



HMD 内部の影響を考慮した VR 空中像のぼけ量の補正

林竜吾¹⁾, 小泉直也¹⁾

Ryugo HAYASHI and Naoya KOIZUMI

1) 電気通信大学 (〒 182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1, hayashi@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

概要: 本研究では, VR 空間での空中像インタラクションの設計・検証を目的とした, 空中像の VR シミュレーションの実現を目指す. 空中像の特徴のひとつであるぼけは, 空中像インタラクションに影響するため, 再現が重要である. しかし, HMD を通して知覚できる VR 空中像の解像度は, HMD 内部の処理や光学系の影響を受ける. そこで, 本研究では HMD を通して画像のぼけを計測し, それを踏まえたぼけ量の補正を実装し, 評価した.

キーワード: 空中像, HMD, MTF

1. はじめに

空中像とは何もない空中に結像した映像である. 空中像は裸眼で観察できるため, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) などの装置の装着や把持が不要という利点がある. さらに, 空中像はセンサ類と組み合わせることで, 非接触のタッチディスプレイとしての活用が期待されている.

本研究の目的は, VR 空間において空中像インタラクションを設計・検証するために, 空中像を再現する VR システムを開発することである. 空中像は観察できる範囲が限定されており, 触れた際に触覚手がかりを得られないという特徴が一般的なディスプレイと異なる. そのため, これらの特徴を把握したうえでのインタラクションの設計・検証には, VR シミュレーションシステムが有用である.

VR 空間で再現すべき空中像の特徴のひとつとして, 空中像のぼけが挙げられる. 光源から出た光は空中像として結像するまでに, 光学素子内で反射・屈折・透過する. この過程において一部の光が拡散するため, 空中像の解像度は光源より低くなる. すなわち, 眼の焦点が合っている場合でも, 空中像はぼけているように見える. この空中像のぼけは, ユーザーが知覚する空中像の結像位置や, インタラクションの精度に影響すると考えられる. そのため, 空中像インタラクションを VR 空間で設計・検証するためには, VR 空間でも実際の空中像と同様にぼけた見目で観察できる必要がある.

しかし, 我々が HMD 越しに知覚する映像は HMD 内部の光学系や処理による影響を受けたものである. Unity や Unreal Engine などのゲームエンジン上で設計された空間は, 描画においてラスライズやアンチエイリアシングといった処理が施される. さらに, HMD に入力されてからユーザーに知覚されるまでの間には, HMD 内部のディスプレイの解像度や光学系による歪みの影響を受ける. そのため, HMD を通してみた場合に現実と同一の空中像のぼけを再現するには, HMD 内部の影響の考慮が重要である.

そこで, 本研究では HMD を通して画像のぼけを測定し, ユーザーが知覚する VR 空中像のぼけを補正するシステムを提案する. 本研究の目的は HMD 上で観察される VR 空中像のぼけ量を, Micro-Mirror Array Plates(MMAP) によって結像した実際の空中像と同等のぼけに調節することである. そのため, HMD 上に表示された VR 空間の画像を撮影し, 撮影された画像のぼけが実際の空中像のぼけに近づくようにぼかし処理 (ブラー) の強度を調節する.

2. 関連研究

2.1 視覚におけるぼけ

視覚に関連するぼけの原因として, 眼の被写界深度 (Depth of Field) や周辺視野での知覚が挙げられる. VR 空間におけるこれらのぼけの再現は, 複数の研究で試みられている. Kieran ら [1] は, HMD 使用時の視覚的な不快感を軽減するために, 動的に変化する被写界深度のぼけを実装し, その効果を調査している. また, Anjul ら [2] は視線追跡技術を利用し, ユーザーの視野の周辺部ほど解像度を下げる Foveated Rendering の手法を提案している. さらに, Razeen ら [3] はこれらのぼけを HMD 上で統合して再現し, ぼけがない場合と比較して VR 空間における奥行き知覚の誤差が 27%減少すると報告している.

本研究では, これらの研究で周辺視野での知覚によるぼけの再現に用いられているガウシアンブラーを, 空中像のぼけの再現に利用する. 本研究ではぼけ量に焦点を当て, ガウシアンブラーを用いて空中像のぼけ量を再現する. 詳細なぼけ方の再現は今後の課題である.

2.2 空中像インタラクション

空中像インタラクションを設計する際には, 空中像のぼけを考慮することが重要である. Kim ら [4] は, 展示物の周囲に視覚情報を表示するシステムとして MRsionCase を提案している. このように空中像がディスプレイとして利用される際, 小さな文字や細かい模様は空中像のぼけによ

てつぶれてしまう。そのため、空中像として表示する映像を設計する際には空中像のぼけを考慮する必要がある。

また、空中像のぼけは見た目だけでなく、インタラクションの精度にも影響を与える。眼の焦点に起因するぼけは奥行知覚における重要な手がかりとなる [5] が、空中像はもとよりぼけた見目をしている。そのため、目の焦点によるぼけを奥行手がかりとして利用しづらい。ユーザーが空中像の奥行位置を正確に知覚できていない例として、ユーザーが空中像に触れるとき、実際の結像位置より奥に指を動かす傾向にあること [6] が挙げられる。

2.3 VR シミュレーション

我々は VR 空間において空中像インタラクションを設計し、その有用性を検証するために、空中像を再現する VR システムを開発している。VR 空間におけるシミュレーションの有用性は複数の研究で示されている。Ville ら [7] は、パブリックディスプレイのフィールドスタディを VR 空間で行い、評価研究に活用できることを示した。また、Uwe ら [8] は VR 空間で Cross Reality System をプロトタイプするツールを開発し、実装を効率化できることを示した。これらの研究結果と同様に、VR 空間は空中像インタラクションの設計・検証にも活用できると考えられるが、実際の空中像と同様にインタラクションできる VR システムはこれまでに開発されていない。

HMD 上で動作するシミュレーションにおいては、HMD 内部の影響を考慮したうえで空中像のぼけを再現する必要がある。HMD の内部処理や光学系は、ユーザーが知覚する VR 空間の映像の解像度に影響する。木島 [9] は、VR ディスプレイシステム内部の特性は、空間周波数に対するコントラスト応答 (MTF: Modulation Transfer Function) として合成できることを示した。本研究では、MTF を指標として HMD 越しに VR 空間の映像のぼけを測定し、実際の空中像のぼけ量と比較調整することで、ユーザーが HMD 上で知覚するぼけの量を実際の空中像のぼけ量に近づけることを目指す。

3. 方法

本研究では、HMD 内部の影響を考慮した、VR 空中像のためのぼけの補正手法を提案する。HMD 内部の処理や光学系による影響を踏まえるために、VR 空間の画像を HMD 越しに撮影する。実際の空中像からあらかじめ測定したぼけ量に近づくようにぼかし処理 (ブラー) の強度を調節し、VR 空間内の空中像のぼけ量を補正する。ぼけの量は MTF を用いて評価する。ブラーはガウシアンブラーを用いる。

提案手法によるぼけの補正手続きを図 1 に示す。はじめに、VR 空間内で白と黒のエッジ画像を用意し、HMD に表示する。そして、HMD 越しにエッジ画像を撮影する (図 1(1))。これにより、HMD の内部処理や光学系の影響を反映した画像が得られる。次に、撮影したエッジ画像から、MTF を測定する (図 1(2))。撮影したエッジ画像から得られた MTF 曲線を、実際の空中像の画像から得られた MTF 曲線と比

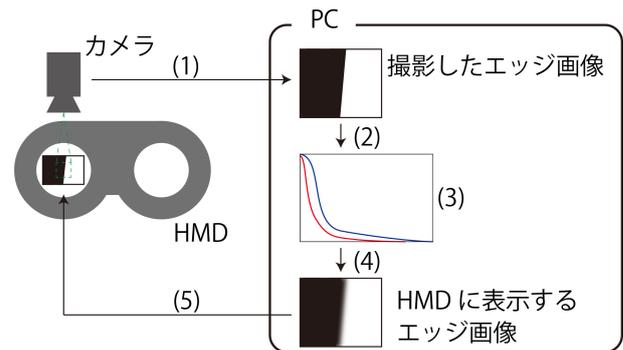


図 1: ぼけの補正手続き (1)HMD 越しにエッジ画像を撮影 (2) 撮影したエッジ画像から MTF を測定 (3) 目標となる MTF 曲線と比較 (4)MTF 曲線の比較結果に応じてブラーの強度を調節 (5) ブラーを調節したエッジ画像を HMD に表示

較する (図 1(3))。ここで、実際の空中像の MTF 曲線に対する平均誤差が正であればブラーの強度を増し、負であれば減らす (図 1(4))。最後に、ブラーを調節した結果を VR 空間のエッジに反映させる (図 1(5))。以上の手続きを繰り返す。繰り返しごとにブラーの調節量を半減し、0.1 未満になった時点で終了した。

本手法は、補正対象の HMD が空中像よりも高い解像度性能を持つことを前提としている。これは、HMD の解像度が低く、鮮明な映像を表示しても実際の空中像よりもぼけてしまう場合、空中像のぼけは HMD 上で再現できないためである。

4. 評価

提案手法によるぼけ補正の効果を検証するために、実際の空中像、HMD に表示した補正前の鮮明なエッジ画像、補正後のぼけたエッジの画像の 3 つから MTF を測定した。Meta Quest2, HTC VIVE Pro2, Varjo VR-3 の 3 種類の HMD を利用し、それぞれの HMD について提案手法によりぼけを補正した。

MTF 測定のための撮影の概要を図 2 に示す。VR 空中像の解像度測定 (図 2(b)) は、Unity 内で同じ装置構成を実装し、実際の空中像の解像度測定 (図 2(a)) と同様に行った。補正前の HMD の MTF は、図 2(b) の配置でエッジ画像を空中像の位置に置いて測定した。空中像の飛び出し距離 L_d は 25cm とし、標準レンズ (オムロン社製 VS-1214H1, 画角 $50.8^\circ \times 50.8^\circ$) を取り付けたカメラ (HOZAN 社製 L-836) で撮影した。

カメラと HMD の位置関係は手動で調節した。ユーザーが HMD を装着したときの目の位置に、カメラレンズの後側焦点が位置するように配置した。HMD のアイリリーフが不明なため、画像がもっとも鮮明に見える位置に調節した。また、配置の際に HMD 上に十字の線を表示し、線がもっとも鮮明に見える位置にカメラを移動することで光軸を合わせた。これは VIVE Pro2 での高さや瞳孔間距離の調節方法を参考にしている。

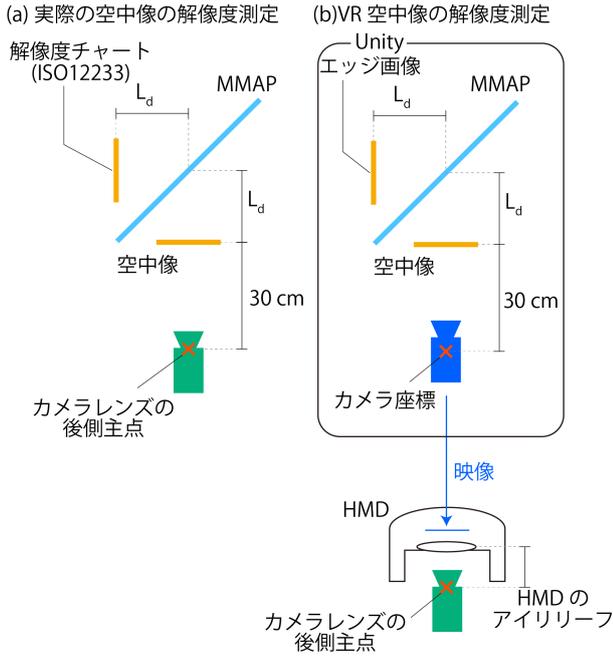


図 2: MTF 測定の概要図

実際の空中像のぼけは、MMAP によって結像された空中像を正面から撮影することで測定した。MMAP によって生成された空中像は、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)[10] によって生成された空中像よりも解像度が高い。さらに、空中像は正面から観察した際にぼけがもっとも少なくなる。HMD 上でもっとも鮮明な条件の空中像を再現できれば、ブラー強度を強くすることで、より大きくぼける空中像にも対応することが可能となる。

4.1 結果

図 3 に実際の空中像と、ぼけ補正前の前後に HMD を通して撮影したエッジ画像の MTF 曲線を示す。縦軸が MTF 値、横軸が空間周波数を表す。緑の点線が空中像の MTF 曲線であり、ぼけの補正における目標値である。どの HMD についても、補正前の MTF 値は空中像の MTF 値より高い。これは HMD が空中像よりも高い解像度性能を持つことを意味する。

提案手法によるぼけの補正効果を MTF 曲線の平均誤差率で評価した結果、空中像のぼけに対する各 HMD の誤差が大幅に改善された。例えば、Meta Quest2 の平均誤差率は補正前の 128.2%から補正後は 1.091%に、VIVE Pro2 では 202.5%から 1.735%に、Varjo VR-3 では 558.8%から 2.760%にそれぞれ改善された。補正により、全ての HMD で平均誤差率を 3%以内に抑制できた。

図 4 に補正前後でのぼけ具合を比較した結果を示す。補正前は文字やマークの輪郭が鮮鋭だったが、補正後は実際の空中像に近い、ぼやけた輪郭になった。特に'A'の文字の穴は、補正により実際の空中像と同様にほとんどつぶれるようになった。補正後と実際の空中像のぼけ方には、まだ若干の違いが見られるが、後述するブラー処理の改善によりさらなる再現度の向上が期待される。

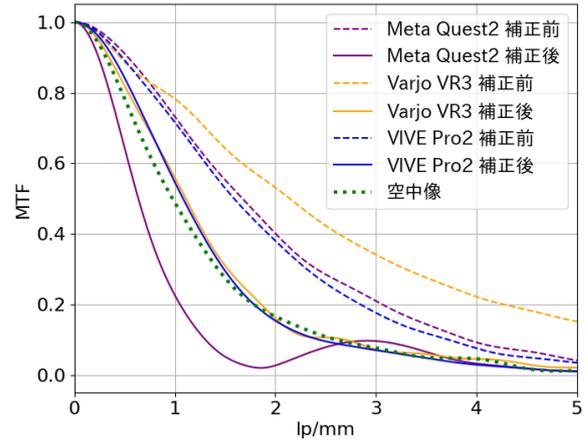


図 3: 実際の空中像と補正前後の HMD の MTF 曲線

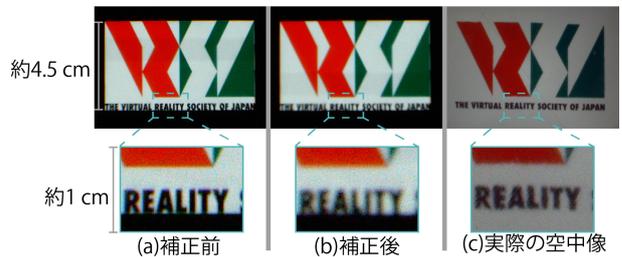


図 4: 補正前後でのぼけの比較 (VIVE Pro2)

5. 考察

本研究で使用した HMD は、空中像の VR シミュレーションに十分な解像度を持つと考えられる。VR 空間でのパブリックディスプレイのフィールドスタディでは、HMD の解像度が不足しているため、遠くのディスプレイの内容を明瞭に見ることが困難であると報告されている [7]。しかし、本研究で扱った MMAP によって結像された空中像は AIRR によって結像されたものよりもぼけが少ないにもかかわらず、HMD よりも低い解像度であることが判明した。したがって、本研究で使用した HMD の解像度は空中像の VR シミュレーションに十分であり、本手法はほかの光学素子によって結像された空中像にも適用可能である。

一方で、本手法を用いてぼけを補正するためには、HMD に一定以上の解像度が必要である。HMD の解像度が低い場合、スクリーンドア効果が発生し、MTF の計算に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、使用した HMD の中でもっとも解像度の低い Meta Quest2 を通して撮影された画像においてのみ、格子状のアーティファクトが確認された。さらに、図 4 に示される補正後の Meta Quest2 の MTF 曲線は振動しており、補正の目標値である空中像の曲線とは大きく異なる形状を示した。したがって、スクリーンドア効果によるアーティファクトが発生すると、MTF 曲線が振動し、正しく補正できなくなると考えられる。このため、本手法でぼけを補正可能な HMD は、スクリーンドア効果を防ぐ内部処理や、十分に高い解像度が求められる。

ぼけの補正に用いるブラー処理の種類については改善の

余地が残されている。提案手法によるぼけの補正は HMD の空中像に対する平均誤差率を減らしたが、MTF 曲線を完全に一致させることはできなかった。この誤差は、使用したガウシアンブラーと実際の空中像のぼけのぼけ方の違いに起因する。この課題は、空中像のぼけ特性に応じたブラー処理を実装することで改善が期待できる。一例として、点光源を空中像として結像させた画像から、点広がり関数 (PSF) をぼけ方の特性として測定し、空中像のぼけを抑制した研究がある [11]。この研究のように PSF から測定したぼけ特性と、本手法によるぼけ量の補正を組み合わせることで、HMD 上での空中像のぼけをより高い精度で再現できると考えられる。

空中像のぼけ量がインタラクションに与える影響の調査は今後の課題である。本手法によってぼけを補正することで、VR 空間で実際の空中像のぼけを基準に、自在に VR 空中像のぼけを調整できる。また、ユーザーが VR 空間と実空間で異なるふるまいを示すことが、複数の研究により報告されている [7][12]。そのため、VR 空間で実空間と同様に空中像に対してインタラクションするためには、実際の空中像のぼけを過剰または不足に再現することが効果的である可能性がある。空中像インタラクションの設計・検証が可能な VR システムの実現のために、本手法を活用した、インタラクションの精度やユーザーのふるまいに対して空中像のぼけが与える影響の調査が必要となる。

6. 結論

本研究では VR 空間における空中像インタラクションの設計・検証を目的とし、HMD 内部の影響を考慮した VR 空中像のぼけの補正手法を提案した。本手法では、HMD 越しにカメラで VR 空間の画像を撮影し、MTF を測定することで、HMD 内部の影響を踏まえたぼけを測定した。鮮明なエッジ画像を VR 空間に配置した際、実際の空中像から測定された MTF 値よりも大きい値が得られ、HMD の解像度性能が空中像のぼけの再現に十分であることが確認された。さらに、提案手法によるぼけの補正によって、HMD 上で観察されるぼけが実際の空中像のぼけに近づき、MTF 曲線の平均誤差率は 3%以内には抑えられた。しかし、一部の HMD では解像度が低いいため、スクリーンドア効果によるアーティファクトが発生し、ぼけを補正できないことが判明した。

ガウシアンブラーを用いた現在の処理では、空中像のぼけ特性を完全に再現できないため、ブラー処理の改善が今後の課題となる。今後の研究では空中像のぼけが空中像インタラクションに及ぼす影響を調査し、その結果を VR 空間での空中像インタラクションの設計および検証に活用することが期待される。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR216L の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Kieran Carnegie and Taehyun Rhee. Reducing visual discomfort with hmds using dynamic depth of field. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(5):34–41, 2015.
- [2] Anjul Patney et al. Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality. *ACM Trans. Graph.*, 35(6), 2016.
- [3] Razeen Hussain et al. Modelling foveated depth-of-field blur for improving depth perception in virtual reality. In *2020 IEEE 4th International Conference on Image Processing, Applications and Systems (IPAS)*, pages 71–76, 2020.
- [4] Hanyuool Kim et al. [paper] mrsioncase: A glasses-free mixed reality showcase for surrounding multiple viewers. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2(3):200–208, 2014.
- [5] Robert T. Held et al. Blur and disparity are complementary cues to depth. *Current Biology*, 22(5):426–431, 2012.
- [6] Li-Wei Chan et al. Touching the void: Direct-touch interaction for intangible displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, page 2625–2634, 2010.
- [7] Ville Mäkelä et al. Virtual field studies: Conducting studies on public displays in virtual reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, page 1–15, 2020.
- [8] Uwe Gruenefeld et al. Vrception: Rapid prototyping of cross-reality systems in virtual reality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, 2022.
- [9] 木島 竜吾. 仮想空間における視力. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 23(3):179–188, 2018.
- [10] Hirotsugu Yamamoto et al. Floating aerial led signage based on aerial imaging by retro-reflection (airr). *Optics Express*, 22(22):26919–26924, 2014.
- [11] Hiroshi Kikuta et al. Optimization of blur correction of color images formed with aerial imaging by retro-reflection. *Optical Review*, 30:111–121, 2023.
- [12] Florian Mathis et al. Can i borrow your atm? using virtual reality for (simulated) in situ authentication research. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 301–310, 2022.