



# 斜円筒アレイによる空中像光学系の迷光除去手法の提案

奥田和歌<sup>1)</sup>, 小湊咲<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>1)</sup>

Waka OKUDA, Saki KOMINATO, 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, w.okuda@media.lab.uec.ac.jp, kominato@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

**概要:** 空中像光学系において, ゴースト像を生成する迷光は視認性を低下させる. そこで本研究では, 空中像を形成する光と迷光の再帰性透過素子への入射角度の違いに着目し, 特定の入射角度の光だけを遮断する斜円筒アレイを用いて迷光を除去する手法を提案する. 3D ソフトウェアの Blender を用いてシミュレーションを行い, 円筒の傾き, 寸法を検討した. 本手法により生成される空中像を Blender 上で作成・観察し, 迷光が除去されていることを確認した.

**キーワード:** 空中像, 迷光, 斜円筒

## 1. はじめに

空中像は, 映像を実空間に提示する手法であり, Micro-Mirror Array Plate (MMAP) 等の光学素子を利用することで, 容易に表示させることができる. MMAP は二層の微細な鏡面が直交して並ぶ構造であり, 入射した光を二回反射させることで空中に鮮明な映像を浮かび上がらせることが可能である. 像は光源に対して光学素子と面対称な位置に結像する. これにより CG を実空間に自然に溶け込ませるような表現が可能となる.

しかしながら, MMAP は優れた光学特性を持つ一方で, 空中像を生成する際に迷光という不要な光も同時に生じてしまう問題がある. MMAP における迷光とは, 本来意図しない経路を通じて観察者の視野に入る光線であり, ゴースト像が出現する原因となる. この迷光が生じる主な要因は, MMAP の構造上, 一層のみの鏡面で反射した光線がそのまま観察者の方向に漏れてしまうためである. また, 反射せずに光学素子をそのまま通り抜けてしまう光線も迷光と言える. このような迷光を押さえ込み, 空中像のみを表示することで, 不要な光によって邪魔されることなく, 実空間と映像を融合できる.

そこで本研究では, MMAP から生じる迷光のみを効果的に除去する手法として, 斜円筒光学素子を新たに提案する. この斜円筒光学素子は, 吸光性素材で形成された微細な円筒構造であり, 空中像を生成するための二回反射光のみを通過させ, 迷光となる光線を円筒の内壁にて吸収する構造を有する. この構造によって, 鮮明な空中像を保ちながら不要な迷光の発生を大幅に抑制することを狙いとしている.

本稿ではまず, 提案する斜円筒光学素子を用いた迷光除去の原理を詳細に説明し, 次にその原理をレイトレーシングを用いて評価した結果を述べる. これにより, 提案手法の妥当性および実用性を明らかにする.

## 2. 関連研究

### 2.1 空中像

空中像を生成する再帰透過光学系には, MMAP 以外にも複数の方法が存在する. Dihedral Corner Reflector Array (DCRA) は, 2 枚のミラーを垂直に配置してアレイ状に並べた構造である. 光源からの光を二面で反射することにより, 光源に対して光学素子と面対称な位置に空中像を結像する. Aerial Imaging by Retro-Reflection は, 再帰性反射材とハーフミラーで構成されている. 光源からの光を反射・透過させることにより空中像の結像が可能となる. 本研究では MMAP を用いた際に発生する迷光の除去手法について提案する.

レイトレーシングによって, 空中像や迷光の見え方をシミュレーションすることが可能である. Kiuchi らは Blender を用いて, MMAP によって表示される空中像と迷光の見え方をシミュレーションする手法を提案している [1]. Hoshi らは, この手法により光学系を組み立てた際の空中像や迷光の見た目や出現位置をシミュレーションし, 環境反射空中像装置において迷光を見せない設計を提案している [2]. 本研究でも, この手法を用いて提案光学素子のシミュレーションを行う.

### 2.2 迷光

MMAP を用いて空中像を表示すると迷光が発生することがあり, それらを除去するための様々な手法が提案されている. Yoshimizu らは, DCRA を放射状に配置することで視野角の拡大と迷光の排除を両立する radially arranged DCRA を提案している [3]. この構成では, 反射面における入射角が常に 45 度となるため, 一回反射による迷光が発生せず,  $\pm 90$  度の広視野角で空中像を提示できることが示されている. しかし, 提案構造の光学素子は市販されておらず, 手に入りにくいという課題がある. 一方, Osada らは, DCRA にプリズムを組み合わせることで, 迷光を屈折によ

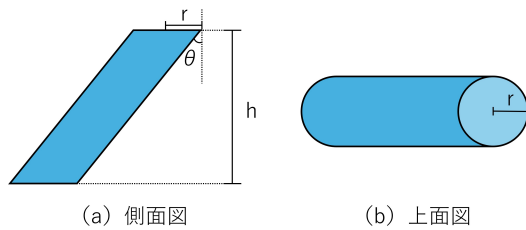


図 1: 単斜円筒

て補正し、空中像として再構成する手法を提案した [4]. この方法では、迷光の明るさが、DCRA のみの場合と比較して正面で約 14% に抑制されたことが示されている. しかし、ルーバーフィルムを用いた場合と比較すると迷光が明るいという課題がある. Yano らは、MMAP に 4 枚の視野制御フィルム (VCF) を用いることで迷光を抑制し、光学素子を高速回転させることによって全方位から観察可能な空中像ディスプレイを実現している [5]. しかし、提案設計と合致した種類の VCF は市販されておらず実装に関して課題が残っている. さらに、Takenawa らの提案する ReQTable では、四方向に空中像を提示可能な MMAP において、リニア偏光板と VCF を併用することで、迷光を抑制している [6]. この手法では、偏光の反転特性を利用して奇数回反射による迷光を除去し、VCF により不要な透過光を遮断する. しかし、偏光板と VCF を重ねるため空中像の輝度がかなり低減してしまう.

本研究では、空中像を生成する光だけを通し、迷光となる光のみを吸光する光学素子を設計する. MMAP への各光の入射角度に着目し、斜円筒を用いて迷光を生成する入射光を制限する.

### 3. 提案手法

#### 3.1 目的

MMAP に取り付けることで、迷光を除去し、空中像の輝度を低下させないような光学素子を設計する. 提案光学素子では、斜円筒アレイを用いることで、結像光は透過し、迷光は吸光される.

#### 3.2 MMAP と入射角度の関係

片桐らによって、空中像となる光線と迷光となる光線の入射角度が異なることが確認されている [7]. 彼らはこのような入射角度の差異を利用し、異方性光拡散フィルムを再帰性透過素子の裏面に配置することで、空中像を生成する光は直進透過させつつ、迷光のみを選択的に拡散させる手法を提案した. ただし、光を拡散させているため、完全に迷光を消すことはできていない.

そこで本研究では、斜円筒アレイを用いることで、入射光を制御し、空中像となる光線を透過し、迷光となる光線を吸光することができると考えた. 透過光は MMAP に一度も反射せずに光源から垂直に出射する光であるため、図

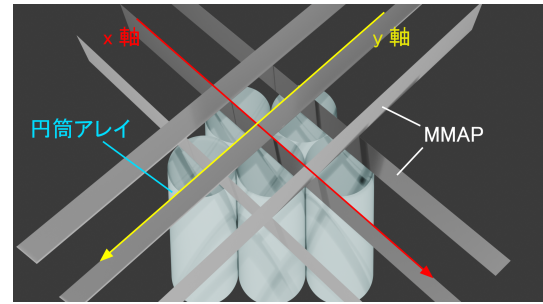


図 2: 真上から観察した MMAP と斜円筒アレイの配置

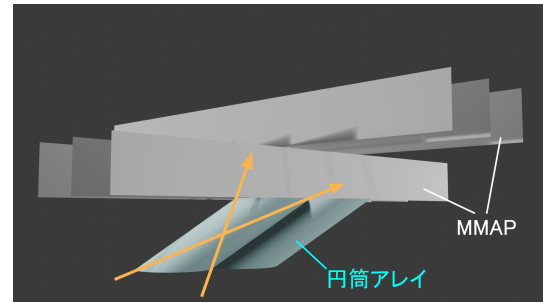


図 3: 真横から観察した MMAP と斜円筒アレイの配置

1 (a) のように円筒を斜めにすることで吸光することができる. さらに、空中像と迷光の入射角度の違いを考慮して斜円筒の角度を決定することで、空中像を生成する光だけを透過させることができる. また、ゴースト像は左右対称に出現するため、左右対称な構造の円筒を用いることで迷光が除去できると考えた.

#### 3.3 提案設計

空中像を生成する入射角度から斜円筒アレイの傾きの決定及び配置の設計を行った. 本研究では、空中像と迷光が重ならない場合に適応することを考える. MMAP に入射する光を漏れなく制御するために、斜円筒は最密充填構造で並べる. この斜円筒アレイを MMAP の光源側に密着させて取り付けることにより、迷光の除去を実現する. 空中像を生成する光だけが斜円筒を通過するように円の半径  $r$ , 斜円筒の傾き  $\theta$ , 高さ  $h$  の各パラメータを決定する.

MMAP に対する提案素子の傾き方向は、図 2 に示すように MMAP を構成する 2 層のマイクロミラーの並ぶ方向をそれぞれ  $x$  軸,  $y$  軸としたとき、 $y = x$  の方向である. 提

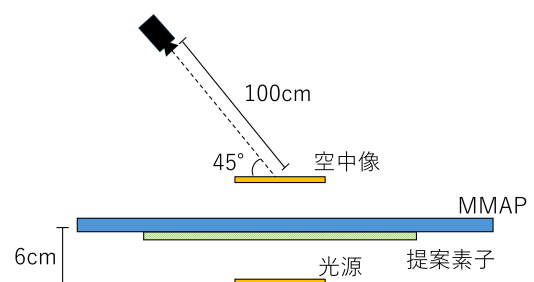


図 4: レンダリングにおける配置図

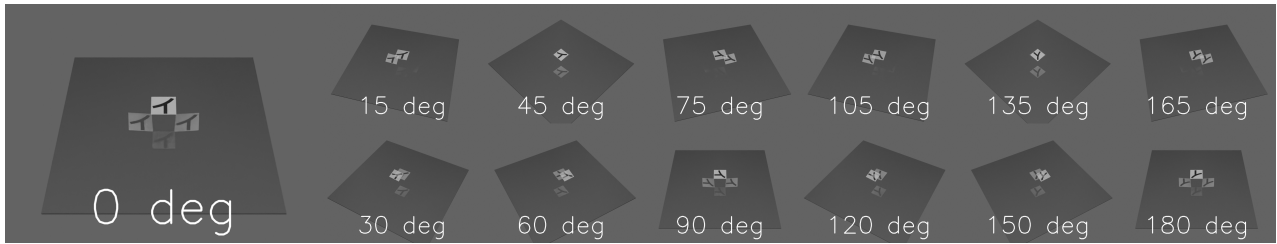


図 5: MMAP のみのレンダリング画像

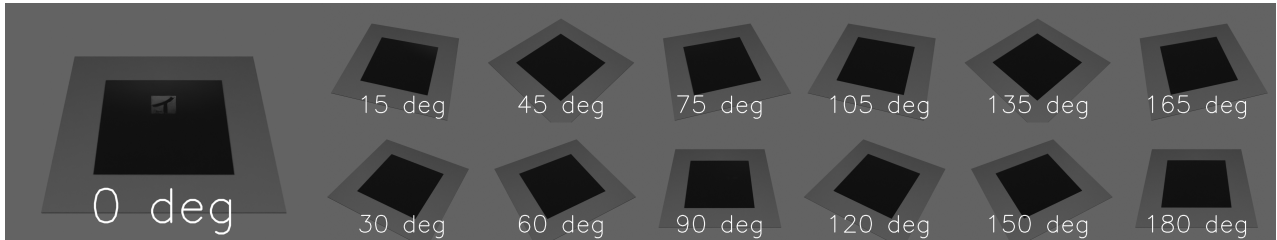


図 6: 提案光学素子を用いた場合のレンダリング画像

案素子の斜円筒を真横から見た様子を図 3 に示す。このとき、図の右側が観察者にとって奥側、左側が手前側に対応する。斜円筒アレイを通過する光は、図 3 のオレンジ色の矢印のように入射する。

### 3.4 レンダリング

斜円筒の各パラメータの決定のために 3D ソフトウェア Blender 4.2 を用いて提案素子を作成し、Cycles で網羅的にレンダリングを行った。図 4 は、レンダリング時の MMAP、提案素子、カメラの配置を示している。カメラは MMAP の中心方向に向け、空中像の結像位置の斜め上 45 度方向に 100 cm 離して設置する。カメラの焦点距離は 50 mm とした。まず円の半径  $r$ 、斜円筒の傾き  $\theta$ 、高さ  $h$  の各パラメータについて複数の条件でレンダリングを行い、迷光が除去されるおおよその条件を把握した。それらの結果を参考に網羅的なレンダリングの範囲を決定し、半径  $r = 0.2$ 、傾き  $\theta$  を 39 度から 46 度の範囲で 1 度刻み、高さ  $h$  を 0.5 cm から 2.0 cm の範囲で 0.1 cm 刻みで変更してレンダリングを行った。

レンダリングの結果を踏まえ、半径  $r = 0.2$  cm、傾き  $\theta = 45^\circ$ 、高さ  $h = 0.8$  cm というパラメータを採用する。これらの値を選定したのは、各パラメータを変化させて観察した結果、空中像が結像し、迷光および透過光が効果的に除去されたことが確認されたためである。円の直径  $2r$  と高さ  $h$  については、比が 1:2 であれば、空中像が消え、迷光が除去されることが分かった。しかし、半径  $r$  が大きいと、結像した空中像に円形の影が発生してしまうために影が目立たない 0.2 cm として、高さ  $h$  の値も併せて決定した。

## 4. 評価

### 4.1 迷光除去

全方位から覗いたときに迷光が除去されていることを確認する。設計時と同様に 3D ソフトウェア Blender 4.2 を用いて、レンダリングを行った。図 4 の設計を用いて、正面を 0 度として 15 度刻みでカメラを MMAP と水平な方向に

1 周させて全方位からレンダリングを行った。

MMAP のレンダリング画像と比較した結果、迷光が除去されていることが確認された。図 5 は、MMAP のみのレンダリング結果、図 6 は、提案素子を用いた際のレンダリング結果を示している。レンダリングはカメラを 360 度移動させて行ったが、180 度以降は対称的な結果となるため、本稿では前半の結果のみを掲載する。

### 4.2 空中像表示

提案光学素子が空中像の生成を妨げないことを確認する。MMAP に提案光学素子を取り付けた際、光源と MMAP の距離の変化に合わせて、空中像の結像位置も変化し、MMAP の面对称な位置に空中像が結像することをステレオマッチングを用いて確認した。

まず Blender 4.2 を用いて図 7 に示した配置で、ステレオマッチングに用いる画像を撮影した。図 7 中の上からの図のように、同一水平面上で 5 cm 離れた位置にもう 1 台のカメラを設置して左右 2 か所からの画像を撮影した。光源画像には白丸が  $4 \times 4$  で並んだ画像を使用した。使用した光源画像を図 8 に示す。光源と MMAP の距離  $L_A$  は 400 mm から 600 mm の範囲を 50 mm 刻みで変化させた。撮影した画像の差分を OpenCV を利用して計算し、空中像の飛び出し距離を求めた。

実験結果として、光源と MMAP の距離  $L_A$  と空中像と MMAP の距離  $L_B$  の関係を図 9 に示す。グラフより、 $L_A$  と  $L_B$  が比例の関係であることが分かった。よって、光源の距離が変わっても空中像が面对称な位置に結像することが確認された。

## 5. 考察

評価実験から、斜円筒アレイを用いることで、全方位に対して迷光が除去されることが確認できた。また、提案光学素子を MMAP に取り付けても、空中像が問題なく結像することが確認できた。

今回提案した光学素子では、空中像が欠けず、迷光が除

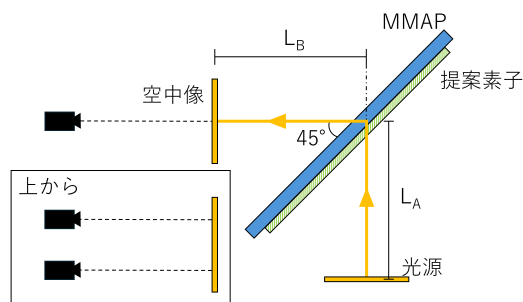


図 7: ステレオマッチング実施時の配置図

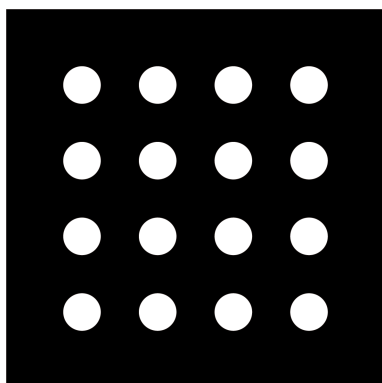


図 8: ステレオマッチングで用いた光源画像

去される具体的な条件はまだ明らかにすることができていない。また、提案素子の効果が問題なく発揮される具体的な観察範囲についても検討されていないため、観察条件についても詳しく調べる必要がある。また、空中像の輝度や欠けについても検証がされていない。そのため、提案光学素子が空中像の輝度に与える影響についても今後の検証が必要である。特に、空中像を結像する光と、迷光となる光の具体的な入射角度の範囲を明らかにすることで、空中像の輝度や欠けの改善が期待される。

今後、提案設計について最適化や 3D プリンターを用いて提案光学素子の実装を行う。また、各パラメータ間の関係式を導出することで、目的に合わせた構造を計算によって

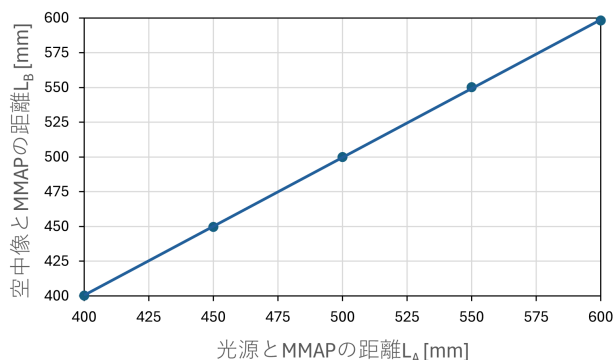


図 9: ステレオマッチングの結果

求めることが可能になると考えられる。さらに、円筒の傾き方向を位置によって変化させることで、単一の光学素子で複数方向への空中像提示を実現できる可能性がある。空中像の輝度を低減させることなく、迷光を生成しない空中像の実装が可能となれば、全方位に空中像を提示させる装置への応用が期待される。

## 6. まとめ

本研究では、空中像における迷光を斜円筒アレイを用いて除去する手法を提案した。斜円筒は半径  $r = 0.2$  cm、傾き  $\theta = 45^\circ$ 、高さ  $h = 0.8$  cm とし、最密充填構造で並べたものを MMAP の光源側に密着させて取り付けることで迷光を除去する構造を提案した。評価実験の結果、空中像の生成を妨げることなく、全方位に対して迷光を除去できることが示された。今後は、提案設計の最適化や 3D プリンターを用いた実装を行う。

**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] Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, and Naoya Koizumi. Simulation of mid-air images using combination of physically based rendering and image processing. *Optical Review*, Vol. 29, pp. 106–117, 2022.
- [3] Yuta Yoshimizu and Eiji Iwase. Radially arranged dihedral corner reflector array for wide viewing angle of floating image without virtual image. *Opt Express*, Vol. 27, No. 2, pp. 918–927, 2019.
- [4] Yuto Osada and Yue Bao. Design of ghost-free aerial display by using prism and dihedral corner reflector array. *Electronic Imaging*, Vol. 34, No. 17, pp. 237–1–237–4, 2022.
- [5] Yano Yutaro and Koizumi Naoya. Omnidirectional mid-air image system using micro-mirror array plates. *Opt. Express*, Vol. 32, pp. 21473–21486, 2024.
- [6] Mizuki Takenawa, Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura. ReQTable: Square tabletop display that provides dual-sided mid-air images to each of four users. *ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies*, No. 8, pp. 1–2, 2022.
- [7] 片桐麦, 草間健太郎, 小泉直也. 異方性光拡散フィルムを用いた空中像ディスプレイのゴースト低減. 日本バーチャルリアリティ学会大会, 1C2-07, 2023.