

# 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<sup>1</sup> 竹中 健介<sup>1</sup> 島 圭介<sup>1</sup> 島谷 康司<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 横浜国立大学大学院環境情報学府 <sup>2</sup> 広島県立大学保健福祉学科

## 1 はじめに

HMD 型 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 (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 構成とデータフロー

提案システムは、(i) VR アプリケーション、(ii) 刺激制御モジュール、(iii) 刺激提示部 (GVS・振動) から構成される。VR アプリケーション (例: Unity) から、視点 (あるいはユーザ座標系) における速度  $v(t)$  と加速度  $a(t)$  のみを取得し、刺激制御モジュールへ送信する。刺激制御モジュールは受信した  $v(t), a(t)$  を基に刺激パラメータを算出し、GVS ドライバおよび振動アクチュエータ (頬・首) を駆動する。同時に、刺激ログ (時刻, GVS 条件, 振動条件, 算出した刺激指令値) を保存する。

図 1: システム構成図 (ダミー)

速度・加速度取得 → 刺激生成 → GVS/振動提示

図 1: 提案システムの概略

### 2.2 刺激生成 (速度・加速度に基づく同期制御)

刺激生成は速度および加速度から行う。本稿では速度・加速度のみを用いるため、視覚運動の主要な変化

(定速移動・加速・減速) に対して刺激を追従させる設計とした。GVS は加速度の符号 (例: 前後方向) に応じて極性を切り替え、強度は条件 (無/弱/強) として切り替える。振動刺激は速度・加速度の大きさに応じて強度を変調し、頬・首の提示部位を用いて運動方向の手掛かりを補助する。

### 2.3 安全設計と同期性の確保

刺激提示では安全性と同期性が重要である。刺激制御モジュールでは、刺激指令値の急峻な変化を抑えるための平滑化 (例: 一次遅れ相当のフィルタ) を導入し、指令値の上限を飽和处理により制限する。また、緊急停止 (手動停止) を設け、異常時に刺激を停止できるようにする。同期性については、VR 側の更新周期に合わせて刺激指令を更新し、視覚運動の変化に対する刺激遅延を可能な限り小さくする。

## 3 実験

### 3.1 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、 $3 \times 2$  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

### 3.2 評価指標

VR 酔いの程度は VRSQ [6] で評価し、没入感は VAS (Visual Analog Scale) 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

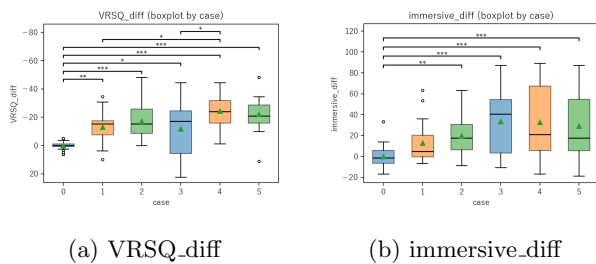


図 2: VR 酔いと没入感の条件別比較

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。

### 3.3 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。図 2 には有意差を示す。

### 3.4 結果と考察

図 2a 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、併用による重量効果が示唆された。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 2b 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样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。

## 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。

## 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.