



# ドライビングシミュレータにおける HMD のフレームレート低下が注意喚起に及ぼす影響

Examining the Effects of Reduced Frame Rates in HMDs on Driver Attention in Driving Simulator

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>

Sora MAEHARA, Wataru HASHIMOTO, Yasuharu MIZUTANI and Satoshi NISHIGUCHI

1) 大阪工業大学 大学院情報科学研究科 (〒573-0196 大阪府枚方市北山 1-79-1, m1m02530154@oit.ac.jp)

2) 大阪工業大学 情報科学部 (〒573-0196 大阪府枚方市北山 1-79-1,  
{wataru.hashimoto, yasuharu.mizutani, satoshi.nishiguchi}@oit.ac.jp)

**概要:** ドライビングシミュレータで走行中、特定物体を見た際に、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、危険物体への注意喚起が可能か試みている。これを検証するために、ドライビングシミュレータ上で注視対象を見たときにフレームレートを低下させ、アクセル・ブレーキ反応速度の変化を調べた。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、反応時間が短縮することが分かった。

**キーワード:** VR 訓練, HMD, 注意喚起, 反応速度

## 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 を用いた訓練において学習効率を高めるためには、ユーザが注目すべき箇所を適切に教示することが求められる。これを達成するため、視線誘導は効果的な手法とされており、矢印やハイライトなど、視覚的強調を用いて実現できることが知られている。しかし、これらの視覚的強調手法はユーザが視線誘導されていることを知覚しやすく、結果として違和感や不快感を伴うことがあり、没入感を損ねてしまうことで、訓練の妨げになってしまう可能性がある。そのため、ユーザが視線誘導に気づくことなく、自然に注意を向けることが可能な手法が望まれる。

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。藤原らの研究によれば、フレームレート低下は視線停留時間に影響を与える可能性が示唆されている[1]。この先行研究を踏まえ、訓練中に注意すべき箇所に視線が向いた際、HMD のフレームレートを低下させ注意喚起を行うことで、反応時間に影響があるのではないかと考えた。

本研究では、特に適切な視線配分が求められる分野として、多くの人が使用し事故が絶えない自動車の運転に着目する。運転中の視線誘導に関する先行研究では、注目すべ

き領域を色彩で強調することにより注意喚起を図る手法が提案されている[2]。本研究では、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)。この手法が運転者の注意喚起にどのような影響を与えるか、また運転中の反応速度にどう影響するかを調査する。

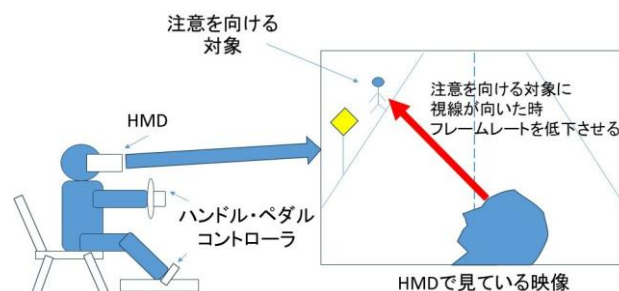


図 1 ドライビングシミュレータにおける  
フレームレート低下の概要図

## 2. フレームレート低下実現と実装

本研究では、先行研究 [1]の手法をドライビングシミュレータに適用することにした。これは特定の領域を見たときに画面全体のフレームレートを低下させる手法であり、VR 空間内に 2 台のカメラを用意することで実現している。

本研究も[1]にならって VIVE 社の VIVE Pro Eye を使用し、それらの制御のため Unity で開発を行った。VIVE Pro Eye のフレームレートは 90fps であり、注意喚起したい領域へ視線が向いた際は 90fps 未満にフレームレートを低下させる。VR 空間のカメラをアクティブ・非アクティブに切り替えていることで、フレームレートを低下させていることから、90 の約数となるフレームレートにしか設定できない。予備実験から 45fps ではフレームレート低下を知覚されにくく効果が薄いこと、1~10fps ではフレームレート低下の影響が大きく、VR 酔いを招いたり、運転に支障を来すことから、まずは先行研究と同じ 15fps と 30fps を採用することにした。なお、18fps は 15fps とほとんど大差ないため、候補に挙げていない。

ドライビングシミュレータを実装するにあたり、ハンドル操作や加減速操作には Thrustmaster 社の T150 と T3PA を使用する。システムの実装の様子を図 2 に示す。シミュレータには Unity の Windridge City というアセットを活用し、よりリアルな運転に近づけるようにした。



図 2 実装の様子

### 3. 標識への注意喚起における反応速度への影響

#### 3.1 実験目的

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。実際の運転では、標識は進行路上の危険を事前に知らせる重要な視覚情報源である。そこで本研究では、ドライビングシミュレータ上での運転中、標識に視線が向いたときにフレームレートを低下させ、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に変化があるかを調査する。視覚的違和感によって危険を迅速に察知できれば、これらの反応時間が短縮すると考えた。

#### 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。

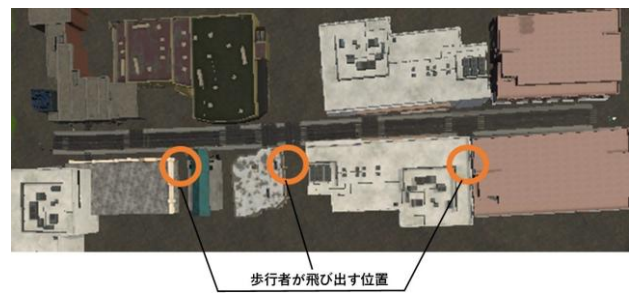


図 3 一直線の道路の俯瞰図

実験中の通常のフレームレートは VIVE Pro Eye のデフォルトのリフレッシュレートである 90fps に設定した。自動車の走行中、実験参加者の視線が指定された標識に向けられたとき、標識に「Warning」と表示され、HMD のフレームレートを 90fps のままとする条件に加え、15fps また 30fps に低下させる条件を設定した。これによって視覚的な違和感と反応速度への影響を調査する。

自動車が歩行者の位置から 25m まで接近すると、歩行者が道路上に飛び出すように設定された。この距離は、時速 40km で走行する自動車の停止距離が約 22m であることを考慮している。

歩行者は図 3 に示す 3 か所のうちいずれかに、建物の陰に隠れるように配置され、その手前に標識を配置した。図 4 は歩行者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 実験参加者視点の映像

#### 3.3 実験手順

実験には 21-23 歳の大学生 16 名が参加した。実験を始める前に視線検出精度を高めるためキャリブレーションを行い、その後、歩行者がいない状態の道路で数回慣らし走行をもらった。

実験では次の 4 条件を設定した。実験参加者が標識に視線が向いたときに①フレームレートが 15fps に低下し歩行者が飛び出す条件、②フレームレートが 30fps に低下し歩行者が飛び出す条件、③フレームレートは 90fps のままで歩行者が飛び出す条件、④90fps のままで歩行者が飛び出さない条件である。④は実験参加者に歩行者の飛び出しを

予測されないための対照条件である。歩行者の配置は図3の3か所からランダムに設定され、合計12通りの条件を用意した。

実験は12条件をランダムに4条件ずつ分割し、各セットの間に休憩をはさみながら3セット実施した。実験参加者の視線が標識に向けたタイミングを起点に、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計測した。実験参加者には、フレームレートが低下することを伏せ、無意識下での反応速度を測定するようにした。

### 3.4 実験結果

まず、標識に視線が向いてから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各条件において求めた。図5には各フレームレート条件におけるアクセルから足を離すまでの時間の平均値を示している。アクセルから足を離すまでの時間に関しては、15fps条件で最も短く、次に30fps、90fpsの順であり、フレームレートの低下が反応時間の短縮に寄与する傾向が見られた。ブレーキを踏むまでの時間も同じ傾向であった。

統計的に検証するため、各fps条件間においてフリードマン検定を実施した。その結果、標識に視線が向いてからアクセルから足を離すまでの時間において、フレームレートの違いによって5%水準で有意な差が認められた( $p=.016 < .05$ )。さらにフレームレート条件間での比較をホルム法によって行った結果、15fpsと90fpsの条件間において、15fpsのほうが有意な順位差があることがわかった( $p=.002 < .05$ )。なお、ブレーキを踏むまでの時間には差は認められなかった。

実験中にフレームレートが15fpsに低下したとき、数人の実験参加者はフレームレートの低下を知覚したが、30fpsの低下は誰も知覚していなかった。ただし、フレームレートが意図的に低下されていることは気づいておらず、動作が重くなった、と受け止められていた。

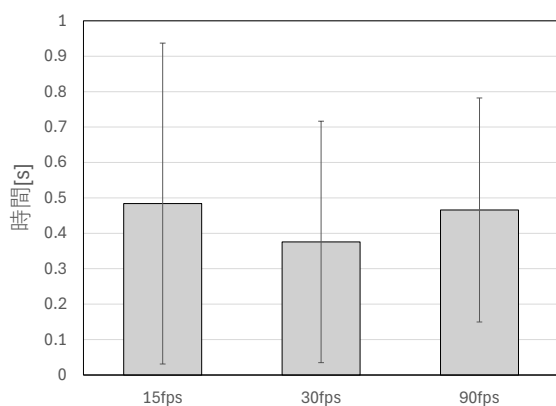


図5 標識を見てからアクセルから足を離すまでの時間

### 3.5 考察

フレームレートを低下させることにより、アクセルから足を離すまでの時間が短縮する傾向にあった。フレームレート低下により、標識上の文字の出現や歩行者の存在にも早く認識できた可能性が考えられる。特に、本研究に用い

た標識はサイズが小さく、平常時の視認性が低いため、15fpsという大きなカクツキが注意喚起として作用したと考えられる。しかし、反応時間の短縮がフレームレート低下の直接的な効果であるかどうか解釈が難しい。本実験では、標識に視線を向ける→文字の出現→歩行者の飛び出し、という視線の推移が含まれており、間接的に歩行者への反応を早めた可能性もある。

## 4. 動的物体への注意喚起における反応速度の影響

### 4.1 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、反応速度にどのような影響を与えるかについて検証する。

また、今回は動的物体の違いが反応時間に与える影響に着目し、前節の歩行者に加え、大型のトラックも飛び出し対象に含めた。トラックの方が歩行者に比べて体積が大きいため、フレームレート低下の効果が向上し、反応速度の短縮傾向が顕著に表れると推察される。

### 4.2 実験環境

前節と同様のシミュレータ環境で実験を行うが、今回は飛び出し対象として歩行者とトラックを設定する。飛び出し対象は、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こっていることから、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。

### 4.3 実験手順

実験には20-23歳の大学生10名が参加した。前節の実験と同様、実験開始前には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。

実験の条件は次の通りである。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た。これによって合計20条件について、休憩をはさみながらランダムな順で実験を行った。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間を起点として、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、無意識下での反応速度を測定するようにした。図6は歩行者とトラックが飛び出してくる場面、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。

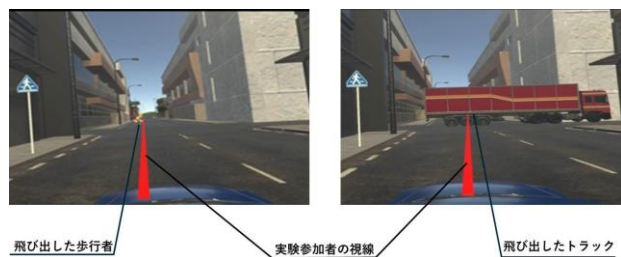


図6 歩行者とトラックが飛び出してくる場面

#### 4.4 実験結果

まず、飛び出し対象が歩行者である条件について、反応時間を集計した。図7には各フレームレート条件におけるアクセルから足を離すまでの時間の平均値を示している。アクセルから足を離すまでの時間においては、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条件間の比較においてフリードマン検定を用いた。その結果、アクセルから足を離すまでの時間において、5%水準で有意な差が認められた ( $p=.012<.05$ )。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から足を離すまでの時間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ってフレームレート条件間で比較した結果、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 ( $p=.009<.05$ )。

次に、飛び出し対象がトラックである条件について、反応時間を集計した。アクセルから足を離すまでの時間においては、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。ブレーキを踏むまでの時間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。

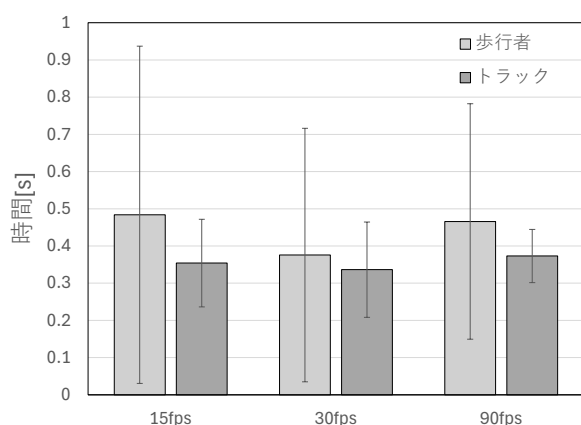


図7 飛び出し対象を見てからアクセルから足を離すまでの時間

実験中にフレームレートが15fpsに低下したとき、多くの実験参加者はフレームレートの低下を知覚したが、30fps

の低下は誰も知覚していなかった。単に動作が重くなった、という違和感として受け止められていた。

#### 4.5 考察

飛び出し対象が歩行者の場合では、30fps、15fps、90fpsの順で反応速度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。3節の実験に比べてフレームレートを知覚している実験参加者も多いことから、知覚され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が早い傾向にある。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。

#### 5. 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、危険物体に視線が向いた時にフレームレートが低下することで、アクセル・ブレーキの反応速度に影響を及ぼすかを調査した。2つの実験の結果から、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。

今後の展望として、フレームレート低下を用いたVR訓練を行った場合と、行っていない場合の実験参加者で、習熟度に影響があるかを検証する。また、視認性が低いほど注意喚起効果が効果的に表れたことから、悪環境下での適用や、自動車・歩行者の速度、距離の差で、フレームレート低下による視線誘導の影響が変化するかを調査する。

**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] 藤原徹, 橋本渉, 水谷泰治, 西口敏司: HMDのフレームレート低下が注視行動に及ぼす影響の検証, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 2024年9月
- [2] 内藤弘望, 松浦健二, 柏原昭博, 齊藤玲, 戸井健夫, 栗田弦太, 視線誘導を導入した自動車運転時の気づき支援環境, 教育システム情報学会論文誌, vol.35, no.4(2020-11), p21-2