

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[†]
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、吐き気やめまい等の不快が体験品質を低下させる。これに対し、前庭感覚や体性感覚に対して感覚刺激を打つ手法が提案されているが、それらの重畠刺激は検討されていない。

そこで本研究は、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・加速度に基づき同期制御するシステムを構築し、VR酔いと没入感へそれぞれの刺激デバイスの影響を評価する。

2 システム

提案システムでは、VRシミュレーション上で生じる前方速度 v_{fwd} 、左右加速度 a_{lat} 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。

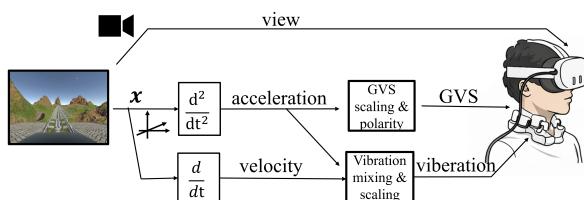


図 1: 提案システム

2.1 刺激量算出部

提案システムでは、予めユーザの不快に感じない最大の刺激量 (GVS: I_{max} , U_{max}) を設定し、VR上の位置

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

情報から算出される刺激量 (GVS: i , 振動: u) を蒸散した刺激量を提示する。ただし、 $-1 \leq i \leq 1$, $0 \leq u \leq 1$ である。ここで速度、加速度は基準値を 1 m/s , 1 m/s^2 として正規化して用いる。

$$\hat{a}(t) = \frac{a_{lat}(t)}{a_{ref}}, \quad \hat{v}(t) = \frac{|v_{fwd}(t)|}{v_{ref}} \quad (1)$$

ただし、 $\hat{a}(t)$ について -1 未満の場合は -1 , 1 を超える場合は 1 とし、 $\hat{v}(t)$ について 1 を超える場合は 1 とする。

GVS の刺激量は、左右方向加速度の正規化量を用いて以下の式で算出する。

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

$$I_{gvs}(t) = I_{max} u_{gvs}(t). \quad (3)$$

振動刺激は右・左それぞれのアクチュエータの振幅量を算出する。ここで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) として右・左の振動制御量は次式で与える。

$$u_R(t) = (1 - r)\hat{a}(t) + r\hat{v}(t), \quad (4)$$

$$u_L(t) = -(1 - r)\hat{a}(t) + r\hat{v}(t). \quad (5)$$

ここで、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、 $0 \leq u_{vib,R}(t), u_{vib,L}(t) \leq 1$ を満たす指令値とする。最終的な刺激量は $U(t) = U_{max}r(t)$ とし、右・左の振動アクチュエータを駆動する。

2.2 感覚提示部

算出した刺激量を開発した刺激デバイスを用いて提示した。刺激デバイスは大きく分けてGVS用電流出力部、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・GVSの3つの指令値を受信し、各提示系の駆動量へ変換して出力することで、視覚運動に同期したマルチモーダル刺激を実現する。

振動刺激部にはフォスター電機のFOSTER ACOUSTIC HAPTIC®を用い、頬および首周辺に配置した左右のアクチュエータを独立に駆動した。

GVSは一般的な定電流源の回路を用い、乳突部に貼付した電極を介して提示した。また、装置側のつまみにより設定した最大電流量を上限として、PCからの指令値に応じた電流を出力した。以上により、本デバ

イスは前庭電気刺激（電流）と体性感覚刺激（左右振動振幅）を同時に提示可能である。

3 実験

提案デバイスの性能検証のために献上若年者8名（21-24歳）に対して実験を行った。

3.1 条件

被験者はHMDを装着し、Unity上で提示されるコスタ一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。



(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

実験では前庭電気刺激について無・弱（感覚閾値未満）・強（約2mA）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。刺激条件の対応を表1に示す。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（刺激条件の対応）

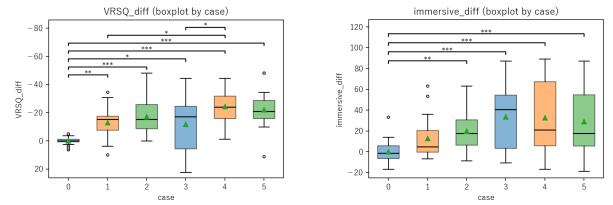
条件	前庭電気刺激（GVS）	振動刺激
a	無	無
b	弱（感覚閾値未満）	無
c	強（約2mA）	無
d	無	有
e	弱（感覚閾値未満）	有
f	強（約2mA）	有

評価指標としてVR酔いの程度をVirtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ) [2]で評価し、没入感を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条件a（刺激なし）を基準とした差分を算出し、各条件間でボンフェロー補正を適用した多重比較検定を行った。

3.2 結果と考察

図3aに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と比較して、両方を併用した条件で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。

図3b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。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

本稿では、視覚運動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、個人適応を導入し、刺激設計の最適化を進め、コンテンツや運動条件が変化しても安定して効果を発揮する汎用的な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] 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.