

マルチモーダルな感覚刺激に基づく加速度感覚誘発システム

高須賀 颯太[†] 竹中 健介[‡]
横浜国立大学[†] 横浜国立大学[‡]

島 圭介[§] 島谷 康司[¶]
横浜国立大学[§] 広島県立大学[¶]

1 はじめに

頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) を用いる Virtual Reality (VR) は訓練・設計支援・教育など多様な領域へ普及している一方、利用継続を妨げる要因として VR 酔いが知られている [1]。VR 酔いは、視覚運動により自己運動知覚が生じたにもかかわらず、前庭・体性感覚側の手掛かりが不足または不整合となることで生じやすく、吐き気やめまい等の不快が体験品質を低下させる。また、没入感と不快は負に関連し得るため [2]、VR 酔いの低減は体験価値の向上にも直結し得る。

本研究は、不足している感覚手掛かりを付与する方針を取り、視覚運動に同期した前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation: 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の向上を狙う。GVS は VR 体験における運動感覚の補助に用いられており [3]、頭頸部への振動提示も VR 酔い低減やリズム向上に寄与し得る [4, 5]。これらを速度・加速度に基づき同期制御するシステムを構築し、VR 酔いと没入感への影響を検証する。

2 システム

2.1 構成と処理手順

提案システムは、Unity 上で実行される VR シミュレーション (PC) と、Bluetooth 通信で接続された刺激提示デバイスから構成される。Unity は視点 (ユーザ座標系) における前方速度 $v_{\text{fwd}}(t)$ および左右方向加速度 $a_{\text{lat}}(t)$ を算出し、それらを刺激指令値へ変換して Bluetooth でデバイスへ送信する。デバイス側は受信した指令値に基づき、前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation: GVS) の電流と、左右振動アクチュエー

タの振幅を生成する。図 1 に、実際に作成したシステム外観を示す。

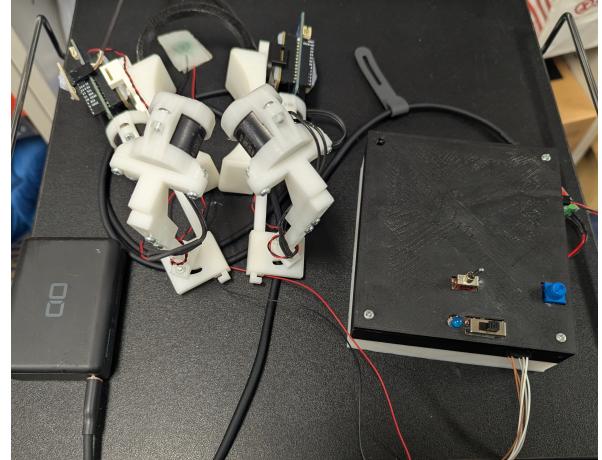


図 1: 作成した刺激提示デバイスの外観

2.2 刺激指令値の生成

本システムでは、GVS 指令値は -1 から 1 の範囲、振動指令値は 0 から 1 の範囲となるように正規化する。実験では基準値として左右方向加速度の基準値 $a_{\text{ref}} = 1 \text{ m/s}^2$ 、前方速度の基準値 $v_{\text{ref}} = 1 \text{ m/s}$ を用いた。まず、左右方向加速度と前方速度を次の正規化量として扱う：

$$\hat{a}(t) = \frac{a_{\text{lat}}(t)}{a_{\text{ref}}}, \quad \hat{v}(t) = \frac{|v_{\text{fwd}}(t)|}{v_{\text{ref}}}.$$

ここで、 $\hat{a}(t)$ は -1 未満なら -1、1 を超えるなら 1 として扱い、 $\hat{v}(t)$ は 1 を超える場合は 1 として扱う。

GVS (電流) GVS の指令値は、左右方向加速度の正規化量をそのまま用いる：

$$u_{\text{gvs}}(t) = \hat{a}(t) \quad (-1 \leq u_{\text{gvs}}(t) \leq 1). \quad (1)$$

デバイス側には最大電流量を調整するつまみがあり、設定された最大電流 I_{max} と PC からの指令値を乗算して出力電流を決定する：

$$I_{\text{gvs}}(t) = I_{\text{max}} u_{\text{gvs}}(t). \quad (2)$$

A Multimodal Sensory Stimulation-Based System for Inducing Acceleration Sensations

[†]Sota Takasuga, Yokohama National University

[‡]Kensuke Takenaka, Yokohama National University

[§]Keisuke Shima, Yokohama National University

[¶]Koji Shimatani, Prefectural University of Hiroshima

振動（振幅） 振動は右・左それぞれの振幅指令を生成し、いずれも 0 から 1 の範囲として扱う。前方速度と左右方向加速度を混合するため、混合比 r （速度側の重み）を導入し、実験では $r = 0.7$ とした。右・左の振動指令値は次式で与える：

$$u_{\text{vib},R}(t) = (1 - r)\hat{a}(t) + r\hat{v}(t), \quad (3)$$

$$u_{\text{vib},L}(t) = -(1 - r)\hat{a}(t) + r\hat{v}(t). \quad (4)$$

算出後、負の値は 0 として扱い、1 を超える場合は 1 として扱うことで、最終的に $0 \leq u_{\text{vib},R}(t), u_{\text{vib},L}(t) \leq 1$ を満たす指令値とする。デバイス側では、これらの指令値に比例した振幅で右・左の振動アクチュエータを駆動する。

3 実験

3.1 タスクと環境

被験者は HMD を装着し、Unity 上で提示されるコースタータスクを実施した。タスク時間は約 1 分であり、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。実験中、Unity から視点（ユーザ座標系）における前方速度 $v_{\text{fwd}}(t)$ および左右方向加速度 $a_{\text{lat}}(t)$ を取得し、2 章で述べた方法で刺激指令値へ変換して Bluetooth で刺激提示デバイスへ送信した。図 2 に被験者装着の様子とタスク画面を示す。



(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

3.2 被験者と条件

被験者数は 8 名である。前庭電気刺激は無・弱（感覚閾値未満）・強（約 2 mA）の 3 水準、振動刺激は無・有の 2 水準とし、 3×2 の計 6 条件を設定した。case 番号と刺激条件の対応を表 1 に示す。感覚閾値は被験者ごとに簡易手続きで同定し、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ランダムに決定した。

表 1: 実験条件 (case 番号と刺激条件の対応)

case	前庭電気刺激 (GVS)	振動刺激
0	無	無
1	弱（感覚閾値未満）	無
2	強（約 2 mA）	無
3	無	有
4	弱（感覚閾値未満）	有
5	強（約 2 mA）	有

3.3 評価指標

VR 酔いの程度は Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ) [6] で評価し、没入感は Visual Analog Scale (VAS) で取得した。個人差を抑えるため、各条件のスコアから case0 (刺激なし) を基準とした差分を算出し、VRSQ_diff および immersive_diff として比較した。VRSQ_diff は負方向が VR 酔いの低減、immersive_diff は正方向が没入感の向上を表す。

3.4 統計解析

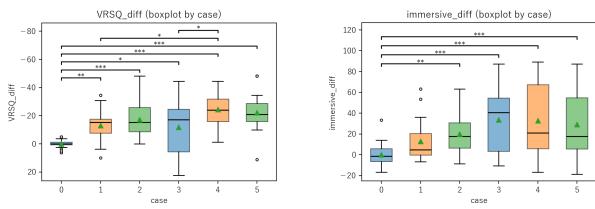
VR 酔い (VRSQ_diff) についてはシャピロウィルク検定の p 値がすべて 0.05 を上回ったため、パラメトリックとして扱い事後比較を行った。多重比較に伴う第 I 種過誤を抑えるため、ボンフェローニ補正を適用した p 値を用いた。没入感 (immersive_diff) についてはシャピロウィルク検定の p 値が 0.05 を下回る条件が含まれたためノンパラメトリックとして扱い、Dunn の事後比較を行った。同様に、ボンフェローニ補正を適用した p 値を用いた。

3.5 結果と考察

図 3a に VR 酔い変化 (VRSQ_diff) を示す。無刺激 (case0) と比較して、GVS 弱 (case1) または振動刺激 (case3) を付与した条件で VR 酔い改善に有意差が確認された。さらに、片方のみを付与した条件 (case1 または case3) と比較して、両方を併用した条件 (case4) で VR 酔い改善に有意差が確認され、併用による重畠効果が示唆された。一方で、振動併用下における前庭刺激強度の差 (case4 と case5) については、本結果から明確な差は読み取れなかった。以上より、前庭・体性感覚いずれの手掛かり付与も視覚運動との不一致を緩和し得るが、特に GVS 弱と振動刺激の併用は単独提示よりも VR 酔い低減に寄与する可能性がある。先行

研究でも GVS による運動感覚の補助 [3] や頭頸部への振動提示による VR 酔い低減 [4, 5] が報告されており、本研究の結果はこれらの知見と整合する。

図3bに没入感変化(immersive_diff)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見られる。ただし、没入感は一部条件で正規性を満たさなかったため、ノンパラメトリックに事後比較(Dunn)を行い、ボンフェローニ補正後のp値で判断した。没入感に関しては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様にならない可能性がある。したがって、今後は同期誤差の定量化と個人適応(閾値同定や強度スケーリング)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。



(a) VRSQ_diff (b) immersive_diff
図 3: VR 酔いと没入感の条件別比較

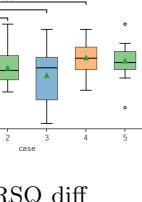
4 まとめ

視覚運動（速度・加速度）に同期して前庭電気刺激と頬・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見られ、さらに単独提示条件に対して併用条件で有意に改善することが確認された。今後は、同期誤差の定量化と個人適応を導入し、刺激設計の最適化を進める。

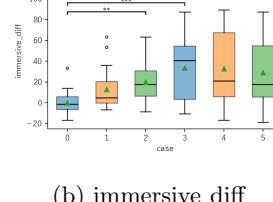
参考文献

- 研究でも GVS による運動感覚の補助 [3] や頭頸部への振動提示による VR 酔い低減 [4,5] が報告されており、本研究の結果はこれらの知見と整合する。

図 3b に没入感変化 (immersive_diff) 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見られる。ただし、没入感は一部条件で正規性を満たさなかったため、ノンパラメトリックに事後比較 (Dunn) を行い、ボンフェローニ補正後の p 値で判断した。没入感に関しては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様にならない可能性がある。したがって、今後は同期誤差の定量化と個人適応（閾値同定や強度スケーリング）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。



(a) VRSQ_diff



(b) immersive_diff

図 3: VR 酔いと没入感の条件別比較

4 まとめ

視覚運動（速度・加速度）に同期して前庭電気刺激と頸・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見られ、さらに単独提示条件に対して併用条件で有意に改善することが確認された。今後は、同期誤差の定量化と個人適応を導入し、刺激設計の最適化を進める。

参考文献

 - [1] Dimitrios Saredakis, Andrzej Szpak, Benjamin Birckhead, Hannah A. D. Keage, Albert Rizzo, and Tobias Loetscher. 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] Sebastien Weech, Sean Kenny, and Michael Barnett-Cowan. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review. *Frontiers in Psychology*, Vol. 10, p. 158, 2019.
 - [3] 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.
 - [4] Yi-Hao Peng, Carolyn Yu, Shi-Hong Liu, Chung-Wei Wang, Paul Taele, Neng-Hao Yu, and Mike Y. Chen. 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.
 - [5] Kun-Woo Song and Sang Ho Yoon. Neck goes vrrr: Reducing rotation-induced virtual reality sickness through neck muscle vibrations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 31, No. 10, pp. 6977–6990, 2025.
 - [6] Hyun K. Kim, Jaehyun Park, Yeongcheol Choi, and Mungyeong Choe. Virtual reality sickness questionnaire (vrsq): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, Vol. 69, pp. 66–73, 2018.