness. As a result of measuring the Simulator Sickness Questionnaire, SSQ Total Score approached significance ($p < 0.1$).

Keywords: virtual reality sickness (VR sickness), vection, simulator sickness questionnaire

1. はじめに

風景の中を移動するVirtual Reality（VR）映像を見るとき，あたかも自分が動いているかのような感覚が得られる．たとえば，Universal Studios JapanのアトラクションHarry Potter and the Forbidden Journey™では，ホグワーツ城周辺の上空を飛び回る感覚が得られる．これは，ベクション（視覚誘導性自己運動知覚）と呼ばれる知覚現象であり，視覚系が運動情報を伝え，視覚系以外の感覚系が静止情報を伝える環境において，視覚系の運動情報のもとになる視覚刺激の移動方向とは反対方向の自己運動を知覚することが知られている [1]．一方，VR映像を見るとき，VR酔いという，めまい，吐き気，ふらつきなどの乗り物酔いに似た不快な症状が生じることがある [2], [3]．VR酔いの発生メカニズムの1つとされる感覚矛盾説 [4] によると，VR酔いは，視覚系，前庭系，自己受容感覚器によって伝達される運動信号が相互に不一致であり，過去の空間の環境との相互作用に基づいて期待されるものとも不一致であるために生じると説明される．そのため，VR酔いを軽減する方法の1つは，視覚系，前庭系，自己受容感覚器によって伝達される運動信号を一致させ，過去の経験からの予測に近づけることで感覚矛盾を軽減することである．視覚系が運動情報を伝え，視覚系以外の感覚系が静止情報を伝えている環境で，感覚矛盾を軽減するには，物理的な加速度を付加する方法と，ベクションを低減する方法があ

1　国立大学法人奈良女子大学
Nara Women's University, Nara 630–8506, Japan
2　三菱電機株式会社情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Co., Kamakura, Kanagawa 247–8501, Japan
a)　Sasayama.Kotoyu@cb.MitsubishiElectric.co.jp

る．前者は加速度を付加する高価な装置が必要である．本稿では後者の方法で感覚矛盾を減らすことを考える．

これまで, ベクションを減らす方法 [5], [6], [7], [8], [9], [10] は多数提案されている．たとえば，Keshavarz らの研究 [10] では，17 インチの TFT 液晶モニタ上に，表示領域を中央と周辺の 2 つに分けて白黒の縦縞を左右反対方向に移動させると，同方向に移動させるよりも，ベクションと VIMS（2.1 節に後述）は統計的に有意ではないが低減した．本稿では，反対方向に動く 2 つの視覚刺激が Head Mounted Display（HMD）を用いた VR 環境のベクション低減にも効果的であると仮定し，VR 酔い低減効果の有無を検証する目的で，仮想風景から回転ベクションが生じるときに，仮想風景とは反対方向に動く 3 次元のランダムドット [11], [12] を表示し，実験を行った．ランダムドットは，多くのベクションに関する視覚実験で用いられてきた視覚刺激の代表例である．以降，仮想風景とは反対方向に動く視覚刺激を制御刺激と呼ぶ．また，提案手法の効果検証として，VR 酔いの計測には，主観評価アンケートである SSQ（Simulator Sickness Questionnaire）[13] と立位時の体の揺れ（重心動揺）を用いる．

本稿の流れは以下のとおりである．2 章では，関連研究として，VR 酔いの発生メカニズムと VR 酔い低減方法，ベクション低減方法についてまとめる．3 章では，酔いの発生原因となる仮想風景の動きと，制御刺激の動きを，一般式で定義する．4 章では，実験に用いたパラメータと実験内容について記載する．5 章では，実験結果と結果についての考察を行い，最後 6 章でまとめとする．

2. 関連研究

2.1 節では，VR 酔いの発生メカニズムと，発生メカニズムに基づく VR 酔い低減方法についての研究を記す．また，2.2 節では，VR 酔い低減方法の 1 つであるベクションの低減方法について記す．

2.1　VR 酔い低減手法

液晶ディスプレイなどの空間に固定された映像表示面を見たときに発症する酔いの症状である Visually Induced Motion Sickness（VIMS）の研究は，VR 酔いとの類似点が多く，知見を相互に活用できる．

VIMS の発生メカニズムはまだ完全には解明されていないが，有力な 3 つの説がある．それは，各感覚系の運動信号が過去の経験から予測されるものと不一致であることが原因だとする感覚矛盾説 [4]，体の揺れにより姿勢の安定性を制御する能力を失うことが原因だとする姿勢不安定説 [14]，視運動性眼振（OKN：optokinetic nystagmus）が迷走神経を支配することが原因だとする眼球運動説 [15] である．これらの説は必ずしも排他的ではなく，実験環境に応じてお互いの説を補完しあうとともに，共存することもある [16]．VIMS の低減方法は，これまでさまざまな方法が提案されている．

1 つめは，加速度発生のタイミングが不明な状況において，映像の動きや変化を予感させる予測情報を提示することで酔いを軽減する方法 [17], [18] である．この方法は，視覚刺激から行った動きの予測が外れることで生じる感覚矛盾を減らすため，予測プロセスを補足する情報を事前に提供して VIMS を低減させるという考え方である．たとえば，予測情報は飛行機 [17] や三角錐 [18] などの形状で表現される．

2 つめは，注視点による酔い低減効果である．注視点となるオブジェクトを追加すると，VIMS の原因となる OKN が減る [19]．これは，眼球運動説に基づく考え方である．

3 つめは，ベクションの変化による酔い低減効果である．これは，感覚矛盾説や姿勢不安定説に基づく考え方である．ベクションの発生は，VIMS 発生の前提条件ではないが，ベクションが発生した後で VIMS が発生する確率が高く，両者には密接な関係があると考えられている [16]．ベクションの強度と VIMS の強度の関係については，正の相関があるという研究 [11] があるが，VIMS 低減に有意差がなくベクションが低減した研究 [12]，ベクションに変化がなくて VIMS が減少した研究 [20] もある．正の相関が実証された研究について，Palmisano らの研究 [11] では，等速前進をシミュレートするランダムドットに対して垂直方向に振動する揺れ（1.8 Hz，3.7 Hz，7.4 Hz）をそれぞれ付加したところ，VIMS もベクションも増加した．また，Diels らの研究 [12] では，ランダムドットを単軸で回転させたときと複数軸で同時回転させたときで比較した結果，複数軸での回転の方がベクション強度は低減し，VIMS には有意差があるとはいえなかった．ベクションに変化がなく VIMS が減少した報告としては，Prothero ら [20] が，グリッド状の静止したフレームを追加表示した研究がある．また，特に注視点を追加表示してベクションを計測すると，ベクションは低下または上昇するが，OKN と VIMS の両方が低下する [21], [22], [23] ことが判明している．これは注視点の表示有無が，ベクションではなく，主に OKN に影響を与えたためだと考えられている．

2.2　ベクション低減手法

ベクションは，提示映像に関する要因，映像観視時の環境に関する要因，観察者に関する要因で，変化する．ベクションを変化させた先行研究を記す．

提示映像に関しては，自己の移動を裏付ける情報であるほどベクションが増加する [5], [6]．Riecke らの研究 [5] では，ベクション誘発刺激である町並みの風景画像を矩形に区切ってシャッフルし，シャッフルの目を細かくするほど，つまり，意味を理解できなくなるほどベクションは低減した．Ogawa らの研究 [6] では，自ら落下しうる有意味の刺

激（葉っぱ，花びら，羽）と，これらに対応する「輝度，色度，サイズ（外接矩形）が同じ，無意味な単純形状の刺激」を下方向に移動させると，有意味の刺激でベクションが低減した．

映像観視時の環境に関して，Brandt らの研究 [7] では，視野内でベクションを誘発する視覚刺激の占める面積が小さいとベクションが低減した．

観察者に関しては，ベクションを誘発する視覚刺激が注意対象である場合 [8]，注視点を中央から動かさない場合 [9] にベクションが低減する．千川らの研究 [8] では，視覚対象に注意を向ける群よりも自己の身体運動に注意を向ける群でベクションが低減した．Palmisano らの研究 [9] では，注視点を中央から動かさない方が注視点を周辺位置に動かした場合よりもベクションが低減した．

3. 提案方法

仮想風景の動きと，制御刺激の動きについて，それぞれの実現方法を説明する．なお，2 つの視覚刺激を反対方向に動かすという Keshavarz の研究 [10] では，視野中心に近いエリアとそれ以外のエリアに分け，それぞれの領域にヨー回転で左右反対方向に動く白黒ストライプを表示している．しかし，Keshavarz 自身も述べているが，近年，ベクションの知覚は，視覚刺激の偏心角とはあまり関係がないといわれている．そのため，本提案では，2 つの視覚刺激の表示エリアを分離しない．

仮想風景は，実世界の風景を模擬して CG で作成した VR 空間内を，VR 空間内のユーザ視点の位置姿勢（仮想カメラ）から撮影して生成し，仮想カメラの動きで仮想風景の動きを制御する．つまり，ユーザから見る仮想風景の動きは，仮想カメラの動きとは逆の動きとなる．仮想風景の回転運動が原因で VR 酔いを発症する一例としては，VR 空間内の車に乗って蛇行する道を走行するケースが考えられ，本研究ではこれに近い環境を生成する．仮想カメラは，ヨー回転（時計回り，反時計回り）を繰り返す決められた経路を進み，高さは固定とする．この実現には，直線，円弧（時計回り），直線，円弧（反時計回り）…を繰り返すものが考えられるが，同じ形状のカーブを繰り返すという目的は正弦曲線で簡単に実現できる．そのため，仮想カメラの軌跡は正弦曲線とする．また，感覚矛盾説 [4] では加減速も VR 酔いの原因になる．酔いを増長させるため，加減速を繰り返す映像とする．これは，波動の進む軸上の等速運動で実現できる．つまり，正弦曲線上を進む仮想カメラから見ると，加減速を繰り返しながら進む動きとなる．

制御刺激では，立方体の中に複数の 3 次元の球体をランダムに配置し，その立方体の中心を基準として位置や方向を制御する．立方体は複数個用意して，正弦曲線上に一列で配置し，正弦曲線上を移動させる．制御刺激用の正弦曲線の軌跡は仮想カメラ用の正弦曲線と同じでもよく，平行

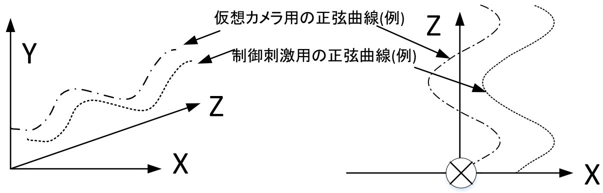


図 1　仮想カメラと制御刺激の動き基準となる正弦曲線例
Fig. 1　Examples of virtual camera and control stimulus trajectory.

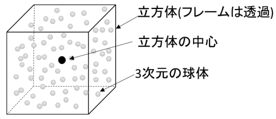


図 2　制御刺激
Fig. 2　Control stimulus.

移動させたものでもよい．仮想空間（軸の単位はメートル）内で，仮想カメラと制御刺激の動きの基準となる正弦曲線の例を**図 1**，制御刺激の模式図を**図 2** に示す．

3.1 仮想風景の動き

開始からの経過時間 t に対する仮想カメラの座標 P_c を式 (1)，(2)，(3) に示す．回転は Yaw のみで，$F_c(z_{c,t})$ の接線方向を向くよう回転させる．

$$P_c := (x_{c,t}, y_{co}, z_{c,t}) \tag{1}$$

$$x_{c,t} := F_c(z_{c,t}) = A_c \sin\left(2\pi \frac{z_{c,t}}{z_{cp}}\right) \tag{2}$$

$$z_{c,t} := v_{cz} t \tag{3}$$

A_c…振幅（m）

y_{co}…高さ（m）

z_{cp}…Z 軸方向の 1 周期の長さ（m）

v_{cz}…Z 軸方向の移動速度（m/秒）

t…開始からの経過時間（秒）

3.2 制御刺激の動き

制御刺激の動きは，立方体の中心の動きで制御する．立方体は，制御刺激用の正弦曲線上に一列で配置され，以下に述べる 3 つの規則を満たしながら動く．

① 制御刺激は，仮想カメラの回転方向と同一，かつ，仮想カメラよりも高速で動かす．
② 制御刺激を仮想カメラに近づけすぎない．
③ 「仮想カメラに最も近い曲がり角」の周辺にのみ制御刺激を表示する．

①について説明する．回転方向とは，時計回りまたは反時計回りを表す．たとえば，仮想カメラが時計回りに回転するとき，VR 映像を観視する人には仮想風景が反時計回りに回転するように見える．仮想風景と制御刺激が反対方

向に動くように見せるために，制御刺激を仮想カメラよりも高速で，仮想カメラと同方向，つまり時計回りに回転させる．

②について説明する．予備実験で仮想カメラと制御刺激の距離が近い場合，制御刺激との衝突感が原因で酔いが増すという意見が得られた．衝突感により発生する酔いは今回の検証対象外である．そのため，仮想カメラと制御刺激は衝突感を感じない程度に距離をとる．本稿では，+Z 軸方向を前方，X 軸方向を横方向と表現するとき，仮想カメラ前方に距離をとりつつ前方に制御刺激を表示する方法（前方向制御刺激）と，仮想カメラ横方向に距離をとりつつ横方向に制御刺激を表示する方法（横方向制御刺激）の 2 通りのコンテンツを作成する．制御刺激を前方向または横方向に配置したのは，制御刺激は仮想風景と反対方向に動かすため，高さ一定で左右に Yaw 回転しながら前進するという仮想風景の動きに合わせたためである．前方向制御刺激では，仮想カメラ用と制御刺激用の正弦曲線を同一とする．横方向制御刺激では，仮想カメラ用の正弦曲線を X 軸方向に平行移動したものを制御刺激用の正弦曲線とする．横方向制御刺激では，仮想カメラの視野を考慮して，反時計回りの回転時には X 軸正の方向，時計回りの回転時には X 軸負の方向に，それぞれ仮想カメラ用の正弦曲線を平行移動して制御刺激用の正弦曲線を生成する．

③について説明する．仮想カメラと制御刺激は，いずれも時計回り，反時計回りを繰り返しながら移動する．ここで，①のとおり制御刺激は仮想カメラよりも高速なため，仮想カメラよりも前方にある制御刺激は，時間が経つにつれて仮想カメラから遠ざかる．ここで，仮想カメラが時計回りに回転中に，仮想カメラから遠ざかった制御刺激が反時計回りに回転中の場合，仮想風景と制御刺激を反対方向に動かすという目的を果たせなくなる．そのため，仮想カメラに最も近い曲がり角の周辺にのみ制御刺激を表示する．

制御刺激の動きを**図 3** を用いて説明する．文中の記号の説明は**表 1** を参照．前方向制御刺激では，$z_{sb} \neq 0$ かつ $p = 0$，横方向制御刺激では $z_{sb} = 0$ かつ $p \neq 0$ である．なお，距離をとるという目的は $z_{sb} \neq 0$ かつ $p \neq 0$ とすることでも可能であるため，その場合の例で説明する．また，図 3 は，n が偶数のとき，つまり，仮想カメラに最も近い曲がり角を曲がるときに反時計回りであることを表している．仮想カメラが $p1$ から $p2$ に移動する間，立方体の中心は Z 軸で間隔 d を保ちつつ，$p3$ から $p4$ の範囲を 1 方向に繰り返し移動する．図 3 では，立方体中心の個数（候補含む）は合計 5 個（$i = 0, 1, 2, 3, 4$）である．仮想カメラが $p1$ にいるときは，立方体中心の $i = 0$ が $p3$ にいる．仮想カメラの速度 v_{cz} よりも，立方体の速度 v_{sz} の方が速いため，5 つの立方体のうち一番早く $p4$ に到達した立方体 $i = 4$ は，$p3$ に戻り，再び正弦曲線上を移動する．また，複数の立方体中心の候補のうち，条件を満たした立方体内の制御刺激のみが表示される．図 3 では立方体中心候補は 5 つあるが，表示条件を満たすのは仮想カメラ位置 $z_{c,t}$ を基準に z_{sb} 離れたところから z_{se} 離れたところに存在するものだけなので，$i = 0$ と $i = 1$ の立方体内の制御刺激が表示され，それ以外は非表示となる．仮想カメラが $p2$ に到達すると，次の時計回りの曲がり角周辺にのみ立方体中心が配置される．なお，z_{sb} は予備実験にて制御刺激と衝突感を感じない程度の距離として設定する．z_{se} は予備実験にて制御刺激が遠くなりすぎない距離として設定する．

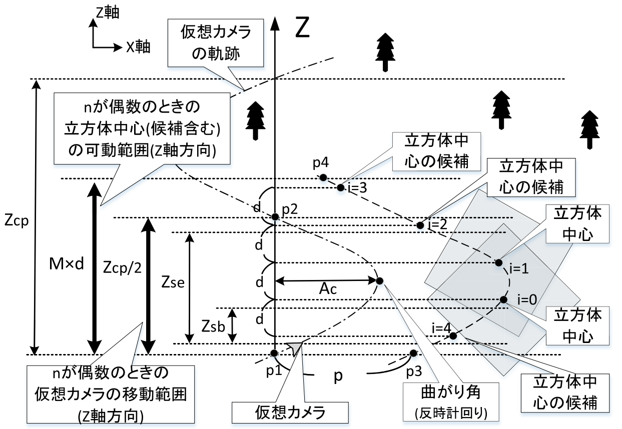


図 3　制御刺激の動き（n が偶数，$M = 5$ のときの例）
Fig. 3　Movement of the control stimulus.

表 1　制御刺激の動きの説明で使用する記号
Table 1　Parameters of the control stimulus.

記号	説明
x_{so}	X 軸方向のオフセット(m)
p	X 軸方向のオフセットの絶対値(m)
y_{so}	Y 軸方向のオフセット(m)
v_{sz}	Z 軸方向の移動速度(m/秒)
t	開始からの経過時間(秒)
t_{s0}	立方体中心位置決め基準時刻の，開始からの経過時間(秒)
z_{sb}	Z 座標での仮想カメラと制御刺激の最小距離(m)
z_{se}	Z 座標での仮想カメラと制御刺激の最大距離(m)
d	Z 座標での立方体中心の配置間隔(m)
M	立方体中心の個数(候補含む)(個)

開始からの経過時間 t に対する立方体の中心座標 P_s を，式 (4)，(5)，(6)，(7) で定義する．$\mathbb{Z}$ は整数全体の集合，%は剰余，ceil は切り上げを表す．立方体 i は，$F_s(z_{s,t,i})$ の接線方向を向くよう回転させる．

$\frac{z_{cp}}{2v_{cz}}n \le t < \frac{z_{cp}}{2v_{cz}}(n+1)$，$\{0 \le n,\ n \in \mathbb{Z}\}$ のとき $t_{s0} = \frac{z_{cp}}{2v_{cz}}n$，$M = \mathrm{ceil}\left(\frac{z_{cp}}{2d}\right)$ とすると，

$$P_s := \left\{ (x_{s,t,i}, y_s, z_{s,t,i}) \;\middle|\; \begin{array}{c} x_{s,t,i} \in X_{s,t}, \\ y_s = y_{co} + y_{so}, \\ z_{s,t,i} \in Z_{s,t}, \\ 0 \le i < M,\ i \in \mathbb{Z} \end{array} \right\} \tag{4}$$

$$X_{s,t} := \left\{ x_{s,t,i} \,\middle|\, \begin{aligned} x_{s,t,i} &= F_s(z_{s,t,i}) \\ &= A_c \sin\left(2\pi \frac{z_{s,t,i}}{z_{cp}}\right) + x_{so} \\ &0 \le i < M,\, i \in \mathbb{Z} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

$$Z_{s,t} := \left\{ z_{s,t,i} \,\middle|\, \begin{aligned} z_{s,t,i} &= \frac{1}{2} z_{cp} n \\ &\quad + (di + (t - t_{s0})v_{sz})\%(dM) \\ z_{c,t} + z_{sb} &\le z_{s,t,i} < \tfrac{1}{2} z_{cp}(n+1) \\ z_{c,t} + z_{sb} &\le z_{s,t,i} < z_{c,t} + z_{se} \\ &0 \le i < M,\, i \in \mathbb{Z} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

$0 \le p$ とすると，

$$x_{so} := \begin{cases} p, & n = \{2k \mid 0 \le k,\, k \in \mathbb{Z}\} \\ -p, & n = \{2k+1 \mid 0 \le k,\, k \in \mathbb{Z}\} \end{cases} \tag{7}$$

4. 実験

4.1 実験装置

表示コンテンツは SteamVR，Unity2018.2.7f1 を用いて作成し，PC（Windows10，GeForceGTX1080）上で実行し，VIVE Pro（HTC 社製）に視野角 110°，立体視，60 Hz で表示する．なお，VIVE Pro のカタログ値は 90 Hz だが，レンダリング処理の重さが原因でリフレッシュレートが低下していたため，60 Hz に固定する．また，重心動揺計には，バランス Wii ボード（任天堂社製）を用いる．バランス Wii ボードは Bluetooth で PC と接続し，PC では，WiimoteLib [24] を用いて重心位置を 100 Hz で取得する．バランス Wii ボードは，高価な重心動揺計と同等に高精度であるとされる [25]．システム構成を図 **4**，実験風景を図 **5** に記す．

4.2 手続き

1 回の実験の手続きについて記載する．被験者は SSQ に回答した後，重心動揺計に裸足で乗り，両踵を接触して内側を 30 度開いた足位（Kapteyn 案 [26]）で自然な立位体勢のまま，ヘッドマウントディスプレイを装着して 1 分間の静止画，10 分間の動画を連続で観視する．動画観視中には，重心動揺を測定する．映像観視後に，SSQ に回答して終了とする．実験の流れを図 **6** に示す．静止画観視には，正面の球体（4.3 節参照）を注視させることで，姿勢を安定させる役割を持たせている．動画観視中の注視位置は指定せず，被験者の自由とする．動画観視の時間は，仮想環境にて被験者の 80%が最初の 10 分間で酔いを発症したという先行研究 [27] を参考に，10 分間に設定する．さらに，動画観視中は，外部の音を遮断するため，ヘッドホンからホワイトノイズを流す．

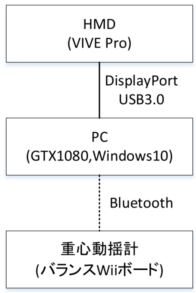


図 **4**　システム構成
Fig. 4　System configuration.

図 **5**　実験風景
Fig. 5　Experimental scene.

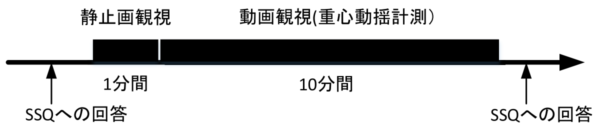


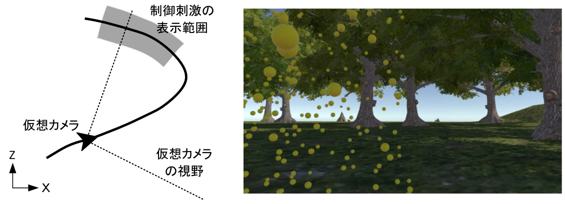
図 **6**　1 回の実験の流れ
Fig. 6　Experimental procedure.

図 **7**　静止画
Fig. 7　Scene with the gaze target before the virtual camera starts moving.

4.3 視覚刺激

仮想風景は，森の中をイメージして作成する．静止画では，図 **7** のように，仮想風景とともに被験者の正面に注視点となるオブジェクトを 1 つ表示する．このオブジェクトは直径 0.5 m の不透過の球体で，中心は $(x, y, z) = (2\,\mathrm{m}, 1\,\mathrm{m}, 2\,\mathrm{m})$，$\mathrm{RGB}(255, 244, 0)$ である．動画では，仮想風景とともに制御刺激を表示する．視覚刺激は，前方向制御刺激（forward）（図 **8**），横方向制御刺激（crosswise）（図 **9**），制御刺激なし（None），の合計 3 種類作成する．

ここで，提案手法による VR 酔い低減効果を確認するためには，まずは仮想風景の動きのみで，VR 酔いを発症させる必要がある．そのため，仮想風景の動きを VR 酔いしやすい周波数帯 0.2 Hz～0.4 Hz 帯 [28] に含まれるように



(a)仮想カメラと制御刺激の位置関係　(b)被験者が観視した映像

図 8　前方向制御刺激の動き（反時計回りの回転開始時）
Fig. 8　Forward control stimulus when the virtual camera starts to rotate counterclockwise.

(a)仮想カメラと制御刺激の位置関係　(b)被験者が観視した映像

図 9　横方向制御刺激の動き（反時計回りの回転開始時）
Fig. 9　Crosswise control stimulus when the virtual camera starts to rotate counterclockwise.

設定する．仮想カメラの実験パラメータは，$A_c = 1.0\,\mathrm{m}$，$z_{cp} = 2\pi\,\mathrm{m}$，$v_{cz} = 0.4\pi\,\mathrm{m}/$秒，$y_{co} = 1.0\,\mathrm{m}$ である．

制御刺激は，あくまで風景の動きから生じるベクションを制御するためのものであり，制御刺激自体からはベクションを感じないことが望ましい．2.5 秒～3.5 秒程度の短い提示時間ではベクションを感じない [10] ため，制御刺激を表示し続ける時間は 2.5 秒以内とする．制御刺激の実験パラメータは，$v_{sz} = 0.8\pi\,\mathrm{m}/$秒，$y_{so} = 0.5\,\mathrm{m}$，立方体の 1 辺（2L とする）は 3 m，そのなかに直径 0.05 m，不透過，RGB(255, 221, 0) の球をランダムに 400 個配置する．$\alpha = \sqrt{(z_{cp}/4)^2 + {A_c}^2}\,\mathrm{m}$ のとき，$d = \frac{z_{cp}}{4ceil(\alpha/L)}\,\mathrm{m}$ である．横方向制御刺激では，$p = 3.0\,\mathrm{m}$，$z_{sb} = 0\,\mathrm{m}$，$z_{se} = \pi\,\mathrm{m}$，前方向制御刺激では $p = 0\,\mathrm{m}$，$z_{sb} = 0.6\pi\,\mathrm{m}$，$z_{se} = \pi\,\mathrm{m}$ である．制御刺激の立方体や球のサイズや個数や配置間隔は，球体が単純形状であることを把握できる大きさ，かつ，密度が高くなりすぎない値として設定した．

4.4　測定項目

制御刺激がない場合と，制御刺激がある場合について，酔い低減効果が確認できるかを，コンテンツ観視後に取得した SSQ のスコアを用いて調査する．SSQ は，Nausea（吐き気），Oculomotor（目の疲れ），Disorientation（方向感覚の喪失）のカテゴリに関する 16 項目の質問項目について，0～3 の 4 段階（0：なし，1：わずかに，2：中程度，3：はげしく）で回答するアンケートである．そして，Nausea，Oculomotor，Disorientation に属する素点の各合計に対し，それぞれ 9.54，7.58，13.92 を乗じたものが各カテゴリのスコアとなる．また，酔いを表す総合得点 TotalScore は，各「全カテゴリの重みづけ前の素点」の合計に対し，3.74 を乗じた値である．上記の係数は，すべて SSQ [13] で定義されている．

また，重心動揺の指標としては，外周面積と総軌跡長を用いる [29]．外周面積と総軌跡長は，重心動揺計の検出台上に裸足で立ったときの足圧の中心位置（重心．2 次元座標）の時系列データから算出する．まず，先行研究 [30] にならい 20 Hz で解析するため，100 Hz で取得した重心をエイリアシングエラーの抑制を目的として 10 Hz のローパスフィルタ（バターワースフィルタ）で高周波成分を除去した後，20 Hz にダウンサンプリングする．その後，動画観視した 10 分間を，1 分間隔で区切り，各区間に対して，外周面積と総軌跡長を算出する．

外周面積は，重心の軌跡の最外郭によって囲まれる面積である．各区間の重心座標の平均値を原点と定め，原点の周囲を 3 度ごとに分割した領域のうち，重心が 1 点以上存在する領域 i について原点からの距離が最大となる点 r^i_{max} をそれぞれ求め，時計回りにその点どうしを結んだ時に囲まれる領域の面積とする．重心が 1 点以上存在する領域の数を n 個とし，その領域に時計回りに $i = 0, 1, 2, \cdots, (n-1)$ と番号をつけると，外周面積は外積を用いて式 (8) で表せる．

$$\text{外周面積} = \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{n-1}|r^i_{max} \times r^{i+1}_{max}| \quad (r^0_{\mathrm{max}} = r^n_{\mathrm{max}}) \tag{8}$$

総軌跡長は，重心の単位時間あたり（$\Delta t = 1/F$，周波数 F(Hz)）の瞬間移動距離を 1 区間（T 秒）分，合計した長さである．各区間の開始時刻からの経過時間 t 秒から $t + \Delta t$ 秒の瞬間移動距離を $d^{t+\Delta t}_t$ とすると，総軌跡長は式 (9) で表せる．

$$\text{総軌跡長} = \sum_{s=0}^{T-1}\sum_{k=0}^{F-1} d^{(k+1)\times\Delta t+s}_{k\times\Delta t+s} \quad (F = 20,\ T = 60) \tag{9}$$

4.5　被験者

被験者は，これまでに光感受性発作の既往歴のない奈良女子大学に所属する 18 歳から 24 歳の女性 42 名（平均 19.5 歳，標準偏差 1.3 歳）である[*1]．年齢と性別は酔いの感受性に影響があるとされ [31], [32]，今回の実験結果の VR 酔いの大きさの要因から排除するために，20 歳前後の女性のみを被験者とする．被験者は，3 種類（制御刺激なし，前方向制御刺激，横方向制御刺激）すべてのコンテンツを観視する．順序効果を考慮し，コンテンツの観視順序 6 パターンの被験者数を揃える．また，前回の実験の影響を考慮し，次の実験までの時間は 3 日間以上設ける．

[*1] 本実験は，奈良女子大学と三菱電機株式会社の倫理審査委員会の承認を得て実施した．

5.　結果と考察

5.1　結果

当日の体調不良で 1 回以上実験に参加できなかった被験者 2 名と，実験開始前に TotalScore が 10 以上となっていた被験者 21 名はすでに何らかの生体影響が生じている可能性があることから除外した [33]．その結果，被験者 42 名のうち，SSQ の解析対象は 21 名となった．重心動揺の解析では，SSQ の解析対象者から，1 回以上機械の不調で計測漏れが発生した被験者 5 名と，1 回以上実験中に足が浮いた被験者 2 名と，1 回以上酔いがひどく自己申告により中断した被験者 6 名を除外した．中断者を除外したのは，後述する 1 分ごとの区間に対して行った検定において，各群のサンプルサイズを揃える必要があったためである．その結果，重心動揺の解析対象は 10 名となった．なお，複数の除外条件を満たす被験者がいる．

・SSQ

制御刺激がない場合に酔いが生じていたかを調べるため，制御刺激がない場合の TotalScore の実験前と実験後のスコアについて Wilcoxon の符号順位検定を行った結果，実験後のスコアが有意に高い（$p < 0.001$）ことを確認した．結果を図 **10** に記す．グラフは平均値，エラーバーは 95%信頼区間を示す．図 **11**，図 **12**，図 **13**，図 **14**，図 **15** においても同様である．

また，制御刺激がある場合の実験後に生じた VR 酔いの低減効果について調べるため，実験後の各スコアについて，制御刺激なしと前方向制御刺激，制御刺激なしと横方向制御刺激に対して，それぞれ Wilcoxon の符号順位検定を実施した．その結果，制御刺激なしと比較して，TotalScore，Nausea，Oculomotor において，制御刺激がある場合にスコアが有意に低くなった（$p < 0.05$）．しかし，Disorientation では，横方向制御刺激でのみスコアが有意に低くなった（$p < 0.05$）．ただし，前方向制御刺激においても，スコアが低い傾向があった（$p \fallingdotseq 0.12$）．結果を図 11 に示す．

・重心動揺

動画観視 10 分の間に計測した重心の時系列データを 60 秒の区間に区切り，外周面積と総軌跡長を求めた．そして，区間ごとに制御刺激なしと前方向制御刺激，制御刺激なしと横方向制御刺激に対して，それぞれ Wilcoxon の符号順位検定を行った．その結果，制御刺激なしの場合と比較して，外周面積では，前方向制御刺激で 180〜240 秒，360〜420 秒，540〜600 秒の区間でのみ有意に値が低くなった（$p < 0.05$）．横方向制御刺激で，300〜360 秒，480〜540 秒の区間でのみ有意に値が低くなった（$p < 0.05$）．結果を図 12 に示す．また，総軌跡長においても同様に，Wilcoxon の符号順位検定を行ったが，制御刺激なしに対して有意差があるとはいえなかった（$p > 0.05$）．結果を図 13 に示す．

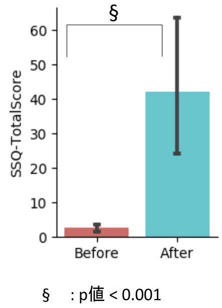


図 **10**　実験前後の主観評価（TotalScore）

Fig. 10　SSQ Total Score before and after the experiment.

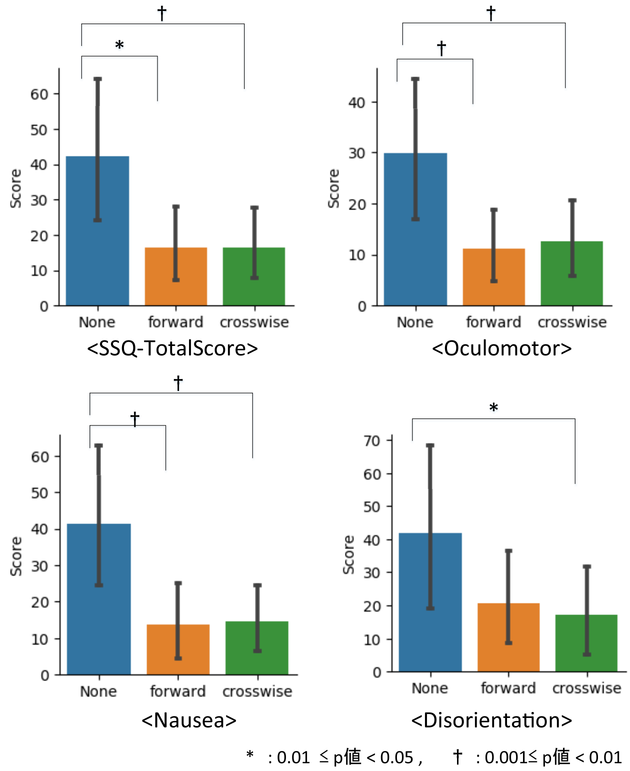


図 **11**　実験終了後の主観評価結果

Fig. 11　SSQ Total Score and SSQ subscores after the experiment.

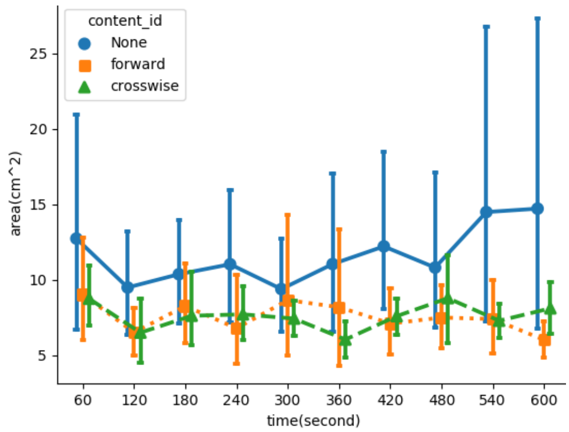


図 **12**　重心動揺（60 秒間ごとの外周面積）

Fig. 12　Area of center of gravity every 60 seconds.

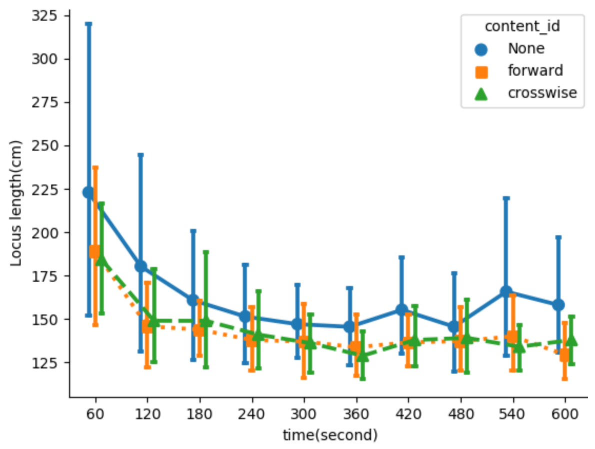


図 13　重心動揺（60 秒間ごとの総軌跡長）

Fig. 13　Total trajectory length of center of gravity every 60 seconds.

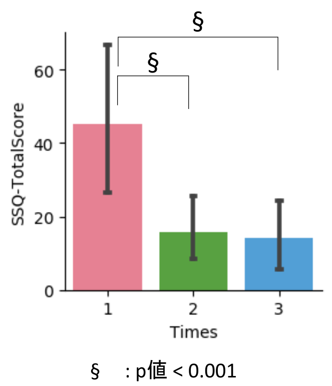


図 14　観視回数ごとの主観評価結果

Fig. 14　SSQ Total Score for each number of views after the experiment.

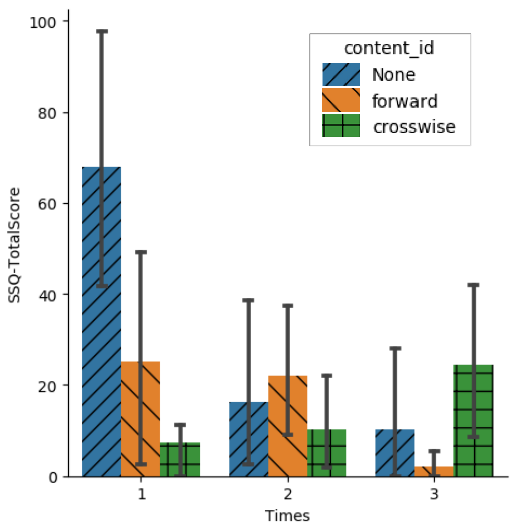


図 15　観視回数と制御刺激種類別の VR 酔い

Fig. 15　SSQ Total Score categorized by number of views and stimulus type.

5.2　考察

実験の前提として，実験に用いた仮想風景から VR 酔いが生じたか，制御刺激自体からはベクションを感じなかったかを確認する．その後，本実験の仮説が正しかったか，つまり，制御刺激によって，仮想風景から生じる VR 酔いを低減することができたのかについて確認する．また，5.1 節に記載のとおり，基準を満たす対象者を解析から除外したことにより，順序効果が生じている可能性がある．そのため，観視回数ごとの VR 酔いについて考察する．

5.2.1　実験の前提の確認

VR 酔いの指標である SSQ の TotalScore において，図 10 に示すとおり，制御刺激がない場合に，実験前と比較して実験後にスコアが上昇し，想定どおり VR 酔いを発症できていることが分かった．

制御刺激自体からベクションを感じたか否かについて確認する．もし制御刺激自体からベクションを感じてしまった場合，後退感が得られたはずであるが，実験後の被験者に対するヒアリングでは，全員が前進感を訴え，後退感を訴えた人はいなかった．さらに，一部の被験者からは，球があるときはないときと比較して曲がり方がゆっくりだと感じたという意見が得られており，制御刺激の表示可否にかかわらず，想定どおり仮想風景のみからベクションを感じていることが分かった．

5.2.2　酔いの低減が生じたかについての確認

VR 酔いの低減効果があったかについて，SSQ と重心動揺で確認する．前方向制御刺激と横方向制御刺激のどちらかがある場合は，制御刺激がない場合と比較して，TotalScore が有意に低くなったことから，これらの 2 つの制御刺激は，VR 酔いの抑止に効果があったと考えられる．なお，Kennedy らの研究 [34] では，シミュレータ使用時に問題があると見なされるレベルは TotalScore が 20 程度だとされている．その観点からは，制御刺激があった場合には，酔いのレベルが問題ない程度に減少したといえる．

一方，姿勢不安定説 [14] に基づくと，重心動揺の外周面積と総面積軌跡長では，値が小さい程，VR 酔いの程度が小さいと考えられる．外周面積，総軌跡長は，図 12，図 13 に示すとおり，制御刺激がない場合と比較して，前方向制御刺激，横方向制御刺激ともに，全区間をとおして平均値自体には差がある傾向が見られたが，外周面積では統計的に有意差があるとはいえない区間が多く，総軌跡長では統計的な有意差がある区間はなく，個人差が大きいことが分かった．ここで，重心動揺とベクションには共通の神経メカニズムがあり [35]，正の相関を示す [36] と考えられている．外周面積で有意差が認められた区間については，制御刺激によりベクションが低減した可能性がある．しかし，従来，ベクション自体の計測には，潜時，持続時間，マグニチュードという指標を用いることが多い [37] が，本稿ではこれらを測定していない．そのため，制御刺激によるベクション低減効果に関しては議論できない．今後は，ベクション自体を測定し，詳細を調査する必要がある．なお，重心動揺は，実験開始直後に値が大きくなっているが，映

像観視開始直後 90 秒間はベクションの影響とは異なる体の動きが生じている [30] とされるため，実験直後のベクションが大きかったというわけではない．

また，ベクションは VR 酔い発生の前提条件ではない [16] ことから，VR 酔いの低減は，ベクション以外に起因している可能性がある．以下，2 つの可能性について考察する．

1 つめは，制御刺激が脳内の動きの予測プロセスを向上させた可能性である．仮想風景は周期的な動きをしているため，被験者は曲がる方向やそのタイミングをある程度予測しやすかったと考えられる．しかし，回転時における制御刺激の表示，非表示の切り替えタイミングや表示位置は同じであったため，制御刺激が回転開始，終了タイミングや回転角度や加速度変化の目安となり，予測精度を向上させた可能性がある．この可能性については，今後，被験者が仮想風景の動きを予測できないようにランダムに設定して実験することで確認できる．

2 つめは，制御刺激が注視点となる，あるいは，視線誘導を引き起こし，OKN が低減した可能性である．今回は視線を計測しておらず，被験者がどのタイミングでどの位置を見ていたかは不明である．しかし，実験後に，制御刺激がある場合の注視位置についてヒアリングしたところ，(1) 球を追いかけていた，(2) 球に追いつかれないように球よりも速く視線を動かしていた，(3) 球を避けて見ていた，(4) 全体をぼんやり見ていた，(5) 酔いにくい場所を探していた，の 5 つに分類できることが分かった．このうち，(1)，(2)，(3) では，球の位置に注視点位置が影響を受けていたと考えることができる．特定対象への視線の維持は VR 酔い低減に効果がある [38] といわれている．一方，球がない場合は，どこを見ていいか分からずキョロキョロしていたというコメントが得られている．今後は視線と OKN を測定し，詳細を確認する必要がある．

5.2.3　実験結果の順序効果について

VR 酔いは，慣れによって減少する [39]．5.1 節記載の基準に従い，一部の被験者を解析から除外したことにより，VR 酔いに順序効果が生じている可能性がある．はじめに，観視回数が増えることで VR 酔いが減少しているかについて確認し，その後，観視回数を揃えて被験者間検定を行うことで順序効果を排除したコンテンツと VR 酔いの関係について確認する．

観視回数が 1 回目，2 回目，3 回目の各 TotalScore について，Wilcoxon の符号順位検定（Bonferroni 補正）を行った．その結果，図 14 に示すとおり，1 回目と 2 回目（補正 $p < 0.001$），1 回目と 3 回目（補正 $p < 0.001$）で有意差が認められた．つまり，2 回目以降は酔いが低減し，先行研究 [39] を支持する結果となった．実験で使用した VR 映像は周期的な動きであったため，被験者にとって慣れやすい環境であったといえる．

観視回数と観視映像の種類別人数を**表 2**，TotalScore を図 15 に示す．1 回目に制御刺激なしを見た人は 11 人となり，人数が多い．これが原因で，制御刺激なしの VR 酔いスコアが大きくなった可能性がある．つまり，有意差が認められたのは，制御刺激の有無ではなく，観視回数に起因する可能性がある．そこで，観視回数が同じ場合の TotalScore について，制御刺激なしと前方向制御刺激，制御刺激なしと横方向制御刺激に対して，それぞれ Wilcoxon の順位和検定を行う．たとえば，2 回目に制御刺激なしを見た人と 2 回目に前方向制御刺激を見た人の TotalScore について，Wilcoxon の順位和検定を行う．その結果，どの組合せでも，有意に差があるとはいえなかった（$p > 0.05$）．ただし，1 回目に前方向制御刺激を見た人は 1 回目に制御刺激なしを見た人に対して TotalScore が有意に低い傾向があった（$p < 0.1$）．また，1 回目に横方向制御刺激を見た人は 1 回目に制御刺激なしを見た人に対して TotalScore が有意に低い傾向があった（$p < 0.1$）．また，2 回目以降は TotalScore20 程度以下で観視コンテンツによらず問題ない程度の酔いレベルとなっている [13]，問題があるレベルであったのは初回の制御刺激がない場合のみである．そのため，制御刺激は初見時に VR 酔い低減効果がある可能性が高い．

表 2　観視回数ごとのコンテンツ観視人数
Table 2　Breakdown of subjects.

観視回数 ＼ コンテンツ	1 回目	2 回目	3 回目	合計
制御刺激無し	11 人	6 人	4 人	21 人
前方向制御刺激	7 人	7 人	7 人	21 人
横方向制御刺激	3 人	8 人	10 人	21 人

6.　おわりに

仮想風景から生じる VR 酔いの低減を目的とし，VR 酔いの一因とされるベクションについて，低減のための 1 手法を提案した．具体的には，正弦波状に動く仮想風景から回転方向のベクションが生じるときに，仮想風景の動きとは反対方向に動く 3 次元ランダムドット（制御刺激）を付加表示する手法を提案した．制御刺激がないコンテンツと，制御刺激があるコンテンツを被験者に観視させ，主観評価アンケート SSQ と重心動揺を計測することにより，VR 酔いの低減可否を確認した．制御刺激は，仮想カメラの動きに合わせて，被験者の視点と制御刺激の距離を，前方向にずらした前方向制御刺激と，横方向にずらした横方向制御刺激の 2 パターンを作成し，それぞれを制御刺激がない場合と比較した．その結果，以下に示す知見が得られた．

(1) SSQ の TotalScore では，前方向制御刺激や横方向制御刺激がある場合は，制御刺激がない場合と比較して，1 回目の試行で有意に低い傾向（$p < 0.1$）がある．
(2) 重心動揺の外周面積と総軌跡長では，前方向制御刺激

や横方向制御刺激がある場合は，制御刺激がない場合と比較して，実験参加者の平均値自体には条件間に差があるものの，統計的な有意差がある区間は少なく，個人差が大きい．

以上により，HMD を用いた VR 環境において，酔いを誘発する仮想風景とは反対方向に動く視覚刺激を表示することは，VR 酔い低減効果がある可能性が示された．重心動揺の結果から，制御刺激によりベクションが低減した可能性を推測することはできるが，ベクション自体の測定を行っていないため，実際にベクションが低減したか否かの確認ができていない．また，VR 酔い低減の原因は，制御刺激が予測プロセスを向上させたため，制御刺激が注視点の役割を果たしたため，など，別の要因も考えられる．そのため，さらなる検証が必要である．また，本稿では，仮想風景と制御刺激について，正弦波という特定の運動条件における VR 酔い低減について確認した．今後は他の運動条件についても検証していきたい．

謝辞　実験にご協力いただいた奈良女子大学の学生の皆様に感謝いたします．ベクションと VR 酔いの関係についての知見や，SSQ の前処理方法についてご教授くださったキヤノン IT ソリューションズ株式会社の三浦直樹氏に感謝いたします．

参考文献

[1] Palmisano, S., Allison, R.S., Schira, M.M. and Barry, R.J.: Future challenges for vection research: Definitions, functional significance, measures, and neural bases, *Frontiers in Psychology*, Vol.6, p.193 (2015).

[2] McCauley, M.E. and Sharkey, T.J.: Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environments, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol.1, No.3, pp.311–318 (1992).

[3] Keshavarz, B., Hecht, H. and Lawson, B.: Visually induced motion sickness: Characteristics, causes, and countermeasures, *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, pp.648–697 (2014).

[4] Reason, J.T.: Motion sickness adaptation: A neural mismatch model, *Journal of the Royal Society of Medicine*, Vol.71, No.11, pp.819–829 (1978).

[5] Riecke, B.E., Schulte-Pelkum, J., Avraamides, M.N., Heyde, M.V.D. and Bülthoff, H.H.: Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality, *ACM Trans. Applied Perception* (*TAP*), Vol.3, No.3, pp.194–216 (2006).

[6] Ogawa, M. and Seno, T.: Vection is modulated by the semantic meaning of stimuli and experimental instructions, *Perception*, Vol.43, No.7, pp.605–615 (2014).

[7] Brandt, T., Dichgans, J. and Koenig, E.: Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception, *Experimental Brain Research*, Vol.16, No.5, pp.476–491 (1973).

[8] 千川　隆：傾く部屋によって惹起される身体動揺への身体の操作性と注意の影響，心理学研究，Vol.69, No.4, pp.310–316 (1998).

[9] Palmisano, S. and Kim, J.: Effects of gaze on vection from jittering, oscillating, and purely radial optic flow, *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol.71, No.8, pp.1842–1853 (2009).

[10] Keshavarz, B. and Berti, S.: Integration of sensory information precedes the sensation of vection: A combined behavioral and event-related brain potential (ERP) study, *Behavioural Brain Research*, Vol.259, pp.131–136 (2014).

[11] Palmisano, S., Bonato, F., Bubka, A. and Folder, J.: Vertical display oscillation effects on forward vection and simulator sickness, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol.78, No.10, pp.951–956 (2007).

[12] Diels, C. and Howarth, P.A.: Visually induced motion sickness: Single-versus dual-axis motion, *Displays*, Vol.32, No.4, pp.175–180 (2011).

[13] Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S. and Lilienthal, M.G.: Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol.3, No.3, pp.203–220 (1993).

[14] Riccio, G.E. and Stoffregen, T.A.: An ecological theory of motion sickness and postural instability, *Ecological Psychology*, Vol.3, No.3, pp.195–240 (1991).

[15] Ebenholtz, S.M.: Motion sickness and oculomotor systems in virtual environments, *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol.1, No.3, pp.302–305 (1992).

[16] Keshavarz, B., Riecke, B.E., Hettinger, L.J. and Campos, J.L.: Vection and visually induced motion sickness: How are they related?, *Frontiers in Psychology*, Vol.6, p.472 (2015).

[17] Lin, J.J., Abi-Rached, H. and Lahav, M.: Virtual guiding avatar: An effective procedure to reduce simulator sickness in virtual environments, *Association for Computing Machinery* (2004).

[18] Watanabe, H., Teramoto, W. and Umemura, H.: Effect of predictive sign of acceleration on heart rate variability in passive translation situation: Preliminary evidence using visual and vestibular stimuli in VR environment, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, Vol.4, No.1, p.36 (2007).

[19] Webb, N.A. and Griffin, M.J.: Optokinetic stimuli: Motion sickness, visual acuity and eye movements, *Aviation, Space and Environmental Medicine*, Vol.73, No.4, pp.351–358 (2002).

[20] Prothero, J.D., Draper, M.H., Parker, D. and Wells, M.: The use of an independent visual background to reduce simulator side-effects, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol.70, No.3 Pt 1, pp.277–283 (1999).

[21] Ji, J.T., So, R.H. and Cheung, R.T.: Isolating the effects of vection and optokinetic nystagmus on optokinetic rotation-induced motion sickness, *Human Factors*, Vol.51, No.5, pp.739–751 (2009).

[22] Riecke, B.E., Schulte-Pelkum, J., Avraamides, M.N. and Bülthoff, H.H.: Enhancing the visually induced self-motion illusion (vection) under natural viewing conditions in virtual reality, *PRESENCE 2004*, UPV (2004).

[23] Becker, W., Raab, S. and Jürgens, R.: Circular vection during voluntary suppression of optokinetic reflex, *Experimental Brain Research*, Vol.144, No.4, pp.554–557 (2002).

[24] Peek, B.: WiimoteLib, available from ⟨https://github.com/BrianPeek/WiimoteLib⟩ (accessed 2020-06-29).

[25] Park, D.-S. and Lee, G.: Validity and reliability of balance assessment software using the Nintendo Wii balance

board: usability and validation, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, Vol.11, No.1, p.99 (2014).

[26] Kapteyn, T.S. et al.: Standardization in platform stabilometry being a part of posturography, *Agressologie*, Vol.24, No.7, pp.321–326 (1983).

[27] Cobb, S.V., Nichols, S., Ramsey, A. and Wilson, J.R.: Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE), *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol.8, No.2, pp.169–186 (1999).

[28] Diels, C. and Howarth, P.A.: Frequency characteristics of visually induced motion sickness, *Human Factors*, Vol.55, No.3, pp.595–604 (2013).

[29] 今岡　薫，村瀬　仁，福原美穂：重心動揺検査における健常者データの集計，Equilibrium Research，Vol.56, No.12Supplement, pp.1–84 (1997).

[30] 杉浦明弘，田中邦彦，若田部駿，松本千佳，宮尾　克：往復運動映像観視における重心動揺の時間特徴解析，日本衛生学雑誌，Vol.71, No.1, pp.19–29 (2016).

[31] Reason, J.T. and Brand, J.J.: Motion sickness, Academic Press (1975).

[32] Koslucher, F., Haaland, E., Malsch, A., Webeler, J. and Stoffregen, T.A.: Sex differences in the incidence of motion sickness induced by linear visual oscillation, *Aerospace Medicine and Human Performance*, Vol.86, No.9, pp.787–793 (2015).

[33] Balk, S.A., Bertola, M.A. and Inman, V.W.: Simulator sickness questionnaire: Twenty years later, *Driving Assessment Conference* (2013).

[34] Kennedy, R.S., Drexler, J.M., Compton, D.E., Stanney, K.M., Lanham, D.S. and Harm, D.L.: Configural Scoring of Simulator Sickness, Cybersickness and Space Adaptation Syndrome: Similarities and Differences, *Virtual and Adaptive Environments: Applications, Implications, and Human Performance Issues*, pp.247–278 (2003).

[35] Tanahashi, S., Ujike, H., Kozawa, R. and Ukai, K.: Effects of visually simulated roll motion on vection and postural stabilization, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, Vol.4, No.1, p.39 (2007).

[36] Kuno, S., Kawakita, T., Kawakami, O., Miyake, Y. and Watanabe, S.: Postural adjustment response to depth direction moving patterns produced by virtual reality graphics, *The Japanese Journal of Physiology*, Vol.49, No.5, pp.417–424 (1999).

[37] Apthorp, D. and Palmisano, S.: The role of perceived speed in vection: Does perceived speed modulate the jitter and oscillation advantages?, *PloS One*, Vol.9, No.3, p.e92260 (2014).

[38] Miura, N., Hiroyasu, U. and Ohkura, M.: Influence of fixation point movement on visually induced motion sickness suppression effect, *AHFE 2018*, Springer (2018).

[39] Regan, E.: Some evidence of adaptation to immersion in virtual reality, *Displays*, Vol.16, No.3, pp.135–139 (1995).

笹山 琴由　（学生会員）

2008 年奈良女子大学大学院人間文化研究科情報科学専攻修了．同年三菱電機（株）入社．同社情報技術総合研究所でヒューマン・マシン・インタフェースに関する業務に従事．2017 年より奈良女子大学大学院人間文化研究科博士後期課程在学中．

五味田 啓　（正会員）

1993 年茨城大学工学部情報工学科卒業．同年三菱電機（株）入社．同社でコンシューマ機器開発に携わった後，2000 年より同社情報技術総合研究所にてコンピュータグラフィクスの研究に従事．

加藤 嘉明　（正会員）

1986 年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了．同年三菱電機（株）入社．同社情報技術総合研究所で画像高能率符号化，デジタル放送の研究開発に従事．同社先端技術総合研究所を経て，2016 年より同社情報技術総合研究所主管技師長．博士（情報科学）．IEEE シニア会員，電子情報通信学会シニア会員．本会シニア会員．

城 和貴　（正会員）

1984 年大阪大学理学部数学科卒業．日本 DEC，ATR 視聴覚研究所（日本 DEC より出向），（株）クボタ・コンピュータ事業推進室で勤務の後，1993 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学，1996 年同研究科後期課程修了，同年同研究科助手．1997 年和歌山大学システム工学部講師，1998 年同助教授．1999 年奈良女子大学理学部情報科学科教授，2014 年同大学生活環境学部情報衣環境学科教授，現在に至る．博士（工博）．