



CAST-Table: 実物体を配置できる 4 方向観察可能な 直立空中像光学系

野口朋輝¹⁾, 小泉直也¹⁾

Tomoki NOGUCHI, Naoya KOIZUMI

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

概要: 本研究では, 4 方向から観察できる直立空中像を投影かつ, テーブルトップに実物体を配置可能な空中像光学系の実現を目的とする. 従来の空中像を用いたテーブルトップシステムでは, 多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示の 3 要素を同時に満たすことが難しかった. そこで本研究ではディスプレイと鏡のセットで形成した複数の虚像を同一位置に重ね合わせ, これを光源として空中像を結像する光学系 CAST-Table を提案する.

キーワード: mid-air image, view-dependent display, tabletop

1. はじめに

本研究では, テーブルを囲む複数のユーザが, 卓上の実物体と, それに隣接して表示される CG やテキストといったデジタル情報を, それぞれの方向から同時に観察できる体験の実現を目指す. このような体験では, 特別な装置を装着している特定のユーザのみが, デジタル情報を観察できるのではなく, デジタル情報が実物体と同じように複数方向から観察でき, かつ画面や枠といった物理的な境界を持たないことが求められる.

この体験を実現するために, 本研究では空中像に着目する. 空中像とは, 光源と光学素子によって空中に結像される実像である. ユーザはヘッドマウントディスプレイ等の装置を装着することなく, 複数人で同時に空中像を観察することができる. また, 空中像は, その表示にスクリーン等を必要としないため, 像の近傍に手や実物体を近づけることが可能であり, テーブル上の実物体と共存させる用途に適している. 空中像の結像には, micro-mirror array plate (MMAP) などの直交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おり, 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.

しかし, 従来の空中像を用いたテーブルトップシステムでは, 本研究で目指す体験の実現に必要なと考えられる, 多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示という 3 要素を同時に満たすことが難しい. 単に光源と光学素子のみによって空中像が結像される方式だと, 空中像は視域が限定的で, 1 方向からしか観察することができない. そこで, テーブル面に空中像光学素子を用いたテーブルトップシステムにおいて, 多方向から空中像を観察する手法として, 光学系を高速回転させる手法 [1] や, 4 枚の両面ディスプレイを配置 [2] する手法が提案されている. しかし, 光学系を高速回転させる手法では空中像がテーブル



図 1: CAST-Table によって提示された 4 方向から観察可能で実物体に隣接した直立空中像

面に対し水平に結像する. テーブル上に像を表示する場合, 水平像よりも立像の方が見やすいことが示されている [3]. また, 4 枚の両面ディスプレイを配置する手法では, 各空中像が異なる位置に結像するため, 結像光がテーブル上の広範囲を通過する. その結果, 卓上に実物体を配置すると結像光が遮られ, 空中像と実物体を共存させることが難しい.

そこで本研究では, ディスプレイと鏡のセットによって光源の虚像を同一位置に重ね合わせ, それを空中像の光源とする手法により, 多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示という 3 要素を同時に満たすテーブルトップ空中像システム CAST-Table を提案する (図 1). ディスプレイと鏡のセットは 4 つで, それぞれ異なる向きでテーブル面に対して垂直に配置されているため, ユーザは 4 方向から直立空中像を観察できる. また, テーブル面と鏡が隣接した構造をとることで, 結像光を遮ることなく空中像の真下に実物体が配置可能である.

2. 関連研究

テーブル上に空中像を提示するシステムは, 光学系の工夫によってこれまで複数提案されてきた. 空中像結像素子をテー

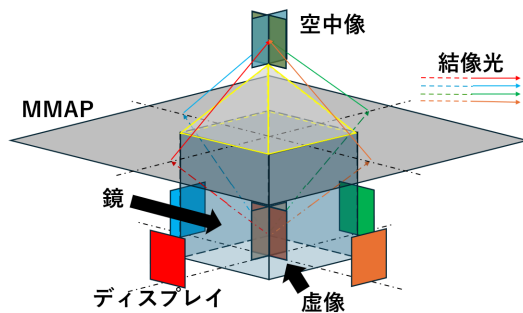


図 2: 結像原理

ブル面に用いるシステムとして、AiRound[1] は、MMAPを用いた光学系を高速に回転させることで、テーブルの周囲 360° から観察可能な空中像の提示を実現した。これにより、ユーザはテーブル周囲の任意の位置から空中像を観察できる。ReQTable[2] では、4 枚の両面ディスプレイを 4 箇所配置することで、テーブルを囲む 4 人のユーザがそれぞれの位置から異なる映像を観察できる。また、両面ディスプレイはそれぞれ鉛直に配置されているので、ユーザは直立空中像を観察することができる。EnchanTable[4] は、空中像結像素子をテーブル面とするのではなく、任意のテーブル面での反射を利用するシステムであり、テーブルトップに直立空中像を提示することができる。また、テーブル上の実物体に隣接させて空中像を提示することが可能である。

しかし、これらの手法はいずれも、多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示という 3 要素を同時に満たせていない。AiRound では、空中像がテーブル面に対し水平に結像するため、直立空中像が提示できない。テーブル上に像を表示する場合、立像の方が水平像よりも見やすいことが示されており [3]、テーブル上での空中像の観察には立像を表示の方が好ましい。ReQTable では、テーブル周囲の 4 人のユーザに提示される空中像が、それぞれ異なる位置に結像するため、結像光がテーブル上の広範囲を通過する。その結果、卓上に実物体を配置すると結像光が遮られ、空中像と実物体を共存させることが難しい。EnchanTable では 1 方向からしか観察できないため、複数のユーザがテーブルを囲んで、空中像を共有して観察することには対応していない。

3. 提案

3.1 原理

本稿で提案する CAST-Table は、4 対のディスプレイと鏡のセットが形成する虚像を同位置に重ね合わせ、これを空中像結像の光源として用いることで、多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示という 3 要素を同時に満たす。

多方向からの空中像観察と立像の提示は、4 対のディスプレイと鏡のセットをテーブル面に対し鉛直に配置し、ディスプレイの虚像を同位置に重ね合わせることで実現される。ディスプレイから出た光は鏡で反射されることによって虚

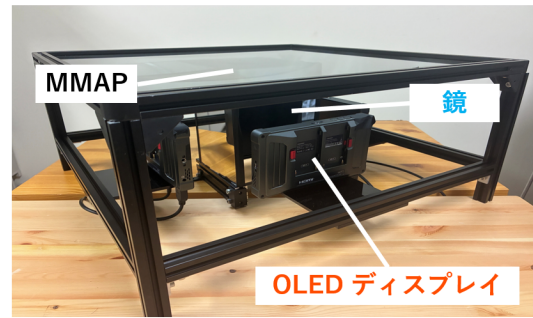


図 3: 実装したシステム

像を形成する。虚像は実体を持たないため、4 対のディスプレイと鏡のセットで 4 つの虚像を同位置に重ね合わせることができる。したがって、図 2 のように、一つの光源から 4 方向に結像光が出て、それぞれが MMAP へ入射するような状態が作られる。さらに、各ディスプレイを鉛直に配置することで、対応する虚像も鉛直に形成されるため、空中像は立像となる。その結果、ユーザはテーブルを囲む 4 方向から、直立空中像を観察することができる。

また、空中像と実物体の隣接表示は、ディスプレイと鏡の光学配置によって、テーブル上に結像光が通らない領域を確保することで実現される。4 方向から観察可能な直立空中像の結像光は、ディスプレイから出て鏡で反射した後に、MMAP へ入射する経路上にしか存在しない。本システムでは MMAP と鏡を接触させた設計をとっているため、ディスプレイから見て鏡よりも奥側の領域には結像光が入射しない。したがって、結像光が通る領域の境界は、ディスプレイと鏡の上端を結んだ直線となる。4 方向それぞれの結像光が通る領域を考えると、図 2 の四角錐の内側には結像光が通らない。この領域は、実物体を配置しても結像光を遮らないため、空中像の真下に実物体を配置することができる。

3.2 実装

本システムは、MMAP 1 枚、OLED ディスプレイ 4 枚、アクリルミラー 4 枚で構成される（図 3）。MMAP にはアスカネット社製の ASKA3D plate (480 mm × 480 mm) を用いた。光源には 7 インチ OLED ディスプレイ 4 枚（解像度 1920 × 1080）を用いた。

アクリルミラーには厚さ 2 mm のものを用い、136 mm × 200 mm の大きさに切り出した 4 枚のミラーでボックスを組み立てた。ボックスは、その中心が MMAP の中心から下ろした垂線上に位置するように配置した。各ディスプレイは、それぞれの虚像がミラーボックスの中心で重なるように、発光面をミラーボックスの中心から水平方向 140 mm 離れた位置に配置した。また、ディスプレイの上端が MMAP から 70 mm 下方の位置になるように配置した。

3.3 本手法の特徴

CAST-Table の構造は、ディスプレイと鏡のセットが形成する虚像を同位置に重ね合わせることで、3 要素の同時実現に加え、光学配置に基づく不要光の抑制・多様な空中像光学素子との互換・3D 空中像表示への拡張という 3 つの利点

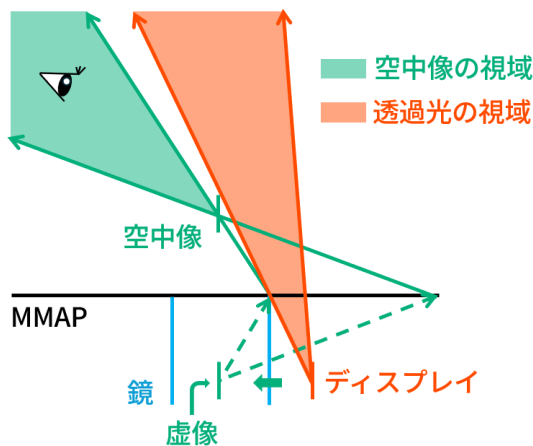


図4: 透過光の視域と4方向から観察可能な空中像の視域

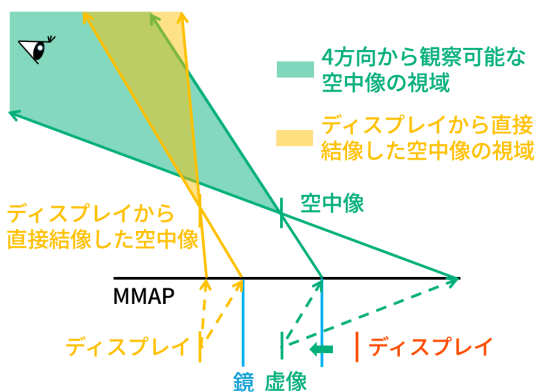


図5: ディスプレイから直接結像した空中像の視域と4方向から観察可能な空中像の視域

をもたらす。これらの利点はいずれも、虚像を実質的な光源として用いる本手法によって達成されるものである。本節ではこれらの利点について順に述べる。

3.3.1 光学配置に基づく不要光の抑制

CAST-Table では、光学配置とディスプレイ1枚あたり1枚のフィルムによって、空中像の輝度を大きく損なわずに、透過光と迷光、および本手法に特有の、ディスプレイから直接空中像を結像させてしまう光という3種類の不要光を抑制する。これらの不要光は空中像観察時の妨げになるため、抑制することが望ましい。

従来の手法では、複数枚のフィルムを用いて透過光と迷光を抑制してきた。ディスプレイ1枚あたり複数枚のルーバーフィルム [1] や偏光板との組み合わせ [2] が用いられてきたが、フィルムを通過するたびに光が吸収されるため、空中像の輝度が大幅に低下する。

しかし、本手法では、透過光とディスプレイから直接空中像を結像する光を、光学配置によって抑制することができる。透過光とは、ディスプレイから MMAP に入射したものの、直交スリットミラー構造内で反射されずに素子を透過した光である。MMAP 下方にディスプレイを配置するテーブルトップシステムでは、透過光がユーザの目に入り、MMAP 背後のディスプレイが直接見え空中像観察の妨げになる。CAST-Table では MMAP と鏡を接触させた設計に

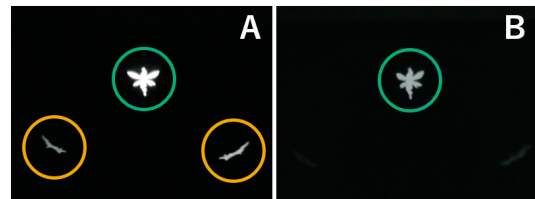


図6: ルーバーフィルムによる迷光低減。(A) ルーバーフィルムなし、(B) ルーバーフィルムあり。緑色の円が空中像、オレンジ色の円が迷光を示す。

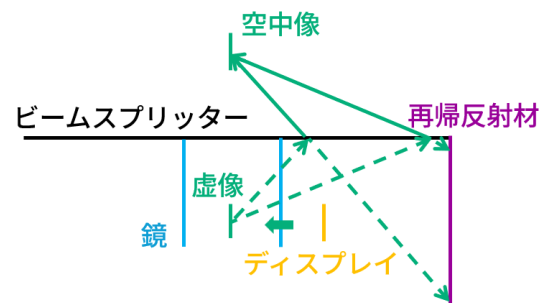


図7: MMAP をビームスプリッターと再帰反射材の組み合わせに置き換えた CAST-Table の構成

より、図4に示すように透過光が空中像の視域の外側に向かうため、フィルムを用いずに透過光を抑制することができる。また、ディスプレイから直接空中像を結像させてしまう光は、ディスプレイから出た後、鏡で反射せずに MMAP へ入射した光である。この光は、ディスプレイと鏡の配置によって、MMAP に急な角度で入射する（図5）。MMAP が明るい空中像を結像するためには、結像光が MMAP に入射するときの角度が、約 30° から 60° でなければならない。ディスプレイから直接空中像を結像させてしまう光は、この角度条件を満たしていないため、結像される空中像の輝度が大きく低下し、観察することが難しい。

これら2つの不要光が光学配置によって抑制されることで、残る迷光をディスプレイ1枚あたり1枚のフィルムで低減すれば、すべての不要光を抑制することができる。迷光とは、MMAP の直交するミラーの各面で偶数回ずつ反射した光である。本システムでは、ユーザがテーブルの一方の側で、対面から提示される空中像を観察するとき、対面に隣接した2辺に設置されているディスプレイからの迷光が、空中像の視域に重なってしまう。図6(A)では、この迷光をオレンジ色の円で示している。それに対し図6(B)では、各ディスプレイにルーバーフィルムを1枚貼ることで、迷光を抑制しつつ観察される空中像の輝度がおおむね保たれている。以上より、本手法は空中像の輝度を大きく損なわずに、3種類の不要光を抑制することができる。

3.3.2 多様な空中像光学素子との互換性

CAST-Table では、空中像の形成に用いる素子は MMAP に限定されず、多様な光学素子と互換性がある。この柔軟性は、CAST-Table が虚像の生成と空中像の結像とを構造的に分離していることに起因しており、光源と素子面に対して面对称な位置に空中像を形成する光学素子ならば、シ

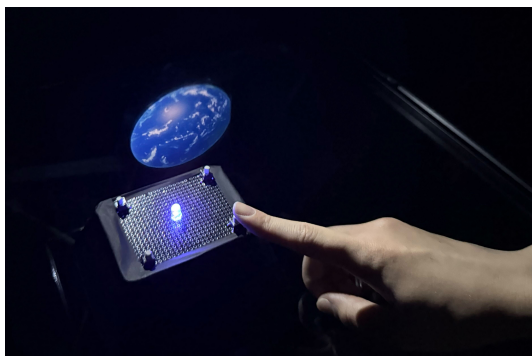


図 8: アプリケーション例

システムの他の部分を変更することなく、CAST-Table の光学素子として採用することができる。

例えば大型の結像系が要求される場合、MMAP を再帰反射材とビームスプリッタを用いて空中像を形成する aerial imaging by retro-reflection (AIRR)[5] や polarized aerial imaging by retro-reflection (p-AIRR)[6] に置き換えることができる。図 7 は、MMAP をビームスプリッタと再帰反射材の組み合わせに置き換えた構成を示す。

加えて、全方位からの観察が要求される場合には、MMAP を AiRound[1] や biconical-ended cylinder array plate (BCAP)[7] のような全方位に空中像を結像可能な光学系に置き換えることもできる。このように、CAST-Table は特定の光学素子に依存せず、より大きな空中像の結像、360°からの空中像観察、あるいは迷光の抑制といった、所望の特性を持つ光学素子を選択することができる。

3.3.3 3D 空中像表示への拡張

CAST-Table は、2D ディスプレイを 3D ディスプレイに置き換えることにより、平面的な空中像から裸眼立体視可能な空中像へと拡張可能である。ディスプレイが奥行情報を持つならば、鏡に反射されて形成された虚像も奥行情報を持つ。そのため、光源に 3D ディスプレイを用いることで、最終的に結像する空中像に両眼視差を付加することができる [8]。その結果、本システムでも、ユーザは奥行き感のある空中像を観察することができる。

4. アプリケーション

CAST-Table は、テーブル上の実物体や手と空中像を共存させた状態でのインタラクションを可能にする。図 8 にその例を示す。本アプリケーションでは、卓上に置かれたボタンをユーザが押すと、何もなかった空間に空中像が出現する。空中像の直下には結像光が通らない領域が確保されているため、ボタンのような実物体を配置することができる。また、テーブルを囲む 4 方向から空中像を観察可能なため、複数人で体験を共有することができる。

5. むすび

本稿では、4 対のディスプレイと鏡のセットが形成する虚像を同位置に重ね合わせ、これを光源として空中像を結

像する空中像光学系 CAST-Table を提案した。本手法により、多方向からの空中像観察・立像の提示・空中像と実物体の隣接表示という 3 要素を同時に満たすことができる。また、本システムは、光学配置に基づく不要光の抑制、多様な空中像光学素子との互換、3D 空中像表示への拡張という利点を持つ。

今後は、提案手法による空中像の視野角や輝度の定量評価を行うとともに、応用例の拡充に取り組む。

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ある。

参考文献

- [1] Yutaro Yano and Naoya Koizumi. Omnidirectional mid-air image system using micro-mirror array plates. *Opt. Express*, Vol. 32, No. 12, pp. 21473–21486, 2024.
- [2] Mizuki Takenawa, Tomoyo Kikuchi, Yuchi Yahagi, Shogo Fukushima, and Takeshi Naemura. ReQTable: Square tabletop display that provides dual-sided mid-air images to each of four users. In *ACM SIGGRAPH 2022 Emerging Technologies*, Article 8, 2 pages, 2022.
- [3] Hanyuool Kim, Hiroki Yamamoto, Naoya Koizumi, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura. HoV-erTable: Combining Dual-sided Vertical Mid-air Images with a Horizontal Tabletop Display. *The Transactions of Human Interface Society*, Vol. 17, No. 3, pp. 275–286, 2015.
- [4] 山本 紘暉, 梶田 創, 小泉 直也, 苗村 健. EnchanTable: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 401–410, 2016.
- [5] Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama. Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR). *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924, 2014.
- [6] Masato Nakajima, Kenta Onuki, Ichiro Amimori, and Hirotsugu Yamamoto. Polarization state analysis for polarized aerial imaging by retro-reflection (PAIRR). In *Proceedings of the International Display Workshops*, Vol. 22, pp. 429–432, 2015.
- [7] Junpei Sano and Naoya Koizumi. Omnidirectional mid-air imaging with a single biconical-ended cylinder array plate. *Opt. Express*, Vol. 34, No. 10, pp. 18839–18857, 2026.
- [8] 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*, Article 37, 2 pages, 2020.