

両端斜切円柱集積構造による空中像光学素子の検討

佐野遵平¹⁾, 小泉直也¹⁾

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

概要: 本研究では、水平方向の視域の広い空中像を実現することを目的として、円柱の両端を斜めに切断した形状の光学素子が二次元的に並べて配置された構造を提案する。これは、再帰透過光学素子などの既存の空中像光学系における、空中像の視域が狭いという課題を解決するものである。本研究では、この空中像光学素子によって結像される空中像をレイトレーシング法によりシミュレーションし、その評価を行った。

キーワード: 空中像, 光学素子, レイトレーシング

1. はじめに

空中像とは、空中に結像される実像のことである。光源から出た光が光学素子で屈折・反射し、空中に実像を結ぶことによって実現される。このような空中像を結像するための光学素子は多数提案されている。

空中像を結像する光学素子の一つとして、再帰透過光学素子がある。再帰透過光学素子とは、素子に対して光源と面対象な位置に空中像を結像する光学素子である。入射した光線の X 軸・Y 軸・Z 軸の三成分のうち、光学素子に平行な 2 軸の成分については反射し、垂直な方向の軸の成分は直進する性質を持つ。

再帰透過光学素子の課題の一つとして、空中像を観察することのできる範囲が限られていることが挙げられる。直交する 2 つのミラーアレイで構成された Micro Mirror Array Plates (MMAP)[1] のような再帰透過光学素子は、空中像を観察する角度によっては空中像の一部が欠けたり空中像の輝度が低下したりしてしまう。

もう一つの課題として、迷光が生じてしまうことが挙げられる。MMAP のような再帰透過光学素子では、2 層のミラーアレイの各層で偶数回ずつ反射した光が迷光となってしまふ。ユーザが空中像を見る位置によっては、迷光が空中像と重なって観測される場合があり、空中像を見る際の妨げとなってしまう。

これらの課題は、再帰透過光学素子と平行な平面内での再帰性反射を、直交ミラー構造を用いずに実現することで解決することができる。MMAP のような再帰透過光学素子は、素子と平行な平面での再帰性反射に直交ミラーの構造を用いていることが原因となり、視域の縮小や迷光の問題が発生する。しかし、再帰性反射を実現する光学素子には、直交ミラー型の構造だけでなくビーズ型の構造を利用したものも提案されている。ビーズ型再帰性反射材のように円形の屈折面を利用した空中像光学素子を利用することで、これらの課題を解決することができる。

そこで本研究では、水平方向に広い視域を持ち、かつ迷光によって空中像の観察が妨げられることの無い光学系と

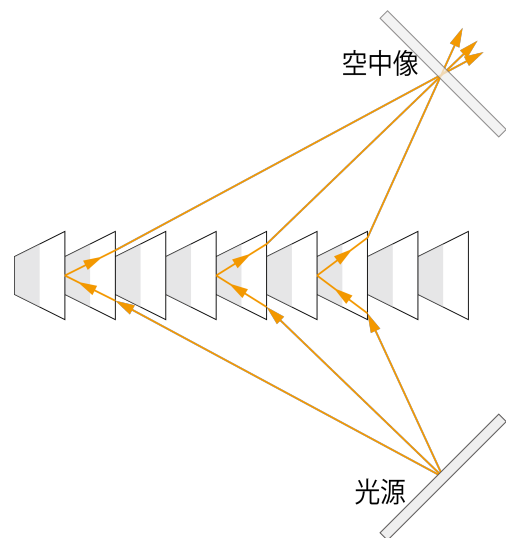


図 1: 両端斜切円柱集積構造による空中像の概要図

して、図 1 のように円柱の両端を斜めに切断した形状の光学素子が二次元に並べられた構造を提案する。この光学素子は、光線を屈折させる円柱の側面の一部に鏡を貼った構造をしている。また、円柱の両端を斜めに切断することで、円柱を利用した既存の空中像結像光学素子 [2] よりも高い解像度を実現する。

本稿では、空中像光学素子を評価する手法として、レイトレーシング法によるシミュレーションを用いた。レイトレーシングの手法として、Kiuchi ら [3] が提案した Blender を使用した空中像のシミュレーション方法を実施した。本研究では、提案する新たな空中像結像光学素子の比較対象として、MMAP 及び両端を切断しない円柱による空中像結像光学素子の 2 つを使用した。

2. 関連研究

2.1 空中像結像光学素子

空中像を結像する光学系は、XYZ 軸すべての方向で光線が反射する再帰性反射材の構造を、いずれかの一軸だけ直進する構造に変更することで実現できる。再帰性反射材と

は、光線が入射した方向へ光を返す性質を持つ光学系であり、コーナーキューブ型とビーズ型が提案されている。

コーナーキューブ型再帰性反射材の直交ミラーの構造から、XYZ 軸のうちのいずれかの 1 軸だけを直進させる構造にすることで空中像を実現する光学系として、Roof Mirror Array[4] や Retroreflective Mirror Array[5]、MMAP、Dihedral Corner Reflector Array (DCRA)[6] などが提案されている。これらの空中像結像光学素子は、光学素子に平行な面のうちの 1 軸を直進させる構造と、垂直な 1 軸を直進させる構造の 2 つに分類することができる。

Roof Mirror Array や Retroreflective Mirror Array は、コーナーキューブ型再帰性反射材の素子に平行な平面の 1 軸のみを直進させることで空中像を結像する光学系である。それぞれ V 字状の鏡もしくは帯状に配置された鏡を用いることで、光学素子に対し光源と同じ側に空中像を結像する。

MMAP や DCRA は、コーナーキューブ型再帰性反射材の素子に垂直な軸のみを直進させることで、光学素子に対し光源と面対象な位置に空中像を結像する光学系である。直交する 2 つのミラーアレイのそれぞれで光を奇数回ずつ反射させることで、光学素子に対し光源と面対象な位置に空中像を結像する。

一方で、ビーズ型再帰性反射材の構造から、XYZ 軸のうちのいずれかの 1 軸の光線だけを直進させる構造にすることで空中像を実現する光学系として、円柱を使用した構造が考案されている。

ビーズ型再帰性反射材の光学素子に垂直な軸のみを直進させる構造にすることで空中像を結像する光学系として、武中 [2] は円柱が二次元的に並べて配置された構造を提案している。この空中像光学素子は、透過面と反射面をもつ円柱が多数集まった構造をしている。円柱側面から入射した光が、円柱の反対側の鏡面部分で反射し、円柱側面から再度出射することで空中像を結像する。

ビーズ型再帰性反射材に平行な平面の 1 軸のみを直進させることで空中像を結像する光学系として、細長い円柱が 1 列に並んだ構造が考えられる。予備実験より、この構造による空中像には歪みが生じてしまうことが確認されたため、本稿ではこの構造については検討せず、円柱が二次元的に並んだ構造のみ検討することとする。

2.2 光学シミュレーション

空中像光学系のシミュレーションとして、いくつかの手法が提案されている。Fujii ら [7] は、AIRR という仕組みを利用した空中像光学系において、再帰性反射材に入射する光の照度分布をヒートマップによって表示している。Otao ら [8] は、MMAP を使用したオプティカルシースルー型の HMD のデザインに、光線追跡シミュレーションを用いている。Kiuchi ら [3] は、レイトレーシングを用いて空中像の見え方を再現している。

レイトレーシング法を光学系の設計に使用した研究も行われている。Jang ら [9] は、レイトレーシング法を用いて HOE (Holographic Optical Elements) の最適化を行って

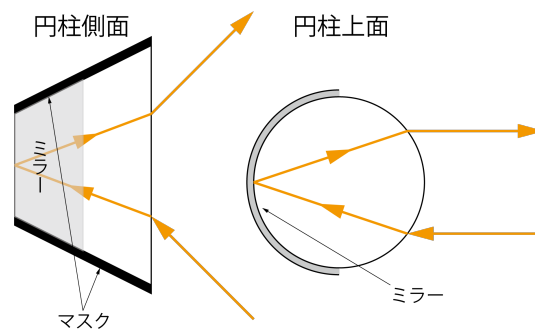


図 2: 両端斜切円柱の概要図

いる。本研究においても、空中像の結像位置や迷光を再現することのできるレイトレーシング法を使用して光学系の設計を行う。

3. 原理

武中 [2] の提案する円柱集積構造の空中像光学素子には、水平方向の視野角が広いという利点がある。MMAP のように直交する 2 つのミラーアレイをもつ構造の場合、格子の向きによって光学素子に指向性が生じてしまうため、視域が限られてしまう。一方で、円柱が集積した構造の場合は指向性がないため、水平方向のどの角度からでも空中像を観察することができる。

しかし、この円柱の集積した空中像光学素子の課題として、空中像の解像度が低下することが挙げられる。解像度が低下してしまう理由の一つは、空中像結像に寄与しない円柱の断面部分が視界に入ってしまうからである。もう一つの理由は、円柱側面から光を取り込む必要があるために円柱同士の配置に間隔を開ける必要があるからである。

本研究では、図 2 のように円柱の両端を斜めに切断した形状を用いることで、水平方向の視野角の広さをできるだけ維持しつつ、特定の向きで高い解像度の空中像を結像できる空中像光学系を提案する。円柱断面を斜めに切断することで、特定の視点位置から観察した際に円柱の断面部分が視界に入りにくくなる。また、円柱を密集させて配置した場合にも円柱側面から光を取り込むことが可能になる。

4. 評価

4.1 モデリング

本実験は、空中像光学系を Blender 内でモデリングし、レンダリングエンジンとして Cycles を使用した。距離の単位として、Blender 内の距離 1 を現実空間での 1 cm と仮定した。円柱型の光学素子や MMAP に用いる鏡の反射率は 0.87 と定めた。円柱の透過面には Refraction BSDF を使用し、屈折率を 1.71 と定めた。円柱の直径及び MMAP のミラーアレイの間隔は 1 mm とした。また、円柱の鏡面部分の長さは 0.46 mm、円柱両端の断面の角度は 35° と定めた。

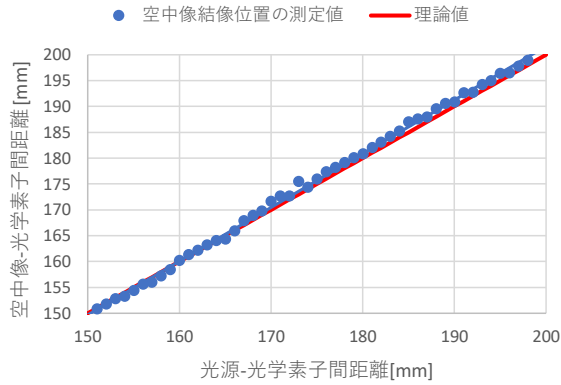


図 3: 空中像の飛び出し距離

4.2 空中像の結像位置

空中像が光学素子に対して光源の面对象な位置に結像していることを確認するために、光学素子からの飛び出し距離を計測した。結像位置の確認には、左右 2 枚の画像を用いたステレオマッチングの手法を用いた。光源の中心と空中像光学素子の間の距離を、150 mm から 200 mm まで 1 mm ごとに計測した。光源には、格子状に配置された 16 点の白丸が描かれた画像を利用し、丸の位置を画像処理によって自動検出することで左右の画像の比較を行った。

計測により得られた空中像の飛び出し距離と、その理論値の関係を図 3 に示す。実験より、空中像の結像位置は飛び出し距離の理論値とほぼ同じ値を取ることが確認できた。このことから、両端斜切円柱が集積した構造によって結像する空中像は、光学素子に対して光源と面对象な位置に結像することが分かる。

4.3 円柱両端の斜切の有無の比較

円柱の両端を斜めに切断することによる効果を確認するために、切断する場合としない場合でそれぞれレンダリングを行った。円柱の直径 D は、2 つの条件とも $D = 1$ mm で統一した。また、円柱を切断しない条件における円柱上下の透過面の長さ及び円柱同士の配置間隔は、鏡面部分の長さと同じ 0.46 mm と定めた。

切断する場合としない場合のそれぞれの条件における空中像のレンダリング結果を図 4 に示す。この結果から、円柱を切断する場合は円柱を切断しない場合に比べて、正面から観察したときの空中像の解像度が向上する場合があることが確認できた。

4.4 視域・迷光の評価

提案光学系の視域や迷光について評価するために、複数の視点位置から観察される空中像のシミュレーションを行った。比較対象として、Kiuchi ら [3] の提案する MMAP のモデルを 2 倍に拡大したものを使用した。光源と光学素子の間の距離は、5 cm と定めた。カメラの位置は、空中像を中心に空中像の正面の 0° の位置から空中像の右側 90° の位置まで 10° 刻みで変化させながら撮影を行った。得られた画像を図 5 に示す。

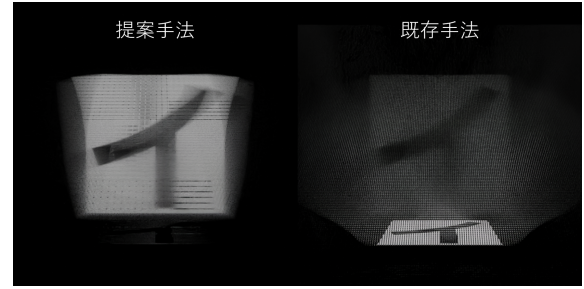


図 4: 左：提案手法（円柱両端を切断）、右：既存手法（円柱両端を切断しない）

表 1: 空中像光学素子の比較

	MMAP	円柱集積型	両端斜切型
解像度	◎	△	○
視域・迷光	△	◎	○

図 5 より、提案手法の光学素子によって結像された空中像は、正面から水平方向におよそ 40° までの角度で視認できることが確認できた。また、MMAP では 40° 前後で迷光が目立ってしまう一方で、提案手法による空中像では観察の邪魔になる迷光がほとんど発生していないことが確認できた。

5. 考察

MMAP・円柱集積構造・提案の空中像光学系のそれぞれの特徴について表 1 に示す。空中像を正面から観察した際の解像度は、既存の円柱集積構造よりも本提案手法の方が高かった。また、斜め方向から空中像を観察する条件においては、迷光が目立たない本提案手法が MMAP に比べて優れていた。一方で、視野角が最も広いのは既存手法の円柱集積構造であり、予備実験より 360 度から観察可能であることが確認できた。

提案手法における円柱の屈折率や高さ、断面角度は、必要とされる上下方向の視野角や結像位置に応じて決定する必要がある。例えば、光学素子から離れた位置に空中像を結像したい場合、円柱の屈折率を低くし、鏡面部分の高さや円柱の切断角度を大きくする必要があると考えられる。これらのパラメータを決定する方法の一つとして、レイトレーシング法により網羅的にレンダリングし、画像処理で評価することで最適化する手法が有効である。

円柱の屈折率は、ビーズ型の再帰性反射材と異なり、2 より小さい値であることが望ましいと考えられる。ビーズ型再帰性反射材を構成する球面レンズの場合、屈折率が 2 のときにレンズの焦点距離が球面レンズの半径と等しくなるため、ミラーで反射させることで再帰性反射を実現できる。一方で、本提案手法において円柱に入射する光線は、円柱の側面に対し斜め方向に進むため、図 6 に示すように経路が楕円面で表される。光線は楕円面の長辺側から入射し反対側で焦点を結ぶことで再帰性反射を実現できることから、

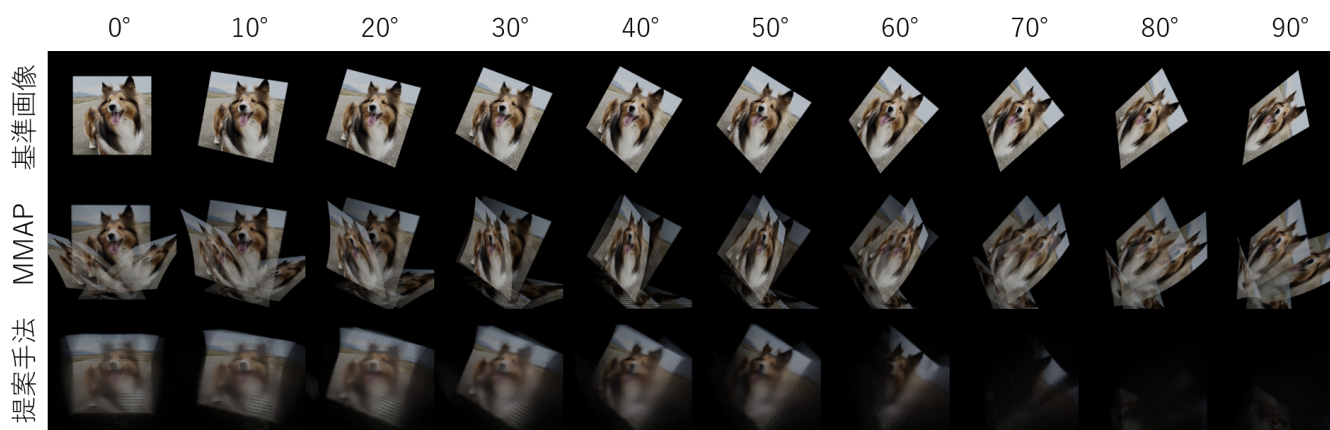


図 5: MMAP と両端斜切円柱集積光学系の比較. 上段: 空中像結像位置に直接ディスプレイを配置した際の基準画像, 中段:MMAP による空中像, 下段: 提案手法による空中像

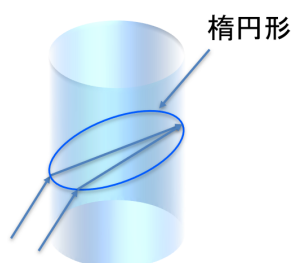


図 6: 円柱内部での光路

円形の面内で再帰性反射させる場合の屈折率 2 よりも小さい値であることが望ましいと考えられる。

Blender によるシミュレーションを用いた際の課題として、円柱を正確に再現できないことが挙げられる。Blender 内では、円柱の再現にポリゴンモデルが使用されているため、円柱の側面は長方形の板が円周状にならべて配置されたような構造になっている。したがって、円柱の側面をポリゴンではなく正確な円として扱うモデルを用いることで、シミュレーションの精度が向上することが考えられる。

Blender を使用することにより発生するもう一つの問題として、光源のディスプレイが実際のディスプレイの発光の特性を反映していない点が挙げられる。実際の液晶ディスプレイには、観察する角度が液晶の正面から離れるにしたがって輝度が低下する性質がある。したがって、今後はこの特性を再現した手法も検討する必要がある。

6. むすび

本稿では、水平方向の広い範囲から観察できる解像度の高い空中像を実現することを目的として、円柱の両端を斜めに切断した形状の光学素子が集積した構造を検討した。レイトラッキング法を用いて結像する空中像をレンダリングすることで、既存の空中像結像光学系との比較を行った。その結果、光学素子に対して斜めの方向から空中像を観察する条件において、視域や解像度、迷光が発生しない点で本提案手法が有効である可能性が示された。

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] Makoto Otsubo. Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same. U.S. Patent No. 8,702,252, 2014.
- [2] 武中健一. 光学プレートおよびそれを備えた表示装置. 特開 2016-090826, J-PlatPat.
- [3] Shunji Kiuchi, et al. Simulating the appearance of mid-air imaging with micro-mirror array plates. *Computers & Graphics*, Vol. 96, pp. 14–23, 2021.
- [4] Yuki Maeda, et al. Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays. In *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215, 2014.
- [5] Takafumi Koike, et al. Aerial 3d imaging by retroreflective mirror array. In *Proceedings of the 2018 ACM Companion International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, p. 25–29, 2018.
- [6] Satoshi Maekawa, et al. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In *Three-Dimensional TV, Video, and Display V*, Vol. 6392, pp. 130 – 137. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [7] Kengo Fujii, et al. Aerial display on a clear sphere with aerial imaging by retro-reflection. In *2019 24th Microoptics Conference (MOC)*, pp. 222–223, 2019.
- [8] Kazuki Otao, et al. Air mounted eyepiece: Optical see-through hmd design with aerial optical functions. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, 2018.
- [9] Changwon Jang, et al. Design and fabrication of freeform holographic optical elements. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 39, No. 6, 2020.