

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¹ 竹中 健介¹ 島 圭介¹ 島谷 康司²

¹ 横浜国立大学大学院環境情報学府 ² 広島県立大学保健福祉学科

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 酔い低減やリア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.

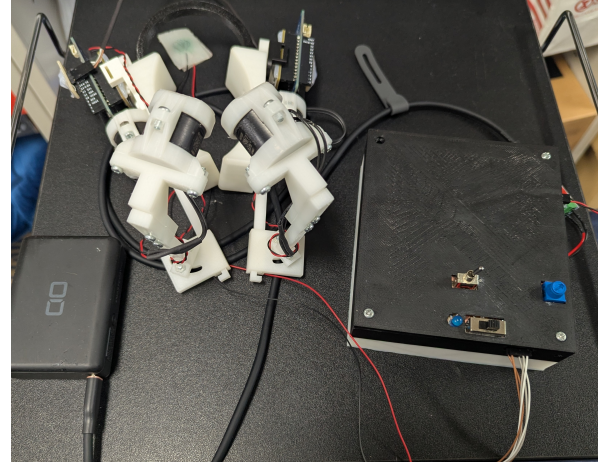


図 1: 作成した刺激提示デバイスの外観

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:

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

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。

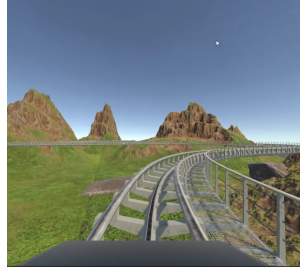
3 実験

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体験タスクを実施した。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2mA）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2mA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2mA）	無
3	無	有
4	弱（感覚閾値未満）	有
5	強（約2mA）	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（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、併用による重畳効果が示唆された。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（immersive_diff）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、没入感の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樣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。

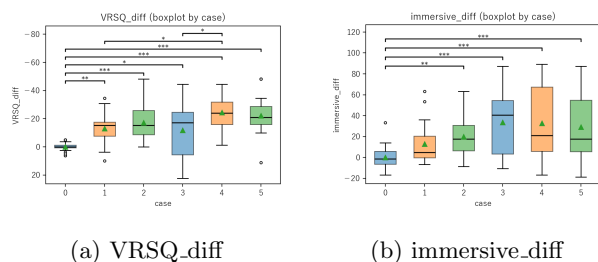


図 3: VR 酔いと没入感の条件別比較

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頰・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。

5 *

参考文献

- [1] Dimitrios Saredakis, Andrzej Szpak, Benjamin Birkhead, 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.