



## 鏡に映り込む空中像と鏡に吸い込まれる空中像

明石穂紀<sup>1)</sup>, 韓燦教<sup>2)</sup>, 苗村健<sup>1)2)</sup>

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, akashi@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, {hanc, naemura}@nae-lab.org)

**概要:** 実空間に存在する空中像が鏡に映り込むことは複合現実感システムとして重要である。2つの空中像を鏡面共役な位置に提示することで鏡に映り込んだように見せられる一方で、空中像を移動させるには別々の位置にある2つの光源を同期して移動させる必要があった。本研究では1つの両面ディスプレイを光源として2つの空中像を鏡面共役な位置に提示することによって、(1) 実空間を動き回り高輝度で鏡に映り込む空中像と(2) 実空間内の移動にとどまらず鏡の内側へと吸い込まれる空中像の2通りの光学系を提案し、実装により特性を確認した。

**キーワード:** 空中像, 複合現実感, 鏡像, 鏡空間



図 1: 鏡に映り込む空中像



図 2: 鏡に吸い込まれる空中像

### 1. はじめに

空中像は光学的結像により実空間中に提示された映像であり、裸眼で鑑賞可能な複合現実感システムに用いることができる。実空間に存在する空中像が鏡に映り込むことは複合現実感システムとして重要である。更に、実空間の空中像が鏡空間へと連続的に移動することで、新たな体験の創出が期待される。

空中像を鏡に映り込ませることは2つの空中像を実空間と鏡空間の鏡面共役な位置に提示することで実現できる。しかし、空中像を鏡に映り込んだまま移動させるには2つの光源を同期させて動かす必要があった。

本研究では2つの空中像の光源に1つの両面ディスプレイを用いることによって、2つの空中像が鏡面共役な位置関係のまま移動することを容易にした。2通りの実現方法により(1) 高輝度な空中像が鏡に映り込み動き回る光学系「鏡に映り込む空中像」(図 1)と(2) 実空間内の移動にとどまらず実空間と鏡空間を行き来する光学系「鏡に吸い込まれる空中像」(図 2)を提案する。

### 2. 関連研究

#### 2.1 空中像を鏡面に映りこませる光学系

空中像を鏡に映り込ませる光学系は、鏡面共役な位置に2つの空中像を提示することで実現できるが、これには2つの方法がある。1つ目は同一位置に2つの空中像を結像させ、一方は直接目に入る光路、もう一方は鏡に反射してから目に入る光路とする方法である。2つ目は鏡としてハーフミラーを用い、鏡面共役な2つの位置に直接それぞれの空中像を結像させる方法である。

加藤ら [1] は1つ目の方法により、2枚のディスプレイをそれぞれフレネルレンズを用いて空中像として同一の場所に結像させ、実空間の空中像の背面をハーフミラーに映した。しかし、レンズは光源位置と結像位置の関係が非線形なため、空中像を自在に移動させることは容易ではない。

AriCE [2] では2つ目の方法により、2枚のディスプレイと1枚の dual Slit Mirror Allays (dual SMAs)[3]を用いてハーフミラーの鏡面共役な位置に空中像を直接結像させた。Dual SMAs は素子に対して光源と面対称な位置に空中像を結像させる素子であり、光源位置と結像位置が線形である

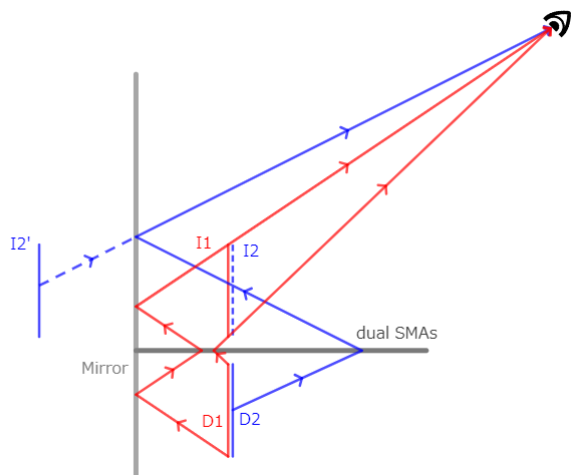
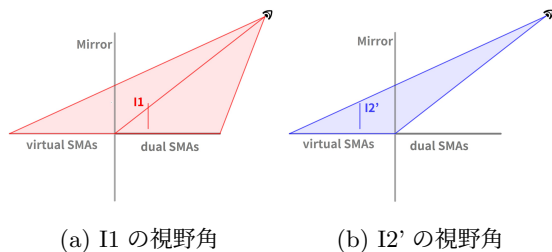


図 3: 鏡に映り込む空中像の光学系



(a) I1 の視野角 (b) I2' の視野角

図 4: 鏡に映り込む空中像の視野角

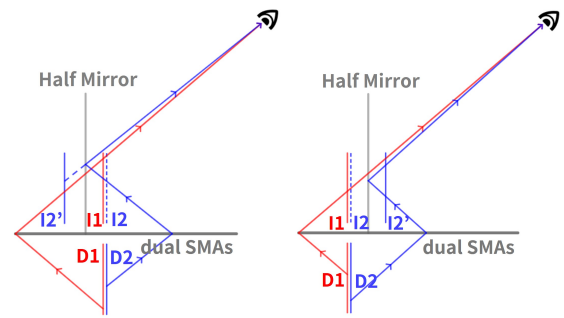
ため空中像を移動させることは可能だが、2つの空中像を鏡面共役な位置関係のまま動かすには異なる2つの光源を同期して動かす機構が必要となる。また、光路が dual SMAs とハーフミラーの両方を通してることによって空中像の輝度は低くなってしまっている。

本研究の1つ目の提案では、簡便な方法で2つの空中像を鏡面共役な位置関係のまま動かし、更に空中像の輝度も高い光学系を提案する。

## 2.2 鏡の世界を意識させる光学系

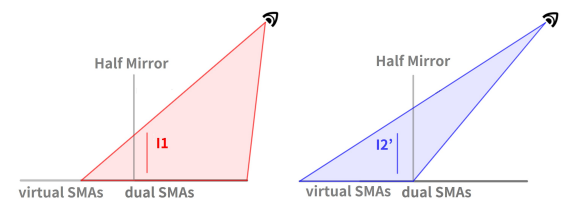
through the looking glass [4] では立ち見鏡とテーブルが一体となった筐体において、拡散制御フィルムとプロジェクタを用いて実空間側のテーブル面と鏡空間側のテーブル面に異なる映像が投影されるようにすることで、鏡の中の自分と対戦するホッケーゲームが提案されている。ハーフミラーでない通常の全反射鏡でありながら鏡の中に実空間と異なるものが映り、鏡の中の自己と対戦を通じて対話するという不思議な体験を実現した。ただし、これは空中像のシステムではなく、実空間と鏡空間の対称性が崩れているのはテーブルの表面に限られる。

超鏡空中像 [5] という Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [6] を用いてハーフミラーの向こうの鏡像空間と実空間の境界を超える空中像が提案されている。この光学系では空中像の提示位置によって結像空中像と直視空中像の2つに分かれており、結像空中像に関してはアクチュエータによるシームレスな超鏡を実現しているが [7]、結像空中像



(a) 光源が手前にあるとき (b) 光源が奥にあるとき

図 5: 鏡に吸い込まれる空中像の光学系



(a) I1 の視野角 (b) I2' の視野角

図 6: 鏡に吸い込まれる空中像の視野角

と直視空中像の切り替えは不連続であり、また、空中像が実空間にいるときにその背面が鏡に映り込むこともない。

本研究の2つ目の提案では、原理上シームレスな移動範囲に制限のない形で空中像が実空間と鏡空間を行き来し、空中像が実空間にいるときその背面が鏡に映り込む光学系を提案する。

## 3. 提案手法

### 3.1 提案光学系 1: 鏡に映り込む空中像

本研究で提案する1つ目の光学系では高輝度の空中像が鏡に映り込み、空間中を移動する。光学系を図3に示す。dual SMAs をテーブル面として用い、鏡に垂直に密着させる。光源としてテーブルの下に両面ディスプレイを用いる。図中の赤で示した面 D1 の空中像は I1 の位置に結像し、そのまま目に映る。一方、図中に青で示した面 D2 の空中像は I2 の位置に結像するが、直接は目に入らず、鏡に反射することで目に入る光路であるため、I2 と鏡面共役な I2' の位置に空中像は見える。2つの空中像が1つの両面ディスプレイを光源としているため、光源を動かすと2つの空中像は鏡面共役な位置関係を維持したまま動き回ることができる。また、この光学系はハーフミラーではなく全反射鏡を用いているため反射による光の減衰がほとんど生じず、空中像は鏡を見込む領域においても dual SMAs を見込む領域とほぼ同程度に高輝度となる。

I1 を見ることができると視野角は、図4(a)のように dual SMAs を見込む領域と、鏡に映った dual SMAs である virtual SMAs を見込む領域の両方である。I2' の視野角は図4(b)のように virtual SMAs を見込む領域のみである。

I1 は常に実空間にあり、I2' は常に鏡空間にある。従って、この光学系において空中像が実空間と鏡空間を行き来する超鏡を行う場合、光源を鏡の傍まで近づけた上で、D1 に映す映像と D2 に映す映像を反転させるという方法となる。D1 からの光が鏡で反射した後 D1 にぶつかるなど、両面ディスプレイによって光路がさえぎられる領域は空中像が結像しないため、光源は鏡に密着できるわけではない。したがって鏡面付近に空中像を提示することはできないため、この光学系における超鏡は不連続になってしまう。

### 3.2 提案光学系 2: 鏡に吸い込まれる空中像

本研究で提案する 2 つ目の光学系では空中像が実空間と鏡空間を連続的に移動する光学系を提案する。光学系を図 5 に示す。テーブル面として用いた dual SMAs 上にハーフミラーが垂直に置かれており、テーブルの下の両面ディスプレイが光源となっている。鏡に映り込む空中像と類似のメカニズムにより、D1 の空中像が I1 の位置に結像し、D2 は I2 の位置に結像するもののハーフミラーで反射することによって目に映るため I2' の位置に空中像として見える。光源を鏡面の手前にも真下にも奥にも置くことができるため、光源を動かすことによって I1 が実空間から鏡空間へと連続的に吸い込まれることができる。

I1 の視野角は図 6(a) のように dual SMAs を見込む領域であり、I2' の視野角は図 6(b) のようにハーフミラーに映った virtual SMAs を見込む領域である。したがって、I2' は実空間にいるときでもハーフミラーを見込む領域でしか見ることができず、ハーフミラーのふちで見切れてしまう。そこで I2' は超鏡の瞬間に D2 のディスプレイを消し、鏡空間のみに存在するようにする。これによって、I1 が主体となり、主体が実空間にいるときその背面が I2' として鏡に映り込み、主体が鏡に吸い込まれると実空間には何も像がないというシステムになる。

また、I1 の視野角は常に変わらないが、I2' の視野角は virtual SMAs が大きいほど広い。virtual SMAs の大きさが最大となるのはハーフミラーの位置が dual SMAs の奥の端と一致するときであるが、このとき鏡空間に I1 の視野角がなくなってしまう。従ってハーフミラーの適切な位置は提示する空中像の大きさに合わせて変化する、

この光学系では全反射鏡ではなくハーフミラーを用いている。ハーフミラーを見込む領域は dual SMAs を通過した後ハーフミラーを通過または反射するため、dual SMAs を見込む領域よりも輝度が低くなる。したがって I1 が dual SMAs を見込む領域とハーフミラーを見込む領域にまたがっているとき空中像の輝度は領域の境界で不連続となる。

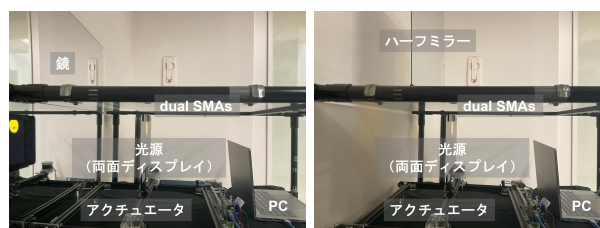
2 つの提案光学系の特性の違いを表 1 にまとめた。

## 4. 実機による評価

提案した 2 つの光学系を実装し、鏡に映り込むこと、及び表 1 に示した 3 つの特性である輝度とその連続性、超鏡、視野角が理論通りであるかを確認した。両面ディスプレイには 2 台の iPad を背中合わせにして用い、dual SMAs には

表 1: 2 つの光学系の比較

	鏡に映り込む空中像	鏡に吸い込まれる空中像
輝度	高いため連続	低いため不連続
超鏡	不連続	連続
視野角	広い	狭い



(a) 鏡に映り込む空中像 (b) 鏡に吸い込まれる空中像

図 7: 実装の様子

ASKA3D-630 を用いた。光源を動かすアクチュエータには xy プロッタを用い、xy プロッタの Arduino を PC からシリアル通信で制御した。

### 4.1 鏡に映り込む空中像

図 7(a) に鏡に映り込む空中像の実装の様子を示す。また、図 8 に空中像を示す。実空間の空中像 I1 の背面 I2' が鏡に映り込んでいる様子がわかる。ただし、実際には I1 と I2' は完全な鏡面共役な位置にはなく、両面ディスプレイとして用いた iPad2 台分の厚み 11mm だけ位置がずれている。

鏡に反射した空中像 I2' の輝度は dual SMAs を見込む通常の空中像 I1 の輝度と同程度に高輝度であり、図 8 のように I1 を dual SMAs を見込む領域と鏡を見込む領域にまたがる位置に提示した場合であっても領域間でおおむね輝度連続でもあることがわかる。超鏡に関しては、アクチュエータで近づけることができる限界まで近づけた時本実装で用いたアクチュエータでは 82mm 鏡と光源の隙間があるため、光源である iPad2 台分の厚みも考えて 175mm 不連続な超鏡となる。視野角については図 4 に示した通りとなった。



図 8: 鏡に映り込む空中像の輝度連続性



(a) I1 が実空間にあるとき

(b) I1 が鏡面上にいるとき

(c) I1 が鏡空間にあるとき

図 9: 鏡に吸い込まれる空中像が実空間と鏡空間を行き来する様子

#### 4.2 鏡に吸い込まれる空中像

図 7(b) に鏡に吸い込まれる空中像の実装の様子を示す。ハーフミラーの位置は dual SMAs の奥の端から 210mm とした。なお、用いた dual SMAs である ASKA3D-630 は一辺 630mm の正方形である。

図 9 に空中像が実空間と鏡空間を行き来する様子を示す。

主体である I1 が実空間にいるとき、図 9(a) のように空中像の背面 I2' が鏡に映り込んでいる様子が見える。ただし鏡に映り込む空中像同様、実際には I1 と I2' は完全な鏡面共役な位置にはなく、両面ディスプレイとして用いた iPad2 台分の厚み 11mm だけ位置がずれている。

アクチュエータにより光源を動かすことで、I1 が実空間と鏡空間をシームレスに移動した。図 9(b) のように鏡面を超える瞬間において I1 と I2' が一致しており、連続であることがわかる。

輝度及び輝度連続性に関しては、図 9(a) に見られるように、ハーフミラーを見込む領域は dual SMAs を見込む領域よりも低輝度であるため、領域間で輝度が不連続であることがわかる。視野角については図 6 の通りとなった。

#### 4.3 制約

本実装では、2つの提案光学系のどちらにおいても視点位置によって、D1 が鏡面に反射した D1'、及び dual SMAs を透過した D2 が迷光として見える場合がある。使用した dual SMAs である ASKA3D は素子の特性上、素子に対して約 45° の方向には透過光をほとんど通さないが、視点位置が 45° 方向から外れるほど迷光が高輝度で見えてしまう。

D1' が見えるのは鏡を見込む領域であるが、鏡に映り込む空中像ではテーブルの下まで鏡があるのに対して、鏡に吸い込まれる空中像ではテーブルの上のみ鏡があるため、迷光が見える視野角が狭い。実装した光学系においても鏡に吸い込まれる空中像では I1 が実空間の十分手前にあるときのみ D1' は見られ、超鏡付近や I1 が鏡空間にいるときは D1' は見られなかった。

D2 が見えるのはどちらの光学系においても dual SMAs を見込む領域である。ただし、視点位置と D2 を結ぶ光路が dual SMAs に対し約 45° であるときは D2 はほぼ見られなかった。

#### 5. むすびと今後の課題

本稿では両面ディスプレイの両面を鏡面共役な位置に空中像として提示する光学系を実現することによって、1つの光源である両面ディスプレイを動かすと2つの空中像が鏡面共役な位置関係のまま動き回ることを可能とした。2通りの実現方法により (1) 高輝度かつ輝度連続な空中像が鏡に映り込み動き回る光学系と (2) 空中像が実空間と鏡空間をシームレスに行き来する光学系を提案し、実装によって特性が実現されていることを定性的に確認した。

今後は鏡に映り込む空中像では輝度連続性に対する定量評価や迷光対策を行う。鏡に吸い込まれる空中像では輝度や輝度連続性の観点からふさわしいハーフミラーの透過率と反射率を調べるとともに、提示する空中像の大きさに対する適切なハーフミラーの位置についても研究していく。

謝辞 本研究は中山未来ファクトリーの支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] Kato, N. and Naemura, T.: Mixed Reality Environment with a Mirror, SIGGRAPH '06, p. 155-es (2006).
- [2] 山本紘暉, 金ハンヨウル, 小泉直也, 苗村健: AriCE: 鏡の前後に水平・垂直の空中像を提示する複合現実感システム, 3次元画像コンファレンス, pp. 23-26 (2015).
- [3] Commission, I. E., et al.: 3D display devices-part 51-1: Generic introduction of aerial display, Technical report, Tech. Rep. IEC TR 62629-51-1: 2020 (2020).
- [4] Kakehi, Y. and Naemura, T.: Through the Looking Glass: You Can Play against Your Own Reflection, ACE '05, p. 373-374 (2005).
- [5] 佐野文香, 巻口誉宗, 松元崇裕, 山本隆二: 鏡像空間と実空間の境界を自在に超える超鏡空中像光学系の提案, 第27回バーチャルリアリティ学会大会, 1D4-4 (2022).
- [6] Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919-26924 (2014).
- [7] 巻口誉宗, 佐野文香, 松元崇裕, 山本隆二: 鏡像空間と実空間の境界を自在に超える超鏡空中像表示システムの実装, インタラクシオン 2023, 2C-52 (2023).