

# VR 運転訓練における HMD フレームレート低下とその知覚がペダル操作反応時間に及ぼす影響

前原宙<sup>†1</sup> 橋本渉<sup>†2</sup> 水谷泰治<sup>†2</sup> 西口敏司<sup>†2</sup>

**概要**：VR の訓練環境において、注意喚起したい物体を見た際に HMD のフレームレートを意図的に低下させることでユーザに気付かれないような視線誘導を行い、特定の物体への注意喚起が可能か検証した。これを検証するために、ドライビングシミュレータにおいて特定の物体を見たときにフレームレートを低下させ、アクセル・ブレーキ反応時間の変化を調べた。この実験から、注意を向けるべき対象を見たときにフレームレートを低下させると、反応時間が短縮されることが分かった。さらにフレームレート低下の知覚有無によって反応時間への影響が異なり、フレームレート低下は気づかれない範囲であれば、注意喚起手法として有効である可能性が示唆された。

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)技術は、教育や医療など幅広い分野の訓練に活用されている。VR 訓練では、ユーザが注目すべき箇所を適切に教示することが重要であり、視線誘導はその有効な手段である。矢印やコントラスト[1]などの視覚的強調により実現できる一方、これらは知覚されやすく、違和感や不快感によって没入感を損ねる可能性がある[2]。このため、ユーザが視線誘導に気づきにくく、自然に注意を向けられる手法が望まれる。

そこで本研究では、HMD のフレームレートを低下させることで、ユーザに意識されることなく注意喚起を行う手法の有効性を検討する。先行研究によれば、フレームレート低下はユーザに意識されることなく、視線停留時間に影響を与える可能性が示唆されている[3]。そこで、訓練中に注意すべき箇所に視線が向いた際に HMD のフレームレートを低下させ、注意喚起を行うことで反応時間に影響が生じるのではないかと考えた。

本研究では訓練対象として自動車の運転を扱う。運転中の映像は常に動き続ける点に着目し、画面全体が変化する状況下では HMD のフレームレート低下が知覚されやすく、注意喚起の効果を高めると考えた(図 1)。さらに本研究では、フレームレート低下を知覚したかどうかによる反応時間の差にも着目する。

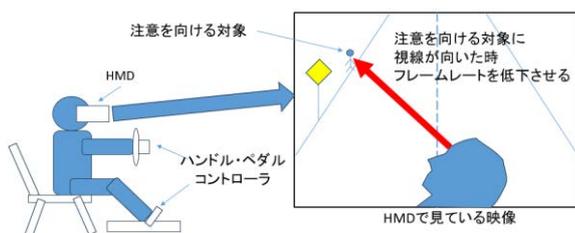


図 1 ドライビングシミュレータにおけるフレームレート低下の概要図

## 2. フレームレート低下の実装環境

先行研究[1]の、特定領域を注視した際に VR 画面全体のフレームレートを低下させる手法をドライビングシミュレータへ適用した。この手法は VR 空間に 2 台のカメラを配置し、視線入力に応じてアクティブ・非アクティブを切り替えることで実現する。使用デバイスは先行研究と同じ VIVE Pro Eye (90fps) であり、視線が注意喚起領域に向いた際には 90 の約数となるフレームレートに低下させる。予備実験より 45fps は効果が弱く、1~10fps は VR 酔いや運転支障の懸念があるため、先行研究と同じ 15fps および 30fps を採用した。ドライビングシミュレータのハンドルおよびペダル操作には、Thrustmaster 社のステアリングコントローラの T150 とアクセル・ブレーキ用のペダルユニット T3PA を用いた。また、Unity 上で都市道路環境を構築するため、Windridge City アセットを活用してリアルな運転環境を構築した。システム実装の様子を図 2 に示す。

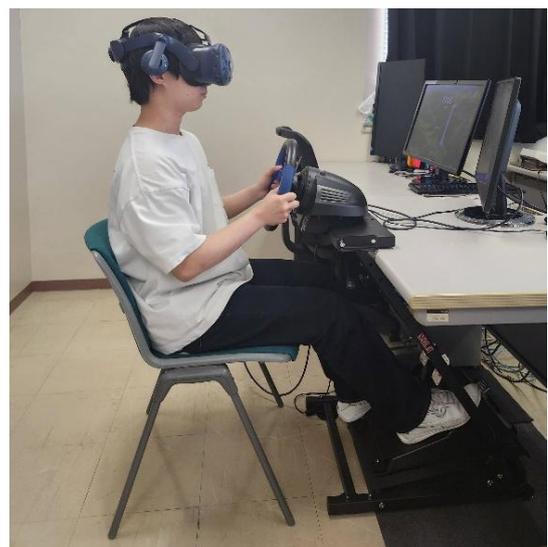


図 2 実験の様子

†1 大阪工業大学 大学院情報科学研究科

†2 大阪工業大学 情報科学部

### 3. 動的物体への注意喚起における反応時間の影響

#### 3.1 実験目的

動的物体（飛び出し対象）そのものに視線を向けたときにフレームレートを低下させることで注意喚起を行い、反応時間にどのような影響を与えるかについて検証する。ここでは動的物体の大きさが反応時間に与える影響に着目し、動的物体として歩行者やトラックも飛び出し対象に含めている。

#### 3.2 実験環境

本研究では、実験環境として図3に示す直線道路を用意し、実験参加者には時速40kmで右から左方向へ走行する自動車を操作させた。時速40kmという速度設定は、都心部における一般的な制限速度に準拠している。

飛び出し対象である歩行者やトラックは、操作車両の進行方向に配置され、運転手側から見えている状態にある。飛び出し対象は図3に記した3か所に配置し、いずれか1か所から飛び出してくる。歩行者の飛び出し速度は、歩行者の事故が駆け足時に多く起きていることから、秒速3m(時速約10km)と設定した。またトラックの速度は、実験参加者が操作する自動車と同様の速度である時速40kmに設定した。

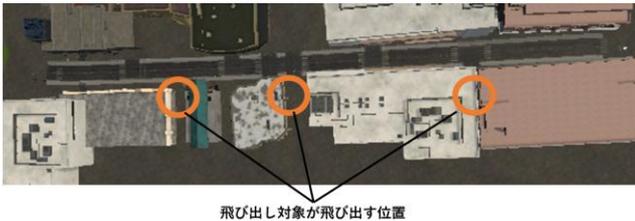


図3 一直線の道路の俯瞰図

#### 3.3 実験参加者

実験には20-23歳の大学生10名が参加した。実験開始前には視線検出のキャリブレーションを実施し、飛び出し対象がない状態で慣らし走行をしてもらった。

#### 3.4 実験条件

実験参加者が走行中に飛び出し対象（歩行者またはトラック）へ視線を向けると、映像全体のフレームレートが低下する条件（15fps, 30fps）とフレームレートが保持される条件（90fps）をそれぞれ設定し、合計6条件とした。これらの飛び出しは図3に示す3地点のいずれかからランダムに飛び出すようにし、合計18条件とした。加えて、実験参加者に歩行者が飛び出してくる箇所を予測させないようにするため、飛び出し対象が全く飛び出さない条件を2回ランダムに挿入し、最終的に計20試行を実施した。

#### 3.5 実験手順

実験参加者は休憩をはさみながら20試行をランダムな順序で走行した。各試行では、実験参加者が飛び出し対象

に視線を向けた時刻を起点として、アクセルから足を離すまでの時間、ブレーキを踏むまでの時間を記録した。また実験参加者には、フレームレートが低下することを伏せ、無意識下での反応時間を測定するようにした。図4は歩行者とトラックが飛び出してくる場面で、実験参加者の視線方向（赤線）を示している。なお、実験では実験参加者には赤線は表示されない。

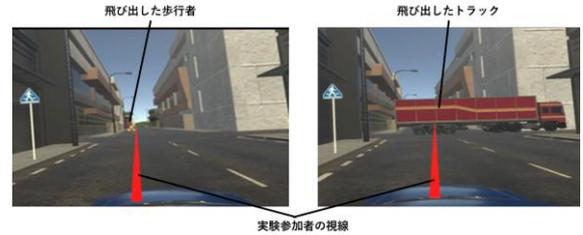


図4 歩行者とトラックが飛び出してくる場面

#### 3.6 実験結果

まず、歩行者条件について反応時間を集計した。図5には各フレームレート条件におけるアクセル操作の反応時間の平均値を示している。アクセル操作の反応時間においては、30fps条件が最も短く、次に15fps, 90fpsの順であった。

この傾向を統計的に検証するため、各fps条件間の比較にフリードマン検定を用いた。その結果、アクセル操作までの時間において、5%水準で有意な差が認められた( $p=0.012<0.05$ )。ブレーキを踏むまでの時間においても有意な差が認められたが、フレームレート低下が主にアクセル操作という初期反応に影響を及ぼしている可能性があることが示された。さらにホルム法による多重比較の結果、30fpsと90fpsの条件間において30fpsのほうが有意な順位差が認められた( $p=0.009<0.05$ )。

次に、トラック条件について反応時間を集計した。アクセル操作の反応時間においては、歩行者条件同様、30fps条件が最も短く、次に15fps, 90fpsの順であった。ブレーキ操作も同様の傾向が見られた。しかしながらフリードマン検定によれば、有意な順位差を確認できなかった。

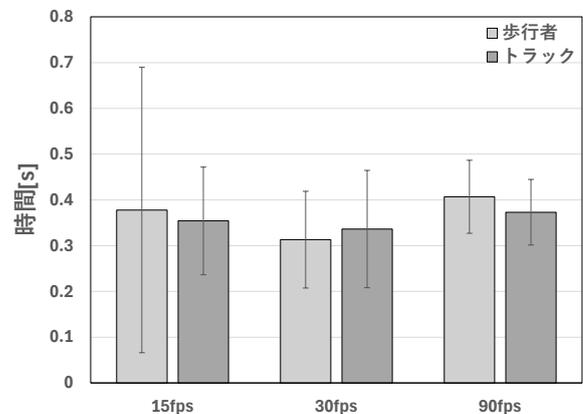


図5 飛び出し対象を見てからアクセルから足を離すまでの時間

15fps まで低下させた条件では、フレームレート低下を知覚した実験参加者は 8 名、知覚しなかった参加者は 2 名であり、知覚の有無が注意喚起の有効性や反応時間に影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、有意な順位差が表れた歩行者条件において、フレームレートの知覚有無により参加者を分類して、追加の分析を行った。知覚の有無は、実験後の質問への回答に基づき、こちらからフレームレート低下を行っていることに気が付いた参加者、システムの不具合だと感じた参加者を「知覚あり」、それ以外を「知覚なし」として分類した。図 6 にフレームレート低下の知覚の有無による歩行者を見てからアクセルから足を離すまでの時間の比較を示す。知覚しなかった 2 名分の図は、人数が少ないため信頼性が低いが参考のため記載した。

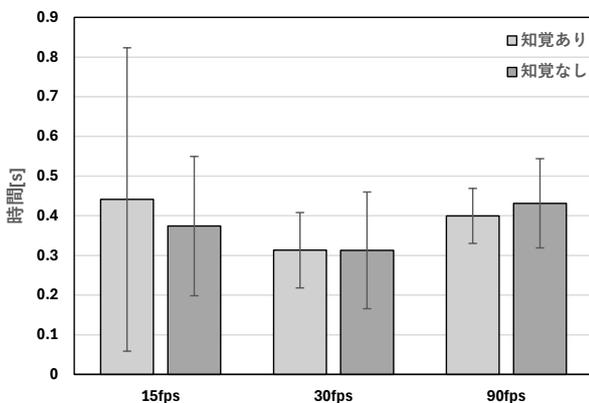


図 6 フレームレート低下の知覚有無による歩行者を見てからアクセルから足を離すまでの時間の比較

歩行者が飛び出し対象である場合、フレームレート低下を知覚した実験参加者では、アクセルから足を離すまでの時間は、30fps 条件が最も短く、次に 90fps、15fps の順であった。一方、フレームレート低下を知覚しなかった実験参加者では、アクセルから足を離すまでの時間は、30fps 条件が最も短く、次に 15fps、90fps の順であった。

### 3.7 考察

飛び出し対象が歩行者の場合では、30fps、15fps、90fps の順で反応時間が短縮される傾向があり、有意差も確認された。15fps という低下条件は、フレームレートによる視覚への刺激が大きく、一部の実験参加者では逆に反応時間が延びるという傾向も確認された。知覚されうる過度なフレームレート低下は注意喚起どころか反応を遅延させるリスクが示唆される。

一方、大型のトラックを対象とした条件では反応時間の短縮傾向が見られたものの、当初の予想に反して有意な差は認められなかった。このことは、大型の物体には常に注意を向けており、フレームレート低下による注意喚起効果が機能しにくいのではないかと考えられる。実際、飛び出し対象がトラックの場合は、歩行者の場合に比べて反応時

間短い傾向にある。小さな歩行者は平常時の視認性が低いため、注意喚起が効果的に作用したと考えられる。

また、フレームレート低下を知覚した参加者で 15fps という過度なフレームレート低下が反応時間の増加につながる傾向が見られたことは、映像の不自然さが注意や操作に干渉した可能性がある。さらに、知覚あり群の 15 fps 条件ではばらつきが大きく、注意喚起として機能する参加者と、違和感により操作が阻害される参加者が混在している可能性が示唆される。この差は、VR 経験や運転経験などの個人差に起因すると考えられる。

一方、フレームレート低下を知覚しなかった参加者では一定程度の低下が許容される傾向が見られ、フレームレート低下は知覚されない範囲であれば注意喚起手法として有効である可能性が示唆される。

## 4. 終わりに

本研究では、HMD の描画面全体のフレームレートの低下が、VR 訓練の注意喚起へ影響を及ぼすかを調査した。ドライビングシミュレータを用いて、特定の物体に視線が向いた際にフレームレートを低下させることで、アクセル・ブレーキの反応時間に影響を及ぼすかを調査した。実験の結果から、注意を向けるべき対象を見たときにフレームレートを低下させると、反応時間が短縮することが明らかとなった。さらに、注視対象の大きさが小さい場合ほど、フレームレートをより低下させることで、注意喚起効果が高まる可能性が示唆された。さらに、知覚の有無によって反応時間への影響が異なり、知覚されうるフレームレート低下は逆に反応時間を遅らせる可能性が示唆された。今後は実験環境をより現実に近づけ、注視対象以外にも視線を向けるべき対象がいる中でも、フレームレートを低下させることで視線誘導を行い、反応時間にどのような影響を及ぼすかを調べる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K12140 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] K. Azuma, H. Koike: "A Study on Gaze Guidance Using Artificial Color Shifts," AVI '18: Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces (2018).
- [2] L. T. Nielsen, M. B. Møller, S. D. Hartmeyer, T. C. M. Ljung, N. C. Nilsson, R. Nordahl, S. Serafin: "Missing The Point: An Exploration of How to Guide Users' Attention During Cinematic Virtual Reality," Proceedings of VRST 2016 (2016).
- [3] T. Fujiwara, W. Hashimoto, Y. Mizutani, S. Nishiguchi: "Examining the Effects of Reduced Frame Rate in HMDs on Gaze Behavior," ICAT-EGVE 2024 Posters and Demos (2024).