

AiRound: 360度から見える空中像光学系の原理検証

矢野 裕太郎^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要: 本論文では、全周囲 360 度から見える空中像光学系 AiRound を提案する。空中像は、ユーザが特別な機器を装着することなく映像世界と実空間をシームレスにつなぐシステムであるが、観察可能な範囲の制限がある点、光源が外から見えてしまう点、迷光が発生する点の 3 つの問題を抱えている。そこで本論文では、光路制御フィルムと再帰透過光学素子を組み合わせ、これらを高速回転させることで、不要な光を除去するとともに空中像が全周囲から見えることを確認した。

1. はじめに

SF 映画には、未来の魅力的な技術として、空中像が時折登場する。例えば、映画「スターウォーズ」では、登場人物が空中像を取り囲み、様々な位置や角度から眺めるシーンが数多く登場する。また、映画「アイアンマン」では、主人公のトニー・スタークが空中像の周囲を歩きながら、映像とインタラクションするシーンも多く存在する。このような体験を現実のものとする空中像装置は、エンタテインメントコンピューティングの基盤となりうるものである。

空中像を形成する光学素子として、Micro-mirror array plate (MMAP) がある [1]。MMAP は、2 層のミラーアレイで構成され、下層と上層で反射方向が直交する。光源からの光がミラーアレイで反射することによって、光源に対して素子と面対称な位置に空中像が結像する。

MMAP を用いて空中像を表示する場合、透過光や迷光と呼ばれる不要な光が、空中像とともに発生することがある。迷光や透過光は空中像と重なり、ユーザが空中像を見るときに妨げとなる。これらの光は、MMAP 内での光線の反射回数によって分類できる。MMAP の各層で奇数回ずつ反射した光は空中像を結像する。一方で、各層で偶数回ずつ反射した光は透過光として観察され、各層合わせて奇数回反射した光は迷光として観察される。

また、MMAP によって形成された空中像は、見る位置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するため、可視範囲が限られる。そのため、映像は空中に浮かんでいるが、全周囲から見ることはできない。

そこで本論文では、空中像が 360 度から見え、かつ不要な光が見えない光学系である AiRound を提案し、実際に



図 1 360 度から見える空中像。ユーザは様々な視点から異なる映像を見ることができる。

検証する。具体的には、光路制御フィルム (view control film, VCF) [2] と呼ばれる、特定方向の光だけを通過させるフィルムを、MMAP に複数枚貼ることで不要な光を除去する。そして、MMAP と VCF を高速回転させることで空中像の可視範囲を広げ、空中像を 360 度から観察可能にする。

2. 関連研究

2.1 空中像結像光学素子

光源からの光を複数回反射させ、空中像を結像させる光学素子が複数開発されている。空中像結像光学素子として、Micro-mirror array plate (MMAP)、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [3] などがある。

MMAP は、直交する 2 つのミラーアレイで構成される。光源からの光が 2 回反射することにより、光源に対して面対称な位置に空中像を結像する。

AIRR は、再帰性反射材とハーフミラーで構成される。

¹ 電気通信大学

^{a)} y.yano@media.lab.uec.ac.jp

^{b)} koizumi.naoya@uec.ac.jp

光源からの光がハーフミラーで反射し、再帰性反射材で再帰反射した光がハーフミラーを透過することで、空中像を結像する。このとき、ハーフミラーで透過する光と反射する光に分かれるため、結像する空中像の輝度は、MMAPと比べて低下する。

本論文では、空中像結像光学素子としてMMAPを使用した。その理由は、MMAPは入手が比較的容易で、空中像の輝度が高く、単体で光学素子として機能するため、配置が簡潔だからである。

2.2 360度ディスプレイ

360度から見えるディスプレイを実現する方法として、回転機構を用いた時分割方式と、複数のディスプレイやプロジェクタによる空間分割方式がある。時分割方式では、回転スクリーンや回転ミラーなどを用いて、光源からの光を順番に走査することで360度ディスプレイを実現する。また空間分割方式では、複数のディスプレイやプロジェクタを配置し、各視点位置に応じた映像を投影することで360度ディスプレイを実現する。

回転機構による時分割方式を用いて360度ディスプレイを実現したシステムには、以下のようなものがある。Jonesらは、高速ビデオプロジェクタと回転ミラーを用いて、360度の立体映像を提案している[4]。Inoueらは、ホログラムパターンを表示するデバイスと回転スクリーンを用いる方式を提案している[5]。Takakiらは、3つのプロジェクタと回転スクリーンを持つ構成を提案している[6]。時分割方式において、映像の視点数は、ミラーやスクリーンの回転速度に依存するため、視点数を増やすためには、より高速で回転する回転機構が必要となる。

これらの回転機構を用いる構成では、安全のために、ユーザは映像に手を伸ばすことができないが、本光学系では、光源からの光が空中で結像しているため、ユーザは映像に手を伸ばすことができる。ユーザが映像に手を伸ばすことができるシステムとして、Butlerらの研究がある[7]。Butlerらは、向かい合うように配置された2枚の放物面鏡の下に、回転スクリーンと高速DMD(Digital Micromirror Device)プロジェクタを配置することで、360度から見える空中像表示を実現している。

複数のディスプレイやプロジェクタによる空間分割方式を用いて360度ディスプレイを実現したシステムには、以下のようなものがある。Yamadaらは、複数のディスプレイとリレーレンズを用いることで、円筒状の表示面を持つ360度ディスプレイを実現している[8]。Yoshidaらは、円周上に配置された288台のプロジェクタからの視点映像を、円錐状スクリーンに投影する方法を提案している[9]。このような複数プロジェクタ方式の利点は、フレームレートを落とさずに視点数を増やせることである。しかし、システム構成が複雑になり、各視点映像のレンダリングには

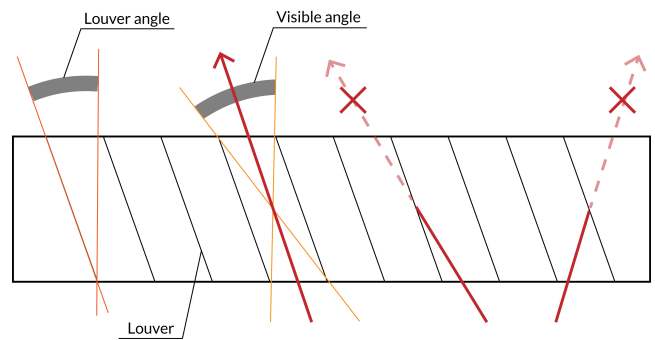


図2 VCFの構成。VCFは、仕切り(ルーバー)が一定の間隔・角度(ルーバー角度)で並ぶことで、光線の入射角度範囲を制限する。

高度な同期システムが必要となる。またMakiguchiらは、リニアブレンディングという視覚系の知覚メカニズムに着目した360度ディスプレイを提案しており、プロジェクタの台数を減らすことに成功している[10]。

本提案手法では時分割方式に着目し、MMAPを高速回転させることで、空中像が360度から観察できる。Butlerらも360度から空中像を観察できる光学系を提案しているが、この光学系では開口部の中心軸に対して、約45度の位置から空中像を見る必要がある。一方で本提案システムは、MMAPにより形成された実像であり、視点を動かしても空中像が観察できる。

2.3 空中像の不要光除去

再帰透過光学素子は、空中像を結像するとともに、迷光や透過光といった不要な光も生成する。これらの光は、見る角度によっては空中像と重なるため、除去する必要がある。

これまでにVCFや偏光板を利用して、迷光や透過光を除去する光学系が提案されている。VCFとは、図2のように、仕切り(ルーバー)が一定の間隔・角度(ルーバー角度)で並ぶことで、光線の入射角度範囲を制限する光学素子である。EnchanTable[11]やPortOn[12]、HoVerTable[13]、ReQTable[14]では、再帰透過光学素子の前にVCFを設置することで、透過光を除去している。ReQTableでは、偏光板を利用することで、奇数回反射により偏光成分が異なる迷光を除去している。

本論文では、4枚のVCFを、MMAPに貼り付けることで、迷光と透過光を除去する。

3. 原理

3.1 空中像の360度表示

MMAPの特徴の1つとして、空中像の視域の制限がある。MMAPは、直交する2つのミラーアレイで光源からの光が反射することで、光源に対してMMAPと面対称な位置に実像を結像する。MMAPの構成上、入射する光の

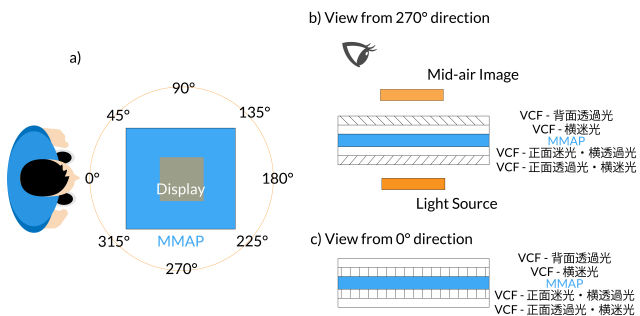


図 3 空中像を見るとき角度および VCF の配置. (a) 空中像の見るとき視点位置の定義. 空中像だけが見える位置を 0° と定義する. (b) 270° 方向から見たときの VCF の配置 (c) 0° 方向から見たときの VCF の配置

角度によっては MMAP で正しく再帰透過せず、空中像が結像されない。そのため空中像は、MMAP の前面近くでのみ観察でき、複数人が空中像を取り囲んで同時に観察したり、空中像とインタラクションできない。

MMAP を用いて結像された空中像の視域を拡大する光学系がこれまでに提案されているが、いずれの研究も空中像の視域を 360 度にまでは拡大できていない。MMAP を用いて結像された空中像の高視野角化に関する研究として、HoVerTable[13] や ReQTable[14]、Hashimoto らの研究 [15] がある。HoverTable や ReQTable では、光源として両面ディスプレイを複数配置することで、空中像の高視野角化を実現している。また Hashimoto らの研究では、MMAP と非対称ミラー構造を組み合わせることで、空中像の視域を拡大している。

本論文では、MMAP を高速回転させることで空中像の視域を全周囲に拡大させ、複数人が好きな角度で、かつ同時に空中像を観察できる。MMAP を特定の角度だけ回転させると、MMAP の回転角度に応じて空中像の可視範囲は変化する。つまり、MMAP の設置角度を変更することで、好きな角度で空中像を表示できる。この MMAP の回転による空中像の表示範囲の変化を、高速で行うことで空中像が常に全周囲 360 度から見えるようになる。

3.2 迷光と透過光のない空中像表示

MMAP を回転させたときに、空中像だけを全周囲に表示するためには、MMAP を回転させない状態で、空中像だけがどこか 1 方向で見える、かつ迷光や透過光はどの角度からも見えないようにする必要がある。迷光や透過光といった不要な光を除去しないまま、3.1 で述べたように MMAP を高速回転させると、不要光も全周囲に拡大し空中像の視認性が低下する。そのため、迷光と透過光は除去する必要がある。具体的には、空中像だけが見える方向を 0° と定義すると (図 3(a))、以下の 5 種類の不要光が除去対象となる。

- 180° 方向から見たときの透過光 (背面透過光)

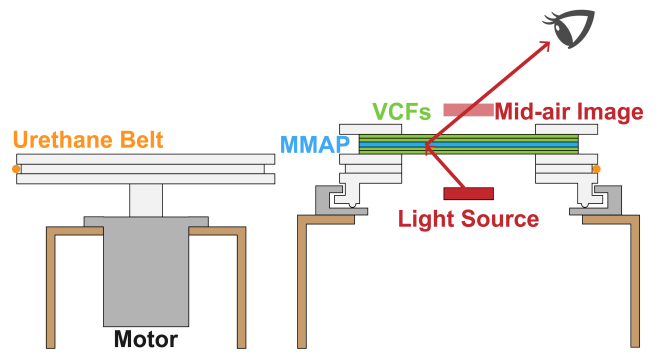


図 4 提案するシステムの光学系. モーター, ウレタンベルト, MMAP, VCF, MMAP と VCF を回転させる回転部, 光源からなる

- 90°, 270° 方向から見たときの迷光 (横迷光)
- 90°, 270° 方向から見たときの透過光 (横透過光)
- 0° 方向から見たときの迷光 (正面迷光)
- 0° 方向から見たときの透過光 (正面透過光)

そこで本論文では、空中像を結像する光を通過させ、迷光と透過光を除去するために、4 枚の VCF を使用した。それぞれの VCF の役割と形状は以下の通りである。

- VCF-背面透過光: 180° 方向から見える透過光を遮蔽するため、ルーバーが 25° 傾いている
- VCF-横迷光: 90°, 270° 方向から見える 2 つの迷光の内の 1 つを遮蔽するため、ルーバーが垂直になっている
- VCF-正面迷光・横透過光: 0° 方向から見える迷光を遮蔽するため、ルーバーが垂直になっている
- VCF-正面透過光・横迷光: 0° 方向から見える透過光かつ、90°, 270° 方向から見える 2 つの迷光の内の 1 つを遮蔽するため、ルーバーが 25° 傾いている

これらの 4 枚の VCF を MMAP に貼り付けることで、迷光と透過光が全ての角度から見えないようにする。具体的には、上から VCF-背面透過光, VCF-横迷光, MMAP, VCF-正面迷光・横透過光, VCF-正面透過光・横迷光という順番で配置する。VCF-背面透過光, VCF-正面透過光・横迷光は、ルーバーの長辺が 0°-180° 方向と直交、かつルーバーの傾きがそれぞれ逆向きに倒れるように配置する (図 3(b))。VCF-横迷光, VCF-正面迷光・横透過光は、ルーバーの長辺が 0°-180° 方向と平行になるように配置する (図 3(c))。

4. 実装

本論文で提案するシステムは、図 4 のようにモーター、ウレタンベルト、MMAP、VCF、MMAP と VCF を回転させる回転部、光源からなる。回転部は円形の亚克力板で構成され、亚克力板で MMAP と 4 枚の VCF を挟みこむことで MMAP と VCF を同時に回転させる。この回転部をモーターとウレタンベルトによって駆動させる。これ

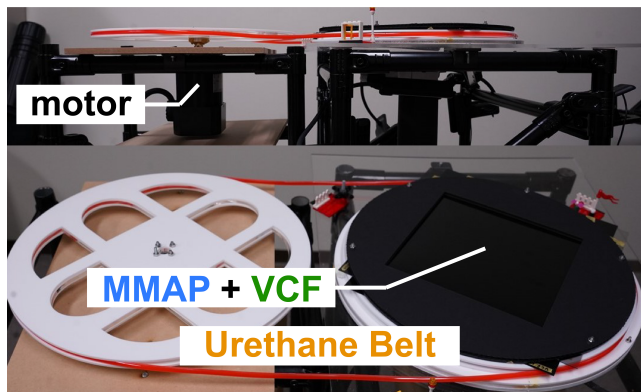


図 5 提案手法の実装

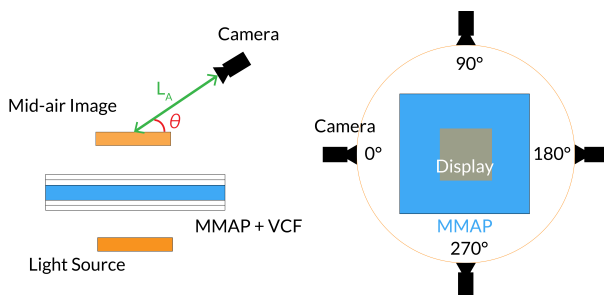


図 6 検証時の撮影条件. 空中像とカメラ間の距離が L_A , カメラが向いている方向と空中像がなす角が θ となるようにカメラを配置し, 4つの視点位置 (0° , 90° , 180° , 270°) から空中像を撮影した.

により, MMAP と VCF の下に設置された光源からの光を妨げることなく, 光学素子を回転させられる.

提案手法を実装した様子を図5に示す. モータはオリエンタルモーター社製 AC スピードコントロールモータ (速度制御範囲: 90–1400 rpm), ウレタンベルトは断面直径が 6 mm のもの, MMAP は ASUKANET 製 ASKA3D-200NT (200 mm \times 200 mm), VCF は信越ポリマー社製光路制御フィルム (VCF2, VCF3 として視野角が 48° ・ルーバー角度が 0° である VCF1324800-PC200, VCF1, VCF4 として視野角が 90° ・ルーバー角度が 25° である VCF1329025-PC200) を使用し, 回転部はアクリル板で制作した. 光源は, SWIT 社製ディスプレイ CM-S75C (最大輝度: 3000 cd/m²) と, 内側に文字が書かれている円筒とライトを組み合わせたものを使用した. このような円筒形の光源を使うことで, 視点位置によって異なる空中像を提示できる.

5. 検証

本提案手法で, 迷光・透過光が見えない, かつ 360° から見える空中像を表示できるかを確かめるために, 実際の空中像の見え方を確認した. 空中像の撮影条件を図6に示す. 空中像-カメラ間距離が L_A , カメラが向いている方向と空中像がなす角が θ となるようにカメラを配置した. L_A は 105 cm, $\theta = 53^\circ$ である. その後, 0° , 90° , 180° , 270° の4方向から空中像をそれぞれ撮影した. 撮影時のカメラ

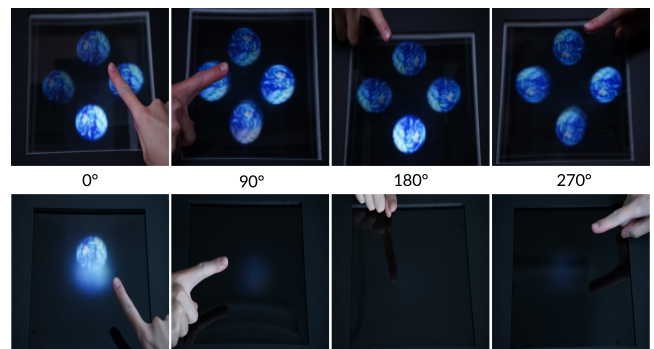


図 7 VCF の有無による空中像の様子. 左から, 0° , 90° , 180° , 270° 方向から見たときの空中像を示す. (上部: MMAP だけを用いたときの空中像, 下部: MMAP と 4 枚の VCF を組み合わせたときの空中像)

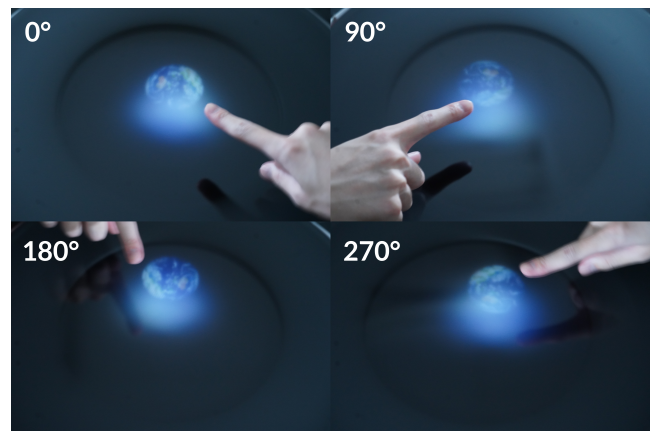


図 8 4 視点 (0° , 90° , 180° , 270°) から見たときの空中像. 空中像が全周囲から確認できる.

の設定は, マニュアルモードを使用した. ISO 値は 2500, F 値は 5.0, シャッタースピードは 1.6 秒とした.

まず, MMAP に貼り付けた 4 枚の VCF によって, 迷光・透過光が除去されているかを確認するために, VCF なしの状態と, VCF ありの状態での空中像を撮影した. 撮影結果を図7に示す. MMAP に VCF を貼らない状態では, 図7上部のように迷光・透過光が発生するが, 4 枚の VCF を貼った場合, 図7下部のように迷光・透過光は除去され, 0° 方向からのみ空中像が確認できた.

次に, 空中像が 360° から見えていることを確認するために, MMAP と VCF を高速回転させた状態で空中像を撮影した. 撮影結果を図8に示す. 撮影の結果, 空中像が4視点全てにおいて見えることが確認できた. また, これらの4視点以外にも, 全周囲から空中像を見ることができた.

これらの撮影の結果, 360° から空中像を観察でき, かつ不要な光のほとんどが除去されていた. しかし, 図8からも分かるように, 空中像の下にばけた光が見えてしまっている.

不要な光が完全に除去されなかった理由として, 透過光を除去するために使用した VCF1, VCF4 のルーバー角度が原因だと考えられる. 今回使用した VCF1, VCF4 の

ルーバー角度は 25 度であるが、本システムで用いた VCF より適切なルーバー角度を持つ VCF があると考えられる。しかし、そのようなルーバー角度を持つ VCF は市販されていない。ただ、必要なスペックは計算可能であり、今後の光学素子の改善によって大いにシステムが改善されると期待できる。

6. 結論

本論文では、空中像を見る際に不要な光が発生せず、360 度から見る事ができる空中像光学系 AiRound を提案し、実際に検証した。本光学系はテーブル型の空中像ディスプレイとして活用できるため、複数人で空中像を見ながら会話するといった新しい体験を提供する。提案システムでは、光路制御フィルムと呼ばれる、特定方向の光だけを通過させるフィルムを、再帰透過光学素子に 4 枚貼ることで不要な光を除去する。そして、再帰透過光学素子と光路制御フィルムを高速回転させることで空中像の可視範囲を広げ、空中像を 360 度から見られるようにする。検証の結果、不要な光が除去され、かつ 360 度から空中像が見えることを確認した。この結果は、これまで不可能であった、再帰透過光学素子により結像された空中像の 360 度表示が可能であることを示している。

本システムにはいくつかの改善の余地がある。それは回転時の振動による空中像のぶれの軽減、不要光のさらなる除去である。空中像のぶれに関しては、ベルトの振動をプーリー等で小さくすることで、空中像のぶれを軽減できると考えられる。また不要光のさらなる除去に関しては、より適切な光路制御フィルムを使うことで解決すると考えられるが、現在そのような光路制御フィルムは市販されていない。しかし、この光学系を用いて行われる新しい空中像体験が、新しい VCF の開発を促進すると考えられる。

また本光学系の応用として、高速ディスプレイを光源に利用した、360 度から見える立体空中像の表示がある。光源に高速ディスプレイを使用し、映像の周期と光学素子が回転する周期を同期させることで、各視点位置に異なる映像を提示できる。これにより運動視差を伴う、360 度から見える立体空中像を表示できる。

謝辞 本研究は JST 創発的研究支援事業 JPMJFR216L の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Makoto Otsubo. Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same, 2014. US Patent 8,702,252.
- [2] 信越ポリマー株式会社. 視野範囲/光路制御フィルム『シンエツ vcf』. <https://www.shinpoly.co.jp/ja/product/product/vcf/vcf.html>. (Accessed: 2023-04-05).
- [3] Hirotsugu Yamamoto, Masahiko Yasui, M. Alvissalim, Masashi Takahashi, Yuka Tomiyama, Shiro Suyama, and Masatoshi Ishikawa. Floating display screen formed by

- AIRR (aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space. *2014 International Conference on 3D Imaging, IC3D 2014 - Proceedings*, 02 2015.
- [4] Andrew Jones, Ian McDowall, Hideshi Yamada, Mark Bolas, and Paul Debevec. Rendering for an interactive 360 light field display. In *ACM SIGGRAPH 2007 papers*, pp. 40–es. 2007.
- [5] Tatsuki Inoue and Yasuhiro Takaki. Table screen 360-degree holographic display using circular viewing-zone scanning. *Optics express*, Vol. 23, No. 5, pp. 6533–6542, 2015.
- [6] Yasuhiro Takaki and Shigeki Uchida. Table screen 360-degree three-dimensional display using a small array of high-speed projectors. *Optics express*, Vol. 20, No. 8, pp. 8848–8861, 2012.
- [7] Alex Butler, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Steve Hodges, David Molyneaux, David Kim, and Danny Kong. Vermeer: direct interaction with a 360 viewable 3d display. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 569–576, 2011.
- [8] Hodaka Yamada, Kayo Yoshimoto, Hideya Takahashi, and Kenji Yamada. 360-degree three-dimensional display with virtual display surface. *Electronic Imaging*, Vol. 2016, No. 5, pp. 1–6, 2016.
- [9] Shunsuke Yoshida. fvision: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3d display composed of conical screen and modular projector arrays. *Optics express*, Vol. 24, No. 12, pp. 13194–13203, 2016.
- [10] Motohiro Makiguchi, Daisuke Sakamoto, Hideaki Takada, Kengo Honda, and Tetsuo Ono. Interactive 360-degree glasses-free tabletop 3d display. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 625–637, 2019.
- [11] Hiroki Yamamoto, Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. Enchantable: Displaying a vertically standing mid-air image on a table surface using reflection. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, pp. 397–400, 2015.
- [12] Ayaka Sano and Naoya Koizumi. Porton: Portable mid-air imaging optical system on glossy materials. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, pp. 38–39, 2019.
- [13] Hajime Katsumoto, Hajime Kajita, Naoya Koizumi, and Takeshi Naemura. Hovetable pong: Playing face-to-face game on horizontal tabletop with moving vertical mid-air image. In *Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 1–6, 2016.
- [14] Mizuki Takenawa, Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura. Reqttable: Square tabletop display that provides dual-sided mid-air images to each of four users. In *ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 2022.
- [15] Naoki Hashimoto and Kota Murofushi. Wide viewing angle 3d aerial display using micro-mirror array plates and aerially-coupled 3d light sources. In *ACM SIGGRAPH 2020 Posters*, pp. 1–2, 2020.