This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2025 年 9 月）

MR 空間での空中像インタラクションの遮蔽矛盾及び視域の再現

高橋うるる [1)]，菅原陵央 [1)]，小泉直也 [1)]
Ururu TAKAHASHI, Ryo SUGAWARA, and Naoya KOIZUMI

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

概要:　本研究では，MR を用いた空中像インタラクションの設計を目的とし，空中像の視域の制限および遮蔽矛盾といった光学的特性を再現する MR アプリケーションを提案する．本手法では，ステンシルバッファを用いた描画によって，MMAP と視点との位置関係に基づく視域の制限と，手などの遮蔽物による像の欠損表現を実現する．これにより，実空間における空中像インタラクションの設計や動作検討を MR で可能にする．

キーワード：　空中像, MR, 遮蔽矛盾, 再帰透過光学素子

1.　はじめに

空中像とは, 光学素子を用いて空中に結像させた像であり, ユーザーは特別なデバイスを装着せずに裸眼で映像を観察できる．この技術はエンタテインメントや公共空間での案内表示などでの利用が考えられている．

空中像を用いたインタラクションの設計にはいくつかの課題がある．まず, 空中像を形成する専用の光学素子が必要であり, その設置には手間と時間がかかる．さらに, 素子は比較的大型で高価なものが多く, 限られた空間や予算の中で試行錯誤を繰り返すことは難しい．また, 実空間に配置した際の見え方を, 設計段階で正確に把握することが難しい点も課題である．

そこで本研究では, Mixed Reality（MR）技術を用いて, 空中像のインタラクションを再現・検証する手法を提案する．これにより, 実際に光学系を実装する前に, 空中像インタラクションの設計を効率的に行えると考えられる．特に, 空中像特有の視域の制限と遮蔽矛盾に着目し実装を行った．

2.　関連研究

2.1　空中像光学系

空中像光学系は, 光源からの光を反射・屈折, 透過させ, 空間に結像させることで, 空中像を形成する．Micro Mirror Array Plate（MMAP）などの再帰透過光学素子や, Aerial Imaging by Retro-Reflection（AIRR）などの再帰反射を利用した光学系などがある．

MMAP は, 微細なミラーを格子状に配置した再帰透過光学素子であり, 光源に対して MMAP を挟んで面対称な位置に空中像を結ぶ．Kiuchi らは, 再帰透過光学系である MMAP の挙動をレイトレーシング法でシミュレーションし, 光源と空中像の位置関係や迷光の影響を評価した [1]. MMAP は単一プレートのみで像を結ぶシンプルな構成が特徴である．空中像を観察するためには, ユーザー視点が MMAP と重なる領域にある必要があり, 視域が制限されるという性質がある．また, 空中像はあたかも空間内に存在しているように知覚されるが, 光は光源, MMAP, 観察者を結ぶ光路上を通過しており, この光路が物理的に遮られると像は欠ける．

また, Yamamoto らは再帰反射素子を利用した AIRR 技術を開発し, 広い視野角や大画面表示のスケーラビリティを実証した [2]. AIRR においても, 光は再帰反射素子と視点を結ぶ光路を経由するため, MMAP 同様に視域の制限が存在し, また物理的な遮蔽が光路上でなければ像は遮られないという遮蔽矛盾が生じる．AIRR は MMAP に比べ, 構成要素やサイズに応じて視野角や結像範囲を柔軟に設計でき, 大型化や複数視点への対応が容易である．一方で, 光学素子が大型化することで輝度や解像度, ボケなどの課題が生じる．

本研究では, MMAP を用いた空中像光学系を MR で作成し, 視域の制限と遮蔽矛盾の再現を行う．MMAP は単一の素子で空中像を結像できるため, AIRR に比べて部品点数が少なく, シンプルかつ再現性の高い光学構成を MR 上で実装できる．また, 面対称な位置に像を結ぶ MMAP の特性は, 視域の制限や遮蔽表現の評価を容易にする．再現する特性は AIRR にも共通して存在するため, 本研究で示す MR 上での手法は, AIRR を用いた空中像インタフェースへの応用も十分に可能であると考えられる．

2.2　空中像インタラクション

空中像インタラクションとは, 実物体を用いて空中に表示された映像に対して直接的な操作を行うものである．Kim らは, MMAP を用いて空中に表示されたキャラクターと実物体とのインタラクションを提案し, 空中像を活用したインタラクションの可能性を示した [3]. さらに, 高崎らは MMAP による空中映像において, 空中像とユーザの手との位置関係をプロジェクター投影映像の色濃度変化や影の表示によって明確に提示する手法を提案している [4]. この研究は特に, 空

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

中像における遮蔽矛盾を解消することを目的としており, 手や実物体と空中像の位置関係が視覚的に把握しやすくなるよう工夫がなされている．また, Ando らは実物体と空中像との幾何学的整合性を保つため, IR センサとホットミラーを用いたセンシング手法を提案した [5]．この研究では, 空中像の背面から実物体の形状を計測することで, 遮蔽矛盾が生じないように, 空中像を配置している．

このように, 空中像を用いたインタラクション手法は多様な体験を提供することが報告されている．その中で, CG 映像と実物体の正確な位置関係をユーザに提示するためには, 遮蔽矛盾の再現が重要である．こうした背景から, 本研究においても空中像の遮蔽矛盾を再現することが不可欠であると考えた．

2.3 HMD を利用したディスプレイとのインタラクション設計

HMD を用いてディスプレイとのインタラクション設計の評価を行うことができる．Ville らは, 公共ディスプレイに関するフィールド調査を VR 上で実施し, ユーザ行動を実世界での観察結果と比較した [6]．Mathis らは, 認証システムの評価における VR の有効性を検証した [7]．これらの研究は, VR が公共ディスプレイや認証メカニズムの評価に有用である可能性を示した．一方で, VR 技術がユーザー行動や評価結果に影響を与える可能性があることも明らかにしている．

さらに, Uwe らは, VR 内でクロスリアリティ（XR）システムをプロトタイピングするためのツールを開発し, 実装効率の向上を示した [8]．さらに, VR 環境における AR システムの迅速なプロトタイピングの有用性も示している．

空中像に関しては, Hayashi らが VR 環境における空中像の有効性を検証しており, 視域の制限と遮蔽矛盾を再現した [9]．しかし, これは VR 空間でのみ機能するものであり, 実空間での検証には適していない．そこで本研究では MR を利用することで, 空中像を実空間で設計する際のサポートツールを提案する．

3. 提案手法

本研究では，MR 空間における空中像提示において，空中像特有の光学的性質である視域の制限，すなわち空中像の欠けおよび遮蔽矛盾を再現する．空中像は, MMAP を通じて空間に実像を形成する特性上, 観察可能な視域が限定される．ユーザー視点が MMAP と重なる範囲から外れると, 空中像は部分的に欠ける, あるいは完全に消失する (図 1)．さらに, 光源から発せられた光が MMAP を通過し, 反射されることで空間内に実像を形成する．このとき, 光路上に不透明物体が存在すれば, 光が遮られて結像は阻害され, 像の一部が欠損する遮蔽矛盾が生じる．これらの光学的特性を MR 上で再現した．

使用したゲームエンジンは Unity のバージョン 6000.1.4f1 であり，HMD には Meta Quest 3 を用いた．Unity のステンシルバッファ機能を用いて，空中像の視域制限および遮蔽矛盾を再現している．ステンシルバッファは，レンダリング時に各ピクセルごとに付与される 8bit のデータであり，描画時にこの値を参照することで，描画の可否を決定できる．描画オブジェクトごとに，ステンシル値への書き込み処理と，その後の描画における参照条件を個別に設定が可能である．描画時には, ユーザー視点の代表点として，HMD の CenterEyeAnchor を使用している．この位置を基準として空中像の欠けや遮蔽矛盾の判定を行い, 描画を行った後, 左目と右目にそれぞれの角度からの映像を投影している．

本手法は, 形状解析やリアルタイムなマスク生成といった高負荷な処理を行うことなく，軽量かつリアルタイムで安定した描画が可能となる．この手法はインタラクティブな MR アプリケーションにおいても，実時間動作での利用が十分に現実的である．

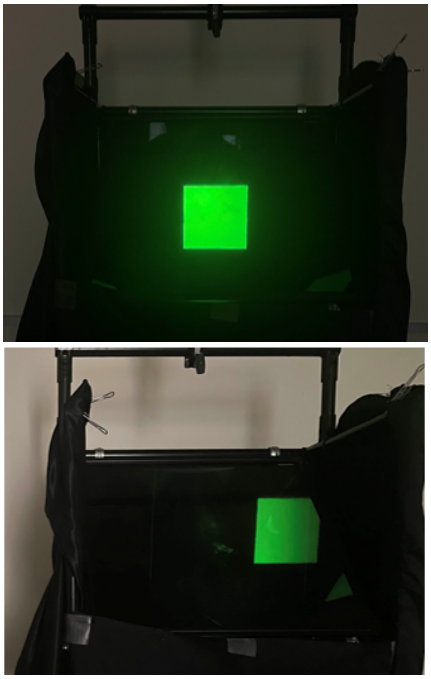

図 1: 空中像における視域の制限　上：正面図 (空中像全体が表示されている)　下：視点を横にずらした際の様子 (空中像の一部が欠けている)

提案手法において，ステンシルバッファの bit0 を MMAP 用，bit1 をハンドモデル用に割り当てている．まず，MMAP オブジェクトの描画時に，ステンシルバッファの bit0 に 1 を設定し，その領域が空中像の視域内であることを示す．次に，ハンドモデルの描画時には，bit1 に 1 を設定し，その領域がユーザーの手によって遮蔽されていることを示す．最終的に，空中像オブジェクトの描画時には，ステンシルバッファを参照し，bit0 = 1 かつ bit1 = 0 の領域にのみ描画を行うことで図 2 のようになる．これにより，MMAP 上で視認可能かつ手で遮られていない範囲に対してのみ空中像が表示される．この処理により，MMAP と視点との位置関係に基づく視域制限と，手による光路の遮断に伴う遮蔽矛盾を同時に再現可能である．

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

本手法は，描画パスを 2 段階に分けて，MMAP およびハンドモデルに対して順に bit 値を書き込み，最終的に空中像描画時にこれらのビットパターンに基づき描画可否を判定する構成とした．これにより，形状解析やリアルタイムなマスク生成といった高負荷な処理を行うことなく，軽量かつリアルタイムで安定した描画が可能となる．この手法はインタラクティブな MR アプリケーションにおいても，実時間動作での利用が十分に現実的である．

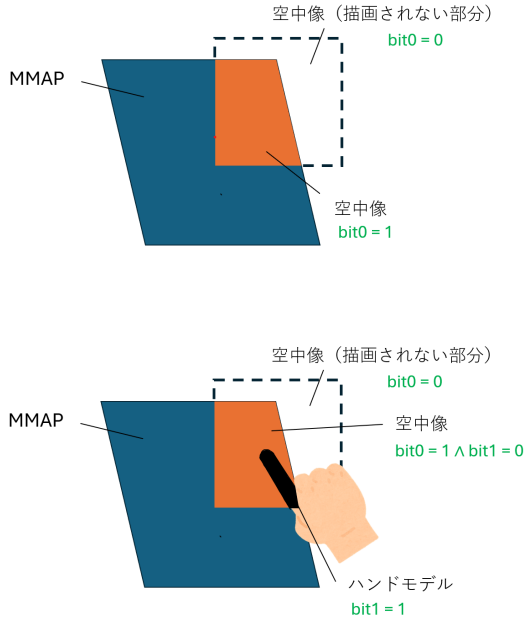

図 2: ステンシルバッファの適応方法　上：空中像の欠けの描画，下：空中像の欠けおよび遮蔽矛盾の描画

4.　結果

本研究で提案した描画手法の有効性を検証するため，実際に MR 空間上で空中像を提示し，視域の制限および遮蔽矛盾の再現状況を確認した．本章では，現実の空中像と MR 空間内で再現された空中像における視覚的現象の比較を行う．空中像結像面の奥行き位置を明示的に示すために，基準として白色の直方体を表示した．この直方体は，奥行き方向の中心位置が空中像結像面と一致するよう配置している．

まず，視域に関しては，図 3 に示すように，提案手法では視点が MMAP と重なる領域から観察した場合にのみ空中像が視認可能となり，それ以外の視点では像が欠損することが確認された．これは，図 1 に示す実空間における結果と同様であり，提案手法による描画が現実の視域特性を正しく反映していることを示している．

次に，遮蔽矛盾の再現について述べる．図 4 は，実空間における遮蔽矛盾の様子を示したものである．指の奥行き関係がわかるよう，提案手法と同様に空中像結像面に基準物体を配置している．図 5 に示すように，空中像結像面よりも奥にユーザーの手が入り込んだ場合，その領域が描画から除外さ

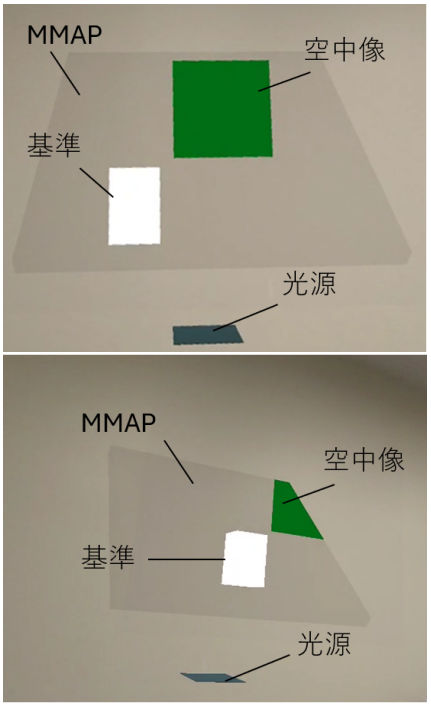

図 3: 提案手法による視域の再現の確認 (空中像は基準物体と同一の奥行きに配置)　上：正面図 (空中像全体が表示されている)　下：視点を横にずらした際の様子 (空中像の一部が欠けている)

れることで，像の一部が欠損して見える現象が MR 空間上でも再現された．この結果は，図 4 に示す実空間における遮蔽矛盾と同様の視覚効果が得られていることを示している．以上より，実空間における空中像の遮蔽矛盾を，MR 空間上でも適切にシミュレーション可能であることが確認できた．

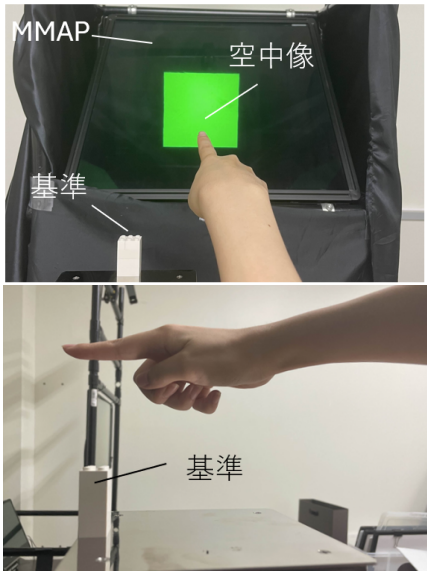

図 4: 実空間における遮蔽矛盾の様子 (空中像は基準物体と同一の奥行きに配置)　上：空中像光線を指で遮っている様子　下：実験時の空中像位置

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

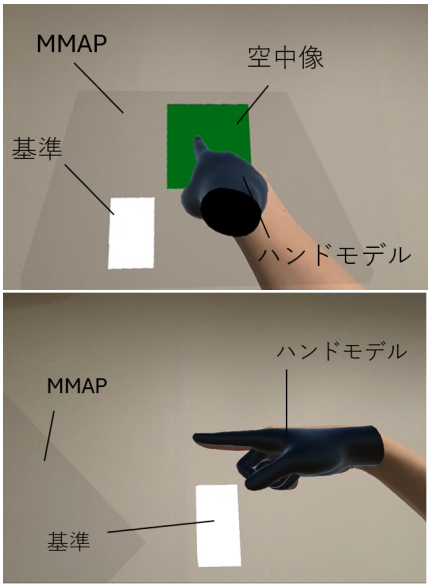

図 5: 提案手法による視域の遮蔽矛盾再現の確認 (空中像は基準物体と同一の奥行きに配置)　上：空中像光線を指で遮っている様子　下：実験時の空中像位置

5. 考察

提案手法により, HMD を用いることで, MR 環境において空中像の視域の制限と手による遮蔽矛盾を再現することができた. また, ステンシルバッファを用いることでリアルタイムでの動作が可能であり, Meta Quest 3 上で動作することを確認した.

また, 手以外の物体による遮蔽矛盾については, Meta Quest の Depth API を用いることで奥行きを判定し, 再現可能であると考えられる. ぼけに関しては, Hayashi らによる VR 環境での空中像再現の研究 [9] が存在しており, 有用な先行研究と考えられる. 輝度や迷光については再現方法が明らかではなく, 今後の検討課題とする.

さらに, 本研究は空中像を用いた設計支援への応用が考えられる. 例えば, 紙などの平面物体を, 空中像として表示したいサイズと仮定し空間に置くことで, 必要となる MMAP の大きさや設置位置を事前に検討することができる. また, MMAP の大きさを仮定した場合に, 表示可能な空中像のサイズや飛び出し距離についても事前に可視化し, 設計段階で確認することが可能となる.

6. むすび

本研究では, MR を用いた空中像インタラクションの設計を目的として, 空中像の視域の制限と遮蔽矛盾を再現した MR アプリケーションを提案した. その結果, MR 空間においても現実の空中像と同様に, 視点の位置に応じた像の欠損や, 手などの遮蔽物による部分的な遮蔽が視覚的に再現されることを確認した. 今後の展望として実空間と提案手法におけるタッチインタラクションの比較などが考えられる.

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] Shunji Kiuchi and Naoya Koizumi. Simulating the appearance of mid-air imaging with micro-mirror array plates. *Computers Graphics*, Vol. 96, pp. 14–23, 2021.

[2] Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama. Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR). *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924, 2014.

[3] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura. MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects. *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233–241, 2014.

[4] 高崎真由美, 水野慎士. MMAP を用いた空中像と実物体との位置関係および相互作用を明確にする表現手法の開発. 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ（DCON）, Vol. 10, No. 2, pp. 14–25, 2022.

[5] Shohei Ando and Naoya Koizumi. An Optical Design for Interaction With Mid-Air Images Using the Shape of Real Objects. *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 39129–39138, 2024.

[6] Ville Mäkelä, Rivu Radiah, Saleh Alsherif, Mohamed Khamis, Chong Xiao, Lisa Borchert, Albrecht Schmidt, and Florian Alt. Virtual Field Studies: Conducting Studies on Public Displays in Virtual Reality. CHI '20, pp. 1–15, 2020.

[7] Florian Mathis, Kami Vaniea, and Mohamed Khamis. RepliCueAuth: Validating the Use of a Lab-Based Virtual Reality Setup for Evaluating Authentication Systems. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, pp. 1–18, 2021.

[8] Uwe Gruenefeld, Jonas Auda, Florian Mathis, Stefan Schneegass, Mohamed Khamis, Jan Gugenheimer, and Sven Mayer. 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, pp. 1–15, 2022.

[9] Ryugo Hayashi and Naoya Koizumi. Simulation of Mid-air Image Interaction in Virtual Reality. In *2024 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pp. 25–32, 2024.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会