

OpaqueLusion: 多層空中像における オクルージョン表現の基礎検討

梶田 創^{1,a)} 小泉 直也² 苗村 健^{1,2}

概要 :

空中像はディスプレイから飛び出し、光学系により反射・屈折し、実空間へと結像されるので、像に手を伸ばすことによるインタラクションが可能である。複数の空中像を表示する方法として、ハーフミラーを用いた像の重ね合わせによる多層化手法がよく知られている。しかし、ハーフミラーを用いると前後の層の光線が重なってしまい、オクルージョン表現ができないという問題があった。本稿では光線制御のためのマスクとして液晶シャッターを利用することで、上記の問題を解決する。液晶シャッターの階調と、実際の透過率の関係を実験によって明らかにし、不透過空中像を利用したアプリケーションを示した。

OpaqueLusion: Occlusion Expression for Mid-air Images using Opaque Mask

HAJIME KAJITA^{1,a)} NAOYA KOIZUMI² TAKESHI NAEMURA^{1,2}

Abstract: Mid-air images are displayed in the real space with optical systems. Mid-air images can be displayed at hand, and therefore people can interact with images due to reach out to them. To express more wealthily, mid-air images are multi-layered using half-silvered mirror. However, if mid-air images are overlapped, they cannot express the occlusion because the light from the rear layer is transmitted through the front layer. In this paper, we solve the occlusion problem by using a mask to block off the light. We clarified the relationship between the gradation of the mask and the brightness of the mid-air image, and made application using opaque mid-air images.

1. はじめに

現実空間にデジタル視覚情報を付加・提示する方法の一つとして空中像を用いる方法がある。空中像とは光源からの光線を光学系によって反射・屈折させて、空中に結像させたものであり、光源としてディスプレイを用いることで、映像を空中に表示することができる。空中像はディスプレイ内から飛び出し、実空間に結像されるので、像に手を伸ばすことによるインタラクションが可能である。

空中像を手元の空間に表示するとき、2次元ディスプレイ



図 1 従来の空中像
Fig. 1 transparent
mid-air images.

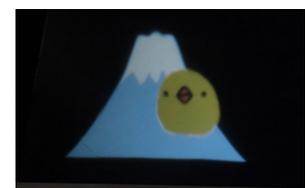


図 2 不透過空中像
Fig. 2 Opaque
mid-air images.

イを光源として用いると、空中像の表示範囲は1平面に限られる。1平面でなく、複数の奥行きに同時に空中像を表示したい場合には、光源として立体ディスプレイを用いる方法もあるが、本稿ではハーフミラーによって2次元ディスプレイを前後に重ねる方法を用いる。

多平面の積層で奥行きを表現するディスプレイは体積型

¹ 東京大学工学部 電子情報工学科
Dept. of Inform. and Commun. Eng., The Univ. of Tokyo
² 東京大学大学院 情報学環
Interfaculty Initiative in Information Studies, The Univ. of Tokyo
a) kajita@nae-lab.org

ディスプレイと呼ばれている。多平面を密に並べることで、連続的な奥行きを表現した例としては DepthCube[1]がある。体積型ディスプレイは、すべての層の光を足し合わせることによって立体表示を実現するが、その原理から後ろが透けて表示される。よって、手前の表示が見にくくなるという問題がある。

空中像を多層化するとき、ハーフミラーでディスプレイを積層すると、体積型ディスプレイと同様に前後の空中像が透けて表示されてしまう。透けて表示されると図1のように前後の像の混色が生じて、手前の空中像が見にくくなってしまふ。手前の空中像を見やすくするためには、図2のように手前の空中像によって後ろの空中像を隠す表現が必要である。このように、前が後ろを隠す表現のことを、本稿ではオクルージョン表現とよぶ。

本稿では空中像を多層表示する際のオクルージョン問題を、マスクを用いた光線の透過率制御によって解決する。本システム名“OpaqueLusion”は不透明 (Opaque) なマスクを用いてオクルージョン (occLusion) を表現することに由来する。マスク用の液晶シャッターの階調と光線の透過率の関係を実験によって明らかにし、マスクの光線制御性能の評価を行った。

2. 関連研究

2.1 空中像の結像方法

空中像はレンズやミラーなどの光学系によって、ディスプレイからの光線を反射・屈折させて結像させたものであるが、実像か虚像かという観点からみると、像に手を伸ばしてインタラクションできるという点において実像の方が望ましい。実像を結像する代表的な光学系は、凸レンズや凹面鏡などがある。実像光学系を用いた空中像の例として、透明なボール内に空中像を表示する i-ball[2] や、多方向から鑑賞可能な Floasion Table[3] がある。しかし、これらの光学系で結像した空中像は、適切な視点位置からでないとい歪みが生じてしまうという問題があった。

本稿では歪みのない実像光学系である実像鏡を用いている。実像鏡は入射光を微小なミラーアレイによって2軸再帰反射させて鏡対象の位置に結像させる実像光学素子である。実像鏡によって結像される空中像は、視点位置による歪みがなく、光源位置と結像位置が線形であり、従来の実像光学系より扱いやすいという利点がある。

実像鏡に分類される素子としては、2006年に前川らによって提案された DCRA[4] や、アスカネット社の AI プレート [5] がある。2つの違いは微小なミラーアレイの構成方法である。前者は四角い微小な穴の2面の内壁にマイクロミラーが配置され、後者は線状の微小なマイクロミラーを平面上に多数並べたものを2層にし、直行させることで構成されている。本システムでは実像鏡として AI プレートを用いている。

本システムでは、2枚の実像鏡を用いて空中像を結像させている。なぜなら、実像鏡を用いる場合、結像される実像は奥行き方向が反転された状態になるからである。表示したい空中像が奥行きをもつ場合は、空中像の奥行きを正しくするため、実像鏡に2回通して奥行きを再反転させる必要がある。

2.2 空中像とのインタラクション

空中像は手を伸ばせる位置に表示できるので、これを利用して様々なインタラクションシステムが提案されている。例として、MARIO (Mid-Air Augmented Reality Interaction with Objects)[6], HORN[7], AIRR Tablet[8] が挙げられる。MARIO はテーブル上のブロックや手の位置を深度センサーで認識し、その情報を元に空中像を表示するシステムであり、空中像の足元に影をプロジェクションすることで、空中像の実在感を高めている。HORN は空中像に超音波の定在波を利用した触覚を重畳させることで、空中像に触れたような感覚を提示できる。AIRR Tablet は再帰性反射材とハーフミラーを組み合わせた光学系を用いることで、ディスプレイからの光線を実像鏡を用いる場合と同じ位置に結像させることができ、ユーザーの手の3次元位置とジェスチャーを超高速のステレオカメラで認識することで、遅れのないジェスチャー操作を実現している。

しかし、これらのインタラクションシステムは表示される空中像が1平面に限られていた。本システムの光学系は、これらの光学系を発展させ、2平面の不透過空中像の表示を実現している。

2.3 多層空中像ディスプレイ

空中像を多層化することは、異なる奥行きに情報提示ができるという利点がある。多層空中像の例として Exfloasion[9] と MRsionCase[10] が挙げられる。Exfloasion は展示物の前と後ろに空中像が2層ずつ表示できるシステムであり、正面からのみ鑑賞可能である。MRsionCase は展示物の前と後ろに空中像が表示でき、展示物の前後左右四方向から鑑賞できる。

従来の多層化手法では後ろの層の光線が前の層の光線と重なってしまい、オクルージョン表現ができないという問題がある。オクルージョンは重要な奥行き手がかりの1つであり、オクルージョン表現ができないと、奥行き関係がわかりづらくなるほか、手前の層の表示が見づらくなってしまふ。Exfloasion や MRsionCase では空中像が重ならないように表示領域を制限することでオクルージョン問題の発生を回避している。本システムでは空中像の重なりによる表示領域の制限を気にすることなく多層空中像を表示することが可能である。

2.4 液晶シャッターを用いた光線制御

光線制御のためのマスクとして、液晶シャッターが利用されることがある。液晶シャッターは動的にマスクの位置や形、透過率を変えることで、光線の進行方向を制限することができる。液晶シャッターを視差バリアとして用いる方法は文献 [11] に示されている。液晶シャッターを空中像の視差バリアに利用した例として、Fuwa-Vision[12] と HaptoMIRAGE[13] が挙げられる。Fuwa-Vision は両眼視差を用いた立体空中像ディスプレイである。結像した視差映像が右目と左目に正しく入るように、モーションキャプチャと液晶シャッターを用いて光線の進行方向を動的に制御している。HaptoMIRAGE は Fuwa-Vision を発展させ、鑑賞方向を 150° まで広げたものである。また、Tensor displays[14] では光線を複数の制御層によってコントロールすることで、立体表示を実現している。以上に述べた例は、すべて立体表示を目的としたものである。

本システムは、平面の空中像を複数並べることを目的としている。本システムは実像結像方式を採用しており、視差バリアとして液晶シャッターを用いるわけではない。実像結像方式での液晶シャッターの役割は、後ろの層を前の層の表示によって遮蔽しているように見せることである。マスクによる遮蔽によって、前後の空中像のオクルージョン表現が可能になる。

3. 提案手法

液晶シャッターをマスクとして用いることで、多層空中像において前後の光線の重なりを制御し、オクルージョン表現を実現することができる。本章では、その光学系の構成について述べる。

3.1 遮蔽原理

前後の空中像の光線の重なりを液晶シャッターによって制御することによって、オクルージョン表現は可能となる。従来手法との差はマスクを配置することにある。マスクの位置は、後ろの層の前であり、かつ前の層と光学共役であることが条件である。マスクは前の層と同期させて形を変える必要がある。以上で、後ろからの光線を透過しなくなり、前後のオクルージョン表現が可能となる。

遮蔽原理を満たすのに必要な装置は2つあり、それは遮蔽を担うマスク用の装置と、マスクと前の層を光学共役の位置に配置するための装置である。前者は光線の減算、後者は光線の加算装置だと言い換えられる。

光線の減算には液晶シャッターを用いる。液晶シャッターはピクセル単位で光線の透過率を変化させることができる装置である。光線の加算にはハーフミラー (図3) や透明有機ELディスプレイ (図4) を用いる。ハーフミラー方式は、一方のディスプレイと、もう一方のディスプレイを積層するように光学共役の位置に配置することで、光線を

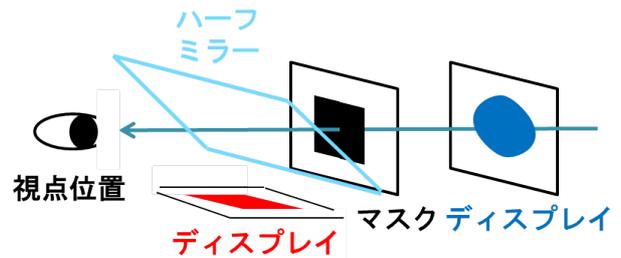


図3 ハーフミラー方式

Fig. 3 Half-silvered mirror system.

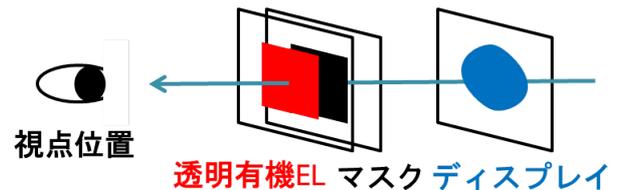


図4 透明有機EL方式

Fig. 4 Transparent OEL display system.

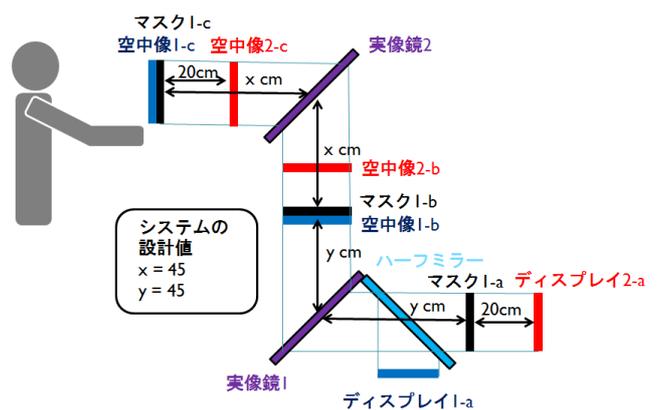


図5 光学系図

Fig. 5 Optical system design.

加算することができる。透明有機EL方式は、後ろのディスプレイの前に透明有機ELディスプレイを置くだけで光線を加算することができる。

遮蔽原理を満たすためには以上のような装置を使って光線の足し引きをすることで、レイヤーに発光・遮蔽の2つの性質を与えればよい。ハーフミラー方式と透明有機EL方式は以下のようなトレードオフの関係がある。前者はディスプレイを光学共役位置に配置するため、ディスプレイの厚みの問題がなくなる一方、光学系が大きくなる。後者は、ディスプレイの厚みの問題からマスクと完全な重畳ができないが、システムがコンパクトになる。本システムでは、透明有機ELディスプレイの入手しづらさからハーフミラー方式を用いている。

3.2 光学系の構成

本システムは図5のように構成した。

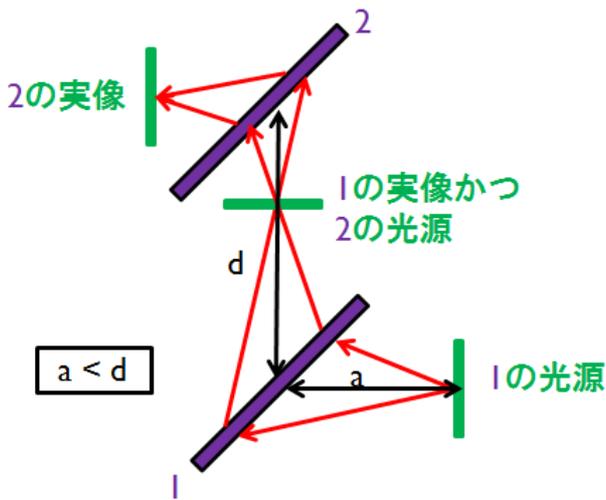


図 6 $a < d$ なら実像が結像される。
 Fig. 6 If $a < d$, real image is displayed.

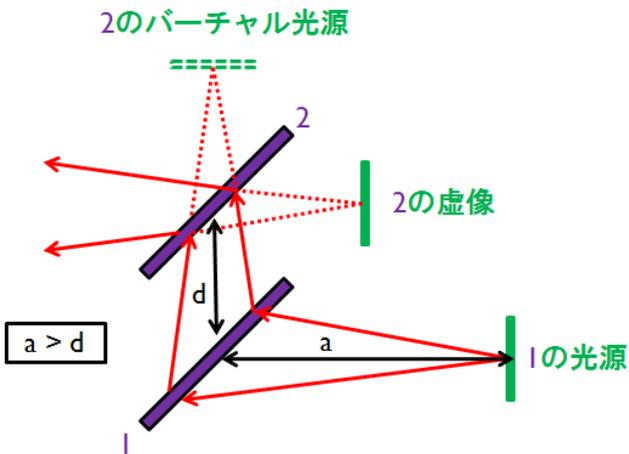


図 7 $a > d$ なら虚像が結像される。
 Fig. 7 If $a > d$, virtual image is displayed.

遮蔽原理を担うのは図5の右下部分である。ディスプレイ 1-a とマスク 1-a はハーフミラーによって光学的に共役の位置に配置されている。ディスプレイ 2-a からの光線はマスク 1-a によって遮蔽されるが、ディスプレイ 1-a によって遮蔽されているように見える。

本システムでは、空中像の奥行き関係を正しく表示し、マスクの効果を得るために、実像鏡を 2 枚用いた。実像鏡 1 枚だけだと空中像の奥行きが反転してしまうためである。マスク効果を得るためには、2 枚の実像鏡を用いて奥行きを再反転させることが必要である。

2 枚の実像鏡の間隔は、空中像の飛出し量 x と、ディスプレイ位置 y に依存している。図5をみると、ディスプレイ位置 y はハーフミラーの大きさによって最小値が決定することがわかる。空中像の飛び出し量 x に関しては、インタラクションしやすい範囲を選ぶことになる。本システムでは、 $x = 45$ cm, $y = 45$ cm に設定した。 x, y を設定した

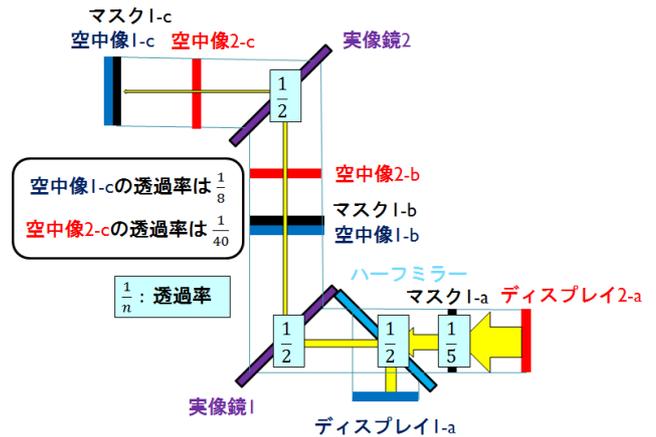


図 8 各光学装置の透過率
 Fig. 8 The transmittance of each optical device.

ことで、2つの実像鏡の間隔は $x + y = 90$ cm に決定する。2つの実像鏡の間隔と光源の配置によっては、空中像が手に結像されないことがある。図6では実像鏡の間隔が光源位置よりも広く、実像鏡間に一度実像が結像される。さらに、その実像が光源となり、実像鏡に入射することで、実像が結像される。つまり、図6のような配置にすると、手に空中像を表示することができる。図7では実像鏡の間隔が光源位置よりも狭く、実像鏡間で実像鏡を結像しない。さらに、その次の実像鏡を通して実像は作られず、虚像が見えることになる。つまり、図7のような配置にすると、空中像は実像鏡の奥に表示され、空中像に手を伸ばすことができなくなってしまう。空中像に手を伸ばしてインタラクションすることを考慮すると、図6のような配置が適切だといえる。

本システムで表示される空中像の輝度は、使用する光源ディスプレイの輝度と光学装置の透過率に依存する。本システムの光線経路と輝度減衰箇所を図8に示す。なお、液晶シャッターに関しては、透過率を最大にした場合を想定している。この図が示すように、手前の空中像では光源からの光線がハーフミラーと2枚の実像鏡を透過しており、一方で後ろの空中像ではハーフミラーと2枚の実像鏡に加えて、液晶シャッターを透過している。装置全体の透過率は各装置の透過率を掛け合わせることで、計算できる。本システムでは、前の空中像に関する透過率は1/8、後ろの空中像に関する透過率は1/40となっている。

4. 実験

4.1 目的

ディスプレイからの光線をマスクによって制御する場合、マスクとして用いる液晶シャッターの階調を変化させることで、光線の透過率を変えることができる。液晶シャッターの階調は256段階変化させることができるが、実際の透過率が線形にが変化するとは限らない。ここでは液晶



図 9 実験装置

Fig. 9 Experimental apparatus.

シャッターの階調と空中像の輝度を実験によって測定し、実際の透過率を明らかにする。

4.2 方法

本システムのマスクによって減衰した空中像の輝度を測定することで、マスクの透過率を計算する。液晶シャッターの階調設定変化によるマスク透過率の変化を測定する。

実験装置は図 9 のように構成した。使用した実験機材は、空中像の光源となるディスプレイが EIZO 社 FlexScan S1903, 透明液晶ディスプレイが SAMSUNG 社 LTI220MT02, ハーフミラーが Edmund 社の透過率が 50%のもの、実像鏡が ASUKANET 社の AI プレートである。手前の空中像は表示しないので、ハーフミラー下のディスプレイは使用しない。輝度測定に使用した色彩輝度計はコニカミノルタ社 CS-100A である。

計測する空中像の色 (R, G, B) は 4 種類で、光源用ディスプレイをそれぞれ (255, 0, 0), (0, 255, 0), (0, 0, 255), (255, 255, 255) に設定した。使用した液晶シャッターの階調は 256 段階だが、実験では階調を 5 の倍数に設定し、52 段階に分けて測定した。環境光の輝度への影響を取り除くため、空中像を表示しない場合の輝度も計測した。また、液晶シャッターの有無による輝度の変化をみることで、液晶シャッターの最大透過率を確認した。

4.3 結果・考察

実験の結果を図 10 に示す。このグラフは、それぞれの色の輝度から空中像以外の輝度成分を除いて作成した。

液晶シャッターの階調の変化に応じて、空中像の輝度に変化しており、マスクによる光線制御が可能であることが確認できた。空中像の輝度変化を線形に変化させるときは、この結果のように重みづけをしなくてはならないことが明らかになった。

液晶シャッターの最大透過率は 20%であることが確認できた。この最大透過率を用いることで、前後の空中像の最

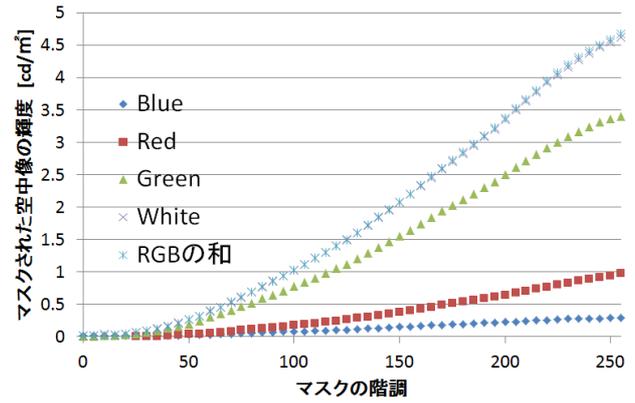


図 10 マスクの階調と空中像の輝度の関係。

Fig. 10 The relationship between the gradation of the LCD mask and the brightness of the mid-air image.



図 11 左視点

Fig. 11 left view.

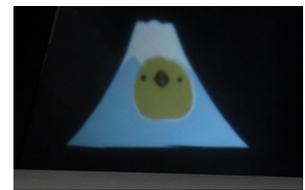


図 12 右視点

Fig. 12 right view.

大輝度を等しくするためのハーフミラーの理想の透過率・反射率を計算することができる。例として、空中像用のディスプレイとして同じ輝度特性を持つディスプレイを用いる場合は、理想のハーフミラーの反射/透過比は 1/5 になる。

5. アプリケーション

不透過空中像を利用したアプリケーションを試作した。試作したアプリケーションは、2014 年 11 月 8 日に日本科学未来館で行われたサイエンスアゴラの研究棟ツアーにて展示した。ツアー参加者に不透過空中像の体験をしてもらうことで、本システムで空中像のオクルージョン表現ができてきていることを確認できた。また、2層になっていることは視点の違いによる見えの違いで確認できる。展示したアプリケーションの左視点は図 11, 右視点は図 12 である。

さらに、Leap Motion を用いて、手の動きで空中像とインタラクションできるアプリケーションを試作した。試作したのは図 13 のようなアプリケーションである。手でスワイプ動作をすることで空中像を動かすことができる。マスクの有無によって、手前の空中像の見えやすさの変化を体験することができる。

6. おわりに

本稿では、空中像の多層表示の際に透過してしまう光線を、マスクによって制御する手法を提案した。提案手法によって前後の空中像の透過光を制御することでオクルー

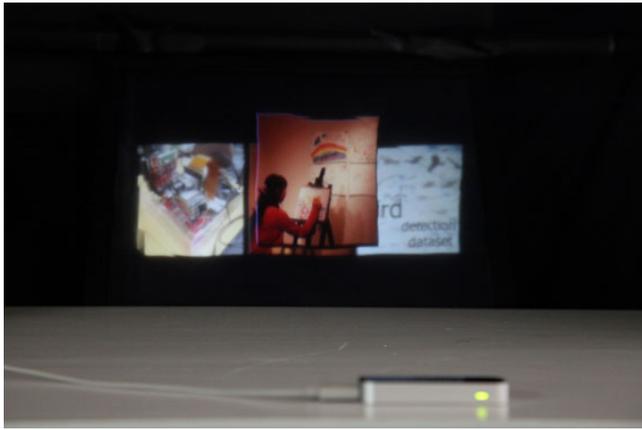


図 13 インタラクティブなアプリケーション
Fig. 13 Interactive application.

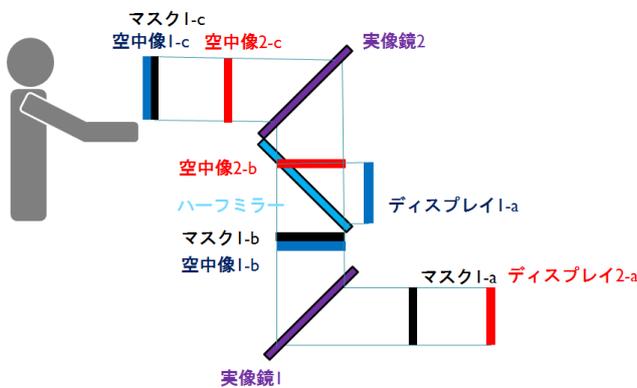


図 14 検討中の光学系

Fig. 14 New optical system for opaque mid-air images

ジョン表現が実際に可能であることを示した。今後は空中像による床面表示とそれに垂直な空中像を用いたインタラクティブシステムを検討している。床面空中像からの光線は本システムの機構によって制御し、空中像のオクルージョン表現を可能にする予定である。

また、システムの光学系を見直すことを検討している。図 14 が検討中の新しい光学系である。ハーフミラーによる前の層の重ね合わせ位置を、2 枚の実像鏡の間に変えることによって、実像鏡の通過回数を減らすことができ、前の層の輝度減衰を小さくすることができる。これによって、前後の空中像の最大輝度を等しくする場合、透過率の大きなハーフミラーを用いることで、後ろの層の輝度を本システムよりも大きくすることができる。

参考文献

- [1] Alan Sullivan: "DepthCube solid-state 3D volumetric display", Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, 279 (May 21, 2004).
- [2] Hiromi Ikeda et al.: "i-ball: Interactive Information Display like a Crystal Ball", ACM SIGGRAPH 2001 Emerging Technologies, (August, 2001).
- [3] 和田 拓朗, 苗村 健: "FloasionTable: 複合現実展示のための多方向から鑑賞可能な空間立像ディスプレイ", Techni-

cal report of IEICE. Multimedia and virtual environment 109(466), 29-34 (March 05, 2010).

- [4] Maekawa, Satoshi et al.: "Transmissive optical imaging device with micromirror array", Proc. SPIE 6392, Three-Dimensional TV, Video, and Display V, 63920E (October 17, 2006).
- [5] ASUKANET: "AI Plate", <http://aerialimaging.tv/index.html>
- [6] Hanyuool Kim et al.: "MARIO: Mid-Air Augmented Reality Interaction with Objects", Advances in Computer Entertainment, 10th International Conference, ACE 2013, Boekelo, The Netherlands, November 12-15, 2013. Proceedings, pp. 560-563 (2013).
- [7] Seki Inoue et al.: "HORN: the hapt-optic reconstruction", SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, Article No. 11 (2014).
- [8] http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/perception/AIRR_Tablet/index-j.html
- [9] Totaro Nakashima et al.: "ExFloasion: Multi-layered Floating Vision System for Mixed Reality Exhibition", 16th Intern. Conf. Virtual Systems and MultimediaVSM2010, pp. 95-98 (October 2010).
- [10] Hanyuool Kim et al.: "MRsionCase: a glasses-free mixed reality showcase for surrounding multiple viewers", SA '12 SIGGRAPH Asia 2012 Technical Briefs Article No. 10 (2012). . A281-A289 (2013).
- [11] J. R. Moore et al.: "The implementation of a multi-view autostereoscopic display", Stereoscopic Television, IEE Colloquium on 4/1 - 4/16 (1992).
- [12] Hideaki Nii et al., : "Fuwa-Vision: an auto-stereoscopic floating-image display". SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies Article No. 13 (2012)
- [13] Yuta Ueda et al., : "HaptoMIRAGE: mid-air autostereoscopic display for seamless interaction with mixed reality environments", SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Posters Article No. 30 (2014).
- [14] Gordon Wetzstein et al.: "Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting", ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2012 TOG Homepage archive Volume 31 Issue 4, Article No. 80 (2012)