



両端斜切円柱集積構造による空中像光学素子の製作と評価

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、迷光の発生を抑えた空中像の実現を目的として、円柱両端を斜めに切断した形状の光学素子を二次元平面上に並べた構造の再帰透過光学素子を製作し、その機能を確認した。従来の直交ミラー構造を有する再帰透過光学素子では迷光の発生が課題であり、その解決策として円柱形状を利用した構造が提案されている。そこで本研究では、実際に製作された円柱構造の光学素子により、文字の空中結像が可能であることを確認した。

キーワード: 空中像, 光学素子, 迷光

1. はじめに

空中像とは空中に結像した実像のことであり、物理空間にデジタル表現を溶け込ませる Augmented Reality 技術の一つである。ヘッドマウンテッドディスプレイ等の装置の装着を必要とせず、複数人が同時に裸眼で観察可能な利点を持つことから、デジタルサイネージや感染症予防に使用される非接触ディスプレイ等での利用が期待されている。この空中像は、再帰透過光学素子などの空中像光学素子により、光源から拡散された光が空中で 1 点に集められることで実現される。

空中像を結像する光学素子として、直交するスリットミラー構造を持つ再帰透過光学素子が提案されている。再帰透過光学素子は、入射光を素子の面に平行な成分のみ反転させ、垂直な成分を直進させる性質を持つ。これにより、光学素子を対称面として、光源と面対称な位置に空中像を結像する。Micro mirror array plates (MMAP) や Dihedral corner reflector array [1] など、直交するスリットミラー構造をもつ再帰透過光学素子が提案されている。

しかし、既存のスリットミラー構造を持つ再帰透過光学素子には、ゴースト像などの迷光が空中像の観察を妨げてしまう課題がある。光学素子に入射した光のうち、直交するミラーの各面で奇数回ずつ反射した光が空中像を形成する一方で、各面で偶数回ずつ反射した光はゴースト像となる。空中像の結像位置やユーザーの観察位置によっては、このゴースト像が観察者の視界に入ってしまうことで、空中像の観察の妨げとなってしまう。

Sano ら [2] は、ゴースト像の課題を解決する構造として、両端を斜めに切断した円柱を集積した Truncated Cylindrical array plate (TCAP) 構造を提案しているが、実際に製造された光学素子による文字や画像の結像はまだ確認されていない。この構造では、透明な円柱の側面で生じる屈折と、円柱の一部に貼り付けられた鏡による反射を組み合わせることで、再帰透過を実現している。従来の反射のみを利用するスリットミラー構造とは異なり、屈折も利用しているため、鏡面反射の回数の過不足によって生じるゴース



図 1: 製作した TCAP による空中像。

ト像が原理的に発生しないという利点がある。Sano らの研究では、シミュレーションによって画像の表示と空中への結像が可能であることが示されており、さらに、実際に製作された素子を用いて点光源から出た光が光学素子に対して面対称な位置に結像することも確認されている。しかし、実際に製作された構造による文字や画像の結像はこの研究では確認できていない。

本稿では、計 3360 個の両端斜切円柱が集積した TCAP による空中像光学素子を製作し、空中像の結像を確認する。空中像をスクリーンに投影することで、空中像の結像位置を評価する。また、実際に結像した空中像を左右から撮影することで、光源画像が空中に結像していることを確認する。

2. 関連研究

2.1 空中像光学素子

空中像の結像に用いられる代表的な光学素子として、直交するスリットミラー構造を持つ再帰透過光学素子が提案されている。MMAP, DCRA [1] 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。また、光学素子に対し光源と同じ側に空中像を結像する Retroreflective mirror array [3] も提案されている。

しかし、これらの空中像光学素子は観察の妨げとなるゴース

スト像が発生してしまう課題があり、この課題を解決する抜本的な光学素子の開発が必要である。ゴースト像の課題を解決する方法として、ミラーを空中像を中心として放射状に配置した Radially arranged DCRA [4] も提案されているが、視点位置が限られるという問題が依然残っている。

スリットミラー構造を無くすことで、構造的にゴースト像の発生を無くした光学素子として、円柱集積構造を持つ再帰透過光学素子が提案されている。武中 [5] は、透明円柱の中央部の側面に鏡を貼り付けた構造が集積した空中像光学素子を提案している。また、Sano ら [2] は、この各円柱の両端を斜めに切断することで、空中像の結像位置に指向性を持たせた TCAP を提案している。しかし、いずれの構造も、実際に製作された光学素子による文字や画像の結像は確認されていない。

2.2 空中像光学素子の利用例

空中像には物理的な物体に触れる必要が無いという利点があるため、非接触ディスプレイとしての利用が期待されている。空中像へのタッチインタラクション等を実現するセンシング技術として、Kinect を用いた方式 [6] や、Time of flight 方式の深度センサーを利用した方式 [7] が提案されている。また、全周囲を囲うような空中像を表示する研究 [8] や大型の空中像を表示する研究 [9]、空中像に触覚デバイスを組み合わせた研究 [10] など、空中像の応用例が広く探索されている。

空中像光学素子をプロジェクションマッピングの光学系として利用したシステムも提案されている。Hiratani ら [11] は、再帰透過光学素子を用いて影のないプロジェクションマッピングを実現している。Kiyokawa ら [12] は、MMAP を用いることで、ProCam システムを隠したステルスプロジェクションマッピングを実現している。

3. 原理

TCAP は、図 2 に示すように、両端を斜めに切断した形状の透明な円柱で構成されている。各斜切円柱のすばんだ側半分には鏡が貼りつけられ反射面となり、その反対側の鏡の貼り付けられていない部分は入射・出射面となる。TCAP に平行な平面内では、ビーズ型再帰性反射材のように、入射した光線が再帰反射し、入射光と同じ経路をたどって出射する（図 2(b)）。一方で TCAP に垂直な軸方向の光線成分は反転せず直進する（図 2(a)）。

この形状の円柱が 2 次元平面上に並べて配置された構造を用いることで、空中像を結像する。光源の 1 点から拡散した光が、各円柱で屈折・反射し、素子に対して光源と反対側で再度 1 点に集まることで空中像を結像する（図 2(c)）。これにより、本構造は再帰透過光学素子として振る舞い、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。

本構造は、光学素子内で屈折および 1 回反射する光により空中像を結像するため、従来のスリットミラーアレイ構造を持つ空中像光学素子で発生していたゴースト像の問題が構造的に発生しない利点を持つ。従来のスリットミラーア

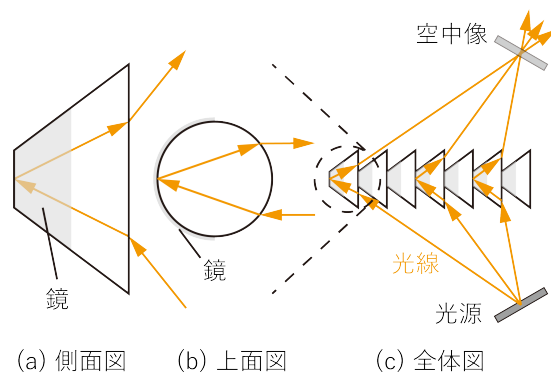


図 2: TCAP の原理. (a) TCAP を構成する円柱の側面図. (b) TCAP を構成する円柱の上面図. (c) TCAP の側面図.

レイ構造では、直交するミラーアレイの各層で奇数回ずつ反射した光が空中像を結像する一方で、偶数回ずつ反射した光はゴースト像を結像してしまう。しかし、円柱集積構造では、屈折と 1 回反射した光が空中像を結像するため、光の反射回数により生じるゴースト像が構造的に発生しない。

提案された TCAP の原理が機能することは、物理ベースレイトレーシングによって検証されている [2]。このレンダリングシミュレーションにより、従来の光学素子と比較して、より広い視野角から空中像を観察できることが確認されている。

4. 製作

本研究では、両端を斜めに切断した形状の光学素子（図 3）を縦 56 個 × 横 60 個並べることで TCAP を製作した。円柱の直径は 2 mm とし、鏡の蒸着されたアクリル製の斜切円柱はオプトセラミックス社に加工を依頼した。斜切円柱のもっとも長い部分の長さは 5.42 mm、円柱の切断角度は 45° とした。これらの設計パラメータは、3DCG ソフトウェアである Blender のレイトレーシングエンジン（Cycles）を用いたレンダリングシミュレーションによって決定した。レンダリングでは、アクリルの屈折率がおおよそ 1.5 であることをもとに、光学素子を基準面として仰角方向 60° から観察することを前提に設計した。

以下の手順で両端斜切円柱を配置し、固定した。まず、20 個の斜切円柱が横一列に収まるのこぎり状の溝の彫られたアクリル製の土台を作成した。次に、その溝に斜切円柱 20 個を並べ、紫外線硬化樹脂を用いて 3D プリンタ製の固定部材と接着し固定した。この斜切円柱 20 個を 1 組としたものを、168 組作成した。続けて、20 個 1 列の斜切円柱を均等に同じ向きで 8 列配置するための「ハ」の字状の固定部材を 3D プリンタで作成し、20 個の斜切円柱の組み合わせを固定部材 1 個あたり 8 列並べた（1 組当たり斜切円柱が 160 個）。これを 21 組作成した。最後に、厚さ 1 mm のアクリルで外枠を作成し、1 組 20 個 × 8 列の斜切円柱アレイを横 3 列 × 縦 7 列並べることで、計 56 個 × 60 個の光学素子を配置した。製作した TCAP を図 4 に示す。

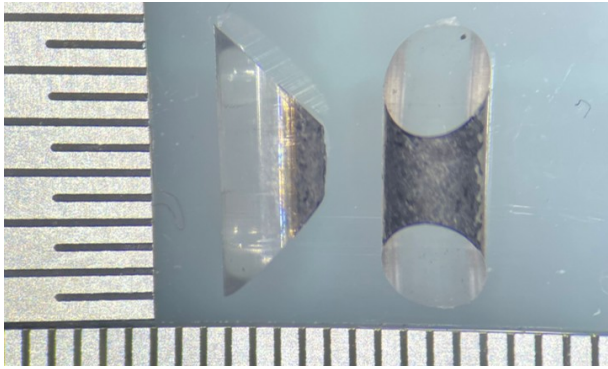


図 3: TCAP を構成する斜切円柱の拡大写真。写真中の物差しの 1 メモリは 0.5 mm を示す。

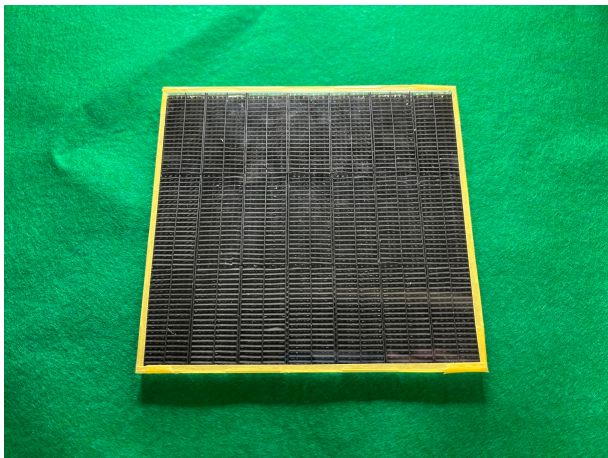


図 4: 製作した TCAP の写真。

5. 評価

5.1 空中像の結像位置

空中像が光学素子に対し光源と面対称な位置に結像することを、スクリーンへの空中像の投影により評価した。空中像の結像位置の測定には、Osato ら [13] の手法を一部参考にし、白抜きの「田」のような形状を持つ、 2×2 マスの線で囲まれた図を光源として表示した。1 マスの大きさは $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ とした。また、スクリーンには、同じ寸法の「田」の形状を印刷したトレーシングペーパーを使用した。使用した装置を図 5 に示す。

図 6 は、TCAP-スクリーン間距離を 2.5 cm, 5.0 cm, 7.5 cm に定めたときのスクリーンに投影された空中像の画像を示している。2.5 cm (空中像飛び出し距離の理論値)

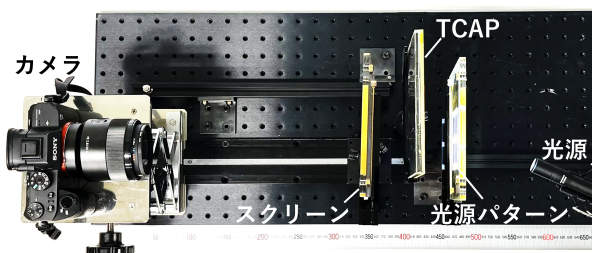


図 5: 空中像結像位置の評価装置。

りも短い距離)では、「田」の模様がスクリーンに印刷された同様の模様よりも大きく、左にずれた位置に投影された。5.0 cm (空中像飛び出し距離の理論値)では、スクリーンに印刷された模様と空中像の位置やサイズがおおむね一致していることが確認できた。7.5 cm (空中像飛び出し距離の理論値よりも離れた位置)では、投影された像が右にずれ、空中像のサイズもスクリーンに印刷された模様のサイズよりも大きくなった。以上の結果から、空中像が TCAP 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。

5.2 文字の表示

本光学素子を、空中像として文字を表示する用途としても利用可能であることを確かめるために、カタカナの「イ」を空中像として表示した。文字の大きさは、縦 5 cm, 横 5 cm と定めた。空中像の飛び出し距離として、光源と TCAP のなす角を 15° と定めた。また、文字の中心と TCAP の間の距離は 3.5 cm と定めた。

結像した空中像を左右から撮影した結果を図 7 に示す。空中像とカメラの間の距離は 50 cm, 左右のカメラの間の距離は 10 cm に設定した。本結果から、左右 2 か所の異なる位置から空中像が観察可能であることを確認できた。

6. 考察

本結果から、CG を用いたコンピュータ上でのレンダリングによって光学素子を設計し、それをもとに実際に光学素子を製作するというアプローチが有効であることが示された。本研究では、レイトレーシングを用いたレンダリングにより光学素子の寸法を決定し、その寸法で実際に光学素子を実装することで、TCAP による空中結像を実現した。本研究で用いたように、事前にレンダリングによって空中像の結像特性を確認してから製作を行うことで、開発に要する時間を短縮し、コストの削減が可能となる。

今回製作した TCAP には、製作上の課題に起因して空中像の視野角が狭くなる問題や、像にぼけやノイズが生じる問題が確認された。1 点目の要因は、製作過程で生じた円柱の傾きや位置ずれなどの幾何学的な誤差が、空中像のぼけやノイズを生んでしまった点である。2 点目の要因は、これらの誤差を軽減するために用いた、3D プリンタ製の「ハ」の字状固定部材が視野角を物理的に制限してしまったことである。

7. むすび

本稿では、両端斜切円柱による空中像光学素子 (TCAP) を製作し、空中像の結像を確認した。レイトレーシングを用いたレンダリングにより、光学素子の寸法や屈折率などのパラメータを決定し、それに基づいて TCAP を製作した。スクリーンを用いた結像位置の評価結果から、製作した TCAP により像が面対称な位置に結像していることが確認できた。また、空中像として文字を表示し、左右 2 か所からカメラで撮影した結果から、製作した TCAP により実際に空中に文字が結像できることが確認できた。

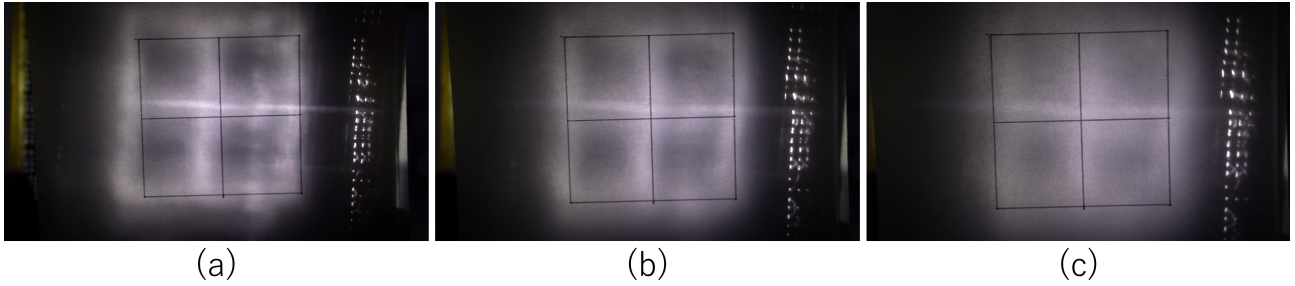


図 6: スクリーン投影による結像位置の評価結果. TCAP – スクリーン間距離が (a) 2.5 cm のとき. (b) 5.0 cm (光源と面対称な位置) のとき. (c) 7.5 cm のとき.

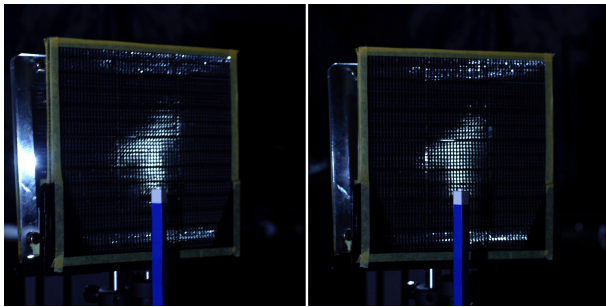


図 7: 製作した TCAP による「イ」の空中像 (左右 2 か所から撮影) .

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] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In *Proc. SPIE*, Vol. 6392, p. 63920E, 2006.
- [2] Junpei Sano and Naoya Koizumi. Truncated cylindrical array plate for mid-air imaging. *Optical Review*, Vol. 32, pp. 131–140, 2025.
- [3] 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*, pp. 25–29, 2018.
- [4] 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, Jan 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Masaki Yasugi, Mayu Adachi, Kosuke Inoue, Nao Ninomiya, Shiro Suyama, and Hirotsugu Yamamoto. Development of aerial interface by integrating omnidirectional aerial display, motion tracking, and virtual reality space construction. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 34, No. 5, pp. 1175–1183, 2022.
- [9] Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, Saki Sakaguchi, and Takeshi Naemura. Air-range: Designing optical systems to present a tall mid-air image with continuous luminance on and above a tabletop. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 75–87, 2023.
- [10] Rina Nagano, Takahiro Kinoshita, Shingo Hattori, Yuichi Hiroi, Yuta Itoh, and Takefumi Hiraki. Haptofloater: Visuo-haptic augmented reality by embedding imperceptible color vibration signals for tactile display control in a mid-air image. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 11, pp. 7463–7472, 2024.
- [11] Kosuke Hiratani, Daisuke Iwai, Yuta Kageyama, Parinya Punpongsanon, Takefumi Hiraki, and Kosuke Sato. Shadowless projection mapping using retrotransmissive optics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2280–2290, 2023.
- [12] Masumi Kiyokawa, Shinichi Okuda, and Naoki Hashimoto. Stealth projection: Visually removing projectors from dynamic projection mapping. In *SIGGRAPH Asia 2019 Posters*, No. 41, pp. 1–2, 2019.
- [13] Yui Osato and Naoya Koizumi. Compact optical system displaying mid-air images movable in depth by rotating light source and mirror. *Computers & Graphics*, Vol. 91, pp. 290–300, 2020.