



対称ミラー構造を用いたテーブルトップ空中像ディスプレイ

Tabletop Mid-air Display using a Symmetrical Mirror Structure

横瀬哲也¹⁾, 阪口紗季²⁾, 苗村健^{1),2)}

Tetsuya YOKOSE, Saki SAKAGUCHI, and Takeshi NAEMURA

- 1) 東京大学大学院 学際情報学府 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {yokose, naemura}@nae-lab.org)
2) 東京大学大学院 情報学環 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, sakaguchi@nae-lab.org)

概要: テーブル上での裸眼複合現実感システムを実現する上で、テーブル面を見込む領域とテーブルの奥を見込む領域の両方に横断的に表示できる空中像ディスプレイは効果的である。しかし既存手法では、テーブルの奥を見込む領域での空中像の視域が限定的であった。本研究では対称ミラー構造を導入することで、両方の領域に十分な視域を確保できるようなディスプレイ系を提案する。このディスプレイ系を実装し、空中像の観察結果について評価した。

キーワード: 空中像, テーブルトップディスプレイ, 複合現実感システム, 対称ミラー構造

1. はじめに

空間中に実像を結ぶ再帰透過光学系を用いた空中像ディスプレイは、裸眼複合現実感システムを実現する手法として効果的である。本研究では特に、テーブル上の空間に映像を提示するテーブルトップ空中像ディスプレイについて考える。

この場合、観察者がテーブル面を見込む領域とテーブルの奥を見込む領域とで、空中像提示に必要な光学系が異なる。これまでに、両者の光学系を同時に実現することで、2つの領域を横断する形で空中像を提示するシステムが提案されている [1]。しかしこの手法では、再帰透過を実現する光学素子の特性上、テーブルの奥を見込む領域での空中像の視域が限定的であった。

そこで本研究では、空中像の視野角拡大手法である対称ミラー構造を導入することで、2つの領域を横断する形で広範囲に空中像を提示できるディスプレイ系を提案する。本稿ではこのディスプレイ系を実装し、空中像の観察結果を評価した。

2. 関連研究

2.1 再帰透過光学系による空中像

空間中に実像を結ぶ空中像ディスプレイを実現する上で、再帰透過性をもつプレート状の光学素子が用いられている。この光学素子には、入射した光線を面内の2軸方向について反転させ、法線方向には透過させる性質がある。この結果、光源からこの光学素子に入射した光はプレート面に関して光源と面対称な位置に実像を結ぶことになり、実空間中にディスプレイのような光源の空中像を配置することができる。本稿では、このような再帰透過を実現するプレートを RT-Plate (Retro-Transmissive Plate) と呼ぶことにする。

本研究ではこうした RT-Plate としてアスカネット社の

ASKA3D[2] を利用する。これは短冊状のミラーをアレイ状に並べ、それをミラーが直交するように2層接合した構造の RT-Plate である。ASKA3D に入射した光線をプレート内のミラーで反射させることで再帰透過が実現されている。一般に RT-Plate には構造上良好に空中像を観察できる領域が存在しており、ASKA3D の場合は視線とプレート面の法線とのなす角が $45^\circ \pm 20^\circ$ となるような領域で良好に観察できる。特に、プレート面の法線方向から観察する場合はプレート内のミラーで反射していない透過光を観察することになり、所望の空中像ではなく光源のディスプレイが観察されてしまう。

2.2 空中像ディスプレイの表示領域

光の直進性から、空中像を観察するには観察者の視点と空中像を結んだ先に光学系が存在していなければならない。梶田ら [1] は、テーブルトップ空中像システムにおける空中像の位置と光学系の位置を以下のように分類している。

空中像の位置

- Above: 観察者がテーブルの奥を見込む領域
- On: 観察者がテーブル面を見込む領域

光学系の位置

- Behind: テーブルの奥に配置した光学系
- Under: テーブル面やその下に配置した光学系

Above の領域に空中像を提示する光学系としては、Behind の光学系によるもの [3] が一般的である。また、On の領域に空中像を提示する光学系としては、Under の光学系によるもの [4] や、Behind の光学系による像を、テーブル面上で反射させるもの [5] がある。

Above と On の両方の領域に空中像を提示する光学系として、梶田ら [1] は [5] の手法にディスプレイを追加し、Above

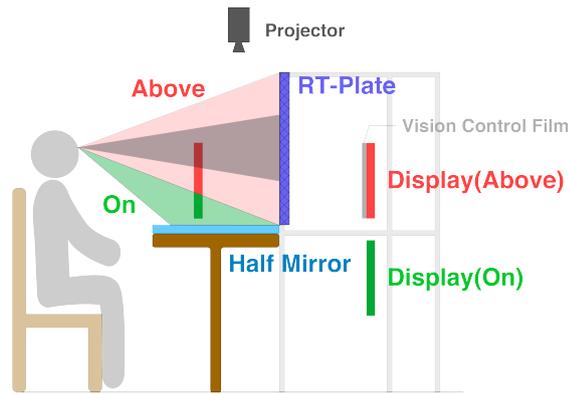


図 1: beyooooonD[1] の光学設計概要と空中像の観察が困難な領域 (図の灰色部分)

の領域へも空中像を提示する beyooooonD を提案した。しかしこの手法では Above 領域の空中像を観察する際に、図 1 に示したように、RT-Plate の法線方向およびそれに近い方向から像を観察する領域が存在する。この領域では、2.1 節で述べた理由により空中像の観察が困難であるという問題がある。これは、Above の領域での実効的な視域が制限されることを意味している。

3. 提案手法

3.1 指針

本研究では beyooooonD[1] が抱えていた Above 領域での視域制限を解決し、On と Above の 2 つの領域を横断して空中像を提示できる光学系を提案する。

Above の領域には、従来から用いられてきた Behind の光学系による空中像提示 [3] を行う。On の領域には、テーブル面上での反射を用いる手法 [5] を用いた上で、十分な視域を実現するために RT-Plate の前後に対称ミラー構造 [6] を導入する。対称ミラー構造は RT-Plate に関して面対称な位置にミラーを配置した構造であり、RT-Plate による空中像の視野角拡大 [7] や Above 領域の空中像の視域拡大 [8] に用いられてきた。

このように、本研究は Above 領域への空中像提示を主とした光学系に、テーブル上のミラーと対称ミラー構造を追加することで、On と Above の領域を横断して空中像を提示することを試みるものである。

3.2 設計

本研究で提案する光学系の設計を図 2 に示す。この光学系はテーブルの他に、光源となるディスプレイ D、空中像を生成する RT-Plate、テーブル上に配置したミラー M_1 、 M_1 と RT-Plate に関して対称に配置されたミラー M_1' 、そして On 領域の視域拡大のための対称ミラー M_2 、 M_2' からなる。全体として、ミラーの組 (M_1 , M_2) と (M_1' , M_2') が対称ミラー構造を構成する形となっている。

この光学系は光線によってミラー M_1 や M_2 で反射するかどうか異なり、それによって複数の結像経路が存在す

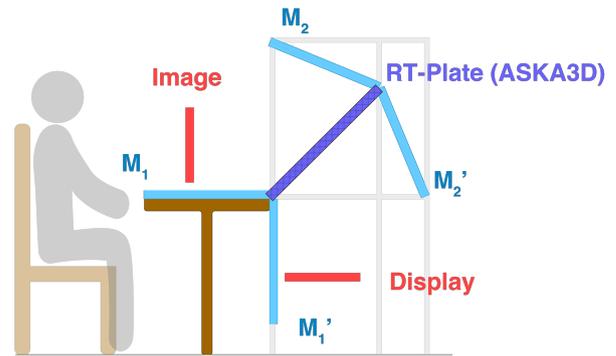


図 2: 提案光学系の設計

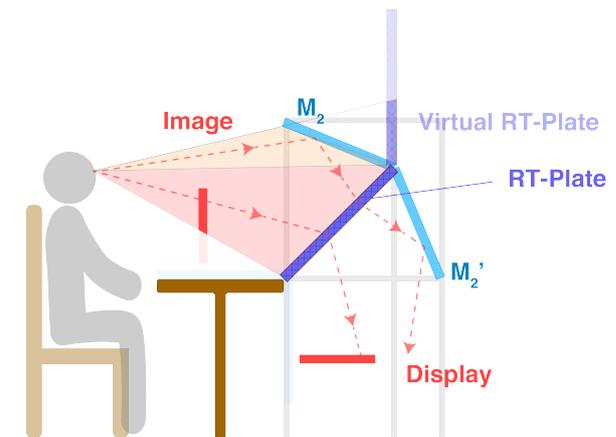


図 3: Above 領域の結像経路と視域

る。いずれの経路も RT-Plate のプレート面に関して光源と面対称な位置に結像するため、空中像が観察される位置は視点によらず一定である。以下では、それぞれの結像経路について説明する。

3.2.1 Above 領域の結像経路

Above 領域の経路には、図 3 に示すように、RT-Plate のみを通して直接結像するものと、対称ミラー M_2 と M_2' での反射を含むものの 2 つがある。観察者が RT-Plate を直接見込むような領域では前者の、 M_2 を見込むような領域は後者の空中像がそれぞれ観察される。Above 領域での視域は、RT-Plate と、 M_2 が生成するバーチャルな RT-Plate を見込む範囲として求まる。

3.2.2 On 領域の結像経路

On 領域の経路には、図 4 に示すように、対称ミラー M_1 と M_1' での反射を含むものと、さらに M_2 と M_2' での反射も含むものの 2 つがある。テーブル面を見込む領域のうち、観察者が M_1 によって生成されるバーチャル RT-Plate を見込む領域では前者の像が観察される。また、観察者が M_1 と M_2 によって生成される RT-Plate を見込む領域では後者の像が観察される。On 領域での視域は、これら 2 つの RT-Plate の像を見込む範囲として定まる。

ここで、 M_1 と M_2 が生成するバーチャル RT-Plate の角度は、対称ミラー M_2 、 M_2' の角度によって変化する。バー

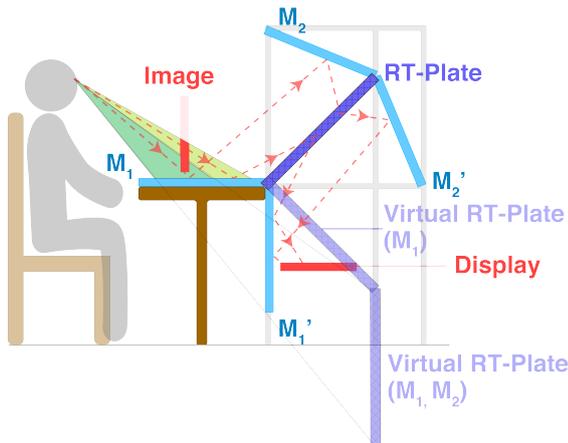


図 4: On 領域の結像経路と視域

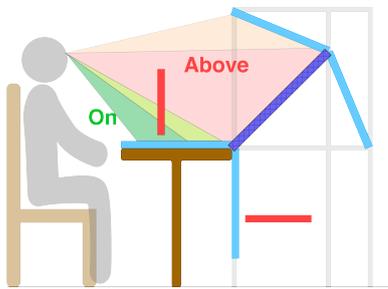


図 5: 光学系全体の視域

チャル RT-Plate の角度が変わると、それを見込む領域の空中像の視域や、良好に観察できる視点位置が変化する。提案光学系では、対称ミラー M_2 や M_2' と RT-Plate のなす角を $\frac{135^\circ}{2}$ と定めた。これは、今回 RT-Plate として用いる ASKA3D の 2.1 節で述べた特性に基づき、観察者が俯角 45° でテーブル面上を見込むような場合に最も良好に空中像を観察できるような設計となっている。光学系と想定される視点位置の関係によっては、最適なミラー角度が変化すると考えられる。

3.2.3 光学系全体の視域

以上の議論から、提案手法の光学系全体としての視域を図 5 に示す。光学系全体の視域は Above 領域と On 領域それぞれの視域を合わせたものであり、これによって 2 つの領域を横断する形で空中像を提示することが可能となる。光学系の視域は、RT-Plate や各ミラーのサイズによって制約を受ける。また、視点位置によっても視域が変化するため、空中像が途切れることなく観察されるためには、あらかじめ想定される視点位置の範囲を設定し、各視点位置での視域の共通範囲の中で映像を提示する必要がある。

3.3 実装

実装した光学系の外観を図 6 に示す。今回の実装にあたり用いた機器は以下の通りである。RT-Plate として、アスカネット社の ASKA3D (488mm × 488mm) を用いた。ディスプレイには LITEMAX 社製の液晶ディスプレイ SLD1968



図 6: 実装した光学系の外観

を用いた。また、ミラーおよびハーフミラーにはアクリルミラー（厚さ 5mm、ハーフミラーの透過率約 30%）を用いた。図 2 に示した光学設計において、テーブル上に配置するミラー M_1 にもハーフミラーを使用し、それ以外は通常のミラーを用いた。なお、beyooooonD[1] ではテーブルへのプロジェクションのためにプロジェクタを配置しているが、本稿では空中像の提示に絞りプロジェクタは配置していない。

4. 評価

4.1 空中像の提示実験

実装した提案光学系により提示される空中像を撮影によって確認する。提案光学系による空中像を撮影した結果を、空中像を見上げる視点（図 7(a)）、水平方向の視点（図 7(b)）、空中像を見下ろす視点（図 7(c)）についてそれぞれ示す。

図 7(b) から、beyooooonD[1] で困難であった水平方向から空中像が観察できていること、加えて図 7(a),(c) から、提案光学系の各結像経路について空中像が確かに結像していることがわかる。ここで、提案システムの光学設計では、理想的には全ての結像経路が実空間中の同じ位置に同じ映像を結ぶため、領域の境界で空中像の位置ずれや途切れが観察されることはないが、実際には境界で位置ずれが見られた。これは提案光学系を組み立てる上の誤差であると考えられ、図 7 に示した撮影結果はミラー位置を微調整することで誤差を最小限に抑えたものである。

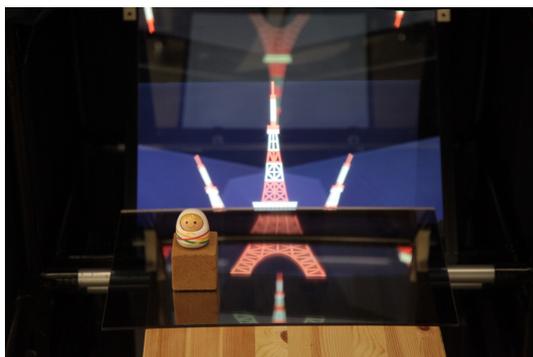
また、図 7 において、領域間で空中像の輝度に差があることが確認できる。これは主に図 3、図 4 に示したように結像光路によってミラーでの反射回数が異なることに起因すると考えられる。特にテーブル上のハーフミラー M_1 での反射を含む On 領域の空中像は、全体として Above 領域の空中像よりも暗い傾向がある。その他の理由としては、反射を含む結像経路において RT-Plate に入射する光線の一部が 2.1 節で述べた理想的な入射角度を満たしていないことが挙げられる。図 3 の M_2 、 M_2' で反射する経路や、図 4 の M_1 、 M_1' で反射する経路には、それぞれ RT-Plate に入射する光線と法線とのなす角が小さすぎる、大きすぎる領域が存在する。結果として該当する領域の映像が比較的暗くなっていることが、図 7(b) の上部、図 7(c) の On 領域上



(a) 見上げる視点



(b) 水平方向の視点



(c) 見下ろす視点

図 7: 空中像の観察結果

部から確認できる。

加えて、図 7 で複数見られるように、所望の空中像の他にいくつか映像が観察された。このうち所望の空中像の左右に見える歪んだ映像は迷光と呼ばれ、RT-Plate をはじめとする再帰透過光学系による空中像ディスプレイ一般に見られるものである。一方、所望の空中像の上下に見えるやや小さな映像は、いずれもディスプレイの透過光である。これは、ディスプレイの光線が直接 RT-Plate を透過したのではなく、ミラーによって反射した光線が RT-Plate に入射する際に、光線によっては RT-Plate を透過するような角度で入射するものが存在するためであると考えられる。

4.2 考察

結像経路によって空中像の輝度が異なる問題については、各ミラーの反射率や生成されるバーチャルな RT-Plate の角度が原因である。生成されるバーチャル RT-Plate の角度は

図 2 に示した光学系のミラーの角度によって決まる。そのため、輝度差を最小にするような最適なミラー配置・角度設定を導出する必要があると考えられる。

また、ミラーで反射した透過光が観察されてしまう問題を解決するには、RT-Plate を通過する光線のうち、法線とのなす角が小さいものを選択的にカットする必要がある。ディスプレイ側で該当する光線をカットすることは困難であるが、RT-Plate 上に法線方向の透過率が低いような視界制御フィルムを貼ることで影響を小さくすることができると考えられる。

5. おわりに

本稿では、テーブル面を見込む領域とテーブルの奥を見込む領域に横断して映像を提示できるテーブルトップ空中像ディスプレイについて、先行研究が抱えていた視域の制限を解決する光学系を提案した。提案光学系を実装し、実際に各領域で映像を観察できる一方で、追加したミラーによる透過光が同時に観察されてしまうことなどが確認された。今後は、判明した問題を解決するための光学系の改良に取り組む他に、提案光学系を使った空中像インタラクションについて模索することを検討している。

参考文献

- [1] 梶田創 他. “beyooooonD: テーブルトップ直立空中像ディスプレイの視域・視野角の拡大.” 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34C-03. 2016.
- [2] <https://aska3d.com/ja/>
- [3] H.Kim et al. “MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects.” Entertainment Computing, Vol. 5, Issue 4, pp. 233-241. 2014.
- [4] H.Kim et al. “HoVerTable: Dual-sided Vertical Mid-air Images on Horizontal Tabletop Display.” In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15). pp. 1115-1120. 2015.
- [5] H.Yamamoto et al. “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 (ITS '15). pp. 397-400. 2015.
- [6] N.Hashimoto et al. “Aerial 3D display using a symmetrical mirror structure.” In ACM SIGGRAPH 2018 Posters (SIGGRAPH '18). Article No. 31. 2018.
- [7] 室伏皓太 他. “インタラクションに適した立体空中像の広視野角化.” 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 32B-4. 2018.
- [8] 梶田創 他. “SkyAnchor: 実物体の高速移動に対して空中像を固定表示する光学系.” 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 22, Issue 3, pp. 413-420. 2017.