



# HMD ユーザの視線を誘導するための解像度制御の基礎検討

A Fundamental Study on A Method for HMD Wearer's Gaze Guidance Using Resolution Control

沈有方<sup>1)</sup>, ハウタサーリ アリ<sup>2)</sup>, 苗村健<sup>1)2)</sup>

Yuuhou SHIN, Ari HAUTASAARI, and Takeshi NAEMURA

1) 東京大学大学院 学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yuuhou@nae-lab.org)

2) 東京大学大学院 情報学環 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {ari, naemura}@nae-lab.org)

**概要:** HMD を用いた体験コンテンツにおいて、画面上にユーザが関心を持つ領域が複数ある場合、コンテンツの制作者が見てほしい領域をユーザが見るとは限らない。HMD ユーザの視線を誘導する様々な手法が提案されてきたが、ユーザは明らかな視線誘導を好まない。そこで、本研究はユーザに気づかれにくい解像度制御を用いた視線誘導に着目し、HMD における解像度制御を用いた視線誘導の効果を明らかにした。

**キーワード:** ユーザインタフェース, HMD, 視線誘導

## 1. はじめに

近年ではヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display, HMD) が普及したことで、個人でも気軽に HMD を用いた体験をすることが可能になった。HMD を用いた体験は、360° 見渡したり広大な空間を歩いたりといった、コンテンツへの没入感を持ち、ユーザの自由度が高い特徴がある。一方で、これらのコンテンツを体験する際に、画面上にユーザが関心を持つ領域 (Region of Interest, ROI) が複数登場する場合、ユーザはその自由度の高さが故に、コンテンツの制作者が注視を促したい ROI を見るとは限らない。

上記の問題を解決するために、ROI に視線を誘導する様々な研究がなされてきた。しかし、HMD ユーザは好きな方向を自由に見たいと思う場合もあるため、制作者による明らかな見るべき領域への誘導は VR のインタラクティブ性と相性が悪い。この問題を解決するための方法の一つとして、HMD ユーザの自由意志を阻害しない範囲内で視線を誘導することが挙げられる。

以下、本論文では、HMD における画像や映像を表示する部分を HMD ディスプレイとよび、デスクトップディスプレイと区別をする。

### 1.1 解像度制御を用いた視線誘導

畑らは、デスクトップディスプレイにおいて解像度を制御し、実験参加者に気づかれにくい程度のぼかしを画像に加えることで視線を誘導できると示した [1]。

畑らの考案した解像度制御を HMD ユーザの体験する VR に応用する研究も盛んに行われてきた。Chatziantoniou らは、融合身体におけるユーザ間のビューマッチングに関する研究で、特定の領域のみを高解像度とする解像度制御をかけることで、他の手法に比べて負荷なくその領域を自分の視線領域と同化させることができると示した [2]。しかし、

この実験では実験参加者に高解像度領域を見るように伝えられているため、潜在的な視線誘導の効果があるかは分かっていない。

HMD ユーザを対象とする解像度を用いた視線誘導は他の研究においても検討されているが、ユーザスタディを経たその実際の効果は明らかにされていない。そこで、本研究は畑らと同様の実験をバーチャル空間にて再現することで、HMD ユーザの視線を誘導することが可能かを調べる。

## 2. 提案手法

### 2.1 解像度制御

本研究では、画像に解像度制御を用いることで視線誘導を試みる。具体的には、ユーザの視線を誘導させたい領域 (Focus Regions, FR) 以外の領域をすべてぼかし、FR のみを高解像度として顕著性を高めることでユーザの注意を引くというものである。

### 2.2 画像の生成方法

まず、畑らの研究にならって、原画像の全領域に対してガウシアンフィルタを用いて平滑化処理を施す。ガウシアンフィルタは、ガウス分布を用いて注目画素の近傍について距離に応じた重みをかけるフィルタである。 $(x, y)$  における入力画像の輝度値  $f(x, y)$  に対して、カーネルサイズ  $k \times k$  のガウシアンフィルタの出力  $g(x, y)$  は以下の式より表される。

$$g(x, y) = \frac{1}{W^2} \sum_{n=-\frac{k-1}{2}}^{\frac{k-1}{2}} G(n) \cdot \sum_{m=-\frac{k-1}{2}}^{\frac{k-1}{2}} G(m) \cdot f(x+n, y+m) \quad (1)$$

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), W = \sum_{s=-\frac{k-1}{2}}^{\frac{k-1}{2}} G(s) \quad (2)$$

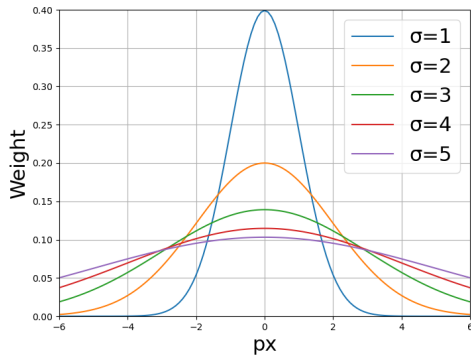


図 1:  $k=13$  のときの各  $\sigma$  における一次元上の近辺画素でのガウシアンフィルタの重みづけ

$\sigma$  については、 $\sigma=0$  のときは例外的に平滑化処理を行わないと定義すると、 $\sigma$  の値が大きいくほど画像は低解像度になる。今回の研究においては畑らと同様に、最大  $\sigma=5$  で解像度制御された画像を生成し、 $k=13$  とした。このときの各  $\sigma$  における近辺画素での距離に応じた重みづけは図 1 の通りである。本提案手法では、FR のみが原画像、FR 以外が解像度制御によってぼかされた画像となるように 2 つの画像をアルファブレンドで合成し、FR の境界線で画像を滑らかに接続した画像を生成する。

### 3. 実験

#### 3.1 実験概要

本研究では、HMD ユーザの視線を解像度制御によって誘導できるかを検証するため、HMD を用いて畑らの行った 2 つの実験を再現する。実験 1 では、解像度制御をかけた画像を実験参加者に提示し、視線データを計測することで視線誘導の効果を調べる。実験 2 では、解像度制御によって徐々にぼけていく画像を実験参加者に提示し、ぼかしの気づくまでの時間を計測することで、ぼかしの気づかれにくさを調べる。どちらの実験においても参加者は 20~30 代の男女計 19 名で行った。なお、19 人の実験参加者のうち、2 人は視線位置のデータを正常に取得できなかったため、残りの 17 人のデータを用いて分析した。実験環境は Unity を用いて実装し、HMD にはアイトラッキング機能を搭載している HTC VIVE Pro Eye を用いた。

#### 3.2 実験 1

##### 3.2.1 実験手順

実験参加者には、解像度制御された画像を 10 秒間提示し、画像が次の画像に切り替わる際に黒い画像を 5 秒間提示し、その間は目を休ませるように指示し、次の画像が提示される前に視線を中央の白い十字に戻すように指示した (図 2 参照)。

実験画像には、画像内の様々な箇所に視線を誘導することを目的として、自らが作成した架空の動物園の園内図を用い、動物のイラストレーションを 11 種類配置した。実験の際には、動物の配置を記憶されることを防ぐため、それ

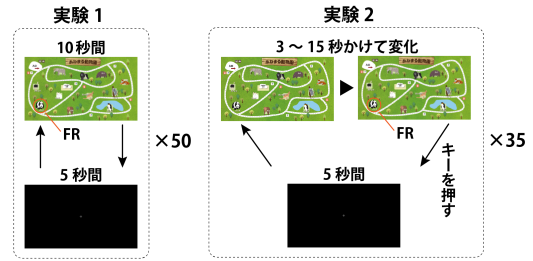


図 2: 実験 1 と実験 2 の流れの概要図



図 3: 原画像 (左) と解像度制御をかけた画像 (右)

らをランダムに変更した 10 種類の画像を用いた。

各画像はそれぞれ  $\sigma=1, 2, 3, 4, 5$  の 5 段階の解像度制御がされており、実験参加者には計 50 枚の画像が提示された。また、FR の位置は画像の中央から 300 px 以上離れたランダムな動物の位置とし、FR の半径は中心視野が  $1.5^\circ$  であることを考慮して 118 px とし、それぞれの実験参加者には同じ 50 枚の画像の組み合わせを提示した。図 3 に使用した動物園の原画像 (左) と実験に使用した画像の一つであるウサギを FR とした  $\sigma=5$  の解像度制御の画像 (右) を並べて示す。

また、実験環境は以下の通りに Unity で実装した。実験参加者の視点カメラから 60 cm 前方に離れた位置に、23 inch (50.83×28.63 cm) の平面を配置し、実験画像を表示させた。なお、実験に使用した HTC VIVE Pro Eye はリフレッシュレートは 90 Hz であり、1 秒に 90 回視線位置のデータを取得した [3]。また、畑らの実験では顎のせ台を用いて頭部の位置を固定したことになって、実験参加者が実験中に身体を動かした場合にも常に視点カメラの前方に実験画像が表示されるようにした。

##### 3.2.2 評価方法

視線誘導の効果を評価するために、以下の 4 つの評価項目を用いる。

1. 画像を提示されてから視線位置が FR に入るまでの時間
2. 画像を提示されてから視線位置が FR に入るまでのサッカードの回数
3. 視線位置が FR に停留した最長の時間
4. 視線位置が FR に入った累計時間

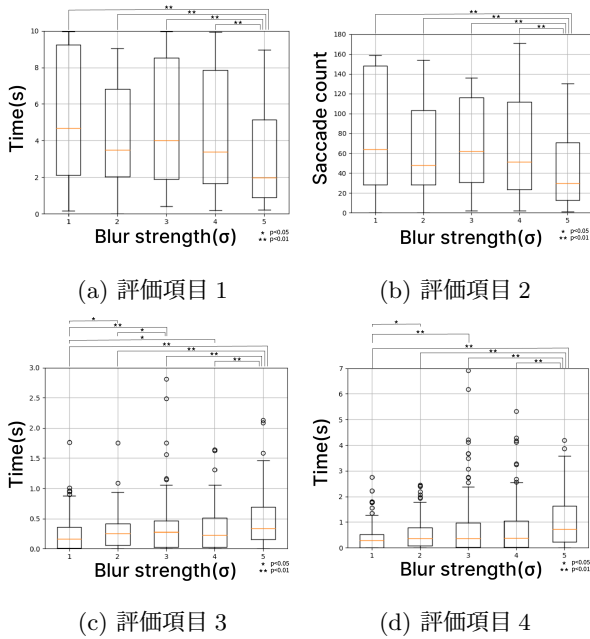


図 4: 各解像度制御の  $\sigma$  における実験結果

### 3.2.3 実験結果

$\sigma=1\sim 5$  のそれぞれの解像度制御について評価項目の結果を図 4 に示す。画像提示時間である 10 秒の間に実験参加者が一度も FR を見なかった場合、視線位置が FR に入るまでの時間とサッカードの回数を定義できないが、十分長い時間提示すればいずれは視線位置が FR に入ると考えられるため、今回の分析においては視線位置が FR に入るまでの時間とサッカードの回数をそれぞれ 1000 秒、1000 回と十分大きな値とした。

これらの結果から、中央値については  $\sigma$  が大きいほど画像を提示されてから視線位置が FR に入るまでの時間、サッカードの回数がともに短くなり、視線位置が FR に停留した最長の時間と FR に入った累計時間が長くなることが読み取れる。以上より、 $\sigma$  の値を大きくするほど視線誘導の効果も大きくなると考えられる。

ここで、どの  $\sigma$  の間で有意差が見られるかを調べるために各  $\sigma$  を群として Mann-Whitney の U 検定を行った。 $\sigma=1\sim 5$  のデータの標本サイズはそれぞれ 170 であった。視線位置が FR に入るまでの時間については、 $\sigma=1$  と  $\sigma=2, 3, 4$  の間には有意差が見られなかったが、 $\sigma=1$  と  $\sigma=5$  の間では有意に  $\sigma$  が大きいほど時間が短かった ( $U=19209.0, p < .001$ )。視線位置が FR に入るまでのサッカードの回数については、 $\sigma=1$  と  $\sigma=2, 3, 4$  の間には有意差が見られなかったが、 $\sigma=1$  と  $\sigma=5$  の間では有意に  $\sigma$  が大きいほど回数が少なかった ( $U=18832.5, p < .001$ )。視線位置が FR に停留した最長の時間については、 $\sigma=1$  と  $\sigma=2$  の間で有意に  $\sigma$  が大きいほど時間が長かった ( $U=12460.0, p = .027$ )。視線位置が FR に入った累計時間については、 $\sigma=1$  と  $\sigma=2$  の間で有意に  $\sigma$  が大きいほど時間が長かった ( $U=12246.5, p = .015$ )。

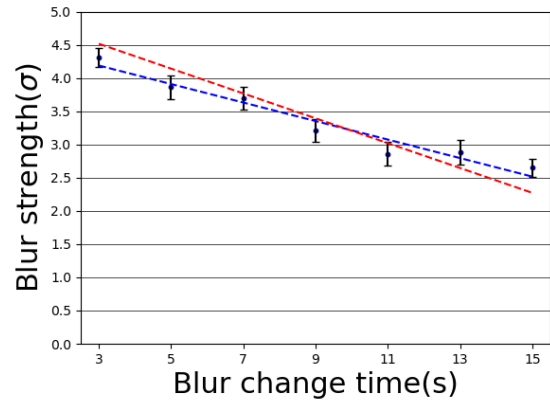


図 5: 各ぼかし変化時間における実験参加者がスペースキーを押下したときのぼかしの強さ

## 3.3 実験 2

### 3.3.1 実験手順

実験参加者には、ある一定時間で徐々に解像度制御されていく画像を提示し、画像が次の画像に切り替わる際に黒い画像を 5 秒間提示し、その間は目を休ませるように指示し、次の画像が提示される前に視線を中央の白い十字に戻すように指示した (図 2 参照)。

実験画像には、実験 1 に使用した 10 枚の画像の内の 5 枚を使用し、各画像はそれぞれぼけていない  $\sigma=0$  の原画像から  $\sigma=5$  まで 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 秒の 7 段階の時間をかけて解像度を徐々に変化させた。使用した画像は実験 1 と同様のもので、5 種類の画像に 7 段階の変化速度で計 35 枚の画像を使用した。実験参加者にはキーボードを持たせ、画像がぼけていることに気づいたらキーボードのスペースキーを押下するよう指示し、スペースキーが押下されるもしくは一定時間が経過したら提示される画像が黒い画像に切り替わった。実験環境は実験 1 と同様である。

### 3.3.2 評価方法

実験参加者が画像のぼかしに気づく  $\sigma$  の値を明らかにするために、実験参加者がキーボードのスペースキーを押下するまでの時間を測定し、その時点での画像のぼかし度合い  $\sigma$  の値を導出した。

### 3.3.3 実験結果

図 5 が本実験の実験結果である。横軸が画像の解像度の変化時間、縦軸が画像の  $\sigma$  を表している。ここで図における黒い点は、実験参加者 17 人がスペースキーを押下した時点における画像の  $\sigma$  の平均を表し、エラーバーは 17 人の平均についての標準誤差、青い点線は最小二乗法を用いて近似した直線である。また、赤い点線は実験参加者がぼかしに気づいてからスペースキーを押下するまでを 300 msec とした場合の最小二乗法を用いた近似直線である。ぼかし変化時間が 3 秒のときは平均  $\sigma=4.31$  でぼかしに気づき、ぼかし変化時間が 15 秒のときは平均  $\sigma=2.65$  でぼかしに気づいた。なお、本実験においてスペースキーが押下されなかつ



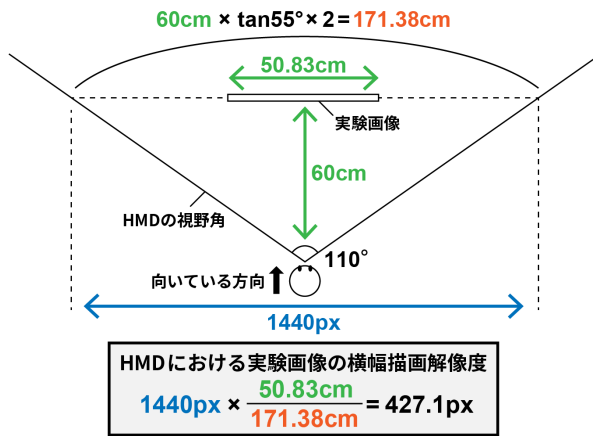


図 6: HMD における実験画像の解像度の計算

たすべての画像については、解像度制御のぼかし度合いの上限の  $\sigma=5$  で気づいたと見なして計算した。

グラフの概形が右肩下がりになっていることから、ぼかしの変化が遅い画像の方が速い画像よりも画像のぼかしに早く気づく傾向にあることが分かる。これは人間の反応速度を考慮した赤い点線においても同じ傾向にあるため、単なる押し遅れだけが原因ではなく、ぼかしの変化がゆっくりであるほど時間をかけてぼかしに気づくことができることを意味する。

### 3.4 考察

#### 3.4.1 デスクトップディスプレイと HMD ディスプレイの解像度の比較

HMD ディスプレイはデスクトップディスプレイに比べて解像度が低く、使用した HMD の視野角が  $110^\circ$ 、解像度が片目あたり  $1440 \times 1600$  px であることから、図 6 のように実験環境における HMD ディスプレイ内での画像の横幅解像度は約 427 px であると定量的に求まる。

用いた実験画像の実際の横幅解像度は 1920 px であることから、元の画像の 4 px 以上の情報が HMD ディスプレイの 1 px に描画されているといえる。本実験の結果は、このような解像度が劣化している HMD ディスプレイにおいても、畑らと同様の解像度制御のパラメータを用いることで、 $\sigma=2$  において視線誘導の効果が得られることを示している。また、本実験ではガウシアンフィルタのカーネルサイズを  $13 \times 13$  としたが、上記の計算から、HMD ディスプレイにおいてはあらかじめ縮小した画像についてカーネルサイズを  $3 \times 3$  として平滑化した画像を用いることで、同等の視線誘導の効果が得られると考えられる。

#### 3.4.2 FR の位置と視線誘導効果の関係性

実験 1 の 4 つの評価項目を、園内図のどこを FR としたかについてそれぞれ分析した。その結果、中心視野から遠い画像の端に FR があると、FR を見るまでに要する時間は長く、サッカードの回数も多くなり、FR を継続して見る時間、見た累計時間はともに短くなることが明らかとなった。このことから画像の端が FR となっていると、解像度制

御の効果が薄く、視線が誘導されにくいといえる。しかし、画像の端に視線が誘導されにくいという傾向が現れたのは、畑らの研究にならって画像を常に視点カメラ前方に追従して表示したためであり、一般に自由に周囲を見渡せるバーチャル空間内では問題にならないと考えられる。

#### 3.4.3 トップダウン要因の顕著性の影響

今回の実験では実際のコンテンツを想定して動物園の園内図に様々な動物を配置したが、インタビューの結果、色によって目立つ動物とそうでない動物が見受けられたり、実験参加者の好みによって恣意的に注視された動物が存在したりしたというコメントがあった。また、動物の配置自体がランダムであったため、背景の池に相応しくない動物が池に配置されて不自然に目立っていたというコメントもあった。本実験においては、これらのトップダウン要因の顕著性が、解像度制御による視線誘導に何らかの影響を及ぼした可能性が考えられる。

## 4. 結論

本研究では、HMD ユーザの視線を誘導するために解像度制御を用いる手法を提案し、実験 1 では視線誘導の効果を、実験 2 では解像度制御の気づかれやすさを調べた。実験 1 の結果からは、解像度の低い HMD ディスプレイにおいてもユーザは高解像度領域を見る傾向にあり、解像度制御の  $\sigma$  を大きくするほど高解像度領域を見る時間が長くなることが示されたが、画面端は画面中央に比べて視線誘導の効果はあまり見られなかった。特に、視線誘導の効果は  $\sigma=2$  においても得られることが確認でき、実験 2 においては  $\sigma=2$  の解像度制御は気づかれないことが確認でき、これはデスクトップディスプレイにて行われた畑らの研究と一致する結果となった。以上のことから、HMD ディスプレイにおいても、視野内に複数の ROI があるときに  $\sigma=2$  の解像度制御を用いることで、HMD ユーザに気づかれることなく特定の ROI に注意を引くことが可能であると考えられる。今後の展望として、実際にバーチャル空間におけるコンテンツに適用することを考える。

謝辞 本研究の実験は東京大学情報学環オープンスタジオ中山未来ファクトリーにて行われた。

## 参考文献

- [1] 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, 56(4):1152–1161, 2015.
- [2] N. Chatziantoniou, A. Oyanagi, K. Ito, K. Aoyama, H. Kuzuoka and T. Amemiya. “Inducing joint attention between users by visual guidance with blur effects”, In Proceedings of IEEE VR, 2023.
- [3] Vive pro eye 仕様 — vive™ 日本. <https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/specs/>. 最終閲覧日時: 2023/02/06.