

両端円錐型円柱による空中像光学素子の検討

佐野 遵平*¹ 小泉 直也*¹

Abstract — 本研究では、水平方向に 360 度から観察可能な空中像の実現を目的として、透明な円柱の両端を円錐状にした光学素子を 2 次元的に並べて配置した構造を提案する。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と、観察の妨げとなる迷光が発生する課題を解決するものである。レイトレーシング法によりこの光学素子によって結像される空中像をシミュレーションした結果、本提案手法による空中像は光学素子に対し光源と面対称な位置に結像することが確認できた。また、既存の直交ミラーを用いた空中像光学素子と異なり、水平方向の 360 度全方位から観察可能で迷光の生じない空中像を結像できることが確認できた。

Keywords : 空中像, 360 度ディスプレイ, 再帰透過光学素子, レイトレーシング, 迷光

1 はじめに

空中像とは、Augmented Reality (AR) を実現するための視覚提示手法の 1 つであり、空中に結像した実像のことである。複数の人が同時に裸眼で観察できる利点から、エンターテインメントや感染症対策の非接触端末などでの利用が期待されている。この空中像は、光源からの光が空中像光学素子によって屈折・反射し、別の一点に集まることで形成される。

空中像を実現するための空中像光学素子には、主に視野角の制限と不要光の発生との 2 つの課題がある。1 つ目は、空中像光学素子には空中像を結像できない角度があるため、空中像を観察できる範囲が限られていることである。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] のような空中像光学素子は、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。2 つ目は、迷光や透過光などの不要光が発生することである。MMAP のような空中像光学素子では、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う、ユーザの位置によっては空中像観察の妨げとなってしまう。

本研究では、水平方向に 360 度の視野角を持ち、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して、図 1 に示されるように円柱の両端を円錐形状にした光学素子が 2 次元に並べられた構造を提案し、その原理を確認する。空中像の観察可能な範囲の評価や迷光の見え方の確認は、コンピュータ上でのシミュレーションを利用する。

評価方法として、Kiuchi ら [2] が提案したレイトレーシング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

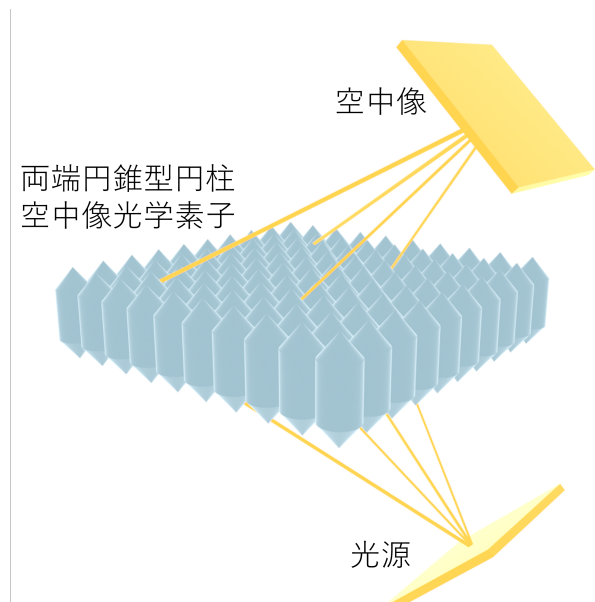


図 1 両端円錐型円柱による空中像の概要図。

光学素子の比較対象として、MMAP を使用した。

2 関連研究

2.1 空中像結像光学素子

空中像光学素子には、再帰性反射材と類似した構造をもつものがある。Z 軸が再帰性反射材の反射面に垂直な 3 次元直交座標 (XYZ) を仮定したとき、再帰性反射材は入射した光線の XYZ 軸すべての成分を反射させる。一方で空中像光学素子は、光線の XYZ 軸のいずれか 2 軸の成分を反射させ、のこりの 1 軸の成分は直進させる。よって、空中像光学素子は、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 1 軸だけ直進する構造に変更することで実現できる。

再帰性反射材には、コーナーキューブ型とビーズ型

*¹電気通信大学

の2種類がある。コーナーキューブ型は、3枚の平面鏡がそれぞれ直交するように配置された構造を持つ。この3つの面のそれぞれで光が反射することで、光は入射光と同じ方向へ戻る。ビーズ型は、球形のビーズと反射膜で構成される。入射した光は、ガラスビーズの焦点に集まる。集まった光は反射膜で反射し、入射光と逆の経路をたどることで、光源側へ戻る。空中像光学素子も同様に、主にこの二種類に分類できる。

コーナーキューブ型再帰性反射材と類似した仕組みを利用する空中像光学素子として、Roof Mirror Array [3] や Retroreflective Mirror Array [4], MMAP, Dihedral Corner Reflector Array (DCRA) [5] などが提案されている。MMAP や DCRA は光学素子に対し光源と面対称な位置に空中像を結像する。一方で Retroreflective Mirror Array や Roof Mirror Array は、光学素子に対し光源と同じ側に空中像を結像する。これらの空中像光学素子に入射する光のうち、直交するミラーの各面で奇数回ずつ反射した光だけが空中像の結像に寄与する。一方で、それ以外の光は迷光などの不要光となってしまう、空中像の観察を妨げる。

ビーズ型再帰性反射と類似した仕組みを利用する空中像光学素子として、武中 [6] は透過面と反射面を持つ円柱を2次元的に並べて配置した構造を提案している。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。この空中像光学素子による空中像は、360°から観察可能である。しかし、円柱断面や円柱どうしの隙間に入る光が失われてしまうため、結像する空中像が暗くなってしまう課題がある。そこで、Sanoら [7] は円柱の両端を斜めに切断した形状を用いることで、特定の方向に対する空中像の輝度や解像度を向上している。しかし、この光学素子による空中像は360°から観察できない。

2.2 光学シミュレーション

空中像の結像位置や不要光をコンピュータ上でシミュレーションする手法がいくつか提案されている。藤井ら [8] は、空中像光学系の1つである Aerial Imaging by Retro Reflection (AIRR) の照度分布をヒートマップを用いて可視化した。Otaoら [9] 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、光源から目までの光線を追跡するシミュレーション手法を用いている。ただし、これらの手法は空中像や迷光の見え方を再現できない。

Kiuchiら [2] は、Computer Graphics (CG) の分野で広く利用されるレイトレーシング手法を用いることで、空中像の見え方を再現している。CGにおけるレイトレーシングとは、カメラの位置から光源まで屈折や反射を再現しながら光線を逆向きに追跡する手法であ

り、写実的な画像を生成できる。空中像のシミュレーションにレイトレーシングを用いることで、空中像だけでなく迷光などの不要光の見え方も再現できる。本研究においても、空中像の見え方だけでなく迷光の再現が可能なレイトレーシングをシミュレーション手法として選択する。

3 原理

本研究では、図2のように透明円柱の両端を円錐形状にした光学素子が、2次元平面上に並べて配置された構造を用いることで、水平方向の360度の視野角を維持しつつ、高い解像度の空中像を実現する。円柱両端を円錐形状にすることで、空中像結像に寄与しない円柱断面部分を無くし、空中像の結像に寄与する光量を増加させる。さらに、円柱部分の側面から光を取り込む必要が無いため、光学素子の間に空隙を設けず密集させて配置することを可能にし、空中像の解像度を向上させる。

本研究で提案する円柱や円錐を利用した空中像光学素子は、マイクロビーズ型再帰性反射材と似た仕組みによって空中像を結像する。空中像光学素子のプレートに平行な空間内では、ビーズ型再帰性反射材と同様に光学素子に入射する光線が再帰反射する(図2左)。一方で、プレートに垂直な方向の成分は直進する(図2右)。この性質により、空中像光学素子に対し光源と面対称な位置で実像が形成される(図1)。

本提案手法で使用する円柱や円錐を用いた方法がMMAPやDCRAなどの直交ミラー構造を用いた方法に比べて優れている点は、空中像の視野角が広い点と迷光が発生しない点の2点である。1点目は、円柱型の構造は直交ミラー構造と異なり、水平方向のどの角度の光も再帰透過できるため、視野角を拡大できることである。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、ミラーの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できる。2つ目は、円柱型は直交ミラー構造に比べ、不要光が発生しにくいことである。MMAPなどの直交ミラー構造は、ミラーのそれぞれの面で偶数回反射した光が迷光となってしまう。一方で、円柱型は反射と屈折を利用するため、このような反射回数の過不足による迷光が構造上発生しない。

本研究では、単純な円柱を用いた方法よりも高解像度で明るい空中像を実現するために、円柱の両端を円錐形状にする。武中の提案した円柱を利用した光学素子は、空中像結像に寄与しない円柱の断面が空中像の輝度を落としていた。加えて、円柱側面から光を取り

4 評価

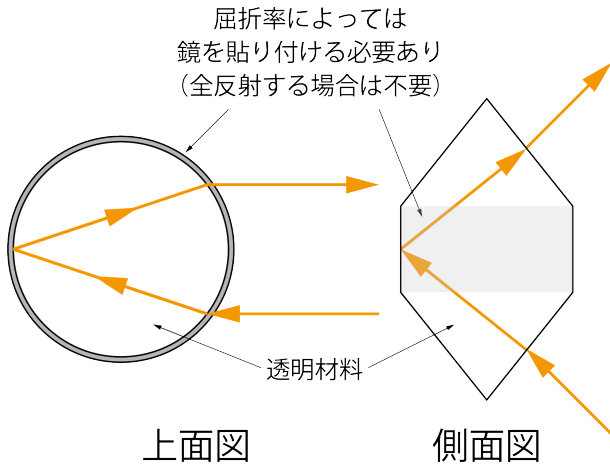


図2 両端円錐型円柱の概要図.

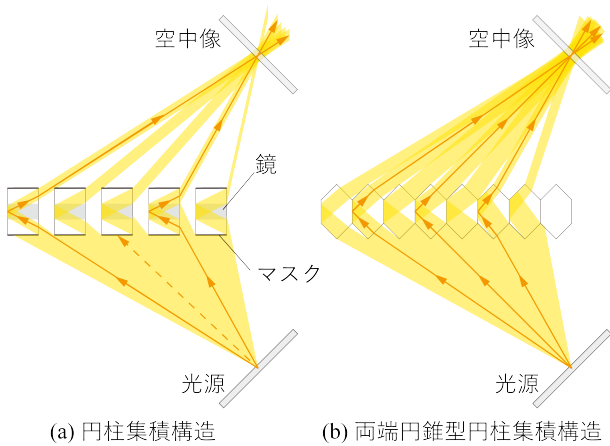


図3 (a) 単純な円柱の集積構造による空中像.
(b) 提案手法による空中像. 提案手法では円柱断面で光が失われず、また円柱を密集して配置できる.

込むために、それぞれの円柱の間に隙間を開ける必要があった。そこで、本提案手法では、円柱の両端を円錐形状にすることで、円柱の両端部分も空中像の結像に活かしつつ、円柱どうし密集して配置することを可能にする(図3)。また、Sanoらの提案する両端斜切円柱構造と異なり、指向性を持たない円柱形状を利用することで、360度からの観察を可能にする。

円柱の両端を円錐形状にすることで生まれるもう1つの利点として、円柱側面の鏡面仕上げが不要になり、素子の製造が容易になる点が挙げられる。光学素子の円錐部分に入射する光線は、円柱の側面に入射する光線と比べ入射面に対し垂直に近い角度で入射するため、屈折によって曲げられる角度が小さくなる。すると、円柱内側の側面で光が反射するときの光の入射角は大きくなる。その結果、屈折率によっては円柱内側側面で全反射するようになるため、円柱側面の鏡面仕上げが不要になる。

提案手法の光学素子により空中結像が可能であることを確認するために、レイトレーシングを用いてシミュレーションした。本シミュレーションでは、次の2つのことを確かめる。1つ目は、空中像が適切な位置に結像していることである。2つ目は、迷光の有無と空中像を見ることのできる範囲を調べることである。本実験では、Kiuchiらと同様に、空中像の見え方や迷光を再現できるレイトレーシングを利用した。

4.1 モデリング

空中像光学素子のシミュレーションには、3DCGを製作するソフトウェアであるBlender 3.6を利用した。また、レンダリングエンジンとしてCyclesを使用した。提案する両端円錐型円柱による空中像光学素子と、比較対象であるMMAPの2つをBlender内でモデリングした。MMAPのモデリングはKiuchiらの手法を援用した。距離の単位として、Blender内の距離1を物理空間での1mmと仮定した。

光学素子のモデリング時のパラメータは次のように定めた。円柱の直径および比較対象のMMAPのミラーレイの間隔は1.0mmとし、光学素子全体の大きさは300mm四方と定めた。光学素子の透過面にはRefraction BSDFを使用し、屈折率はポリカーボネートの屈折率と同等の1.58と定めた。円錐頂角は90°に定めることで、光学素子のプレートに対し45°の角度で入射する光線が円錐部分に垂直に入射するようにした。光学素子の円柱部分の高さは、円柱直径と同じく1.0mmと定めた。

4.2 空中像の結像位置

空中像が光学素子に対して光源と面対象な位置に結像していることを確認するために、両端円錐型円柱光学素子からの空中像飛び出し距離を計測した。結像位置の確認には、Kiuchiらと同様に、左右2か所から撮影した画像を用いて対象物までの距離を求めるステレオマッチングを実施した。

図4は、シミュレーション実施時のディスプレイ、空中像光学素子、カメラの配置を示している。光源のディスプレイと光学素子のプレートのなす角は45°と定めた。光源の中心と空中像光学素子との距離 L_A は、60mmから80mmまで1mmずつ変化させ、それぞれの条件における空中像の飛び出し距離 L_C を計測した。光学素子とカメラの間の距離 L_B は600mm、左右2か所のカメラの間の距離は50mmと定めた。光源には、縦4個×横4個の白丸が27mm間隔で格子状に配置された画像を利用し、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を比較した。空中像の飛び出し距離の測定結果を図5に示す。

図5から、空中像の結像位置は飛び出し距離の理論

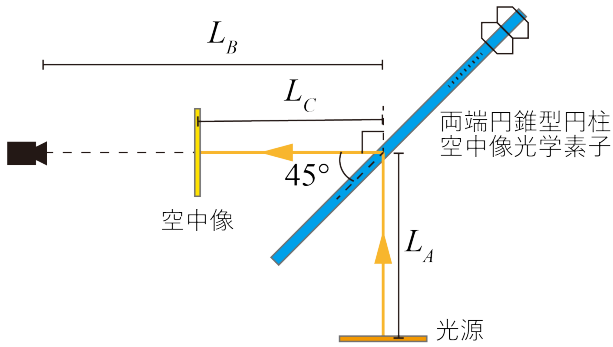


図4 空中像結像位置評価実験の光学素子の配置.

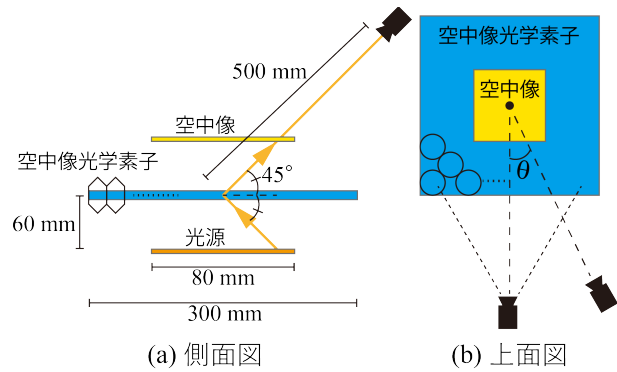


図6 視域・迷光評価実験の光学素子の配置.

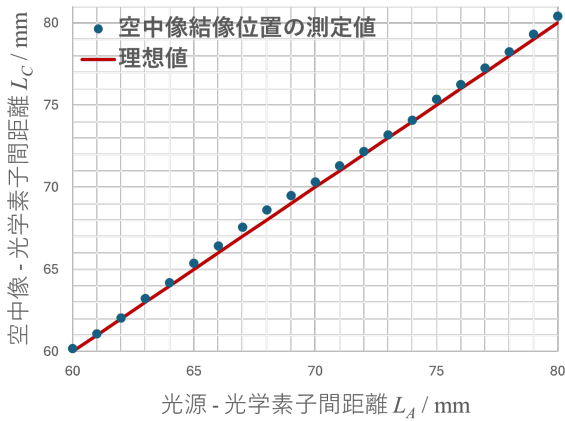


図5 空中像の飛び出し距離.

値と一致することが確認できた. このことから, 両端円錐型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対象な位置の空中に結像することが確認できた.

4.3 視域・迷光の評価

提案する光学素子の視域や迷光について既存の光学素子と比較するために, 複数の視点位置から観察される空中像をレイトレーシングによってシミュレーションした. 比較対象として, Kiuchiらの提案するMMAPのモデルを使用した.

図6は, シミュレーション実施時の光源ディスプレイ, 空中像光学素子, カメラの配置を示している. 本実験では, 空中像光学素子と光源ディスプレイを平行に配置し, 空中像光学素子のプレートの斜め上45度方向から観察したときの空中像の見え方をシミュレーションした. 水平方向の視野角を調べるために, 空中像光学素子に垂直な軸に対してカメラの角度 θ を 0° から 360° まで 15° ずつ変化させながらレンダリングした. 光源ディスプレイと空中像光学素子の間の距離は60 mmと定めた. カメラの位置は, 空中像光学素子のプレートの中心から斜め45度方向に500 mm離れた位置と定めた. 光源ディスプレイの大きさは80 mm四方と定め, カタカナの「イ」を表示した.

提案する両端円錐型円柱とMMAPによる空中像の

見え方を比較した結果を図7, 図8に示す. MMAPでは迷光が空中像と重なって表示されてしまう一方で, 両端円錐型円柱による空中像では観察の妨げとなる迷光が発生しなかった. さらに, MMAPでは $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 付近で迷光が目立ち空中像の輝度が減少しているのに対し, 斜切円柱では 360° 全周りで明るい空中像を結像できていることが確認できた. しかし, 提案する両端円錐型円柱による空中像は, MMAPによる空中像に比べぼけてしまうことが確認できた.

5 考察

レイトレーシング結果から, 両端円錐型円柱集積構造によって水平方向 360° 度から観察可能な空中像を光源と対象な位置に結像できることが明らかとなった. この結果から, 本光学素子はテーブルを囲って複数人で同時に空中像を観察するような用途での使用に適していることが考えられる.

今回のレイトレーシングを用いたシミュレーションでは, 下記のリミテーションが考えられる. 1点目は, 本レイトレーシング手法では色収差を再現できていないことである. 単一波長の光源を用いない限り, 実際の光学素子による空中像はレイトレーシング結果よりもぼけたりにじんだりしてしまう可能性がある. 今後は光の分散も再現できるレイトレーシング手法を用いることで, 色収差の影響も調査する. 2点目は, 円柱や円錐の曲面を正確に再現できていないことである. 本実験では, 円柱や円錐の再現にポリゴンモデルを使用し, 円形部分は多角形(128角形)によって近似した. 今後はポリゴンモデルではなく曲面をそのまま扱うモデルを用いることで, シミュレーションの精度を向上する予定である. 3点目は, 回折など光の波動性の影響を再現できていないことである. 実際に光学素子を作る際に微細な円柱や円錐を用いた場合, 回折の影響によって本シミュレーション結果よりもぼけが大きくなってしまいう可能性がある.

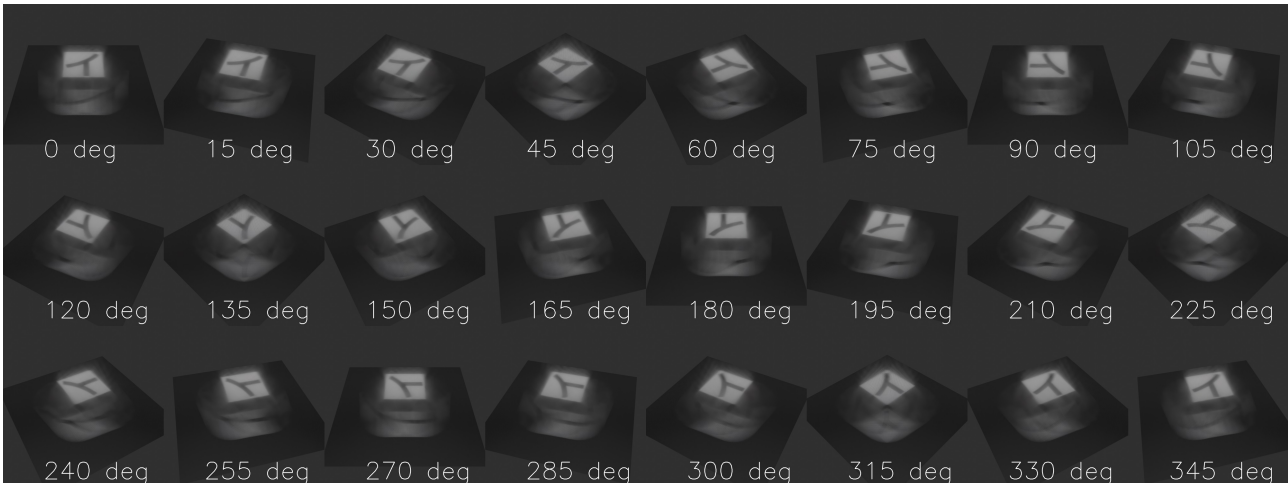


図7 両端円錐型円柱による空中像のレイトレーシングによるシミュレーション結果. 画像は水平方向 15° ずつカメラを移動させながらレンダリングした結果を示す.

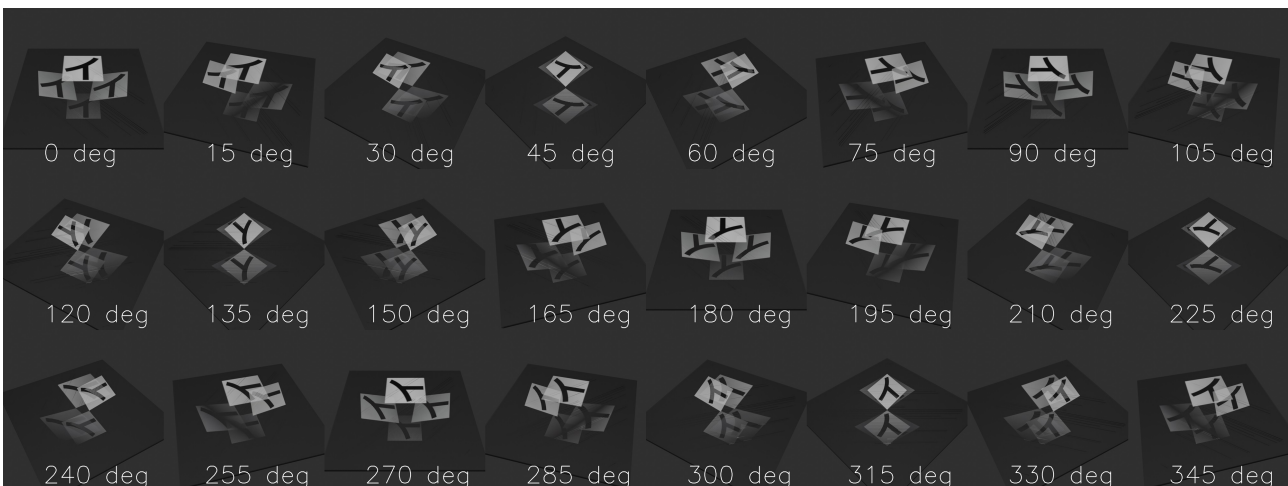


図8 比較対象のMMAPによる空中像のレイトレーシングによるシミュレーション結果. 画像は水平方向 15° ずつカメラを移動させながらレンダリングした結果を示す.

今後の展望として、レイトレーシング手法の改善に加え、光学素子の寸法やパラメータを最適化する予定である。現状では、本空中像光学素子の最適な屈折率や円柱の高さ・円錐の頂角の大きさが判明していない。したがって、今後は高解像度・高輝度な空中像を結像できるような光学素子の寸法やパラメータ条件を調査する。

6 むすび

本稿では、水平方向 360° から観察できる空中像の実現を目的として、円柱の両端を円錐状にした光学素子が同一平面上に並べて配置された構造を検討した。レイトレーシングを用いることで、空中像の見え方や迷光の有無を既存の直交ミラー構造を持つ空中像光学素子と比較した。その結果、水平方向に 360° から観察できる点と、迷光が発生しない点で本提案手法は有

効である可能性が示された。一方で、直交ミラー構造を持つ空中像光学素子に比べ、空中像のぼけは大きくなってしまったことが確認できた。

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. 2014. U.S. Patent No. 8,702,252.
- [2] 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.
- [3] Yuki Maeda, Daisuke Miyazaki, and Satoshi Maekawa. Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mir-

- ror arrays. In *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215, 2014.
- [4] Takafumi Koike and Yasushi Onishi. 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.
- [5] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In Bahram Javidi, Fumio Okano, and Jung-Young Son, editors, *Three-Dimensional TV, Video, and Display V*, Vol. 6392, pp. 130 – 137. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [6] 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.
- [7] Junpei Sano and Naoya Koizumi. Mid-air imaging based on truncated cylindrical array plate. In *2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 909–910, 2024.
- [8] Kengo Fujii and Hirotsugu Yamamoto. Aerial display on a clear sphere with aerial imaging by retro-reflection. In *2019 24th Microoptics Conference (MOC)*, pp. 222–223, 2019.
- [9] Kazuki Otao, Yuta Itoh, Kazuki Takazawa, Hiroyuki Osone, and Yoichi Ochiai. Air mounted eyepiece: Optical see-through hmd design with aerial optical functions. In *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference*, 2018.