

VR酔い低減を目的とした三感覚系のマルチモーダル刺激システム

高須賀 颯太[†]

竹中 健祐[†]
横浜国立大学[†]

島 圭介[‡]

島谷 康司[‡]
広島県立大学[‡]

1 はじめに

頭部装着型ディスプレイ (HMD) を用いた仮想現実 (VR) は訓練・設計支援・教育など多様な領域へ普及しているものの, 利用継続を妨げる要因に VR 酔いがある [1]. VR 酔いは, 視覚運動により生じた自己運動知覚に対して, 前庭・体性感覚との不整合を引き起こす. これに対し, 前庭感覚または体性感覚に刺激を与えることで VR 酔いの低減や没入感向上を図る手法が提案されている [2, 3]. ここで, 複数の感覚刺激を重畳することで効果的に感覚統合を促進できること [4] を鑑みれば, 前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation: GVS) と振動刺激の重畳提示が VR 酔い低減に有効と考えられる. ただし, その効果は十分に検証されていない.

そこで本稿では, 視覚運動に同期した GVS と頬・首への振動刺激を組み合わせて提示することで, 加速度感覚の補完と感覚間整合を向上させる方法論を提案する. これにより, VR における没入感の向上や VR 酔いの低減が期待される.

2 提案システム

人の前庭覚は身体の傾きや身体に生じる加速度を検知し, 体性感覚, 特に皮膚感覚 (表在覚) は身体に加わる振動や物体の接触, 肌にあたる風などを検知する. この点をもとに, 本稿では加速度情報に基づいた前庭感覚刺激 (GVS) および速度情報に基づいた体性感覚刺激 (左右の振動刺激) を同時に提示可能なデバイスを開発した. 図 1 に提案システムの概要を示す. 以下, システムのハードウェアとソフトウェアについて説明する.

2.1 ハードウェア

本デバイスは GVS 用電流出力部と振動用駆動部から構成される. PC から送信される右振動, 左振動, および GVS の 3 種類の刺激量に基づき, 視覚運動に同期したマルチモーダル刺激を提示する.

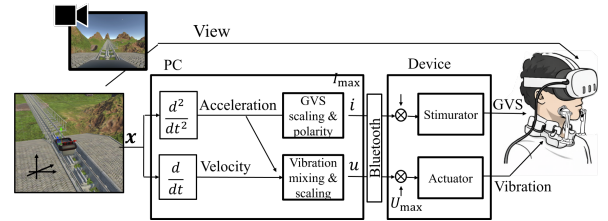
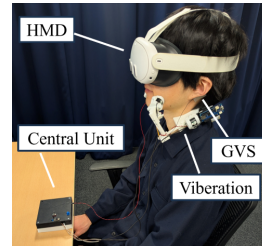
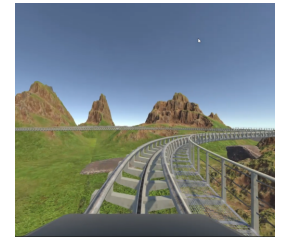


図 1: 提案システム



(a) 被験者装着の様子



(b) Unity 上のタスク画面

図 2: 実験環境とタスク

振動刺激部にはそれぞれ独立駆動が可能な 4 つの振動子 (フォスター電機社製) を用いる. 歩行時に身体に生じる振動を頬部に提示した先行研究 [5] を参考に, 振動子を 3D プリンタで作成した治具によって左右の頬および首周辺に配置し, 移動に伴って知覚される空気抵抗を, 頬部への振動刺激として再現する.

GVS についてはオペアンプを用いた定電流回路を設計・開発し, 乳突部に貼付した電極を介して直流電流により前庭神経へ微小電流を印加する.

2.2 ソフトウェア

提案法では, まず仮想空間上の視点位置 $x(t)$ から, その時間微分により仮想空間上でユーザに生じる速度 $v(t)$, 加速度 $a(t)$ を算出する.

前庭感覚は内耳の耳石が加速度を検出する感覚系であるため, GVS では左右方向の加速度 a_{lat} に比例して GVS 指令値を生成し, スケーリング係数 k_a を用いて次式で与える.

$$i(t) = k_a a_{lat}(t) \quad (1)$$

$$I(t) = I_{max} i(t) \quad (2)$$

体性感覚には前後方向速度 $v_{fwd}(t)$ に比例した振幅の振動刺激を左右それぞれのアクチュエータに与える. こ

A Multimodal Stimulation System Targeting Three Sensory Systems for VR Motion Sickness Reduction

[†]Sota Takasuka, Kensuke Takenaka and Keisuke Shima, Yokohama National University

[‡]Koji Shimatani, Prefectural University of Hiroshima

表 1: 実験条件 (刺激条件の対応)

条件	GVS	振動刺激
a	無	無
b	弱 (感覚閾値未満)	無
c	強 (約 2 mA)	無
d	無	有
e	弱 (感覚閾値未満)	有
f	強 (約 2 mA)	有

こで, 左右方向の加速度 $a_{lat}(t)$ を混合して振幅指令値を生成することで, 左右の加速度変化を同時に体性感覚に与える. 混合比 r およびスケーリング係数 k_v を用いて

$$u_R(t) = (1 - r) k_a a_{lat}(t) + r k_v |v_{fwd}(t)|, \quad (3)$$

$$u_L(t) = -(1 - r) k_a a_{lat}(t) + r k_v |v_{fwd}(t)| \quad (4)$$

とする. 最終的な振動刺激量は以下となる.

$$U_R(t) = U_{max} u_R(t), \quad U_L(t) = U_{max} u_L(t) \quad (5)$$

ただし, I_{max} と U_{max} はユーザが不快に感じない範囲で予め設定する.

3 実験

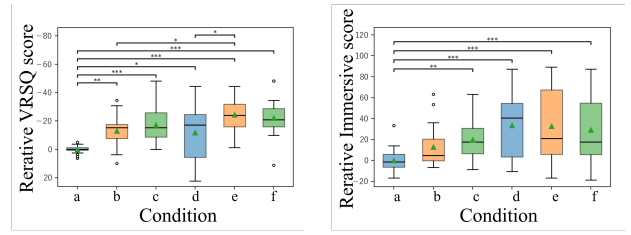
前庭・体性感覚の重畳刺激による VR 酔いの低減と没入感の向上の検証のため, 健常若年者 8 名 (平均 22.5 ± 1.5 歳) に対して実験を行った.

被験者は HMD を装着し, Unity 上で提示されるコースター体験タスクを実施した. タスク時間は 1 分とし, 簡易化のため視点運動は左右方向の運動成分のみを持つように設計した. 図 2 に被験者装着の様子とタスク画面を示す. また, $I_{max} = 2$ mA, $U_{max} = 10$ mm, $k_a = 1$, $k_v = 1$, $r = 0.7$ とした.

実験では GVS について無・弱 (感覚閾値未満)・強 (約 2 mA) の 3 水準, 振動刺激について無・有の 2 水準とし, 3×2 の計 6 条件を設定した. 表 1 に刺激条件の対応を示す. 感覚閾値は被験者ごとに同定し, 弱条件は主観的に知覚されない範囲で設定した. 強条件は約 2 mA を目安に設定した. 各条件は 3 試行とし, 条件順は被験者ごとに無作為に決定した.

評価指標として VR 酔いの程度を Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ) [6] を被験者に回答させ, 没入感を Visual Analog Scale (VAS) で取得した. 各条件のスコアから刺激なし (条件 a) を基準とした差分を算出し, 各条件間でボンフェローニ補正を適用した多重比較検定を行った.

図 3 (a) に被験者が回答した VR 酔いの量の変化を示す. 無刺激 (条件 a) と比較して GVS 弱または振動刺激を付与した条件において有意に低下し, 改善がみられた. さらに, 片方のみを付与した条件と比較して, 両方を併用した条件では有意に低下し, マルチモーダル刺



(a) VR 酔い変化

(b) 没入感変化

図 3: VR 酔いと没入感の条件別比較

激による重畳効果が示唆された.

図 3 (b) に没入感変化を示す. 没入感は刺激条件によって変化し, 特に振動刺激を含む条件で向上傾向がみられる. ただし個人差や分散が大きくなりやすく, 刺激タイミングや強度変調が視覚運動と不整合になる場合には効果が一样にならない可能性がある. 今後は閾値同定や強度スケーリングなどの個人適応を導入し, VR 酔い低減と没入感向上の両立を図る必要がある.

4 おわりに

本稿では, 視覚運動に同期して GVS と頬・首振動を同時制御する加速度感覚誘発システムを提案し, 6 条件の被験者内比較により VRSQ と VAS を用いて評価した. その結果, 無刺激条件に対して GVS 弱または振動刺激の付与で VR 酔い改善に有意差が確認された. 今後は, 被験者ごとの感覚特性に応じた個人適応を導入し, 刺激の強度やタイミングの設計を最適化することで, 汎用的な感覚提示手法の確立を目指す.

参考文献

- [1] Dimitrios Saredakis et al. Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 14, p. 96, 2020.
- [2] Misha Sra, Abhinandan Jain, and Pattie Maes. Adding proprioceptive feedback to virtual reality experiences using galvanic vestibular stimulation. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*, pp. 1–13. ACM, 2019.
- [3] Yi-Hao Peng et al. Walkingvibe: Reducing virtual reality sickness and improving realism while walking in vr using unobtrusive head-mounted vibrotactile feedback. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*, pp. 1–12. ACM, 2020.
- [4] Marc O. Ernst and Heinrich H. Bühlhoff. Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 8, No. 4, pp. 162–169, 2004.
- [5] hi Hong Liu Set al. Phantomlegs: Reducing virtual reality sickness using head-worn haptic devices. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 817–826, 2019.
- [6] Hyun K Kim et al. Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, Vol. 69, pp. 66–73, 2018.