

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[†]
横浜国立大学[†]

竹中 健祐[‡]
横浜国立大学[‡]

島 圭介[§]
横浜国立大学[§]

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生じた自己運動知覚に対し、前庭・体性感覚が不整合である場合に生じやすく、吐き気やめまい等を引き起こす。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]。人間の知覚は複数の感覚情報の統合によって形成され、複数の感覚刺激を重畠することで知覚の整合性が向上することが知られている [4]。この感覚統合の考え方に基づけば、複数感覚刺激の重畠は VR酔い低減にも有効である可能性がある。そのため前庭電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation : GVS) と振動刺激の重畠提示が有望と考えられるが、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の向上を狙う。提案システムでは VR 上の速度・加速度に基づきマルチモーダル刺激を同期制御するシステムを構築し、VR酔いの低減と没入感の向上効果を評価する。

2 提案システム

図 1 に提案システムの概要を示す。提案法では、VR シミュレーション上で生じる速度 v 、加速度 a から、それぞれの感覚刺激量を算出し、開発した刺激デバイスを用いて感覚を提示する。

2.1 ハードウェア

本稿では、前庭感覚刺激 (GVS) および体性感覚刺激（左右の振動刺激）を同時に提示可能な刺激デバイスを開発した。本デバイスは、GVS 用電流出力部と振

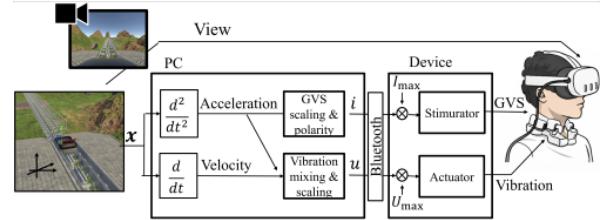
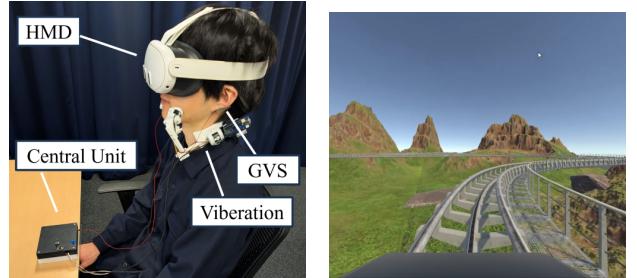


図 1: 提案システム



(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

動用駆動部から構成されており、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。

歩行時の振動を頬部に提示した先行研究 [5] が報告されているが、本稿では特定の歩行動作に依存しない一般的な移動運動を対象とする。そこで、移動速度の変化に伴って身体正面に生じる風（空気抵抗）を、頬部への振動刺激として再現することを目的とした。

振動刺激部には振動子（フォスター電機社製）を 4 つ用い、3D プリンタで作成した治具を用いて左右の頬および首周辺に配置し、それぞれを独立に駆動する。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

ユーザが不快に感じない最大刺激量として、GVS の最大電流 I_{max} と振動の最大振幅 U_{max} を予め設定し、ソフトウェア上で算出される無次元の指令値（GVS : $i(t)$ 、振動 : $u_R(t), u_L(t)$ ）を乗算した刺激量を与えるこ

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

[†]Sota Takasuga, Yokohama National University

[‡]Kensuke Takenaka, Yokohama National University

[§]Keisuke Shima, Yokohama National University

[¶]Koji Shimatani, Prefectural University of Hiroshima

とで、被験者ごとに最適化した感覚刺激を提示する。

提案法では、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ている速度 $v(t)$ 、二階微分により加速度 $a(t)$ を算出する。

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}, \quad a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (1)$$

前庭感覚は加速度に対して感度を持つため、GVS では加速度に比例して GVS 指令値を生成する。スケーリング係数 k_a を用いて

$$i(t) = k_a a(t) \quad (2)$$

とし、最終的な電流は次式で与える。

$$I(t) = I_{\max} i(t) \quad (3)$$

体性感覚については風の再現を目的とし、空気抵抗が速度に比例するという物理的性質に基づき、速度に比例した振幅の振動刺激を頬部に与える。振動刺激は左右のアクチュエータを独立に駆動する。速度の大きさ $|v_{fwd}(t)|$ と加速度 $a(t)$ を混合して振幅指令値を生成する。混合比 r (速度側の重み) およびスケーリング係数 k_v を用いて

$$u_R(t) = (1 - r) i(t) + r k_v |v_{fwd}(t)|, \quad (4)$$

$$u_L(t) = -(1 - r) i(t) + r k_v |v_{fwd}(t)| \quad (5)$$

とする。最終的な振動刺激量は

$$U_R(t) = U_{\max} u_R(t), \quad U_L(t) = U_{\max} u_L(t) \quad (6)$$

とし、右・左の振動アクチュエータを駆動する。

3 実験

前庭・体性感覚の重畠刺激による 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 歳 ± 1.5 歳) に対して実験を行った。

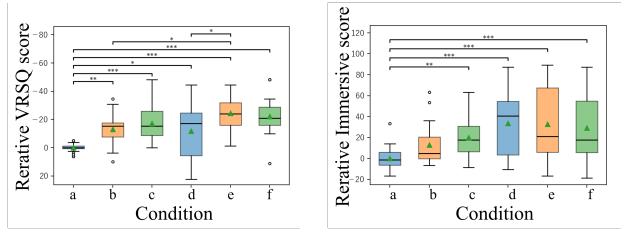
被験者は HMD を装着し、Unity 上で提示されるコマスター体験タスクを実施した。タスク時間は 1 分とし、簡易化のため視点運動は左右方向の運動成分のみを持つように設計した。図 2 に被験者装着の様子とタスク画面を示す。また、 $I_{\max} = 2 \text{ mA}$, $U_{\max} = 10 \text{ mm}$, $k_a = 1$, $k_v = 1$, $r = 0.7$ とした。

実験では前庭電気刺激について無・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] を被験者自身に回答させ、没入感を Visual Analog Scale (VAS) で取

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



(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

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、改善した。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、マルチモーダル刺激による重畠効果が示唆された。

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見られる。しかしながら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。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、コンテンツや運動条件が異なる場合でも安定して効果を示す汎用的な感覚提示手法の確立を目指す。

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] 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, 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.
- [4] Marc O. Ernst and Heinrich H. Bülthoff. Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 8, No. 4, pp. 162–169, 2004.
- [5] Shi-Hong Liu, Neng-Hao Yu, Liwei Chan, Yi-Hao Peng, Wei-Zen Sun, and Mike Y. Chen. 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, 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.