

# 再帰反射材とパンチングメタルビームスプリッターを用いた 空中ヒーター光学系における光利用効率と温度上昇の関係

兼子 颯太郎†, 滝山 和晃†, 陶山 史朗†, 山本 裕紹†

概要空中画像位置に熱感覚を与えることで、インタラクティブな空中ディスプレイのリアリズムと操作性を高める空中ヒーター光学システムを提案する。本システムは、熱源からの遠赤外線(FIR)を収束させるために、打ち抜き金属ビームスプリッターとアルミニウムでコーティングされたコーナークューブアレイを用いた、再帰反射による空中イメージング(AIRR)に基づいている。レイトレーシングシミュレーションにより、原理を確認し、パンチングメタルの穴径、ピッチ、厚さ、レトロリフレクタのプリズムサイズなどの構造パラメータに基づいて光学効率を定量化する。プロトタイプを開発し、シミュレーションされた光学効率と測定された温度上昇の間に強い相関関係があることを示した。

キーワード: 空中ヒーター, 空中ディスプレイ, AIRR, 温熱感覚提示, マルチモーダル, 再帰反射材, パンチングメタル板

## 1. まえがき

拡張現実感(AR)とバーチャルリアリティ(VR)技術は急速に進化しており、エンターテインメント、医療、産業など幅広い分野に応用されている<sup>1,2</sup>。これらの技術は没入感のある体験を提供するが、通常、ヘッドマウントディスプレイや特別なアイウェアデバイスを必要とする。

一方、航空ディスプレイはますます注目を集めている<sup>3</sup>。これらのディスプレイは、光源からの光を収束させる受動的な光学素子を使用することで、空中で実像を形成する。航空画像の位置に物理的なハードウェアがないにもかかわらず、ユーザーは特別な装置なしで、裸眼で航空画像を見ることができる。航空機ディスプレイは、その衛生性・非接触性から、エレベーター制御パネル、コンビニエンスストアのセルフチェックシステム、自動テラマシンのなどの実用的なアプリケーションで拡張されている。

レトロリフレクションによる空中イメージング(AIRR)<sup>4</sup>、ダイヘドラルコーナリフレクタアレイ(DCRA)<sup>5</sup>、マイクロリフレクタアレイ、マイクロレンズアレイ<sup>6</sup>など、さまざまな空中ディスプレイ技術が開発されている。

AIRRは、視野角が広く、光学レイアウトが柔軟であるため、特に非接触インタフェースに適している。AIRRは、シースルー空中ディスプレイ<sup>7</sup>、センサーや高速度カメラを用いた非接触インタフェース<sup>8,9</sup>、カメラで撮影された画像を表示するリアルタイムビデオ通信システム<sup>10</sup>、大規模空中ディスプレイ<sup>11</sup>の多くのアプリケーションに適している。

しかし、空中ディスプレイには、ユーザが視覚的な合図によってのみフィードバックを受けられることができるという問題がある。さらに、奥行き知覚の個人差は、画像位置の認識を困難にし、その結果、リアルさの劣化やタッチ位置の不正確さをもたらす可能性がある<sup>12</sup>。これまでの研究で、航空写真に向かって手を伸ばすことで、奥行き没入感を高め、空間的な不確実性を低減できることが報告されている<sup>13</sup>。没入感と使いやすさを向上させるために、熱、触覚、視覚、聴覚のフィードバックを取り入れたマルチモーダルインタフェースが研究されている<sup>14,15</sup>。マルチモーダルフィードバック技術の比較を表1に示す。音響放射圧を用いた空中ハプティクスは、ユーザの手の位置で超音波を収束させることで、空中ハプティクス感覚を生成する<sup>16,17</sup>。ホログラフィックウイスパーのような指向性超音波スピーカーは、超音波をキャリアとして使用し、位相制御アレイで空気中に超音波フォーカスを形成し、可聴周波数で振幅変調を印加することで、空間的に局在した可聴音スポットを形成します<sup>18</sup>。

航空用ヒーターは、航空画像の位置で遠赤外線(FIR)を収束させることで熱フィード

Received June 21, 2025; Revised October 10, 2025; Accepted October 20, 2025

† Utsumiya University

(Utsumiya, Japan)

【機械翻訳コンテンツの著作権について】

当サイトに掲載されている原著論文の著作権は映像情報メディア学会に帰属します。原著論文および翻訳論文の無断使用は禁止します。  
引用の際には、必ず原著論文の書誌情報をご記載ください。詳細は映像情報メディア学会著作権規定をご覧ください。

# Relationship Between Optical Efficiency and Temperature Increase in Aerial Heater Optical System by Use of Retro-Reflector and Punched Metal Beam Splitter

Sotaro Kaneko<sup>†</sup>, Kazuaki Takiyama<sup>†</sup>, Shiro Suyama<sup>†</sup> and Hirotsugu Yamamoto<sup>†</sup>

**Abstract** We propose an aerial heater optical system that enhances the realism and operability of interactive aerial displays by providing thermal sensation at the aerial image position. The system is based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR) by use of a punched metal beam splitter and an aluminum-coated corner cube array to converge far-infrared radiation (FIR) from a heat source. Ray-tracing simulation confirms the principle and quantifies the optical efficiency based on structural parameters such as the hole diameter, pitch, and thickness of the punched metal, and the prism size of the retro-reflector. A prototype has been developed and indicates a strong correlation between the simulated optical efficiency and the measured temperature increase.

**Keywords:** aerial heater, aerial display, AIRR, presenting thermal sensation, multimodal, retro-reflector, punched metal plate.

## 1. Introduction

Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies are rapidly evolving and have been applied across a wide range of fields, including entertainment, medicine, and industry<sup>1), 2)</sup>. While these technologies provide immersive experiences, they typically require head-mounted displays or special eyewear devices.

On the other hand, aerial displays have attracted increasing attention<sup>3)</sup>. These displays form real images in mid-air by use of passive optical elements that converge light from a source. Despite no physical hardware at the aerial image position, users can view the aerial image with the naked eye, without special devices. Due to their hygienic and contactless nature, aerial displays have been expanded in practical applications such as elevator control panels, self-checkout systems in convenience stores, and automated teller machines.

Various aerial display techniques have been developed, including aerial imaging by retro-reflection (AIRR)<sup>4)</sup>, dihedral corner reflector arrays (DCRA)<sup>5)</sup>, micro-reflector arrays, and micro-lens arrays<sup>6)</sup>. The AIRR is particularly suitable for contactless interfaces

due to its wide viewing angle and flexible optical layout. AIRR is appropriate for many applications of see-through aerial displays<sup>7)</sup>, non-contact interfaces using sensors and high-speed cameras<sup>8), 9)</sup>, real-time video communication systems that display camera-captured images<sup>10)</sup>, and large-scale aerial displays<sup>11)</sup>.

However, aerial displays have a problem that users can only receive feedback through visual cues. Moreover, individual differences in depth perception can cause difficulty in recognizing the image position, resulting in degradation of realism and incorrect touch positioning<sup>12)</sup>. Previous studies have reported that reaching toward the aerial image can enhance depth immersive sensation and reduce spatial uncertainty<sup>13)</sup>. To improve immersive sensation and usability, multimodal interfaces that incorporate thermal, tactile, visual, or auditory feedback have been investigated<sup>14), 15)</sup>. The comparison of multimodal feedback technologies is shown in Table 1. Aerial haptics using acoustic radiation pressure generate mid-air haptics sensations by converging ultrasonic at the user's hand position<sup>16), 17)</sup>. Directional ultrasonic speakers such as Holographic Whisper create spatially localized audible sound spots by using ultrasound as a carrier, forming an ultrasonic focus in air with a phase-controlled array, and applying amplitude modulation at audible frequencies<sup>18)</sup>.

An aerial heater enables thermal feedback by converging far-infrared radiation (FIR) at the aerial image

Received June 21, 2025; Revised October 10, 2025; Accepted October 20, 2025

<sup>†</sup> Utsunomiya University  
(Utsunomiya, Japan)

表1 航空インターフェイスのためのマルチモーダルフィードバック技術の比較。

| Modality | Principle                                                                                                                                                        | Effect                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Thermal  | Passive optics converge far-infrared radiation (FIR)                                                                                                             | Localized warmth in mid-air       |
| Haptic   | Phase-delayed ultrasonic transducer array forms an interference focus, and generating acoustic radiation in mid air pressure                                     | Localized touch/vibration         |
| Auditory | Phase-controlled ultrasonic array uses an amplitude-modulated ultrasonic carrier to form an ultrasonic focus in air, producing spatially localized audible sound | Localized audible spot in mid-air |

バックを可能にし、ユーザーが空中の局所的な温度感覚を知覚できるようにする。本研究では、正方形パイプアレイ (SPA)、交差ミラーアレイ (CMA)、二重層アレイ矩形ミラー (WARM)、AIRRベースの手法を実装した。AIRR、CMA、SPA、WARMの比較を表2に示す。CMAは直交ミラーアレイを用いた二重反射によってFIRを収束させるが、これは大きな開口数にスケールし、単純な受動構造のままである<sup>19,20</sup>。SPAは、中空正方形パイプの複数の内部反射を使用することでFIRを収束させ、大面積のFIR収束を可能にし、大型熱ディスプレイ<sup>21</sup>をサポートする。WARMは、2層の水平・垂直アレイにおいて、層ごとに単一反射を行うことでFIRを収束させ、スケーラビリティと可視光光学系との容易な統合を提供する。他の研究では、可視光AIRRとWARM<sup>22</sup>を統合したハイブリッドシステムが提案されており、視覚と視覚を同時に実現する。

表2 空気ヒーターの比較: AIRR / CMA / SPA / WARM.

| System | Principle                                                               | Features                                                         |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| AIRR   | Retro-reflection                                                        | Single optical axis for visible and FIR, high layout flexibility |
| CMA    | Double reflection with orthogonal mirror arrays                         | Easy large-aperture scaling                                      |
| SPA    | Multiple internal reflections in hollow square pipes                    | Large-area FIR convergence                                       |
| WARM   | Single reflection per layer in a 2D array horizontal and vertical array | Scalable to large structures, easy visible optics integration    |

熱提示。また、音、熱、視覚要素を組み合わせたマルチモーダルディスプレイを、スケーリングされたCMA構造を用いて実証した。しかし、CMA、SPA、WARMベースのシステムは、可視光と熱提示のために別々の光路を必要とするため、システム設計が複雑になり、レイアウトの柔軟性が制限される。対照的に、AIRRは可視光と遠赤外光の両方を単一の光軸で統合的に制御することができる。白熱ランプ、ハロゲンランプ、ソーラーシミュレーターなど、可視光とFIRの両方を発する単一光源を使用することで、可視光と熱の空中画像を光学系を追加することなく同時に形成することができ、AIRRはより優れたスケーラビリティで視覚と熱を組み合わせた提示に適している。

本研究では、ビームスプリッターとして打ち抜き金属を、再帰反射鏡としてコーナーキューブプリズムアレイを用いた、AIRRに基づく新しい空中ヒーター光学系を提案する。本研究では、レイトレーシングシミュレーションにより提案システムの動作原理を明らかにし、打ち抜き金属の穴径、ピッチ、厚さ、再帰反射鏡のプリズムサイズなどの構造パラメータが光学効率にどのような影響を与えるかを明らかにした。さらに、プロトタイプを開発し、温度上昇を実験的に測定することで、シミュレーションした光学効率と熱性能の相関を検証する。

## 2. 原則

2.1 再帰反射による空中撮像 (AIRR) AIRRの原理を図1に示す。光源、ビームスプリッター、再帰反射器から構成される。ソースから放出された光は、部分的に反射され、ビームスプリッターによって透過される。反射光は再帰反射器に入り、ビームスプリッターに向かって再帰反射される。この再帰反射光の一部はビームスプリッターを通過する。

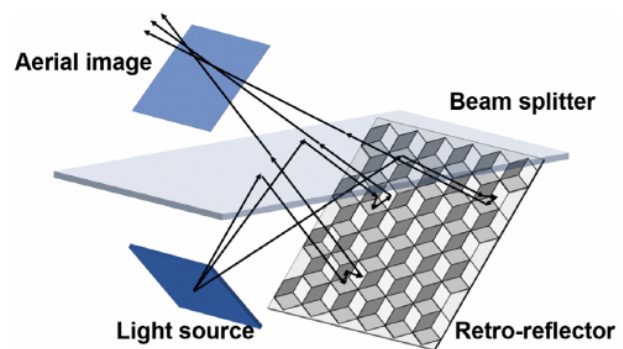


図1 再帰反射による空中撮像 (AIRR) の原理。

**Table 1** Comparison of multimodal feedback technologies for aerial interfaces.

| Modality | Principle                                                                                                                                                        | Effect                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Thermal  | Passive optics converge far-infrared radiation (FIR)                                                                                                             | Localized warmth in mid-air       |
| Haptic   | Phase-delayed ultrasonic transducer array forms an interference focus, and generating acoustic radiation in mid air pressure                                     | Localized touch/vibration         |
| Auditory | Phase-controlled ultrasonic array uses an amplitude-modulated ultrasonic carrier to form an ultrasonic focus in air, producing spatially localized audible sound | Localized audible spot in mid-air |

position, allowing users to perceive a localized temperature sensation in mid-air. Implementations include the square-pipe array (SPA), crossed-mirror array (CMA), the double-layered arrays rectangular mirror (WARM), and the AIRR-based method in this study. A comparison of AIRR, CMA, SPA, and WARM is shown in Table 2. CMA converges FIR by double reflection using orthogonal mirror arrays, which scales to large apertures and remains a simple passive construction<sup>19), 20)</sup>. SPA converges FIR by using multiple internal reflections in hollow square pipes, enabling large-area FIR convergence and supporting large thermal displays<sup>21)</sup>. WARM converges FIR by Single reflection per layer in a two-layer horizontal and vertical array, offering scalability and easy integration with visible-light optics. Other research has proposed hybrid systems that integrate visible-light AIRR with WARM<sup>22), 23)</sup> enabling simultaneous visual and

**Table 2** Comparison of Aerial heater : AIRR / CMA / SPA / WARM.

| System | Principle                                                               | Features                                                         |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| AIRR   | Retro-reflection                                                        | Single optical axis for visible and FIR, high layout flexibility |
| CMA    | Double reflection with orthogonal mirror arrays                         | Easy large-aperture scaling                                      |
| SPA    | Multiple internal reflections in hollow square pipes                    | Large-area FIR convergence                                       |
| WARM   | Single reflection per layer in a 2D array horizontal and vertical array | Scalable to large structures, easy visible optics integration    |

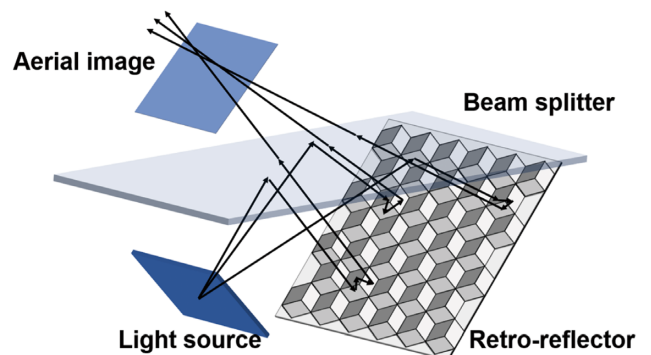
thermal presentation. A multimodal display combining sound, heat, and visual elements using a scaled CMA structure has also been demonstrated. However, CMA, SPA and WARM-based systems require separate optical paths for visible and thermal presentation, which complicates the system design and limits layout flexibility. In contrast, AIRR allows for integrated control of both visible and far-infrared imaging in a single optical axis. By using a single light source that emits both visible light and FIR, such as an incandescent lamp, halogen lamp, or solar simulator, visible and thermal aerial images can be formed coincidentally without additional optics, making AIRR suited to combined visual-thermal presentation with better scalability.

In this study, we propose a novel aerial heater optical system based on AIRR, by use of punched metal as a beam splitter and a corner-cube prism array as a retro-reflector. This study clarifies the operating principle of the proposed system through ray-tracing simulation and how structural parameters such as the hole diameter, pitch, and thickness of the punched metal and the prism size of the retro-reflector affect optical efficiency. Furthermore, we develop a prototype and experimentally measure the temperature increase to verify the correlation between simulated optical efficiency and thermal performance.

## 2. Principle

### 2.1 Aerial imaging by retro-reflection (AIRR)

The principle of AIRR is shown in Fig. 1. The system consists of a light source, a beam splitter, and a retro-reflector. The light emitted from the source is partially reflected and transmitted by the beam splitter. The reflected light enters the retro-reflector and is retro-reflected back toward the beam splitter. A portion of this retro-reflected light passes through the beam splitter

**Fig. 1** Principle of aerial imaging by retro-reflection (AIRR).

光源に対称な平面で空中画像を形成する。

## 2.2 レトリフレクターとパンチングメタルを使用した空中ヒーター

本研究で使用した空中ヒーターの原理を図2に示す。提案する光学系は、熱源、打ち抜き金属ビームスプリッター、コーナーキューブレトリフレクタから構成される。図3に示す打ち抜き金属は、開口部の周期的な配列から構成されている。金属部品は赤外線を反射し、開口部はその透過を可能にする。図4(a)に示すコーナーキューブ型再帰反射鏡は、その内面にアルミニウムでコーティングされている。図4(b)に示すように、入射遠赤外線は各再帰反射プリズム内で3回の内部反射を受け、再帰反射光となる。この過程で、入射光線と再帰反射鏡の間に幾何学的な光線シフトが起こる。その結果、プリズムの大きさに応じて光の戻り位置がずれる。提案する光学系では、この光線移動を利用して、再帰反射光の一部がパンチングされた金属の開口部を通過するようにする。その結果、打ち抜き金属は効果的にビームスプリッターとして機能する。

本研究では、光学素子の開口部が波長よりはるかに大きいので、FIRを光線として扱う。熱源のピーク波長 $\lambda$ を $3\mu\text{m}$ 、

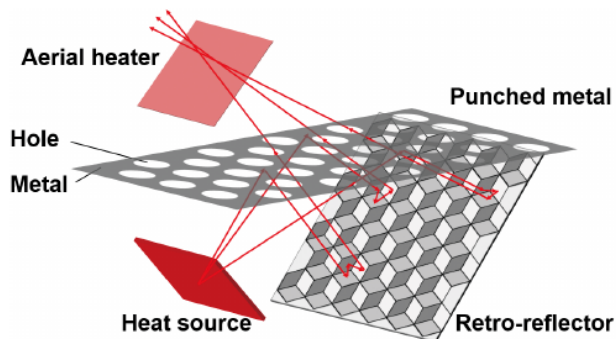


図2 レトリフレクターとパンチングメタルに基づくエアリアルヒーターの原理。

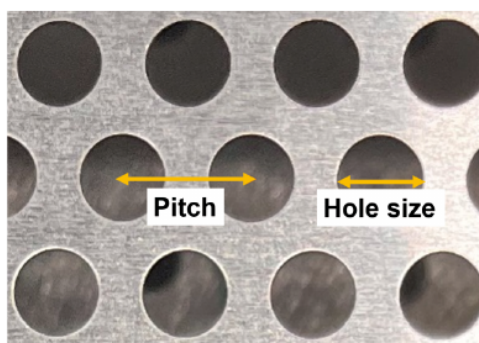


図3 パンチングメタルの構造

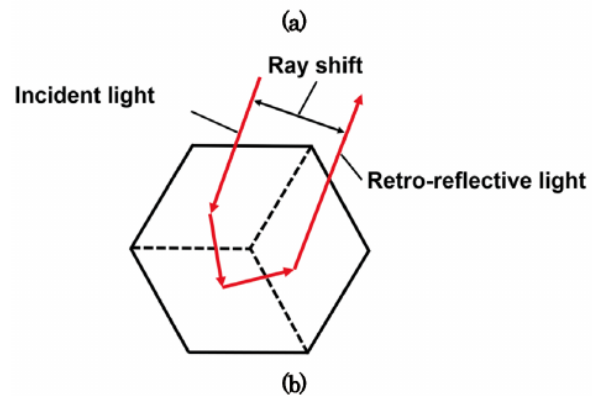
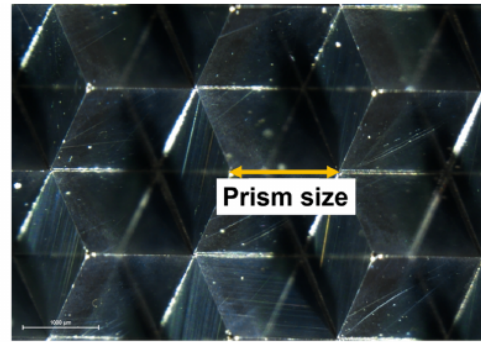


図4 レトリフレクターの特徴 (a) レトリフレクターの構造。 (b) レトリフレクターの光線シフト。

開口サイズ $D$ を $1\text{mm} \sim 10\text{mm}$ として、打ち抜き金属とレトリフレクタについて示す。の比 $a/\lambda$ は $3.3 \times 10^2$ から $3.3 \times 10^3$ のオーダーであり、回折が二次効果であることを示している。幾何光学条件は次式で与えられる。

$$\frac{a}{\lambda} \gg 1 \quad (1)$$

円形開口部の場合、伝搬距離 $L$ における第一ヌル角と対応するぼかし直径は次式で与えられる。

$$\theta \approx 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

$$d \approx \theta L \quad (3)$$

400mmの $L$ を使用すると、 $D$ が3mmの場合の $rd$ は約0.98mm、 $D$ が10mmの場合の $rd$ は0.29mmとなり、幾何光学的な処理<sup>24</sup>をサポートする。

熱源からのFIRは、打ち抜き金属の金属部分によって反射され、その開口部を通して伝達される。反射光は再帰反射器に入り、打ち抜き金属に向かって再帰反射される。幾何学的なずれにより、再帰反射光線の一部が開口部と整列して開口部を通過し、打ち抜き金属と熱源に対称な平面で空中ヒーターを形成する。ユーザーが手を画像の位置に置くことで、放射熱を感じることができる。

and forms an aerial image at a plane symmetric to the light source.

## 2.2 Aerial heater by use of retro-reflector and punched metal

The principle of the Aerial heater used in this study is shown in Fig. 2. The proposed optical system consists of a heat source, a punched metal beam splitter, and a corner-cube retro-reflector. The punched metal, shown in Fig. 3, consists of a periodic array of apertures. The metal parts reflect infrared radiation, while the apertures allow its transmission. The corner-cube retro-reflector, shown in Fig. 4(a), is coated with aluminum on its internal surfaces. The incident far-infrared light undergoes three internal reflections within each retro-reflective prism to become retro-reflected light, as shown in Fig. 4(b). A geometric ray shift occurs between the incident ray and the retro-reflector during this process. As a result, the return position of the light is displaced depending on the prism size. In the proposed optical system, this ray shift is utilized so that a portion of the retro-reflected light passes through the aperture of the punched metal. Consequently, the punched metal effectively functions as a beam splitter.

In this study, FIR is treated as rays because the apertures of the optical elements are much larger than the wavelength. With the heat source peak wavelength  $\lambda$

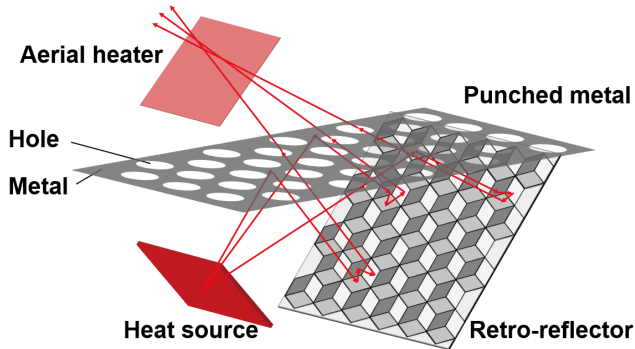


Fig. 2 Principle of Aerial heater based on retro-reflector and punched metal.

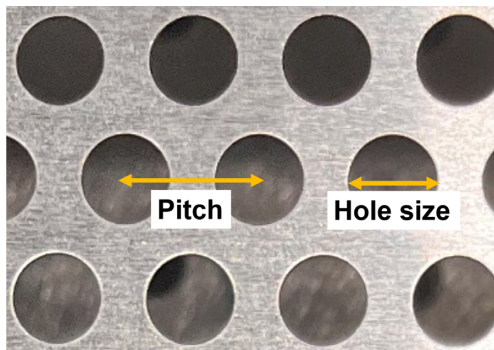


Fig. 3 Punched metal's structure.

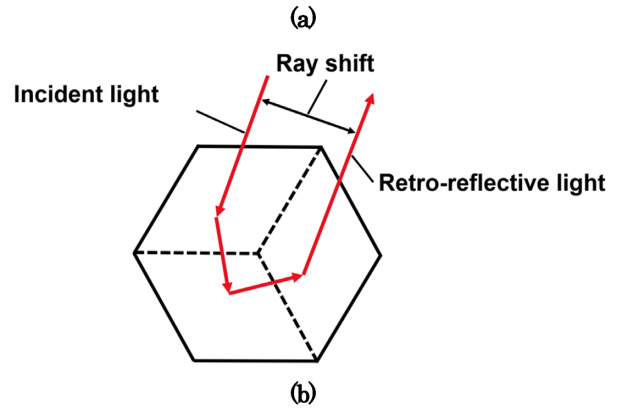
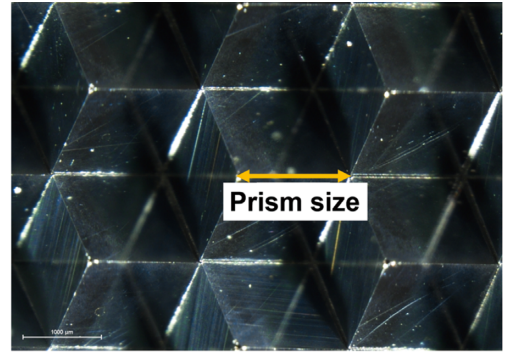


Fig. 4 Characteristics of the retro-reflector. (a) Retro-reflector's structure. (b) Ray shift in the retro-reflector.

of  $3 \mu\text{m}$  and aperture size  $D$  is  $1 \text{ mm}$  to  $10 \text{ mm}$  for the punched metal and retro-reflector. the ratio  $a/\lambda$  is on the order of  $3.3 \times 10^2$  to  $3.3 \times 10^3$ , indicating that diffraction is a secondary effect. The geometrical-optics condition is given by

$$\frac{a}{\lambda} \gg 1 \quad (1)$$

For a circular aperture, the first-null angle and the corresponding blur diameter at a propagation distance  $L$  are given by

$$\theta \approx 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

$$d \approx \theta L \quad (3)$$

Using  $L$  of  $400 \text{ mm}$  yields  $rd$  of approximately  $0.98 \text{ mm}$  for  $D$  of  $3 \text{ mm}$  and  $0.29 \text{ mm}$  for  $D$  of  $10 \text{ mm}$ , which supports the geometrical-optics treatment<sup>24)</sup>.

FIR from the heat source is reflected by the metallic portions of the punched metal and transmitted through its apertures. The reflected light enters the retro-reflector and is retro-reflected toward the punched metal. Due to the geometric shift, a portion of the retro-reflected rays align with the apertures and pass through them, forming an aerial heater at a plane symmetric to the heat source with the punched metal. A user can feel radiant heat by placing their hand at the image position.

提案する光学系は、打ち抜き金属と再帰反射鏡の成分が赤外反射と透過特性に強く影響するため、正確な設計が必要である。穴の直径 $d$ 、ピッチ $p$ 、厚さ $t$ など、打ち抜き金属の構造パラメータは、反射と透過のバランスに大きく影響する。レトロリフレクタのプリズムサイズは、幾何学的な光線シフトの量を決定する。この量は、赤外線収束と分布に影響を与える。

赤外領域でも、金属は高い反射率を示す。パンチングメタルの形状によって決まる開口面積比は、初期反射率と逆反射後の実効透過率の両方を定義する上で重要な役割を果たす。60° 千鳥穴パターンを持つ開口率 $\alpha$ は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}p^2} \quad (4)$$

システムの光学効率 $\eta$ は次のように表すことができる。

$$\eta = R_{PMP} \times R_{RR} \times T \times (1 - A_{PMP}) \times (1 - A_{RR})^3 \quad (5)$$

ここで、 $R_{PMP}$ は初期反射率、 $T$ は2パス目の透過率、 $R_{RR}$ は再帰反射率、 $A$ は各界面の吸収率である。打ち抜き金属への最初の入射の間、反射率 $R_{PMP}$ は $1 - \alpha$ と近似することができ、ここで $\alpha$ は正孔形状によって定義される開口率である。

しかし、再帰反射後の2回目の入射では、透過率 $T$ は単純に $\alpha$ と等しくない。これは、開口部だけでなく、打ち抜き金属の厚さや、再帰反射鏡による幾何学的な光線移動にも依存する。開口部内の斜め入射と内壁反射は、有効透過率をさらに複雑にする。したがって、 $T$ を正確に推定するには、光線偏差と開口アスペクト比の両方を考慮しなければならない。

使用した再帰反射鏡は、互いに直交する3つの表面からなり、立方体のコーナーアレイを形成している。光が入射方向に向かって再帰反射されると、光路の幾何学的なシフトを起こす。この光線シフトは、再帰反射光線が2回目の入射で打ち抜き金属の開口部を通過するかどうかを決定する上で重要な役割を果たす。このシフトの大きさは、プリズムの大きさと入射角の両方に依存する。したがって、プリズム寸法を最適化することは、伝送効率を最大化し、適切なエネルギー収束を達成し、空中画像位置の温度分布を制御するために不可欠

である。

打ち抜き金属の厚さ $t$ も性能に影響する。厚さの増加は、内壁の反射や斜め光線の閉塞の可能性を生じさせ、透過率を低下させる。しかし、過度に薄い構造物は熱負荷により変形し、光学系の位置がずれることがある。

### 3. シミュレーション

3.1 レイトレーシングシミュレーションによる原理検証提案する光学系が空中画像位置でFIRを正しく収束させることができるかどうかを検証するために、FRED版によるレイトレーシングを実施した。22.90. FRED (Photon Engineering, LLC) は、レイトレーシングシミュレーションに広く使用されている市販の光学工学ソフトウェアである。使用したモデルの詳細パンチングメタルの穴の直径は10.0mm、ピッチは13.5mm、厚さは2.0mm、長さ×幅は300mm×200mmであった。プリズムサイズを10mmに設定した再帰反射板を、縦横200mmの正方形に配置した。

点光源から打ち抜き金属までの距離は350mmで、打ち抜き金属と再帰反射板も互いに45°の角度で100mm間隔で配置した。点光源から合計10,000本の光線が放出された。レイトレーシングの結果を記録するために、空中ヒーター位置に受信機を設置した。

シミュレーション結果を図5に示す。点光源から放出された光線は、打ち抜きられた金属によって反射され、逆反射され、打ち抜きられた金属を通して再び透過され、空中画像位置でうまく収束する。光線分布から、エネルギーが焦点位置に集中していることが確認され、提案手法の原理的妥当性が検証された。

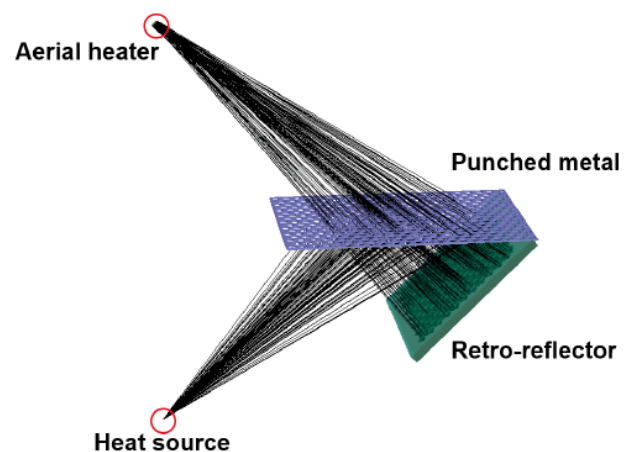


図5 レイトレーシングによる空中ヒーターの画像形成。

The proposed optical system requires precise design of the punched metal and the retro-reflector, as these components strongly influence the infrared reflection and transmission characteristics. The structural parameters of the punched metal, such as hole diameter  $d$ , pitch  $p$ , and thickness  $t$ , significantly affect the balance between reflection and transmission. The prism size of the retro-reflector determines the amount of geometric ray shift, which in turn influences the convergence and distribution of infrared rays.

Even in the infrared region, metals exhibit high reflectivity. The open area ratio of the punched metal, determined by its geometry, plays a critical role in defining both the initial reflectance and the effective transmittance after retro-reflection. The aperture ratio  $\alpha$  with a  $60^\circ$  staggered hole pattern is given by

$$\alpha = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}p^2} \quad (4)$$

The optical efficiency  $\eta$  of the system can be expressed as

$$\eta = R_{PMP} \times R_{RR} \times T \times (1 - A_{PMP}) \times (1 - A_{RR})^3 \quad (5)$$

Where  $R_{PMP}$  is the initial reflectance,  $T$  is the transmittance on the second pass,  $R_{RR}$  is the retro-reflection, and  $A$  is the absorption rate at each interface. During the first incidence onto the punched metal, the reflectance  $R_{PMP}$  can be approximated as  $1-\alpha$ , where  $\alpha$  is the aperture ratio defined by the hole geometry.

However, during the second incidence after retro-reflection, the transmittance  $T$  is not simply equal to  $\alpha$ . It depends not only on the open area but also on the thickness of the punched metal and the geometric ray shift caused by the retro-reflector. Oblique incidence and internal wall reflections within the apertures further complicate the effective transmittance. Therefore, an accurate estimation of  $T$  must consider both the ray deviation and the aperture aspect ratio.

The retro-reflector used consists of three mutually orthogonal surfaces, forming a cube corner array. When light is retro-reflected toward the incident direction, it undergoes a geometric shift in its optical path. This ray shift plays a critical role in determining whether the retro-reflected rays pass through the apertures of the punched metal on their second incidence. The magnitude of this shift depends on both the prism size and the angle of incidence. Therefore, optimizing the prism dimensions is essential for maximizing transmission efficiency, achieving proper energy convergence, and controlling the temperature distribution at the aerial

image position.

The punched metal thickness  $t$  also affects performance. Increased thickness raises the possibility of internal wall reflections and obstruction of oblique rays, reducing transmittance. However, excessively thin structures may deform under thermal load, misaligning the optical system.

### 3. Simulation

#### 3.1 Principle validation by ray-tracing simulation

To verify whether the proposed optical system can correctly converge FIR at the aerial image position, we conducted a ray-tracing with FRED version. 22.90. FRED (Photon Engineering, LLC) is a commercial optical-engineering software widely used for ray-tracing simulations. The details of the model we used. The punched metal had a hole diameter of 10.0 mm, pitch of 13.5 mm, thickness of 2.0 mm, and length and width of 300 mm  $\times$  200 mm. The retro-reflector with a prism size set to 10 mm was arranged like a square 200 mm in length and width.

The distance from the point light source to the punched metal was 350 mm, and the punched metal and the retro-reflector were also placed at a  $45^\circ$  angle to each other with a separation of 100 mm. A total of 10,000 rays were emitted from the point source. A receiver was placed at the aerial heater position to record the ray-tracing results.

The simulation results are shown in Fig. 5. The rays emitted from the point source are reflected by the punched metal, retro-reflected, transmitted through the punched metal again, and successfully converging at the aerial image position. The ray distribution confirmed that the energy is concentrated at the focal position, thereby verifying the principle validity of the proposed method.

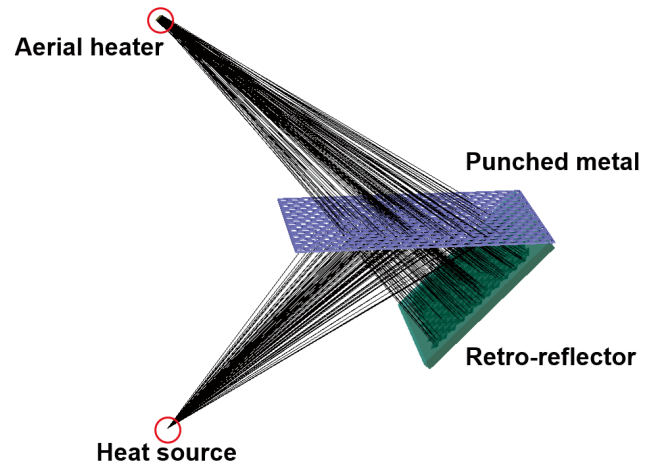


Fig. 5 Image formation of an aerial heater by ray tracing.

### 3.2 パンチングメタルの穴径とピッチに基づく光学効率のシミュレーション解析

レイトレーシングシミュレーションにより、打ち抜き金属の穴径、ピッチ、開口率がシミュレーションの光学効率にどのような影響を与えるかを調べた。モデルパラメータは以下の通りである。穴の直径は1mmから10mmまで0.5mm刻みで変化させた。各直径について、30%から80%の開口面積比になるようにピッチを調整した。パンチングメタルの寸法は300mm×200mm、厚さは1.0mmである。穴の配列は60° 千鳥模様に沿ったものであった。レトロリフレクターは、後述する温度測定と同じ1.4mmのプリズムサイズを使用し、300mm×300mmの正方形に配置した。光学部品的位置は、点光源から打ち抜き金属までの入射角45°、光学部品間の距離350mmに設定した。また、打ち抜き金属と再帰反射鏡は、互いに45°の位置に150mmの間隔をあけて配置した。点光源は1,000,000本の光線を放出した。シミュレーションされた光学効率は、AIRRの原理に基づき、焦点で収束する光線の本数を放出了された光線の総数で割ったものとして計算された。

光学効率のシミュレーション結果を図6に示す。開口率が60%~70%のとき、特に穴の直径が3.0~4.0mmのときに、最も高いシミュレーション光学効率が得られる。最大シミュレーション光学効率は約7%である。

これらのシミュレーション結果において、打ち抜き金属の穴の直径とピッチは、透過と反射のトレードオフを制御する重要な要因である。光学効率のシミュレーションには、60%から70%の範囲の開口面積比が最適である。これらのシミュレーション結果は、以下のセクションで説明する実験結果との比較を通じて検証される。

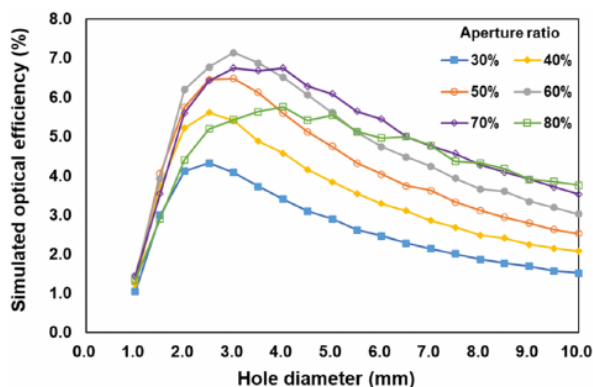


図6 提案する空中ヒーターの光学効率のシミュレーション結果。

## 4実験結果

シミュレーションによる光学効率と測定された温度上昇の関係を調べるために、空中ヒーター光学系を開発し、温度上昇を測定した。実験セットアップを図7に示す。ピーク波長3μm、定格電力400Wの赤外線ヒーターを使用した。PMP1~PMP5の5種類の打ち抜き金属を表3に示す。打ち抜き金属はSUS304で作られ、穴の直径、ピッチ、厚さの異なる5つのパターンが用意された。打ち抜き金属はすべて外形寸法が300mm×200mmであった。

アルミニウムでコーティングされた表面を特徴とする、プリズムサイズ1.4mmの特注フルコーナークューブアレイを使用した。外形寸法は200mm×200mmである。光学配置では、熱源から打ち抜き金属までの距離を350mmとし、打ち抜き金属から再帰反射鏡までの距離を105mmとした。温度測定のために、熱

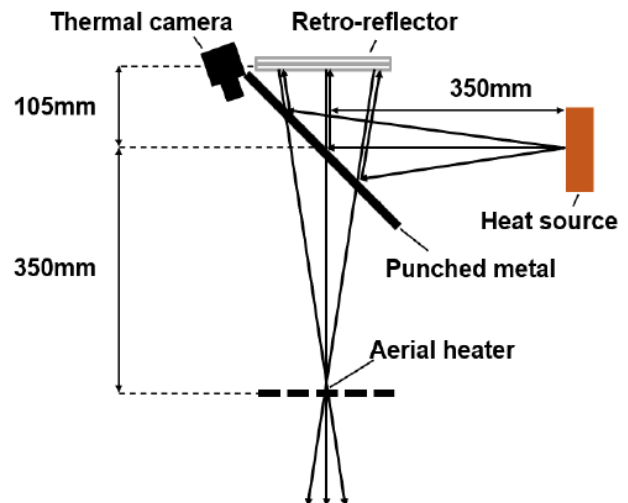


図7 実験セットアップの温度測定。

表3 打ち抜き金属のパラメータ

|       | Hole size (mm) | Pitch (mm) | Thickness (mm) | Optical efficiency(%) |
|-------|----------------|------------|----------------|-----------------------|
| PMP 1 | 1.5            | 3.0        | 1.0            | 2.3                   |
| PMP 2 | 1.5            | 3.0        | 0.8            | 3.6                   |
| PMP 3 | 2.0            | 3.5        | 0.8            | 5.3                   |
| PMP4  | 2.0            | 3.0        | 1.0            | 5.2                   |
| PMP5  | 3.0            | 4.0        | 1.0            | 6.5                   |

### 3.2 Analysis of simulated optical efficiency based on hole diameter and pitch of punched metal

Ray-tracing simulation examined how the hole diameter, pitch, and aperture ratio of the punched metal affect the simulated optical efficiency. The model parameters are as follows. The hole diameter varied from 1 mm to 10 mm in 0.5 mm increments. For each diameter, the pitch was adjusted to achieve open area ratios between 30% and 80%. The punched metal had fixed dimensions of 300 mm × 200 mm and a thickness of 1.0 mm. The hole array followed a 60° staggered pattern. The retro-reflector used the same prism size of 1.4 mm as in the temperature measurements discussed later, arranged in a 300 mm × 300 mm square. The positions of the optical components were set at a 45° incident angle from the point light source to the punched metal, and a distance of 350 mm between them. The punched metal and retroreflector were also positioned at 45° to each other with a 150 mm separation. The point light source emitted 1,000,000 rays. The simulated optical efficiency was calculated as the number of rays converging at the focal point divided by the total number of emitted rays, based on the AIRR principle.

The simulated result for optical efficiency is shown in Fig. 6. The highest simulated optical efficiency is obtained when the aperture ratio is between 60% and 70%, particularly when the hole diameter is 3.0-4.0 mm. The maximum simulated optical efficiency is approximately 7%.

In these simulated results, the hole diameter and pitch of the punched metal are key factors controlling the trade-off between transmission and reflection. An open area ratio in the range of 60% to 70% is optimal for simulated optical efficiency. These simulated results will be validated through comparison with the experimental results described in the following sections.

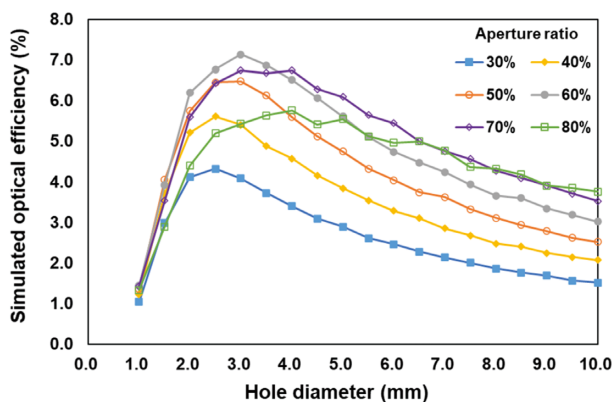


Fig. 6 Simulated optical efficiency of the proposed aerial heater.

## 4. Experiments

To investigate the relationship between the simulated optical efficiency and the measured temperature increase, an aerial heater optical system was developed and the temperature increase was measured. The experimental setup is shown in Fig. 7. An infrared heater with a peak wavelength of 3 μm and a rated power of 400 W was used. The five types of punched metals, PMP1 to PMP5, are shown in Table 3. The punched metals were made of SUS304, and five patterns with different hole diameters, pitches, and thicknesses were prepared. All punched metals had outer dimensions of 300 mm × 200 mm.

A custom-made full-corner cube array with a prism size of 1.4 mm, featuring an aluminum-coated surface, was used. Its outer dimensions were 200 mm × 200 mm. In the optical configuration, the distance from the heat source to the punched metal was set to 350 mm, and the distance from the punched metal to the retro-reflector was 105 mm. For temperature measurements, a thermal

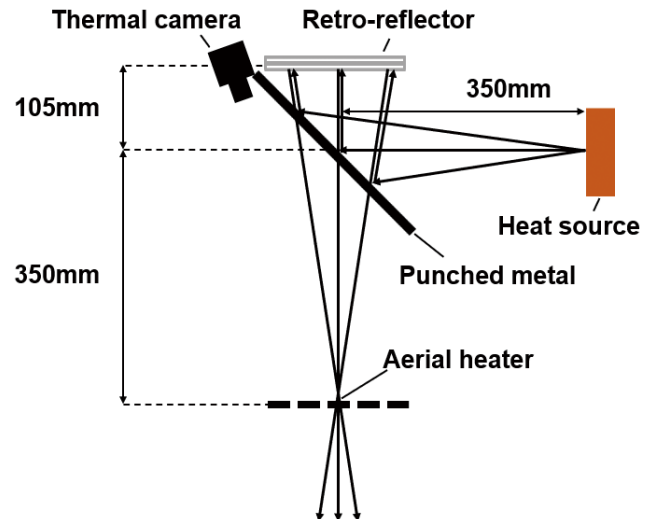


Fig. 7 Temperature measurement of the experiment setup.

Table 3 Parameters of a punched metal.

|       | Hole size (mm) | Pitch (mm) | Thickness (mm) | Optical efficiency(%) |
|-------|----------------|------------|----------------|-----------------------|
| PMP 1 | 1.5            | 3.0        | 1.0            | 2.3                   |
| PMP 2 | 1.5            | 3.0        | 0.8            | 3.6                   |
| PMP 3 | 2.0            | 3.5        | 0.8            | 5.3                   |
| PMP4  | 2.0            | 3.0        | 1.0            | 5.2                   |
| PMP5  | 3.0            | 4.0        | 1.0            | 6.5                   |

カメラ(Fluke Ti100)を使用し、航空画像位置に黒い段ボールのスクリーンを設置した。このスクリーンは310×260mmで、黒い段ボールで20mm間隔で20mm幅のスリットがある。スリット設計により水平熱拡散が減少し、局所的な測定温度上昇を可視化することができた。実験は、温度を25℃に設定した空調室で行った。初期温度は、サーモグラフィを使用して測定した、熱源を作動させる前に空中ヒーター位置に設置したスクリーンの温度と定義した。各条件を3回測定し、再現性を評価した。

各打ち抜き金属について、空中画像位置での温度上昇の測定値を図8に示す。すべての構成において、温度は時間とともに上昇するが、上昇率と最高温度は条件によって異なる。PMP5の光学効率を6%シミュレートした場合、初期温度25℃から10分後には33℃まで最大8℃の増加率を示した。シミュレーションによる光学効率と測定による温度上昇の関係を図9に示す。

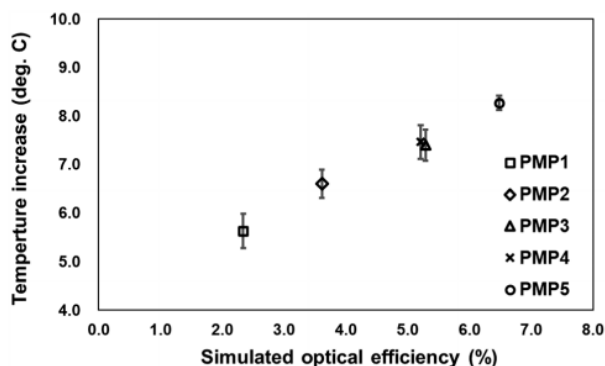


図9 シミュレーションによる光学効率と温度上昇の関係。

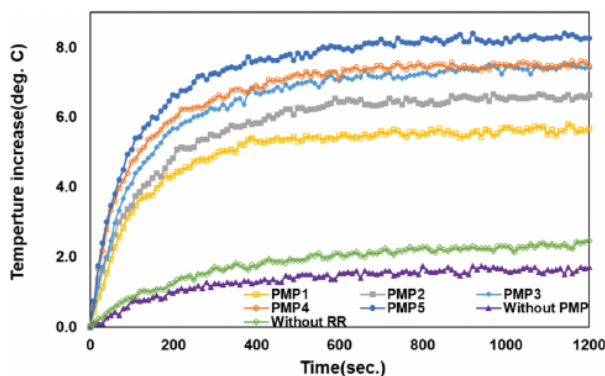


図8 航空ヒーターの温度上昇

シミュレーションの光学効率が高いほど、測定温度も高くなる。シミュレーションによる光学効率と測定による温度上昇の相関係数は0.99であり、強い正の相関があることがわかる。

これらの結果は、提案した空中ヒーター法の有効性を示し、打ち抜き金属の設計パラメータが測定された温度上昇に大きく影響することを確認した。

## 5. 考察

本節では、第3節で示したレイトレーシングシミュレーションの結果と、第4節で述べた実験測定結果について述べる。シミュレーションの結果、各光学部品の構造パラメータが、結果として生じる温度上昇にどのような影響を与えるかが明らかになった。特に、打ち抜き金属の穴の直径とピッチの比は、開口率だけでなく、効率的な空中加熱に不可欠な反射と透過のバランスにも直接影響する。本研究では、正孔径が3mmから4mmのときに、開口率60-70%に相当する最大のシミュレーション光学効率が発生することを明らかにした。この結果は、プリズムサイズが1.4mmのレトロリフレクターに基づいている。したがって、異なるプリズムサイズは光線シフトを変化させ、最適なパラメータをシフトさせる可能性があると予想される。

パンチングメタルの厚さも重要な役割を果たす。パンチングメタルが厚いほど、斜めの赤外線が穴の壁内でブロックされたり反射されたりする可能性が高くなり、透過率が低下し、空中画像位置での温度上昇が抑制される。本研究では、市販の厚さ1.0mmの打ち抜き金属を使用した。厚さを薄くすることで、実効透過率を向上させ、結果として熱効率を向上させることができた。シミュレーションによる光学効率と測定による温度上昇の間に強い相関があることを明らかにした。シミュレーションでより高いシミュレーション光学効率を持つと予測される構成は、一貫して実験でより大きな測定温度上昇をもたらした。このことは、模擬光学効率が空中ヒーターシステムの熱応答を決定する重要な要因であることを示している。それにもかかわらず、シミュレーション結果と実測結果の間にわずかな不一致が観察された。これは、ワーピングや打ち抜き金属のミスアライメントなどの構造的なばらつきによるものと考えられ、焦点位置やエネルギー収束に影響を与える可能性がある。

camera (Fluke Ti100) was used, and at the aerial image position, a black cardboard screen was placed. This screen was  $310 \times 260$  mm, black cardboard with 20 mm wide slits spaced at 20 mm intervals. The slit design reduced horizontal thermal diffusion, allowing visualization of localized measured temperature increases. The experiment was conducted in an air-conditioned room with the temperature set at 25 °C. The initial temperature was defined as the temperature of the screen placed at the aerial heater position before activating the heat source, measured using a thermal camera. Each condition was measured three times to evaluate reproducibility.

The measured temperature increase over time at the aerial image position for each punched metal is shown in Fig. 8. In all configurations, the temperature increases with time, but the increasing rates and maximum temperatures are different across conditions. The case of 6% simulated optical efficiency of PMP5 has the maximum increasing rate of 8 °C from an initial temperature of 25 °C to 33 °C after 10 minutes. The relationship between simulated optical efficiency and measured temperature increase is shown in Fig. 9.

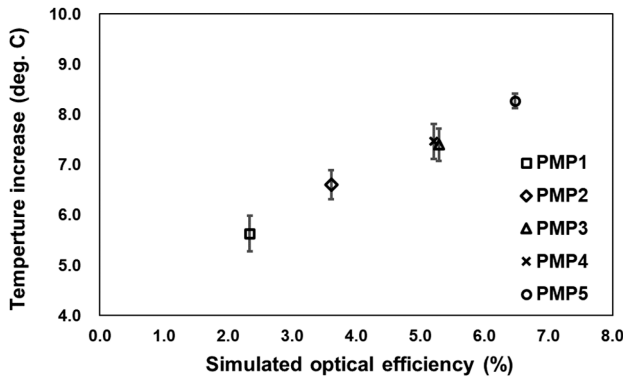


Fig. 9 Relationship between simulated optical efficiency and temperature increase.

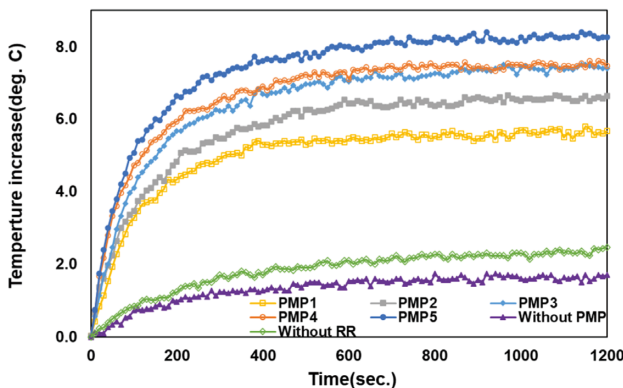


Fig. 8 Temperature increase of the aerial heater.

Higher simulated optical efficiency in the simulation also results in higher measured temperature increase. The correlation coefficient between simulated optical efficiency and measured temperature increase is 0.99, indicating a strong positive correlation.

These results demonstrate the effectiveness of the proposed aerial heater method and confirm that the design parameters of the punched metal significantly influence the measured temperature increase.

## 5. Discussion

This section discusses the results of the ray-tracing simulations presented in section 3 and the experimental measurements described in section 4. The simulated results clarify how the structural parameters of each optical component influence the resulting temperature increase. In particular, the ratio of hole diameter to pitch in the punched metal directly affects not only the aperture ratio but also the balance between reflection and transmission, which is critical for efficient aerial heating. In this study, we clarify that the maximum simulated optical efficiency occurs when the hole diameter is between 3 mm and 4 mm, corresponding to an aperture ratio of 60-70%. This result is based on a retro-reflector with a prism size of 1.4 mm; thus, different prism sizes are expected to alter the ray shift, potentially shifting the optimal parameters.

The thickness of the punched metal also plays an essential role. A thicker punched metal increases the likelihood of oblique infrared rays being blocked or reflected within the hole walls, reducing transmittance and suppressing the temperature rise at the aerial image position. Although this study used commercially available punched metal with a thickness of 1.0 mm, reducing the thickness could improve effective transmittance and, consequently, thermal efficiency. We clarify a strong correlation between the simulated optical efficiency and the measured temperature increase. Configurations predicted to have higher simulated optical efficiency in the simulations consistently resulted in greater measured temperature increases in the experiments. This indicates that simulated optical efficiency is a key factor in determining the thermal response of the aerial heater system. Nevertheless, we observe slight discrepancies between simulated and measured results, likely due to structural variations such as warping or misalignment of the punched metal, which can affect the focal position and energy convergence. Furthermore, regarding the

さらに、打ち抜き金属とレトロリフレクタの相対位置が光学効率に及ぼす影響については、予備評価で若干の影響が示された。レイトレーシング解析の結果、位置のずれが小さいと絶対効率値は変化するが、全体的な分布と傾向は類似していることがわかった。したがって、本研究では、理想的なアライメントの下での代表的な結果のみを提示し、位置依存性のより詳細な調査は、今後の研究で取り上げる予定である。

提案する空中ヒーター技術は、視覚出力だけでなく、熱フィードバックも提供するため、非接触ユーザーインターフェースやインタラクティブディスプレイへの応用に強い可能性を示している。熱感覚と視覚的な手がかりを組み合わせることで、ユーザはより直感的に航空写真の存在と奥行きを知覚することができる。このアプローチは、画像形成面に物理的なハードウェアが存在しないAIRRのユニークな特性を活用し、マルチモーダルなユーザーインタラクションを強化する新しい経路を提供する。

## 6 むすび

本論文では、レトロリフレクターとパンチングメタルビームスプリッターを備えた空中ヒーター光学系において、シミュレーションされた光学効率と測定された温度との関係が増加することを確認した。レイトレーシングシミュレーションは、穴の直径、ピッチ、打ち抜き金属の厚さなどの構造パラメータによって光学効率を定量化し、再帰反射鏡のプリズムサイズが光学効率に影響を与える。解析の結果、穴径3.0~4.0mmで開口率60~70%がシミュレーション効率を最大化することがわかった。

航空用ヒーターのプロトタイプを開発し、温度上昇を測定する。すべての構成において、温度上昇が観察されるが、温度上昇の速度と最高温度は条件に依存する。光学効率を6%シミュレートした場合、初期温度25℃から10分後には33℃まで8℃の最高温度上昇を示した。光学効率のシミュレーションが高いほど、測定温度も高くなる。シミュレーションによる光学効率と測定による温度上昇の相関係数は0.99であり、強い正の相関があることがわかる。

これらの結果は、提案した空中ヒーターシステムの有効性を示し、打ち抜き金属の構造パラメータが測定された温度上昇に大きく影響することを確認した。

提案する空中ヒーターは、空中画像に非接触の熱フィードバックを提供でき、インタラクティブな空中ディスプレイにおけるリアリズムと操作性の感覚を向上させる可能性があることを示唆している。本研究の一部は、JST助成番号JPMJMI24H1の支援を受けている。

## References

- 1) S. Dargan, S. Bansal, M. Kumar, A. Mittal, K. Kumar: "Augmented Reality: A Comprehensive Review", Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 30(2), pp.1057-1080 (Oct. 2022)
- 2) J. Xiong, E. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S. Wu: "Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives", Light: Science & Applications, Vol. 10(1), p. 216 (Oct. 2021)
- 3) A. Javidi, J. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi, H. Yamamoto: "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing and display", Opt. Express, Vol. 28, pp.32266-32293 (Oct. 2020)
- 4) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", Opt. Express, Vol. 22, pp.26919-26924 (Oct. 2014)
- 5) Y. Maeda: "Air Floating Image based on a Dihedral Corner Reflector Array", Proc. IDW, Vol.26, pp.105-108 (Dec. 2019)
- 6) D. Zhao, B. Su, G. Chen, H. Liao: "360 degree viewable floating autostereoscopic display using integral photography and multiple semitransparent mirrors", Opt. Express, Vol. 23, pp.9812-9823 (Apr. 2015)
- 7) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto: "Aerial Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer", IMID2018 DIGEST, p.636 (Aug. 2018)
- 8) M. Yasugi, H. Yamamoto: "Fundamentals and Recent Developments on Aerial Display for Touchless Interface", IMID 2021 DIGEST, p.81 (Aug. 2021)
- 9) M. Ishikawa: "Interactive Display technologies Using High-speed Image Processing", Proc. IDW, Vol.21, pp.812-813 (Dec. 2014)
- 10) K. Fujii, N. Endo, N. Hagen, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Aerial video-calling system with eye-matching feature based on polarization-modulated aerial imaging by retro-reflection (p-AIRR)", Opt. Rev., Vol. 29, pp.429-439 (Aug. 2022)
- 11) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama, H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space Construction", J. Robot. Mechatron., Vol. 34(5), pp.1175-1183 (Oct. 2022)
- 12) Y. Horikawa, T. Ogura, T. Soumiya, R. Kujime, H. Yamamoto, S. Suyama: "Accommodation and Distance Perception for Floating LED Image Formed by a Crossed-mirror Array", Proc. IDW, Vol. 19, pp.1289-1290 (Dec. 2012)
- 13) N. Kiyose, H. Mizushima, K. Yamamoto, S. Suyama: "Reduction of Perceived Depth Instability in Aerial Image by Using Hand or Tools to Aerial Image Position", Proc. IDW, Vol. 28, pp.482-485 (Dec. 2021)
- 14) Y. Terao, H. Mizushima, K. Yamamoto: "Evaluation of usability improvement of contactless human interface with visual, auditory and tactile sensation for aerial display", Opt. Rev., Vol. 31, pp.126-133 (Dec. 2023)
- 15) D. Miyazaki, N. Takemura: "Visual Feedback Using Semitransparent Mirror to Enhance Depth Perception of Aerial Image in Floating Touch Display", MTA, Vol. 12, pp.2-8 (Oct. 2023)
- 16) H. Shinoda: "Present and Future of Midair Haptics", Proc. IDW, Vol.24, pp.106-108 (Dec. 2017)
- 17) S. Inoue, Y. Makino, H. Shinoda: "Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram," Proc. IEEE

effect of the relative position between the punched metal and the retro-reflector on optical efficiency, a slight influence was indicated in our preliminary evaluation. Our ray-tracing analysis showed that while small positional deviations change the absolute efficiency values, the overall distribution and trend remain similar. Therefore, only the representative results under ideal alignment are presented in this study, and a more detailed investigation of positional dependence will be addressed in future work.

The proposed aerial heater technology shows strong potential for applications in contactless user interfaces and interactive displays, as it provides not only visual output but also thermal feedback. By combining thermal sensation with visual cues, users can more intuitively perceive the presence and depth of aerial images. This approach offers a novel pathway to enhance multimodal user interaction, leveraging the unique characteristic of AIRR in which no physical hardware exists at the image formation plane.

## 6. Conclusion

In this paper, we confirm that the relationship between simulated optical efficiency and measured temperature increase with an aerial heater optical system with the retro-reflector and the punched metal beam splitter. Ray-tracing simulation quantifies the optical efficiency by structural parameters such as hole diameter, pitch, and thickness of punched metal, and prism size of the retro-reflector affect simulated optical efficiency. The analysis shows that an aperture ratio of 60-70% with a hole diameter of 3.0-4.0 mm maximizes simulated efficiency.

We develop a prototype of an aerial heater and measure the temperature increase. In all configurations, we observe a temperature increase, but the rate of temperature increase and the maximum temperature depend on the condition. The case of 6% simulated optical efficiency shows the highest temperature increase of 8 °C from an initial temperature of 25 °C to 33 °C after 10 minutes. A higher simulated optical efficiency also results in a higher measured temperature increase. The correlation coefficient between simulated optical efficiency and measured temperature increase is 0.99, indicating a strong positive correlation.

These results demonstrate the effectiveness of the proposed aerial heater system and confirm that the structural parameters of the punched metal significantly influence the measured temperature increase. It

suggests that the proposed aerial heater can provide non-contact thermal feedback to aerial images, potentially enhancing the sense of realism and operability in interactive aerial displays.

A part of this research was supported by JST Grant Numbers JPMJMI24H1.

## References

- 1) S. Dargan, S. Bansal, M. Kumar, A. Mittal, K. Kumar: "Augmented Reality: A Comprehensive Review", *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 30(2), pp.1057-1080 (Oct. 2022)
- 2) J. Xiong, E. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S. Wu: "Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives", *Light: Science & Applications*, Vol. 10(1), p. 216 (Oct. 2021)
- 3) A. Javidi, J. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi, H. Yamamoto: "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing and display", *Opt. Express*, Vol. 28, pp.32266-32293 (Oct. 2020)
- 4) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", *Opt. Express*, Vol. 22, pp.26919-26924 (Oct. 2014)
- 5) Y. Maeda: "Air Floating Image based on a Dihedral Corner Reflector Array", *Proc. IDW*, Vol.26, pp.105-108 (Dec. 2019)
- 6) D. Zhao, B. Su, G. Chen, H. Liao: "360 degree viewable floating autostereoscopic display using integral photography and multiple semitransparent mirrors", *Opt. Express*, Vol. 23, pp.9812-9823 (Apr. 2015)
- 7) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto: "Aerial Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer", *IMID2018 DIGEST*, p.636 (Aug. 2018)
- 8) M. Yasugi, H. Yamamoto: "Fundamentals and Recent Developments on Aerial Display for Touchless Interface", *IMID 2021 DIGEST*, p.81 (Aug. 2021)
- 9) M. Ishikawa: "Interactive Display technologies Using High-speed Image Processing", *Proc. IDW*, Vol.21, pp.812-813 (Dec. 2014)
- 10) K. Fujii, N. Endo, N. Hagen, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Aerial video-calling system with eye-matching feature based on polarization-modulated aerial imaging by retro-reflection (p-AIRR)", *Opt. Rev.*, Vol. 29, pp.429-439 (Aug. 2022)
- 11) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama, H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space Construction", *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 34(5), pp.1175-1183 (Oct. 2022)
- 12) Y. Horikawa, T. Ogura, T. Soumiya, R. Kujime, H. Yamamoto, S. Suyama: "Accommodation and Distance Perception for Floating LED Image Formed by a Crossed-mirror Array", *Proc. IDW*, Vol. 19, pp.1289-1290 (Dec. 2012)
- 13) N. Kiyose, H. Mizushima, K. Yamamoto, S. Suyama: "Reduction of Perceived Depth Instability in Aerial Image by Using Hand or Tools to Aerial Image Position", *Proc. IDW*, Vol. 28, pp.482-485 (Dec. 2021)
- 14) Y. Terao, H. Mizushima, K. Yamamoto: "Evaluation of usability improvement of contactless human interface with visual, auditory and tactile sensation for aerial display", *Opt. Rev.*, Vol. 31, pp.126-133 (Dec. 2023)
- 15) D. Miyazaki, N. Takemura: "Visual Feedback Using Semitransparent Mirror to Enhance Depth Perception of Aerial Image in Floating Touch Display", *MTA*, Vol. 12, pp.2-8 (Oct. 2023)
- 16) H. Shinoda: "Present and Future of Midair Haptics", *Proc. IDW*, Vol.24, pp.106-108 (Dec. 2017)
- 17) S. Inoue, Y. Makino, H. Shinoda: "Active touch perception produced by airborne ultrasonic haptic hologram," *Proc. IEEE*

World Haptics Conf., p. 362 (June 2015)

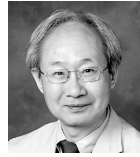
- 18) Y. Ochiai, T. Hoshi, I. Suzuki, "Holographic Whisper: Rendering Audible Sound Spots in Three-dimensional Space by Focusing Ultrasonic Waves", Proc. CHI, pp.4314-4325 (May 2017)
- 19) K. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto: "Thermal and visual 3D display by use of crossed-mirror array", Proc. IDW, Vol. 19, pp.1243-1246 (Dec. 2012)
- 20) K. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto: "Bidirectional Visual and Thermal 3D Information Display by Use of Crossed-Mirror Array" IWH DIGEST, 16p06 (July 2014)
- 21) T. Okamoto, K. Onuki, S. Onose, T. Itoigawa, H. Yamamoto: "Large thermal display with converging far-infrared by square pipe array (SPA)", IMID DIGEST, E37-3 (Dec. 2016)
- 22) T. Okamoto, S. Ito, K. Onuki, S. Onose, T. Itoigawa, H. Yamamoto: "Visual and Thermal Floating Display with AIRR and WARM", Proc. IDW, Vol. 23, pp.823-826 (Dec. 2016)
- 23) H. Yamamoto, S. Ito, T. Okamoto, R. Kujime, K. Fujii, Y. Terashima: "Aerial Display with Thermal and Acoustic Sensation", Proc. SIGGRAPH, a16 (July 2017)
- 24) E. Hecht, A. Zajac: "Optics", Addison-Wesley, 3rd ed., pp.330- 355 (1977)



**Sotaro Kaneko** received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2024. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests include aerial heater based on AIRR consists of retro-reflector and a punched metal.



**Kazuaki Takiyama** received his B. E. and M. E. degrees from Utsunomiya University, Japan. Currently, he is in the process of completing Ph.D. degree from Utsunomiya University. His research interests include aerial display measurements and high-resolution aerial display.



**Shiro Suyama** received the M.E. degrees from Kyushu University in 1981. Since joining NTT Electrical Communication Laboratories in 1981, he has been engaged in research and development on transistor and liquid-crystal devices. He received the Ph.D. degree from Kyushu University in 1990. He was a Professor at Tokushima University from April 2007 to March 2021 and is currently a Project Professor at Utsunomiya University from April 2021. He is engaged in research on 3D display systems: e.g. DFD (Depth-fused 3-D) display, Arc 3D display, Aerial display, Enhancing image reconstruction in Brain, Three-dimensional perceptions and Liquid-crystal devices.



**Hirotugu Yamamoto** received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan. After graduation, he joined the Department of Optical Science and Technology at University of Tokushima, Japan. From April 2014, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University, where he is currently a professor at School of Engineering, Utsunomiya University. He has been a project leader for international standardization of aerial display at IEC/TC110 since Oct. 2018, has been the head of the delegates in IEC/TC110 Japan National Mirror Committee, and received IEC1906 Award for his outstanding contribution. In April 2021, he has become a distinguished professor at Utsunomiya University.

World Haptics Conf., p. 362 (June 2015)

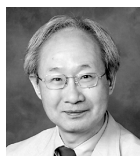
- 18) Y. Ochiai, T. Hoshi, I Suzuki, "Holographic Whisper: Rendering Audible Sound Spots in Three-dimensional Space by Focusing Ultrasonic Waves", Proc. CHI, pp.4314-4325 (May 2017)
- 19) K. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto: "Thermal and visual 3D display by use of crossed-mirror array", Proc. IDW, Vol. 19, pp.1243-1246 (Dec. 2012)
- 20) K. Kujime, S. Suyama, H. Yamamoto: "Bidirectional Visual and Thermal 3D Information Display by Use of Crossed-Mirror Array" IWH DIGEST, 16p06 (July 2014)
- 21) T. Okamoto, K. Onuki, S. Onose, T. Itoigawa, H. Yamamoto: "Large thermal display with converging far-infrared by square pipe array (SPA)", IMID DIGEST, E37-3 (Dec. 2016)
- 22) T. Okamoto, S. Ito, K. Onuki, S. Onose, T. Itoigawa, H. Yamamoto: "Visual and Thermal Floating Display with AIRR and WARM", Proc. IDW, Vol. 23, pp.823-826 (Dec. 2016)
- 23) H. Yamamoto, S. Ito, T. Okamoto, R. Kujime, K. Fujii, Y. Terashima: "Aerial Display with Thermal and Acoustic Sensation", Proc. SIGGRAPH, a16 (July 2017)
- 24) E. Hecht, A. Zajac: "Optics", Addison-Wesley, 3rd ed., pp.330- 355 (1977)



**Sotaro Kaneko** received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2024. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests include aerial heater based on AIRR consists of retro-reflector and a punched metal.



**Kazuaki Takiyama** received his B. E. and M. E. degrees from Utsunomiya University, Japan. Currently, he is in the process of completing Ph.D. degree from Utsunomiya University. His research interests include aerial display measurements and high-resolution aerial display.



**Shiro Suyama** received the M.E. degrees from Kyushu University in 1981. Since joining NTT Electrical Communication Laboratories in 1981, he has been engaged in research and development on transistor and liquid-crystal devices. He received the Ph.D. degree from Kyushu University in 1990. He was a Professor at Tokushima University from April 2007 to March 2021 and is currently a Project Professor at Utsunomiya University from April 2021. He is engaged in research on 3D display systems: e.g. DFD (Depth-fused 3-D) display, Arc 3D display, Aerial display, Enhancing image reconstruction in Brain, Three-dimensional perceptions and Liquid-crystal devices.



**Hirotsugu Yamamoto** received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan. After graduation, he joined the Department of Optical Science and Technology at University of Tokushima, Japan. From April 2014, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University, where he is currently a professor at School of Engineering, Utsunomiya University. He has been a project leader for international standardization of aerial display at IEC/TC110 since Oct. 2018, has been the head of the delegates in IEC/TC110 Japan National Mirror Committee, and received IEC1906 Award for his outstanding contribution. In April 2021, he has become a distinguished professor at Utsunomiya University.