



# 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

## Examining the Effects of Reduced Frame Rates in HMDs on Gaze Behavior

藤原徹<sup>1)</sup>, 橋本渉<sup>2)</sup>, 水谷泰治<sup>2)</sup>, 西口聡司<sup>2)</sup>

Toru FUJIWARA, 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, m1m23a26@st.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:** VR 空間内の特定領域を見た際に, 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の注意をひき, その領域に視線誘導できないかを試みている. これを検証するために, VR 空間内の 360 度に配置された正方形のパネルをすべて見てもらい, 特定のパネルを見たときにフレームレートを低下させるようにした. この実験からそのようなパネルにおいて視線停留時間に影響を与える可能性が示唆された.

**キーワード:** VR, HMD, 視線誘導, アイトラッキング

### 1. はじめに

近年バーチャルリアリティ(VR)の需要が高まっている影響で, ヘッドマウントディスプレイ(HMD)による没入映像メディアの需要も高まっている. VR 空間では HMD を使用することで, ユーザは頭の動きによって視界を自由に変えることが可能である. これによって, 自然で直感的な体験が可能になる一方で, 自由度が高い環境では, ユーザが VR コンテンツ作成者の意図した場所を見らないう問題がある. 特に物語を中心としたコンテンツや, 教育分野の使用においてはユーザに特定の場所や要素に注意を向けさせることが重要である. この問題を解決するために, VR 空間内での視線誘導を試みる. 従来の視線誘導では, 視線誘導したい領域を点滅させる, 局所的なハイライトを施すなど, コンテンツを大きく変容させる可能性がある. また, ユーザが視線誘導をされていることを認知してしまうことで, 違和感や不快感を伴うことがあるなどの問題もある. よって, ユーザに気づかれぬような視線誘導を実現することが理想的である. 本研究では, HMD のフレームレートを意図的に低下させることにより, 注視行動に影響を及ぼすかを検証する. 例えば, タッチスクリーンを用いてスワイプ量に対して, 画面のスクロール量を減少させることでユーザは粘り気や摩擦力を感じるという先行研究がある[1]. この研究を踏まえ, HMD のフレームレートを低下させることで, 同様の効果を得ることができるのではないかと考えた. 本研究では, 視線検出が可能な HMD を使用し, 視線誘導の対象に視線が向いたときにフ

レームレートを低下させることで, 注視行動に変化があるかを検証する.

### 2. 視線誘導のアイデア

#### 2.1 視線誘導と先行研究

視線誘導とは, 画像や映像の観察時に視線の動きを意図的に導く技術であり, その効果は映画や広告, 漫画など広く使用されている. 従来の視線誘導の手法としては, 局所的に点滅を施す, オプティカルフローの発生, 消失点など動的な表現が使用されてきた. しかし, 動的な表現を使用すると, 元のコンテンツの内容を変容するため汎用性が乏しくなる. そこで提案されたのが畑らの視線誘導対象の解像度制御を用いた視線誘導手法である[2]. 一般的に人間の視覚は周波数成分の高い箇所へ注意が向くという性質がある. この性質に着目し, 注意を向けたい領域を高解像度にし, 周辺領域に段階的なブラー(ぼけ)を付加することが提案されている. しかし, これらの方法は元の映像を大きく変質させないという利点があるものの, 視線を意図的に動かされているという違和感や不快感を訴えるユーザがいることもわかっている. 畑らの提案手法を本研究と同じく VR 空間内で行った研究がある. 横見ら[3]の研究では, VR 空間内において表示対象の解像度制御を行うことで視線誘導を試みる方法が提案されている. しかし, 畑らの研究と同じく実験参加者のほぼ半数が, 視線誘導の手法に不快感や不自然さがあつたと回答した.

## 2.2 フレームレート低下による視線誘導の提案

没入型 VR 空間内で、ユーザに視線誘導を知覚させない視線誘導として、フレームレートを制御する方法を提案する。視線誘導したい物体や対象に視線が向いたとき、そのタイミングで HMD に表示される描画面全体のフレームレートを低下させることにより注意を引く。例えば、HMD の画面が頭部運動に追従し、通常 90fps で更新されているとき、視線誘導をしたい領域に視線が向くと、画面全体を故意に 30fps とすることで、注意を喚起する、というものである。図 1 に提案手法の概要図を示す。図 1 中の target は視線誘導したい領域を示す。

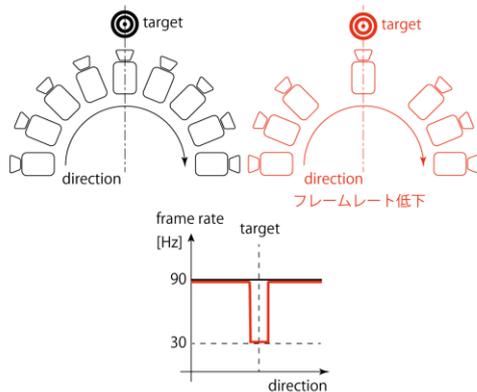


図 1 提案手法の概要図

この際、ユーザに違和感をできるだけ与えないようにするため、フレームレートの低下量を適切に設定する必要がある。本研究では、このアイデアに基づいて視線誘導を試みる。これまでの研究[4]では、フレームレート低下を用いて特定の漢字を発見するまでの時間に変化があるか実験を行った。結果として、特定の条件では有意差は見られなかったものの探索完了までの時間が短くなった。今回はフレームレート低下によって注視行動に影響を及ぼすか検証する。

## 3. VR 映像フレームレート低下の実装

特定の領域に視線が向いたとき、HMD の描画面全体のフレームレートを低下させる手法について検討する。HMD には視線検出ができる VIVE 社の VIVE Pro Eye を使用し、それらの制御には Unity を使用した。HMD のハードウェアや Unity の設定では、フレームレート低下を実現することが困難であった。そこで、HMD に表示させる映像のフレームレートを低下させる手法を実装することにした[4]。はじめに、Unity で生成する VR 空間内に 2 つのカメラを配置する。それぞれ「固定カメラ」と「VR カメラ」と呼ぶ。図 2 に固定カメラ、VR カメラとスクリーンの位置関係を示す。VR カメラは HMD の頭の動きに応じて動き、映像も変化する。このカメラの映像を、RenderTarget を用いて VR 空間内に配置されたスクリーンに投影する。RenderTarget とは、カメラによって捉えられた映像をテクスチャとして保存し、そのテクスチャを他のオブジェクトの表面に投影することを可能にするテクスチャのことである。一方固定カメラは、VR カメラ

によって投影されたスクリーン全体が画角内に収まるように配置されている。

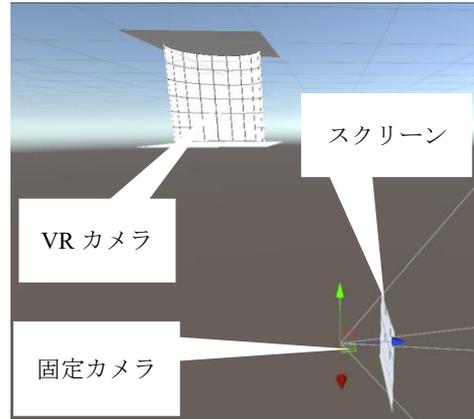


図 2 固定カメラ、VR カメラおよびスクリーンの位置関係

HMD には固定カメラの映像を出力されている。このように配置されていることで、VR 体験者は、実際には固定カメラの映像を見ているがあたかも VR カメラの映像を見ているように感じる。

次にフレームレート低下の実現方法について説明する。RenderTarget を用いて、映像をスクリーンに投影する際、VR カメラの映像取得を非アクティブ化することで、直前の映像をスクリーンに投影したまま映像更新が停止する。その後、VR カメラを再度アクティブ化すると、アクティブ化された直後に VR カメラの画角に移っている映像がスクリーンに投影される。この特性を用いて、フレームレート低下を実現する。例えば、1fps の映像を実現させる場合を考える。VR カメラを非アクティブ化したと同時に、タイマーを起動する。1 秒が経過したあと、VR カメラをアクティブ化させ、すぐに非アクティブ化し再度タイマーを 0 からスタートさせる。このようにすることで、スクリーンは 1 秒に 1 回更新されるため 1fps の映像ができる。

本研究では、視線誘導を行いたいオブジェクトや領域に視線が向いている場合、フレームレートが低下するように実装を行う必要がある。実験中は、VIVE Pro Eye のリフレッシュレートが 90Hz であることから 90fps、視線誘導したいパネルを見ているときは、10fps、15fps、30fps になるように設定した。フレームレート低下時の 30fps は、予備実験でフレームレートの低下に気づくフレームレートを調査した際に、実験参加者全員が気づいたフレームレートが 30fps であったことに基づいている。15fps と 10fps は、30fps より数値が低くかつ、リフレッシュレート 90Hz の約数であることから採用した。90 の約数でなければ、適切なフレームレートを体験できないためである。

## 4. フレームレート低下による注視行動の調査

### 4.1 実験目的

フレームレートを低下させることによって注視行動に影響を及ぼすかについて調べる。ここでは、正方形のポリゴン（以下パネルと呼ぶ）が自分の周囲に円筒形で並んで

いる実験環境において、特定のパネルに視線が向いている場合にフレームレートを低下させたとき、そのパネルを見ている時間に変化があるかを調査する。また、パネル上を推移する視線の動作に影響があるかも調査する。フレームレート低下によって注視行動に影響を及ぼすならば、パネルを見ている時間に偏りが生じるはずだと考えた。

#### 4.2 実験環境

3で述べたVRカメラを中心に、白い無地のパネルを円筒形に配置した。図3に実験環境の俯瞰図を示す。

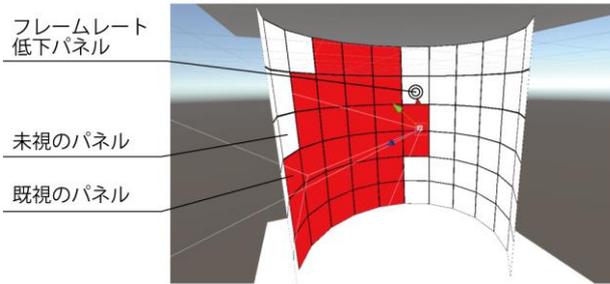


図3 パネルを網羅的に見たときの視線移動に関する実験環境の俯瞰図（パネルの大きさ：20度）

パネルの大きさによる違いを比較するため、3種類のパネルを用意した。それぞれ360度に18枚（水平面角20度相当、以下20度と呼ぶ）、15枚（以下、24度と呼ぶ）、12枚（以下、30度と呼ぶ）配置されている。四角形の形状が正方形となるよう、縦方向の長さも横方向に合わせている。

20度、24度、30度の条件において、あらかじめ決めておいたパネルに視線が向いたとき、3で述べた方法によりフレームレートを低下させた。低下するフレームレートは10fps、15fps、30fpsであり、3枚のパネルは20度、24度、30度の条件間では異なる場所に配置した。

実験では、フレームレートが低下するパネルを一度でも見てもらわなければ、その注視行動の変化を評価することができない。このため、少なくともパネルを1回は見てもらわないと成立しない。このため、実験タスクはすべてのパネルを最低1回ずつ見てもらうこととし、一度見たパネルは白色から赤色に変化させることにした。

#### 4.3 実験手順

実験参加者は20-24歳の大学生10名である。実験を始める前に、視線を正しく検出するために実験参加者前にキャリブレーションを行う。そのあと、実験者が開始の合図で、パネルを見て白色から赤色に変化させること、すべてのパネルを赤色に変更できたかどうかは、実験者が見ていることを伝えた。

パネルの設置角度20度、30度、24度の順番で各1回ずつ合計3回実験を行った。実験では、開始の合図から最後のパネルが赤色に変化するまでの時間を計測している。なお、実験参加者には、フレームレートが低下することは伏せて実験に参加してもらった。

#### 4.4 実験結果

それぞれのパネルをどの程度見ていたかを評価するた

め、ヒートマップを作成した。ここで、実験の所要時間は実験参加者や実験条件によって異なるため、実験参加者が各パネルを見ていた合計時間を、実験の所要時間で割り、実験時間内にそのパネルを見ていた割合として正規化した。その値を全実験参加者で平均化し、ヒートマップを作成することにした。作成したヒートマップの一部について、20度の場合を図4、24度の場合を図5、30度の場合を図6に示す。ヒートマップの中央は実験開始時の位置であり、端に行くにつれて開始点から離れていくようになっている。また、ヒートマップ上で端と端はつながっていないように見えるが、元は円筒形であるため実際は隣接している。

図5について、フレームレート低下パネルの内15fpsが最も見られているが、通常のパネルと比べると割合が顕著に高いとは言いづらい。図6について、15fps、30fpsに関して見られている割合が高いことがわかる。図7について、いずれのフレームレート低下パネルも割合が高いことがわかる。また、どの条件下でも上から2番目の列はほかの列と比べて見ている割合が高いことがわかる。

なお、実験参加者が実験開始直後に見るパネルは、注視時間が一律に長くなることがわかった。実験開始の合図から実験参加者が注視行動を行うまで時間差があるため、開始地点に数値が偏ってしまうからである。このため、実験開始直後に見たパネルがフレームレート低下パネルであった場合は、その実験結果を除外することにした。念のため、実験開始直後から視線がパネル上を推移して、3パネル以内にフレームレート低下パネルが含まれる場合も除外している。また、実験中フレームレート低下を知覚した実験参加者はいなかった。

#### 5. 考察

特定のパネルを見たときにフレームレートが低下することで、そのパネルを注視する時間や頻度が大きくなるのではないかと考えていたが、明確にそのような結果は得られなかった。例えば図4より、フレームレート低下パネルと通常のパネルの割合を比べても、大きな差は見られないことからフレームレート低下による影響が小さいと考えられる。次に図5、図6では、フレームレート低下パネルについて、ヒートマップに偏りが見られる。このような結果が得られたのは、20度に配置されたパネルの面積が小さく、通過するときにフレームレートが低下する時間が短かったことが原因と考えられる。しかし、全体を通して注視している割合が高い領域がある。特に上から2番目の行は顕著である。各行に関する違いを確認したところ、最も低い行と比べて1.65倍見られていた。この行は、実験参加者がやや仰ぎ見るところに位置する。人間の周辺視野は仰角方向と比べ俯角方向に広く、パネル全体を周辺視野に捉えようとしたため仰ぎ見がちだったとも考えられる。今後はこれらの影響も考慮して考察していく必要がある。また、実験参加者のデータを個別にみると、フレームレート低下パネルを見ている割合がほかのパネルより高く、注視行動変化の効果が見られた人もいた。



図 4 パネルを 20 度で配置したときのヒートマップ



図 5 パネルを 24 度で配置したときのヒートマップ



図 6 パネルを 30 度で配置したときのヒートマップ

6. 終わりに

今回の研究では、HMD の描画面全体のフレームレートを低下させることで、注視行動に影響を及ぼすかを調査した。正方形のパネルに囲まれた VR 空間全体を見てもらい特定のパネルを見たときにフレームレートが低下することで注視行動にどのような影響を及ぼすかを調査した。実験の結果から、パネルの面積が小さいときは、大きいときに比べてフレームレートが低下するパネルを見る割合が低く、フレームレートが 15fps と 30fps に低下するとき見ている割合が高い可能性がある。ただし、VR 空間内で目線に近い高さにあるパネルは、見られる割合が高いことは考慮する必要がある。

今後の展望として、フレームレート低下が起きない場合との比較や、場所による影響の排除を行う。また、現実空間を模した VR 空間でも検証していく。

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] 橋本 健, 鳴海 拓志, 長尾 涼平, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝: タッチスクリーンでの擬似触力覚提示による注意誘導, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No.3, p.139-148, 2018
- [2] 畑 元, 小池 英樹, 佐藤 洋一: 解像度制御を用いた視線誘導, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.4, 1152-1161, 2015
- [3] 横見 栄聡, 大久保 雅史, 磯山 直也, 酒田 信親, 清川 清: バーチャル空間における解像度制御を用いた視線誘導手法の提案, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 6C-02, 2019
- [4] 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漢字探索タスクの所要時間に与える影響, 情報処理学会 インタラクション 2024, pp.815-819, 2024