



「慣性力」を付与する 力覚呈示 VR シミュレータシステムの構築

Construction of a Force Presentation Virtual Reality Simulator System that Imparts “Inertial Forces”

鈴木捷己¹⁾, 福士舜介¹⁾, 園部光希¹⁾, 佐々木快¹⁾, 西山雄大¹⁾, 野村収作¹⁾,
Katsuki SUZUKI, Shunsuke FUKUSHI, Mitsuki SONOBE, Kai SASAKI,
Yuta NISHIYAMA, and Shusaku NOMURA

1) 長岡技術科学大学 情報・経営システム工学分野 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

概要: 近年, Virtual Reality (VR) 技術は技能訓練や認知行動療法など幅広い分野で活用されている。一方で, VR 環境に晒されることで, 乗り物酔いに似た症状が現れる「VR 酔い」と呼ばれる現象が報告されている。VR 酔いが発生する一因として, 視覚と前庭・体性感覚との不一致に起因するという感覚矛盾説がある。これに対し, 本研究ではバイク走行中にライダーが受ける慣性力を再現するため, 外的に張力を呈示するシステム構築した。具体的には被験者の腰部を前後左右の 4 方向からステッピングモータにより牽引する機構を用い, 走行時の映像と同期させることでユーザーに外力を呈示するシステムを実装した。

キーワード: VR 酔い, 慣性力, 力覚

1. はじめに

1.1 背景

現在, VR はエンターテインメントのみならず, 医療, 教育, 訓練, 建築設計など多岐にわたる分野で活用が進んでいる[1][2]。

その一方で, VR 体験中に発生する「VR 酔い」と呼ばれる症状は, ユーザの利用継続を妨げる大きな要因となっており, その対策は VR システムの実用化・高度化において重要な課題となっている。

近年, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の進歩による視覚呈示技術が進歩すると同時に, 視覚以外の感覚呈示技術も研究も進められている。Sawada ら (2020) はバイク型筐体の座面を振動させることで実車運転時のような振動刺激を呈示するシステムを構築している[3]。また, Jung ら (2021) も同様に振動に着目し, 床の振動によってオフロード走行時の揺れを再現する VR システムを構築している[4]。しかしながら, これらの研究では, ライダーやドライバーの身体に作用する慣性力の再現には至っていない。

感覚矛盾説[5]では, 視覚と前庭感覚の不一致が酔いを引き起こすとされている。VR 環境でのバイク体験においても HMD 上の映像が動く一方で, ユーザーの身体にはそれに応じた運動が生じないため, 視覚と前庭感覚の不一致が生じ, これが VR 酔いの要因の一つとなっている可能性が

ある。

VR 環境において慣性力を呈示する技術の開発は感覚の矛盾を緩和し, VR 酔いの低減及び, リアリティ向上に寄与する重要な課題であると考えられる。

1.2 目的

本研究は, VR 酔いの原因の一つである「視覚と前庭感覚のずれ」, 特に慣性力の欠如によって生じる違和感に着目し, それを緩和する物理的な刺激がどの程度効果を持つかを評価することを目的とする。我々が知る限り, VR ユーザに対して映像と同期して張力を与えるシステムは見当たらない。VR 映像と同期して腰部に前後左右の張力を加える力覚提示システムを構築し, その有無による VR 酔いやユーザー体験の差異を分析することで, 外力提示の有効性とそのメカニズムの一端を明らかにする。

2. システム設計・構成

2.1 VR シミュレータシステム

本研究ではバイク運転時にライダーが感じる, 慣性力を再現した外力呈示を 4 方向から行うシミュレータシステム (図 1) を構築した。図 2 に示すように, 自転車型筐体に搭乗したユーザーの腰部に固定したラインにステッピングモータを介して, 張力を与えることで力覚呈示を行う。自転車筐体を囲むように 6 本の櫓を構成し, 筐体中心の

延長線上に4台のステッピングモータを配置した。自転車筐体は左右に30°ずつ傾斜可能である。

本システムでは、ユーザーがHMD・ハーネス・ヘッドホンを装着する。ハーネスにはカラビナを取り付け、カラビナの先にはラインを結びつけている。また、転倒防止のために、ハーネスには安全帯が付いており、シミュレータ上部の梁に安全帯を装着した状態でユーザーが自転車筐体に搭乗する。

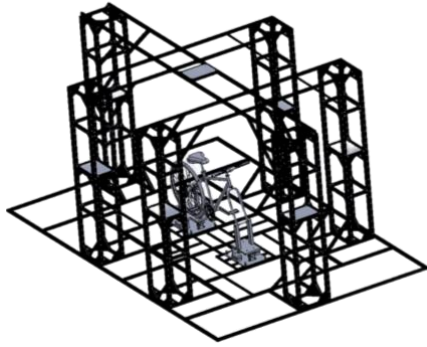


図1: フレームと自転車筐体

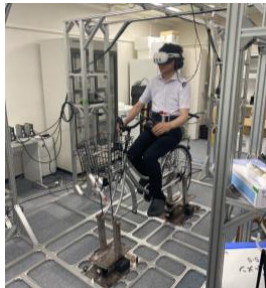


図2: 張力呈示の様子

2.2 ステッピングモータ

モータには高精度な回転角及び回転速度の制御が可能なステッピングモータ（ARM98AC-PS25, Oriental motor）を選定した。ステッピングモータでラインを巻き取るために、モータシャフトには丸ベルト用プーリ（MBRDA60-5-N18, MISUMI）を接続した（図3）。

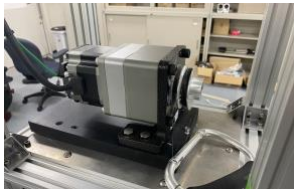


図3: ステッピングモータとプーリ

2.3 VR映像コンテンツ作成

本システムでは視覚情報として、First Person View (FPV) オートバイ映像をHMD（Meta Quest 3, Meta Platforms, Inc.）を介してユーザーに呈示する。

VR映像はヘルメットに取り付けた360°カメラ（GoPro Max, GoPro, Inc.）を用い、実際のバイクライディング映像を撮影した（図4）。また、ライダーが受ける加速度を取得するために、腰部にInertial Measurement Unit（IMU）セン

サ（AMWS020B, ATR-Promotions）を固定し、サンプリング周波数100[Hz]で加速度を計測した。

VR映像の撮影は、あらかじめ設定した数種類のコースを走行した。作成した映像を図5に示す。



図4: コンテンツ撮影の様子



図5: VR映像のスナップショット

2.3 目標値

ステッピングモータの目標値はIMUセンサで取得した加速度にローパスフィルタでノイズ除去を施した後、以下の通りに作成した。

加速度データを用い、式(1)よりロール角： θ_r 、式(2)よりピッチ角： θ_p を導出した。これらのオイラー角を基にPEラインの巻き取り長さを求める。この巻き取り長さをステッピングモータへ入力するパルス量に変換し、これを目標値とした。作成した目標値の一例を図6に示す。

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{a_z} \right) \quad (1)$$

$$\theta_p = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{(a_y)^2 + (a_z)^2}} \right) \quad (2)$$

a_x : x軸方向の加速度センサ出力値

a_y : y軸方向の加速度センサ出力値

a_z : z軸方向の加速度センサ出力値

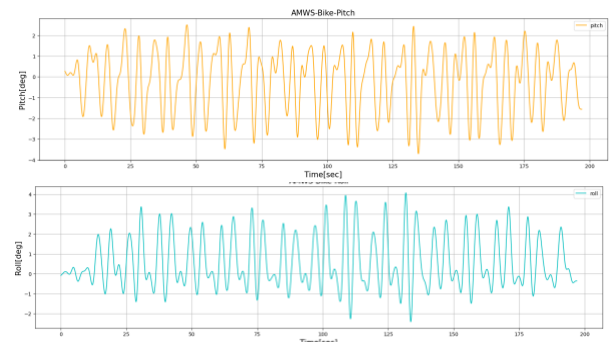


図6: 目標値（上：左右方法，下：前後方向）

2.4 制御手法

VR 映像の再生および、ステッピングモータ制御にはゲームエンジン Unity (Unity Software Inc.) を用いた。ステッピングモータは Unity から API を介して送信される制御指令をモーションコントロールボード (SMC-8DL-PE, CONTEC) が受け取り、モータドライバ (ARD-A, Oriental Motor) を経由して駆動される (図 7)。尚、ステッピングモータの制御には、調整パラメータが少なく扱いやすい PID 制御を採用した。

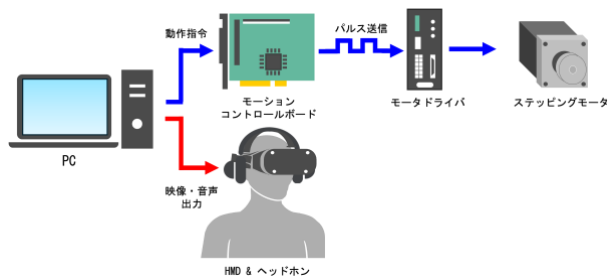


図 7. システム構成

3. ユーザ評価と考察

本システムの初期的なユーザ評価の結果、張力呈示がない場合と比較して、張力呈示ありの条件では VR 酔いの軽減を実感したとの意見が複数の参加者から得られた。これにより、視覚情報に加えて身体への力覚刺激を与えることが、VR 酔いの一因とされる感覚の矛盾 (Sensory Conflict) を緩和する可能性が示唆された。

評価には 6 名の学生が参加し、2 条件 (張力呈示: 有り/無し) を呈示し、いずれもシステムを体験後に聞き取り調査を実施した。映像と力覚の同期性に対しては全員が肯定的な意見を示し、特に自動二輪車の運転経験を持たない参加者からは、シミュレータによってリアルな運転体験が得られたとの好意的な感想が多く寄せられた。

ほとんどの参加者に VR 酔い症状は見られなかったが、一部の条件では軽度の VR 酔いの兆候を訴える者もいた。さらに、自動二輪車の運転経験を持つ参加者の一部からは、コーナリング時の操作に関して「バイクを傾けずにハンドルだけで曲がろうとする挙動」に違和感を覚えたとの指摘があった。この点は、実際のライディング体験と VR 映像内の操作挙動が一致していないことに起因すると考えられ、実写映像の取得方法やライダーの操縦スタイルがユーザー体験に与える影響を示す重要な示唆と考えられる。

本システムにおける張力呈示は没入感やリアリティの向上に寄与し、同時に VR 酔いの軽減にもつながる可能性があると考えられる。

4. むすび

本稿では、VR ユーザに対して「慣性力」を呈示するこ

とで没入感やリアリティの向上を図る力覚シミュレーションシステムの構築内容と、今後実施を予定しているバイク走行映像を用いた実験計画の概要について述べた。

本システムは、バイク走行映像に特化したものではなく、スノーボードや滑り台といった他の移動系 VR コンテンツにも応用可能であり、今後はさまざまな動的体験を再現する VR 環境に展開していく予定である。こうした展開を通じて、VR 空間における身体感覚の再現性を高めるだけでなく、視覚・前庭感覚・体性感覚の統合プロセスや、その不一致が人間の認知や行動に与える影響についても、より深く検討していくことができると考えている。

最終的には、VR 技術を用いた新たな知覚・認知研究の基盤として、本システムが有効に活用されることを目指している。

参考文献

- [1] Hamid Bateni, Jenna Carruthers, Rebecca Mohan, Seyedamirhossein Pishva : Use of Virtual Reality in Physical Therapy as an Intervention and Diagnostic Tool, *Rehabilitation Research and Practice*, Vol. 2024, 1122286, 2025.
- [2] Fabio Richlan, Moritz Weiß, Patrick Kastner, Jeremias Braid, Virtual training, real effects: a narrative review on sports performance enhancement through interventions in virtual reality, *Frontiers in Psychology*, Vol. 14, 1240790, 2023.
- [3] Y. Sawada, Y. Itaguchi, M. Hayashi, K. Aigo, T. Miyagi, M. Miki, et al., Effects of synchronised engine sound and vibration presentation on visually induced motion sickness, *Scientific reports*, Vol. 10, No. 7553, pp. 203-220, 2020.
- [4] S. Jung, R. Li, R. McKee, M. C. Whitton, and R. W. Lindeman, Floor-vibration VR: Mitigating Cybersickness Using Whole-body Tactile Stimuli in Highly Realistic Vehicle Driving Experiences, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.27, No. 5, pp. 2669-2680, 2021.
- [5] J. T. Reason, Motion Sickness Adaptation: A Neural Mismatch Model, *Journal of the Royal Society of Medicine*, Vol. 71, No. 11, pp.819-829, 1978.
- [6] Julia Ciążyńska, Michał Janowski, Janusz Maciaszek, Effects of a Modern Virtual Reality 3D Head-Mounted Display Exergame on Simulator Sickness and Immersion Under Specific Conditions in Young Women and Men: Experimental Study, *JMIR Serious Games*, Vol. 10, No. 4, 2022:e4123