



AIR-range: 輝度連続性を考慮した 空中像のテーブル面から中空までの配置手法

AIR-range: Arranging mid-AIR images from the table surface to the mid-air space
considering luminance continuity

菊池知世¹⁾, 矢作優知¹⁾, 福嶋政期²⁾, 阪口紗季³⁾, 苗村健¹⁾²⁾

Tomoyo KIKUCHI, Yuchi YAHAGI, Shogo FUKUSHIMA, 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, {tkikuchi, yahagi, 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, shogo@nae-lab.org)

3) 東京都立大学 システムデザイン学部 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, s_saka@tmu.ac.jp)

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、テーブル面から中空の広範囲で空中像を提示できるディスプレイとして、対称ミラー構造を用いた手法が提案されている。しかし従来手法では、観察される空中像の一部が暗い映像になり、輝度が不連続になるという課題を含んでいた。そこで本研究ではシミュレータの開発を通じて結像経路間の輝度差を低減する手法を検討する。特に、システム内のミラー配置を変えることで光学素子を見込む角を推奨値に近づける手法を提案する。この手法を実装し、観察される空中像の輝度について従来手法との比較を行った。

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, 再帰透過光学素子

1. はじめに

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、空間中に実像を結ぶ再帰透過光学素子が注目されている。なかでも対称ミラー構造を用いた手法は空中像提示範囲の拡大に用いられてきた [1]。横瀬らの対称ミラー配置 [2] ではテーブル面から中空領域という縦方向の広範囲で空中像を表示することが可能であるが、空中像の一部で輝度が低下するという問題があった。これは、再帰透過光学素子を見込む角が推奨値から外れていることに起因する。

そこで本研究では、光学系内の光学素子の配置や大きさに関するパラメータを可変とし、結像経路による領域の可視化と見込む角の推定を行うシミュレータを開発する。またシミュレーションの結果を元に、ミラーの位置や角度を変えることで輝度の不連続性を低減し広範囲で明瞭な空中像を提示できる光学系を提案する。本稿ではこの光学系を実装し、空中像の輝度を従来手法と比較した。

2. 関連研究

2.1 再帰透過光学素子の特性

空中に映像を表示する技術として再帰透過光学素子が存在する。これはプレート状の光学素子で、光学素子に対して面対称の位置に実像を結像させる。光源位置と結像位置の関係は線形であり、また視点位置による歪みがないため扱いやすい。本稿では再帰透過光学素子を SMAs/DCRA (Slit Mirror Arrays/Dihedral Corner Reflector Array) と呼ぶ

ことにする。

本研究では、SMAs/DCRA として SMAs の構造をしているアスカネット社の ASKA3D [3] を利用する。一般に SMAs/DCRA の構造上良好に空中像を観察可能な領域が存在し、ASKA3D の場合は視線とプレート面の法線との成す角が $45^\circ \pm 20^\circ$ となるような領域で観察することが推奨されている [3]。この領域を大きく外れた角度で見込む場合は、観察される空中像の輝度が低下する。

2.2 テーブルトップ空中像ディスプレイ

テーブル上に空中像を提示するシステムが過去にいくつか提案されている。梶田ら [4] は光学系における空中像の表現範囲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

SMAs/DCRA を用いた空中像ディスプレイは、テーブル上での空中像表現範囲が Above のみ [5]、On のみ [6][7][8] のディスプレイから両領域を横断可能なディスプレイ [2][4] へと拡張されてきた。

横瀬ら [2] が提案した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は、図 1 のようにテーブルの他に、光源となるディスプレイ、空中像を生成する光学素子 SMAs/DCRA、テーブル上に配置したテーブルミラー TM、TM と SMAs/DCRA に関して面対称に配置されたミラー TM'、そして対称ミラー M、M' からなる。本稿において

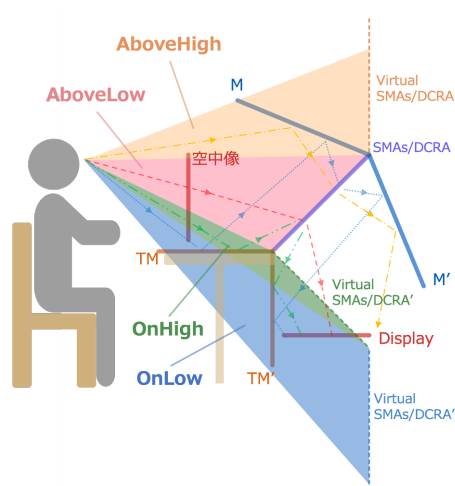


図 1: 結像経路による領域の分類

配置を変えた場合もミラーの組 (TM, TM') と (M, M') の対称ミラー構造は常に保持されている。ディスプレイから出た光は異なるミラーで反射して空中像を生成する。そのため、領域は光線の途中にあるミラー TM や M によって生成される Virtual SMAs/DCRA によって Above が 2 領域 (AboveHigh, AboveLow) に、On が 2 領域 (OnHigh, OnLow) に分けて定義される。このシステムは、触覚提示も含めたシステムである Super Haptoclon [9] で応用されている。

横瀬らの光学系では TM が SMAs/DCRA に接している配置をしている。それにより図で提示された OnHigh において SMAs/DCRA を見込む角が 80° 以上になる。また M と SMAs/DCRA の成す角度により、AboveHigh において見込む角が 10° 以下になる。これらは推奨値より大きく外れた値で、2.1 で指摘した通り空中像の輝度が低下する。

3. 提案手法

3.1 指針

本研究の目的は OnHigh, AboveHigh における輝度の低減をできるだけ小さくし、空中像の提示範囲をできるだけ保持した状態で On から Above へ連続性のある空中像を提示可能にすることである。

空中像をどの領域、角度で観察するかは視点位置や各ミラーの角度と位置、光学素子の大きさといった複数のパラメータによって決定される。そのため各要素の関係性を可視化したシミュレータを動的数学ソフトウェア GeoGebra で開発する。これにより各パラメータの値に対する空中像の見え方が推定可能となる。

シミュレータでは OnHigh を完全に消滅させ輝度の高い領域をつなげる配置も検討したが、空中像の観察可能範囲が非常に狭くなるという問題を含んでいることがわかった。そのため本稿では研究目的を達成する条件にあうパラメータを設定し適切な配置を提案する。

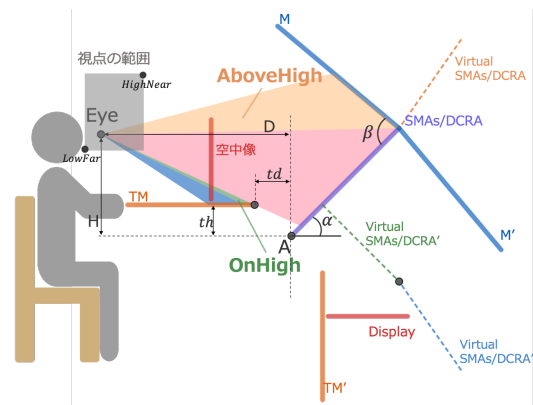


図 2: 提案光学系の設計

3.2 設計

本研究における光学系を図 2 で示す。また GeoGebra でのシミュレーションに 3.2.1 の理論を組み込み、視点範囲に応じた OnHigh を改善するテーブル上のハーフミラー TM の配置が算出されるようにした。

SMAs/DCRA の辺の長さを L_{SMDC} とする。今回用いたアスカネット社の ASKA3D ($488\text{mm} \times 488\text{mm}$) からフレームの厚みを引いた $480\text{mm} \times 480\text{mm}$ として計算し、SMAs/DCRA が水平面と成す角 α は設置のしやすさや 2.1 の観点から 45° としている。視点は指定された一視点ではなく、SMAs/DCRA の下端点 A からの距離、高さによってある程度の範囲を与えた場合を考慮する。

3.2.1 OnHigh の輝度改善手法

TM を SMAs/DCRA に接している従来手法の位置よりも上に、かつユーザ側に移動することで OnHigh における見込む角を推奨値に近づけることができ、空中像の輝度が改善される。これは、OnHigh を定義する Virtual SMAs/DCRA' の位置が TM の上昇とともに上昇するためである。この手法では横瀬らのシステムを引用し $\beta = 67.5^\circ$ として計算する。必要な TM の最低値 th が最も高くなる場合は SMAs/DCRA から最も遠く低い位置 EyeLowFar に視点があるときである。一方で、空中像がテーブル上で見切れることなく表示されるためには、少なくとも SMAs/DCRA に最も近く高い視点位置 EyeHighNear と点 A を結んだ線 Eye-A と TM の端点が接している必要がある。これらをまとめると TM の配置は以下の式で表される。

$$th = -\frac{L_{\text{SMDC}} H_{\text{LowFar}}}{2\sqrt{2} D_{\text{LowFar}}} + \frac{L_{\text{SMDC}}}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$td = \frac{th D_{\text{HighNear}}}{H_{\text{HighNear}}} \quad (2)$$

本稿の光学系では TM を式 1, 2 による配置で実装する。

3.2.2 AboveHigh の輝度改善手法

3.2.1 で算出される光学系において、 β の値を大きくすることで Virtual SMAs/DCRA を見込む角が大きくなり AboveHigh の輝度も改善することが可能である。視点範囲内の SMAs/DCRA に最も近く高い位置に視点があるとき

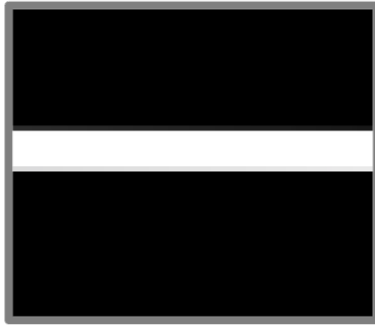


図 3: 提示された映像

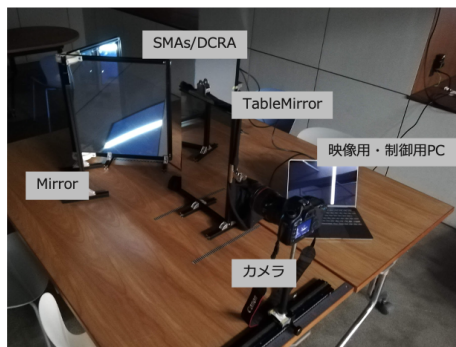


図 4: 実験の様子

必要な β の値が最も大きくなる。一方で M の反射によって生成されるテーブル上の OnLow にも影響が及ぶため、 β の値が大きくなるほど空中像の提示範囲が小さくなることや OnLow における輝度の低下といった問題が生じる。

3.3 実装

今回の実装にあたり ASKA3D の他に用いた機器は以下のとおりである。ディスプレイには LITEMAX 社製の液晶ディスプレイ SLD1968 を用いた。M, M', TM' のミラーおよび TM のハーフミラーはアクリルミラー（厚さ 5mm, ハーフミラーの透過率約 30%）を用いた。

4. 評価

4.1 輝度の比較評価

空中像の輝度の不連続性が低減されていることを確認するため、GeoGebra で提案される光学系と従来手法によるものとで提示される空中像を撮影して比較する。提示した映像は図 3 にあるような白い一本のラインである。実験は図 4 のように構成要素を独立して動かせるように各光学素子を垂直に立てて行った。撮影用のカメラとして Canon の EOS 5D Mark II を使用し、レンズには Canon の EF24-105mm F4L IS II USM を使用した。撮影条件は、ISO 感度が 100, シャッター速度が 2 秒, F 値が 22 である。これは輝度が飽和しないように調整した値である。

4.2 OnHigh の輝度改善手法

視点と点 A の水平距離 $D = 600 - 750\text{mm}$, 視点と点 A からの鉛直距離 $H = 320 - 500\text{mm}$ の範囲を設定し GeoGebra を使って TM の位置を算出した。その結果は (th, td)

表 1: $D = 600\text{mm}$ での OnHigh 輝度の改善

	提案手法	従来手法
H=400		
H=500		

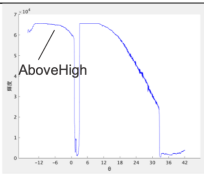
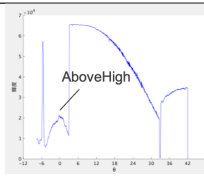
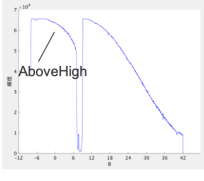
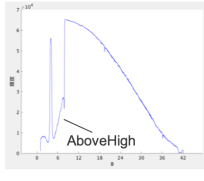
表 2: $D = 750\text{mm}$ での OnHigh 輝度の改善

	提案手法	従来手法
H=400		
H=500		

$= (98\text{mm}, 116\text{mm})$ である。撮影は、 $D = 600\text{mm}$ に対して $H = 320/355/400/500\text{mm}$, $D = 750\text{mm}$ に対して $H = 320/400/434/500\text{mm}$ で行った。 $D = 600\text{mm}$ のときの $H = 355\text{mm}$ や $D = 750\text{mm}$ のときの $H = 434\text{mm}$ は理論的に OnHigh がなくなる境界となる視点である。しかし実際の光学系で OnHigh がなくなる境界点となったのは、 $D = 600\text{mm}$ のとき $H = 330\text{mm}$, $D = 750\text{mm}$ のとき $H = 410\text{mm}$ であった。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る。

撮影結果より求めた空中像の輝度を表 1, 2 に示す。本稿では紙面の都合上、一部の結果のみを示した。グラフは横軸が左から右にむかって視点位置の高さが上から下に対応し、縦軸が輝度を表している。グラフより、各視点位置において OnHigh の範囲が従来手法よりも小さくなり、輝度の不連続性が低減されていることが確認できる。 $H = 500\text{mm}$ において $D = 600\text{mm}$ では OnLow, OnHigh は観察されず AboveLow, AboveHigh のみが観察されている。一方で、 $D = 750\text{mm}$ では OnLow が観察されていることがわかる。以上より、 $(th, td) = (98\text{mm}, 116\text{mm})$ で実装した光学系を本研究の提案光学系とする。

表 3: β の値を変えた場合の AboveHigh 輝度の改善

	$\beta = 85^\circ$	$\beta = 67.5^\circ$
H=400		
H=500		

4.3 AboveHigh の輝度改善手法

実験では OnLow への影響や空中像の提示範囲を考慮せず、視点範囲での Virtual SMAs/DCRA を見込む角が推奨範囲に収まる $\beta = 85^\circ$ において輝度の比較を行った。視点位置は $D = 600\text{mm}$ に対して $H = 400/500\text{mm}$ として撮影を行った。表 3 より AboveHigh の輝度が改善されたことが確認できる。 $\beta = 67.5^\circ$ において一つ高い山が出ているのは、迷光によるものである。

5. 提案光学系を用いたアプリケーション例

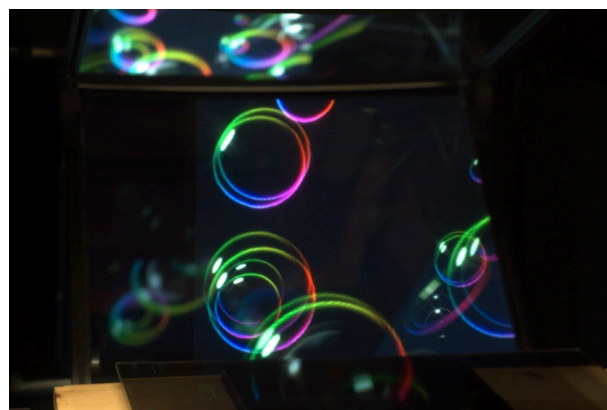
提案光学系を用いて、TM の下にタブレット端末を置いてシャボン玉を映し出した様子を図 5(a) に示す。タブレット端末と光学系の空間設計を揃えることで、タブレット上に 2 次元で映し出されたシャボン玉が、3 次元空間へ飛び出し、上へと上がっていくという表現が可能となる。また図 5(b) は、タブレットに映した映像に雲の空中像を重畳させた様子である。これは On 領域の輝度が改善されたことで可能となっている。

6. 結論

本稿ではテーブル面から中空の広範囲で輝度の連続性が考慮された空中像が提示可能な手法を提案した。シミュレータを実装し様々なパラメータを考慮可能であることや、実際に光学系を実装し輝度が改善されていることが明らかになった。今後の展望としては、見込む角以外の空中像輝度への影響を調べることや、条件によらない光学系の提案が考えられる。

参考文献

- [1] 室伏皓太 他: “複数の立体ディスプレイの組み合わせによる立体空中像の視域拡大” 日本 VR 学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 432-438, 2020.
- [2] 横瀬哲也 他: “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” 第 24 回日本 VR 学会大会論文集, 2019.
- [3] <https://aska3d.com/ja/>



(a) iPad から出てきたシャボン玉の空中像



(b) iPad の映像に重畳された雲の空中像

図 5: アプリケーション例

- [4] 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 VR 学会大会論文集, 2016.
- [5] H.Kim et al.: “MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects.” Entertainment Computing, Vol. 5, Issue 4, pp. 233 – 241, 2014.
- [6] H.Kim et al.: “HoVerTable: Dual-sided Vertical Midair Images on Horizontal Tabletop Display.” In ACM CHI EA, pp. 1115 – 1120, 2015.
- [7] H.Yamamoto et al.: “EnchanTable: Displaying a Vertically Standing Mid-air Image on a Table Surface using Reflection.” In ACM ITS, pp. 397 – 400, 2015.
- [8] N.Koizumi et al.: “Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images” Opt. Exp., Vol. 28, No. 18, pp. 26750 – 26763, 2020.
- [9] K.Serizawa et al.: “Super Haptoclone: ”Upper-Body Mutual Telexistence System with Haptic Feedback.” In ACM SIGGRAPH E-Tech, Article No.1, 2020.