

速度低下錯視を用いた VR 酔いの低減手法

笹山琴由^{1,2,a)} 五味田啓² 加藤嘉明² 城和貴¹

概要: Virtual Reality(VR)空間での映像観視では、乗り物酔いに似た不快な症状(VR 酔い)が生じる。VR 酔いは、視覚と視覚以外の感覚の矛盾から生じ、矛盾の原因の1つは、視覚から生じる自己移動感(ベクション)であると考えられている。そこで、自車周辺の高速な周辺車両に追い越されたり引き離されたりするときに減速感が発生する錯覚を利用してベクションを低減する方法を提案する。被験者実験の結果、提案手法が無い場合と比較して、主観評価で VR 酔いの低減を確認した。

キーワード: VR 酔い, ベクション

Reduction Method of VR Sickness Using Speed Reduction Illusion

KOTOYU SASAYAMA^{1,2,a)} KEI GOMITA²
YOSHIAKI KATO² KAZUKI JOE¹

Abstract: Cybersickness is caused by the conflict between visual and non-visual sensations. One of the causes of the contradiction is thought to be the sense of visually self-movement (vection). Therefore, we propose a method to reduce vection by using the phenomenon that a sense of deceleration occurs when the vehicle is overtaken or pushed by a high-speed peripheral vehicle around the vehicle. As a result of the experiment, it was confirmed that cybersickness decreased by subjective evaluation compared with the case without the proposed method.

Keywords: Virtual Reality Sickness(VR Sickness), Cybersickness, Vection

1. はじめに

近年、VR ヘッドセットの出荷台数は急速に拡大し、一般ユーザが使用する機会が増加している[1]。VR には様々な用途があるが、特にスポーツ観戦に適しているといわれる。それは、会場に行かなくても試合を近くで見ているような臨場感や、まるで自分がスポーツ選手になってボールを追いかけているかのような疑似体験が味わえるためである。2020 年の東京オリンピックに向けても、NTT グループが、VR 向けの自由視点映像など、新たな映像配信の開発に取り組んでいる[2]。

VR 映像の観視では、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[3, 4]。特に、能動的に移動経路を制御できるときと比較して制御できないときは、VR 酔いしやすいと言われている[5]。これは、実世界でも乗用車を運転しているときより、助手席に乗っているときの方が乗り物酔いしやすい[6]ことに似ているが、VR 酔いでも同様のことがいえる。VR でのスポーツ観戦で、選手目線での映像を体験したいときは、選手の移動方向を能動的に制御できないため、VR 酔いが発生しやすい状況であると考えられる。VR でのスポーツ観戦では、VR 酔いせず臨場感のある体験ができることが望ましい。しかし、ヘッドセットを用いて VR 映像を見る場合、VR 酔いを減らす対策をすると、VR でのスポーツ観戦

の一番のメリットである臨場感が下がるというトレードオフの関係がある[7-9]。また、VR 酔いの感受性には個人差があり、同じ映像を見ている個人により VR 酔いの大きさが異なる。これらを考慮すると、ユーザの好みや特性に応じて臨場感の弱め方を自由にカスタマイズできると良いと考えられる。また、スポーツ観戦という主目的がある以上、臨場感を弱める方式としては、注視しなくても効果があるなど、ユーザの無意識下で効果がある方式が望ましい。

カメラ撮影映像やそれを模倣した CG 映像(自然映像)から生じるベクションを変化させる先行研究[10-13]では、直線時のベクション変化を対象としている。VR 酔いは所定の角速度や周波数で発生しやすいと言われているため[14, 15]、右左折などの回転時を対象とすることが望ましいが、右左折時を対象とした研究は行われていない。そこで本稿では、右左折時など、回転しながら前進する経路を対象とする。

本稿では、VR での、右左折を含む決められた経路に従って進む自然映像において、ユーザの無意識下で自然映像から生じるベクションを低減させ、VR 酔いを低減する方法を提案する。本稿で提案するベクションの低減方法としては、実世界で走行車に乗っているときに、隣接レーンの車から追い抜かれるときや、同一レーンを走る前方車の加速で引き離されるときに、あたかも自車が減速したかのように感じられる錯覚に着目する。この錯覚を用いてベクシ

ョンを減少させる研究は行われていない。ベクションを想起させる刺激は、1つの小さい指標だと、自己移動感ではなく、指標が移動している感覚となる[16]とともに指標に注意が誘導されやすい。この知見は自然映像から生じるベクションを減少させるための刺激(制御刺激)に対しても同様だと仮定し、制御刺激は、ベクションを想起させる刺激として一般的なランダムドットとする[7][8]。本論文では、ランダムドットで追い抜き・引き離しの動きを模倣したときに、VR環境においてもベクションの低減が生じるか否か、そして、生じるとしたらベクションの低減によりVR酔いが低減するか否かを実験により確認する。

2. 提案方法

VR酔い低減効果を確認するためには、まずは制御刺激が無い場合の自然映像の動きで、酔わせる必要がある。そのため、まずは自然映像の動きをVR酔いしやすい周波数帯0.2Hz~0.4Hz帯[17]に含まれる0.2Hzになるように設定する。追い抜き・引き離し感を出すため、制御刺激の動きは、自然映像の動きよりも高周波とする。こうすることで、体感としては、0.2Hzよりも低周波となり、VR酔いしやすい周波数帯から外れるため、VR酔いが減ると予想できる。

また、制御刺激の効果を期待したランダムドットは、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、ランダムドット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秒の提示時間ではベクションを感じないという研究がある[9]。また、自然映像の方が単純な図形の集合体から生じるベクションよりも強度が大きい[18]。これらを考慮して、制御刺激を表示し続ける時間は3.5秒以内とし、制御刺激を構成する1つの刺激の形状は3次元の球体とする。

VR酔い発症の原因となるベクションを発生させる自然映像の動きと、自然映像から生じるベクションを低減する効果を持つ制御刺激の動きについて、それぞれの動かし方を説明する。

自然映像は、実世界を模擬してCGで作成したVR空間内を、VR空間内のユーザの視点位置姿勢(仮想カメラ)から撮影して生成する。そして、自然映像の動きは仮想カメラの動きで制御する。制御刺激は、立方体の中に複数の球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姿勢を制御する。仮想空間(軸の単位はメートル)内の動きの例を図1、制御刺激の模式図を図2に示す。

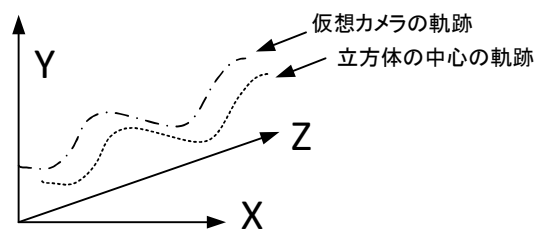


図1 仮想カメラの軌跡と立方体の中心の軌跡例

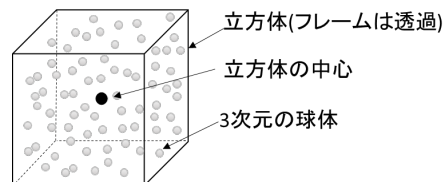


図2 制御刺激

仮想カメラは、右左折を含む決められた経路を進ませる。実際のスポーツ観戦では、選手が移動するときに視線の高さが変化するが、今回は左右回転に焦点をあてるため、高さは変更しない。つまり、仮想カメラは高さ(yの値)が固定のXZ平面上を進む。また、右左折の移動軌跡としては、経験として常に同じ方向に曲がるよりも、右左折を交互に繰り返す方が酔いやすいため、右左折を交互に繰り返す。また、スポーツ選手の動きを考えたとき、右左折時のカーブの曲率は毎回異なる値であると考えられるが、今回は基礎実験のため、すべてのカーブの大きさを同一とする。同じ形状のカーブを右左折する経路としては、直線・円弧(右折)・直線・円弧(左折)・・・を繰り返すことが考えられるが、同じ形状の右左折を繰り返すという形状は正弦波でも実現できる。そのため、仮想カメラの軌跡は正弦波とする。

また、スポーツ観戦では、中心視を制御刺激が遮ることを避けるため、制御刺激を周辺視野に出すなどの工夫が必要だが、今回は基礎実験としての効果検証を目的としているため、制御刺激を表示するエリアは周辺視野に限定しない。

2.1 自然映像の動き

時刻 t に対する仮想カメラの座標 $P_c = (x_c, y_c, z_c)$ を数式(1)に示す。回転はYawのみで、 $F_c(z)$ の接線方向を向くよう回転させる。

$$x_c = F_c(z_c) = A_c \times \sin\left(2\pi \times \frac{z_c}{z_{cp}}\right)$$

$$y_c = y_{co} \quad (1)$$

$$z_c = v_{cz} \times t$$

$$A_c \dots \text{振幅}$$

$$y_{co} \dots \text{高さ(m)}$$

$$z_{cp} \dots \text{Z軸方向の1周期の長さ(m)}$$

$$v_{cz} \dots \text{Z軸方向の移動速度(m/s)}$$

$$t \dots \text{開始からの経過時間(秒)}$$

2.2 制御刺激の動き

時刻 t に対する立方体の配置位置を表すため、立方体の中心座標 $P_s = (x_s, y_s, z_s)$ を数式(2)で定義する。また、立方体は、 $F_s(z)$ の接線方向を向くよう回転させる。 x_{so_x} の値を変えることで、仮想カメラの走行レーンと並走する隣接レーンの軌跡を表現する。1つの曲がり角に対して、立方体は複数個生成し、隊列を組みながら移動する。

ただし、 $v_{cz} < v_{sz}$ とする。

$$x_s = F_s(z) = A_c \times \sin\left(2\pi \times \frac{z_s}{z_{cp}}\right) + x_{so_x}$$

$$y_s = y_{co} + y_{so_x}$$

$$z_s = z_{sb} + v_{sz} \times (t - t_{sb})$$

$$z_{sb} = v_{cz} \times t_{sb}$$

(2)

A_c ... 振幅

x_{so_x} ... x 軸方向のオフセット(m)

y_{so_x} ... y 軸方向のオフセット(m)

v_{sz} ... Z 軸方向の移動速度(m/s)

t ... 開始からの経過時間(秒)

z_{sb} ... 立方体生成時の Z 座標(m).

t_{sb} ... 立方体生成時の開始からの経過時間(秒)

カーブ周辺にのみ制御刺激を表示するため、仮想カメラがカーブ周辺に差し掛かったとき、あらかじめ決めておいたカーブ周辺のエリア内に、 Z 軸上で等距離になるように立方体を配置する。その配置位置の Z 座標が z_{sb} であり、その生成タイミングが t_{sb} である。立方体は仮想カメラよりも速度が速いので、いずれ当該カーブ周辺には立方体が表示されていない区間(Z 軸上での距離)ができる。そのときに、またそのエリアを埋めるように立方体を配置する。

3. 実験

3.1 実験装置

表示コンテンツは SteamVR, Unity を用いて作成し、PC(Windows10, GeForceGTX1080)上で実行し、HTC VIVE Pro に視野角 110° 、立体視、60fps で表示した。

3.2 手続き

被験者一人当たりの手続きについて記載する。本実験で計測するのは、SSQ(Simulator Sickness Questionnaire)[19]とする。被験者は SSQ に回答した後、1 分間の静止画、10 分間の動画を観視する。動画前の静止画には、被験者を VR 空間に慣れさせる役割がある。また、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[20]を参考に、動画を 10 分間とした。静止画視聴では目印とするオブジェクトを注視させ、ヘッドセットのヘッドホンは開けたままとした。また、動画観視中の注視位置は指定せず、被験者の自由とした。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した。最後に SSQ に回答して終了とした。実験の流れを図 3 に

示す。

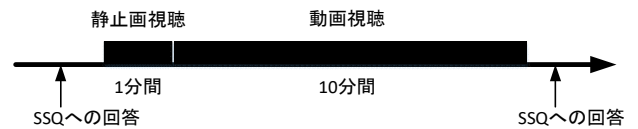


図 3 手続き

3.3 視覚刺激

静止画では、エラー! 参照元が見つかりません。のように、被験者の正面に、注視点となるオブジェクトを表示する。このオブジェクトは直径 0.5m の球体で中心が $(x, y, z) = (2, 1, 2)$, RGB(255, 244, 0) 不透過である。動画では、背景とともに制御用刺激を表示する。制御用刺激は、速度の速い前方車の動きを模擬した「引き離し」エラー! 参照元が見つかりません。と近隣車から追い抜かされる「追い越し」(エラー! 参照元が見つかりません。、エラー! 参照元が見つかりません。)の 2 条件とする。追い越しでは、左折時には右車線から、右折時には左車線から追い抜かす感覚を与えるよう制御する。上記制御用刺激 2 種類と、制御刺激なしの 1 種類と合わせて、合計 3 種類の視覚刺激のパターンを作成する。背景は、自然映像の例として森の中をイメージして作成した。

仮想カメラと制御刺激の実験パラメータは、 $A_c = 1$, $z_{cp} = 2\pi$, $v_{cz} = 0.4\pi$, $v_{sz} = 0.8\pi$ である。追い抜き条件では $x_{so_x} = \pm 3$, 引き離し条件では $x_{so_x} = 0$ とした。

また、立方体の 1 辺は 3m, その中に直径 0.05m・不透過・RGB(255, 221, 0)の球をランダムに 400 個配置した。引き離し条件・追い抜き条件それぞれにおける左折開始時の制御刺激の見え方について図 4, 図 5 に記す。制御刺激が動く方向を矢印で記す。



図 4 引き離し条件での左折開始時



図 5 追い抜き条件での左折開始時

3.4 測定項目

制御用刺激が無い場合と、制御用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、コンテンツ視聴後に取得した SSQ のスコアを用いて調査する。SSQ のスコアは、酔いを表す Total Score に加え、Nausea(吐き気)、Oculomotor(目の疲れ)、Disorientation(方向感覚の喪失)という 3 種類のサブスコアも算出する。

3.5 参加者

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 歳の健康な女性 43 名(平均 19.6 歳、標準偏差 1.4 歳)である。年齢と性別は酔いの感受性に影響があるとされ[21][22]、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した。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。被験者は、3 種類(制御刺激無し・引き離し条件・追い越し条件)全てのコンテンツを視聴した。順序効果を考慮し、コンテンツの視聴順序 6 パターンに対し、被験者数の人数を揃えた。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 日間以上設けた。

4. 結果と考察

4.1 結果

当日の体調不良で 1 回以上実験に参加しなかった 3 名は除外した。また、実験開始前に TotalScore が 10 以上となった被験者は既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[23]。酔いがひどく自己申告による途中中断の被験者は含めた。その結果、被験者 43 名のうち、解析対象は 21 名となった。Wilcoxon の符号付順位検定の結果、制御刺激なしと比較して、TotalScore, Nausea, Oculomotor, の全てにおいて、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、追い越し制御刺激でのみスコアが有意に低くなった。結果を図 6 に示す。

4.2 考察

まず、VR 酔いが発症したか、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、提案手法は、提案手法が無い場合と比較して、ベクションの低減が生じたか、そして、VR 酔いが低減したかについて考察する。

VR 酔いの指標である SSQ のトータルスコアにおいて、提案手法無しでは、実験後にスコアが上昇し、VR 酔いを発症したことが分かった。

また、制御刺激自体からベクションを感じたかについて考える。球の集合体からベクションを感じた場合、後退感を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、そのように感じたとは答えた人はいなかった。

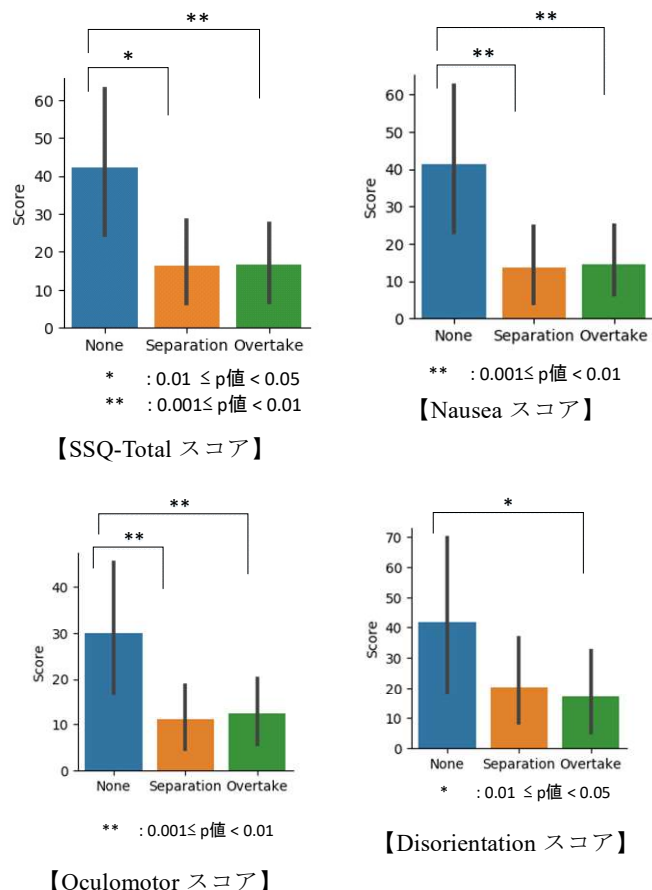


図 6 実験終了後の主観評価結果

そのため、球の集合体は想定通り制御刺激として機能していたと考えられる。さらに、一部の被験者からは、球があるときは無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、制御刺激の有無にかかわらず、想定通り制御刺激自体からベクションを感じたことがわかった。

つぎに、提案手法において、ベクションの低減が生じたかについて考察する。ベクションと姿勢の揺れには共通の神経メカニズムがあり[36]、正の相関を示す[37]とされる。そのため、SSQ の Disorientation にベクションの影響が表れていると考えられる。引き離し条件では有意に差があったとは言えなかったが、追い越し条件では、有意に差があった。そのため、追い越し条件において、ベクション低減の効果があったと考えられる。両者の制御刺激の見え方について考えてみる。図 4、図 5 に示すとおり、引き離し条件と追い抜き条件では、動く方向は画面右から左へという方向は大体同じだが、表示開始位置・非表示位置が異なる。引き離し条件では、画面中央から表示され始め、仮想カメラがカーブを曲がりきる前に制御刺激が消えるのに対し、追い抜き条件では、画面右から表示され始め、カーブを曲がりきる時に消える。そのため、この違いがベクション低減の違いに影響を与えた可能性がある。

さいごに、VR 酔いの低減効果があったかについて確認

する。引き離し、追い越しの2つの制御刺激について、制御刺激が無い場合と比較して、有意に酔いが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。ただし、引き離し条件でベクションが有意に提言したとは認められなかったことを考慮すると、VR酔いが低減した原因はベクションの低減ではなく、NauseaやOculomotorの項目に起因していた可能性がある。引き離し条件では、NauseaやOculomotorも値が有意に低下しており、これらがVR酔い低減に貢献した可能性が高い。

5. おわりに

自然映像から生じるVR酔いを低減するため、ベクション低減効果を期待した制御刺激を用いる方法を提案した。ベクション低減方法としては、隣接レーンの高速車に追い抜かれるときや、同一レーンの前方を走行する高速車に引き離されるときに自車の速度が遅くなったように錯覚する現象をVRに応用した。これらの動きを3次元のランダムドットの動きで模倣し、VRにおいて減速感とVR酔いの低減が得られるかを実験で確認した。その結果、追い抜き時の車の動きを模倣したときに、ベクションが低減し、VR酔いの低減が得られたことを確認した。引き離し時の車の動きの模倣でも、VR酔いは低減したが、その原因としてはベクションの低減ではなく、その他の原因があることが推測された。今後は、この結果について、詳細な理由について検証していきたい。

6. 参考文献

- 1) 総務省: 令和元年版情報通信白書(2019).
- 2) 山口勝: 公共放送による 360° 映像の VR 配信の意義: 2020 年とその先に向けて、放送研究と調査, Vol.67, No.11, pp.90-97(2017).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 妹尾武治, 伊藤裕之 and 須長正治: VR 空間における運転者と乗客のベクションの違いの検討 (<特集> VR 心理学 4), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.1, pp.3-6(2010).
- 6) Rolnick, A. and Lubow, R.: Why is the driver rarely

- motion sick? The role of controllability in motion sickness, Ergonomics, Vol.34, No.7, pp.867-879(1991).
- 7) Diels, C. and Howarth, P. A.: Visually induced motion sickness: Single-versus dual-axis motion, Displays, Vol.32, No.4, pp.175-180(2011).
 - 8) 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).
 - 9) 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).
 - 10) 韓亜由美, 玉木真, 小野晋太郎, 佐々木正人, 須田義大 and 池内克史: 高速道路におけるシークエンスデザイン ‘オプティカルドット’ による走行制御効果の長期検証, 生産研究, Vol.64, No.2, pp.297-302(2012).
 - 11) 川島祐貴, 内川恵二, 金子寛彦, 福田一帆, 山本浩司 and 木屋研二: 道路側面に設置された点滅柱状物体により生起する視覚誘導自己運動感覚を交通工学的に応用した自動車運転者の速度感覚変化手法, 映像情報メディア学会誌, Vol.65, No.6, pp.833-840(2011).
 - 12) 東井隼斗, 北原格, 亀田能成 and 大田友一: ドライバの体感速度変化を促すバーチャルパターン, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.99, No.1, pp.45-55(2016).
 - 13) 西元崇, 植木宗司郎, 松本修一 and 平岡敏洋: 錯視を活用したサグ部における速度低下抑制手法の効果検証, 交通工学論文集, Vol.3, No.4, pp.A_29-A_35(2017).
 - 14) So, R. H., Ho, A. and Lo, W.: A metric to quantify virtual scene movement for the study of cybersickness: Definition, implementation, and verification, Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol.10, No.2, pp.193-215(2001).
 - 15) So, R. H., Lo, W. and Ho, A. T.: Effects of navigation speed on motion sickness caused by an immersive virtual environment, Human factors, Vol.43, No.3, pp.452-461(2001).
 - 16) Dichgans, J. and Brandt, T.: Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In Perception, pp. 755-804, Springer(1978).
 - 17) Diels, C. and Howarth, P. A.: Frequency characteristics

- of visually induced motion sickness, Human factors, Vol.55, No.3, pp.595-604(2013).
- 18) 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 Transactions on Applied Perception (TAP), Vol.3, No.3, pp.194-216(2006).
- 19) 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).
- 20) 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).
- 21) Reason, J. T. and Brand, J. J.: Motion sickness, Academic press(1975).
- 22) 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).
- 23) Balk, S. A., Bertola, M. A. and Inman, V. W.: Simulator sickness questionnaire: Twenty years later(2013).