

動的マスクを用いた多層空中像におけるオクルージョン表現*

梶田 創^{†a)} 山本 紘暉[†] 小泉 直也^{††} 苗村 健^{†,††}

Opaque Mid-air Images Using Dynamic Mask for Occlusion Expression*

Hajime KAJITA^{†a)}, Hiroki YAMAMOTO[†], Naoya KOIZUMI^{††},
and Takeshi NAEMURA^{†,††}

あらまし 空中像とは、映像装置の光が反射・屈折し、空中に結像された像のことであり、映像と実物体を融合させた情報提示が可能である。空中像を多層化する場合、典型的にはハーフミラーを用いるが、この方法では全ての層の映像が混色し、前後の遮蔽関係を表すオクルージョン表現ができないという問題がある。本論文では、任意の視点位置で前後層のオクルージョン表現を実現するために、前層の映像と光学共役の位置に動的マスクを配置して後層の映像を遮蔽する手法、OpaqueLusion を提案する。マスクの有無による前層の空中像の視認性の評価を行い、マスクされた空中像の方が高い視認性をもつことを示した。また、アプリケーションとして、透過制御可能な水平・垂直な空中像を表示できるシステム、Mid-air Plus を実装した。

キーワード 空中像, 多層ディスプレイ, オクルージョン, 動的マスク, 複合現実感

1. ま え が き

空中像とは、映像装置の光が反射・屈折し、空中に結像された像のことであり、映像と実物体を融合させた情報提示が可能である。CG キャラクターを表示すれば、まるで現実世界にいるように見せることができる。実物体のすぐそばに映像を添えるような演出も、物理的実体のない空中像が得意とする表現である。

本研究では、複数の空中像を用いた表現に取り組む。光源を二次元ディスプレイにすると、結像される空中像も二次元平面の映像となる。光源を三次元ディスプレイや多層ディスプレイにすると、空中像を異なる奥行きに配置できる。三次元ディスプレイは、両眼視差を用いて立体映像を提示するため、表示可能な奥行き範囲は融合限界によって制限されている [1]。多層ディスプレイは、ディスプレイを実際に前後に配置して立体映像を表現するため、各層の映像は平面だが広範囲な奥行きをもつコンテンツを表現可能である。

典型的な多層化としてハーフミラーの反射と透過を利用した光の加算による方法が知られている。しかし、この方法では全ての層の映像が混色され、前後の遮蔽関係を表すオクルージョン表現が実現できないという問題がある。オクルージョン表現がないと、遮蔽関係による奥行き表現が得られなかったり、重なっている部分の情報の視認性が悪くなってしまう。

本研究では、任意の視点位置で前後層のオクルージョン表現を実現するために、前層の映像と光学共役の位置に動的マスクを配置して後層の映像を遮蔽する光学系、OpaqueLusion を提案する。動的マスクとしては透明液晶を採用し、実際に 2 層空中像光学系を実装した。マスクの有用性を示すため、マスクの有無による視認性の変化に関する心理物理実験を読字課題で行った。更に、アプリケーションとして、模型の断面図など、内部構造の理解に活用できる透過制御可能な水平・垂直な空中像を表示する光学系、Mid-air Plus を実装した。

2. 関連研究

2.1 空 中 像

空中像を結像する光学素子として、よく知られているのはフレネルレンズである。フレネルレンズを用いている空中像光学系の例としては、Fuwa-Vision [2] や HaptoMIRAGE [3] などがある。また、レンズアレイ

[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科, 東京都

Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656 Japan

^{††} 東京大学大学院情報学環, 東京都

Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8656 Japan

a) E-mail: kajita@nae-lab.org

* 本論文は FIT2015 推薦論文である。

DOI:10.14923/transinfj.2016JDT0001

を用いて結像する RePro3D [4] などの例もある。フレネルレンズには収差や像のひずみがあるため、RGB の各波長の違いによる結像位置の差を考慮して設計する必要がある [5]。

屈折を利用して空中像を結像するフレネルレンズに対して、再帰反射を利用した光学素子もある。再帰反射型の空中像光学系としては AIRR や実像鏡がある。AIRR はハーフミラーと再帰性反射材の組合せで構成されており、光を 2 軸再帰反射させる光学系である [6]。実像鏡は格子状の微小なミラーアレイによって構成され、直交する 2 面の反射によって 2 軸再帰反射させる光学系である [7]。これらの再帰反射型の光学系は、空中像を光源と面対称の位置に結像する。結像位置の関係から、空中像は奥行き方向に反転されて表示される。正しい前後関係にするには、再度 2 軸再帰反射させる必要がある [8]。実像鏡に分類される素子は、2006 年に登場した DCRA [7] をはじめとして、再帰透過性素材 [9]、AIP [10]、CMA [11] などがある。

空中像は光学系の手前に表示できるので、映像を現実と融合させたインタラクションシステムにおいて、特にその有効性を発揮すると考えられる。MARIO [12] は深度センサでテーブル上の実物体の高さを認識して、その情報をもとにキャラクターが三次元空間を移動するシステムである。HORN [13] は超音波アレイを触覚提示装置として使い、空中像に触覚を重畳するシステムである。AIRR Tablet [14] はステレオカメラで手の位置を認識して、空中像を手で直接的に操作できるシステムである。

多層空中像については、ミュージアム展示における映像重畳手法として利用された例がある。Exfloasion [15] は展示物の手前と奥に 2 層ずつ像を表示できるシステムである。MRsionCase [16] は展示物の手前と奥に像が表示でき、更にショーケースの周りの 4 方向から鑑賞できるシステムである。しかし、従来の多層空中像は、前後層での混色が起き、オクルージョン表現はできなかった。オクルージョン表現のある空中像が実現できれば、混色がなくなり視認性が向上すると考えられる。

2.2 多層ディスプレイ

多層ディスプレイには光を加算していく方法と光を減算していく方法の二つの方法がある。

光を加算していく方法の例としては、バリフォーカルミラーによる方法 [17] や、DepthCube [18] のように複数枚の液晶拡散スクリーンを用いる方法、Exflo-

sion [15] や MRsionCase [16] などのハーフミラーの反射と透過によってディスプレイを多層化する方法などがある。光の加算による多層の場合、各層の輝度が明るく表示できる利点があるが、一方で前後層の光が加法混色することで、各層ごとの映像が白とびして見にくくなってしまうという欠点がある。

光を減算していく方法の例としては、透明液晶を並べる方法がある。Tensor displays [19] は、多層の透明液晶で光を減算していくことで、光線空間の再現による立体映像を形成することを目的としている。DFD ディスプレイ [20] は前後の輝度差によって奥行き感を出すことを目的としている。光の減算による多層の場合、輝度を減算によって制御できるという利点があるが、一方で層数を増やすと輝度がどんどん落ちてしまう点や、前層の輝度は後層より低い輝度しか表示できないという欠点がある。

多層ディスプレイではないが、オプティカルシースルー HMD の ELMO [21] は映像と実世界のオクルージョン問題を光の加算と減算を組み合わせることで解決した。この例では、ハーフミラーを用いた光の加算によって映像を実世界に重ね合わせ、透明液晶を用いた光の減算によって実世界の光の部分的な遮蔽を行っている。

多層ディスプレイの場合も、光の加算と、光の減算の両者を組み合わせることで前後層でのオクルージョン問題を解決することが可能であると考えられる。

2.3 水平・垂直な映像を表示するディスプレイ

模型の断面図など、内部構造の理解に活用可能な情報環境を目指して、テーブル上に水平・垂直な映像を表示するディスプレイが提案されている。Deskrama [22] はテーブルに書かれた図面の上でディスプレイを動かし、3D オブジェクトの断面を表示し内部構造を見せるシステムである。Tablescape Plus [23] は、拡散制御フィルムを用いることで、テーブル面上とテーブル上の小さなスクリーンにプロジェクションし、水平・垂直な映像の表示の両方を実現している。また、プロジェクションによってテーブル上に水平な映像を表示しつつ、空中像によって立像を表示するシステム [24], [25] が提案されている。

これらのシステムでは装置が物理的に干渉しあい、映像が交差する表現は難しかった。空中像を用いれば、自由な位置でクロスすることが可能であると考えられる。

3. OpaqueLusion: オクルージョン表現可能な多層空中像光学系の提案

本章では、オクルージョン表現可能な多層空中像光学系、OpaqueLusion を提案する。提案手法で表示した空中像を図 1 に示す。

3.1 ハーフミラーによる多層化

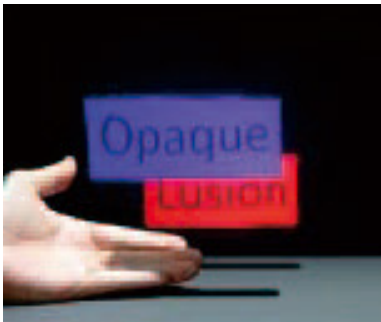
ディスプレイの多層化方法はハーフミラー (Half-silvered mirror: HSM) による方法がよく知られている。典型的な方法を図 2 に示す。この方法では、各層の全ての光が加算され混色するため、前後の遮蔽関係を表現することはできない。また、混色部分の範囲は、映像の奥行きに差があるため、ユーザの視点位置によって変化してしまう。前後層の遮蔽関係を任意の視点位置で表現することが、本研究の目指す光学的整合性のとれた正しいオクルージョン表現である。

3.2 動的マスクによるオクルージョン表現

提案手法では、結像した前層映像と動的マスクを幾



(a) Mid-air images without mask



(b) Mid-air images with mask

図 1 マスクの有無によるオクルージョン表現の変化
Fig. 1 Visibility control with dynamic mask.

何学的に一致させ、マスクによって後層の光を遮蔽することで前後層のオクルージョン表現を実現する。提案手法を図 3 に示す。

前後層でのオクルージョン表現を実現するために動的マスクを導入する。本論文における動的マスクとは、光の遮蔽のための変形可能な光学マスクと定義する。動的マスクの定義を満たす装置として、本研究では透明液晶を採用する。以降、透明液晶を Transparent LCD Mask (TLM) と呼ぶ。透明液晶はピクセル単位で光の透過・遮蔽を変化させることができる。この透明液晶を前層ディスプレイ (Display1) の位置と光学的に共役な位置 (ハーフミラーに対して面对称な位置) に配置することで、透明液晶の背後に設置された後層からの光が前層の映像部分で遮光され、混色が生じなくなる。この結果、前後層の遮蔽関係がユーザの視点位置によらず保存され、光学的整合性のとれた正しいオクルージョン表現が実現できる。

3.3 各光学素子による輝度減衰

オクルージョン表現可能な N 層化方法を図 4 に示す。各層の輝度は各光学素子に反射・透過される過程

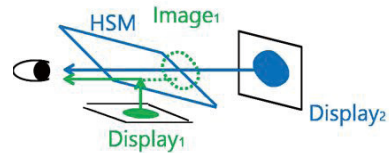


図 2 典型的な多層手法
Fig. 2 Typical multi-layering method.

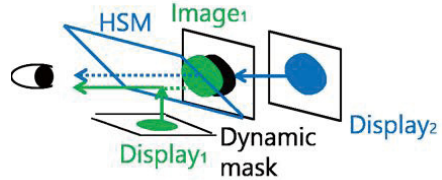


図 3 提案手法
Fig. 3 Proposed method.

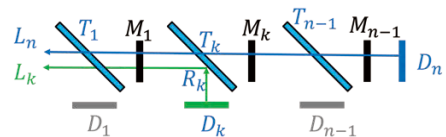


図 4 オクルージョン表現可能な N 層化
Fig. 4 Multi-layering method for occlusion expression.

で減衰する．

ディスプレイ i の輝度を D_i ，マスク i の透過率を M_i ，ハーフミラー i の透過率を T_i ，反射率を R_i とおく．このとき k 層目の輝度 L_k は以下の式 (1)，式 (2) で表される．

$$L_k = R_k D_k \prod_{i=1}^{k-1} (T_i M_i) \quad (k \leq n-1) \quad (1)$$

$$L_n = D_n \prod_{i=1}^{n-1} (T_i M_i) \quad (2)$$

N 層目に関してはハーフミラーの反射がないため，他の層と式が異なっている．奥の層ほど係数が多くかかり，減衰してしまうことが分かる．

動的マスクとして透明液晶を用いる場合，その最大透過率は現在 20% 程度である．層を増やすほど透明液晶を通過する回数は多くなり，輝度は指数関数的に減衰してしまう．本手法で多くの層を表示するのは現実的ではなく，必要最低限の層数で設計する必要がある．

3.4 2 層空中像光学系の設計

オクルージョン表現可能な多層空中像を表示するため光学系の設計として，空中像の結像素子として AIP を採用した．なお，遮蔽関係に焦点を当てるため，2 層で設計した．

本システムの構成を図 5 に示す．ユーザの鑑賞位置は図の左側であり，そこから見ると手元に空中像が表示される設計となっている．ユーザの手元にある空中像は AIP によって結像された実像であり，光源は二つのディスプレイである．

AIP は面对称の位置に像を結像するため，1 回結像させただけでは像の奥行きが前後反転した状態になっ

てしまう．前後反転状態では提案手法によるオクルージョン表現が正しくできないため，2 枚の AIP を用いて前後反転状態を解消した．

二つの AIP の間隔は空中像の飛び出し距離をもとに設計した．二つの AIP の間隔と光源の配置によっては，空中像が手元に結像されないことがある．図 6(a) では AIP の間隔が光源位置よりも広く，AIP 間に一度実像が結像される．その実像が更に光源となり，二つめの AIP に入射することで，二つめの実像が結像される．つまり，図 6(a) のように $a < d$ となる配置にすると，手元に空中像を表示することができる．図 6(b) では AIP の間隔が光源位置よりも狭く，AIP 間で実像を結像しない．更に，その次の AIP を通しても実像は作られず，虚像が見えることになる．つまり，図 6(b) のように $a > d$ となる配置にすると，空中像は AIP 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．空中像とインタラクションすることを考慮すると，図 6(a) のような配置が適切だといえる．

3.5 実 装

使用した機器は次のとおりである．前後のディ

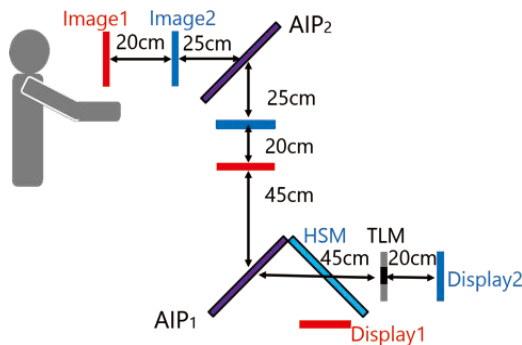
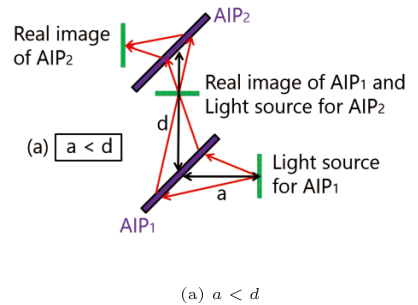
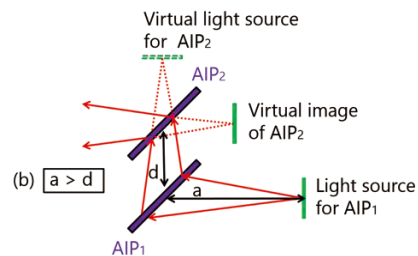


図 5 光学系の設計
Fig. 5 Optical design.



(a) $a < d$



(b) $a > d$

図 6 実像鏡の間隔による結像位置の変化
Fig. 6 Formed position by AIPs.

スプレイとして SLD1968 V2 (1600cd/m^2), 透明液晶として SAMSUNG LTI220MT02 (22 インチ, WXGA 1680×1050 ピクセル, 最大透過率 20%, コントラスト比 500:1), 実像鏡として ASUKANET AIP (340×340mm), ハーフミラーとして Edmund プレート型ビームスプリッター (50/50 R/T(%), 254×356mm) を用いた.

装置の概観を図 7 に示す. 外光の影響を避けるため, 実際のシステムは吸光材で囲った.

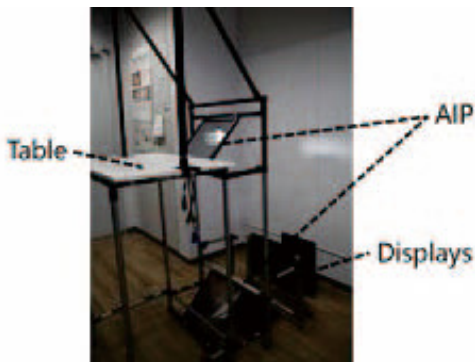


図 7 実装した空中像光学系
Fig. 7 Implemented optical system.

3.6 結 果

光源ディスプレイの (R,G,B) を (255, 0, 0), (0, 255, 0), (0, 0, 255), (255, 255, 255) とした場合における動的マスクの透過率を図 8 に示す. このグラフは, 輝度測定によって作成した. 透明液晶によって光線の遮蔽が可能であることが確認できた. また, 各階調によって液晶ディスプレイの透過率が変化することも確認できた. このことから, 単純なオクルージョン表現だけでなく, 半透明の映像表現も制御可能である

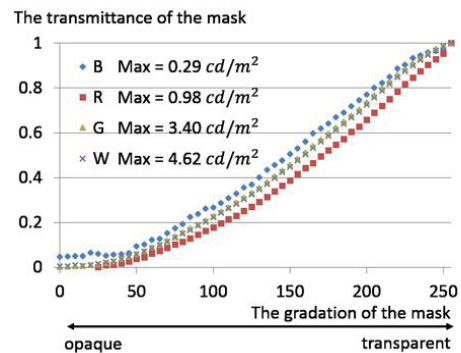
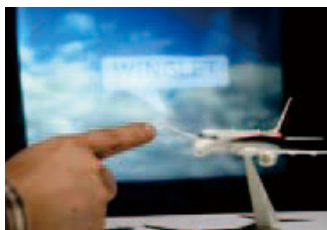
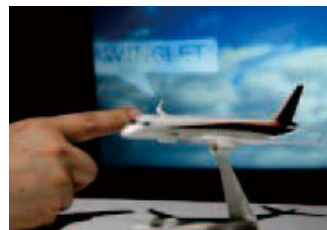


図 8 各階調におけるマスクの透過率
Fig.8 The transmittance of the mask.



(a) Left view without mask



(b) Right view without mask



(c) Left view with mask



(d) Right view with mask

図 9 展示物へのアノテーションと背景の表示

Fig.9 Direct annotation next to physical object and background image for stage scenery.

と考えられる。また、R、G、Bによって各階調での透過率が異なることから、液晶マスクを通した光は色が変わってしまうことが分かる。

図9に視点位置とマスクの有無による空中像の見えの違いを示す。前層映像と透明液晶ディスプレイが幾何学的に一致し、ユーザの視点位置に依らず、正しく後層映像がマスクされた映像が提示できた。任意の視点位置でオクルージョン表現が可能になったことで、同一の展示物に提示されたアノテーションを複数人で同時に観察する等のアプリケーションが実現できるようになった。

4. 読字課題におけるマスク効果に関する実験

4.1 目的

空中像はオクルージョン表現によって視認性が向上すると考えられる。ここでは、マスクされた空中像の識別の容易さを読字課題によって評価する。

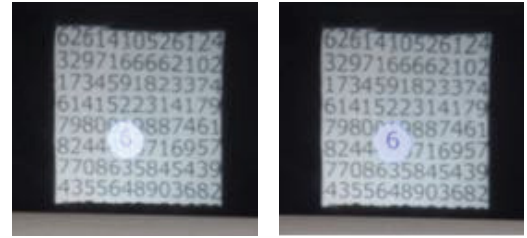
4.2 方法

20代～30代の男女16人に参加を依頼した。参加者の視力矯正を含めて、両眼で0.7、片眼で0.3以上であることを条件とした。

前層には1から9までの数字を表示し、参加者にはキーボードのテンキーを用いてできるだけ早く回答するように指示した。後層には数字を敷き詰めた映像を用意した。後層の表示は3パターンあり、各パターンについて50問ずつ回答させた。表示する3パターンは図10に示すように、マスクなし、マスクあり、背景なしの3種類とした。それぞれの回答時間を記録し、各パターンで差があるか検証した。

いずれのパターンでも前層の数字は白い円に囲まれており、実像鏡の表示可能領域内(15cm×15cm)にランダムに配置した。フォントの大きさに関しては、先行研究[16]において空中像に表示するフォントの大きさに関する視認性の調査がされており、それを参考に60ptのメイリオを用いた。背景の数字も参加者が回答するごとにランダムに変化し、60ptで15cm×15cm内に敷き詰めた。

参加者の視点位置は前の層から1m離れた位置とした。この1mという距離も先行研究[16]で明視の文字の大きさを測定したときの視点距離と同じ距離を選んだ。前の空中像と背景の距離は15cmに設定した。三つのパターンの実験順序は参加者ごとに変更した。参加者が回答している様子を図11に示す。



(a) No mask

(b) With mask



(c) No rear image

図10 実験で使用した空中像

Fig. 10 Mid-air images used in the experiment.

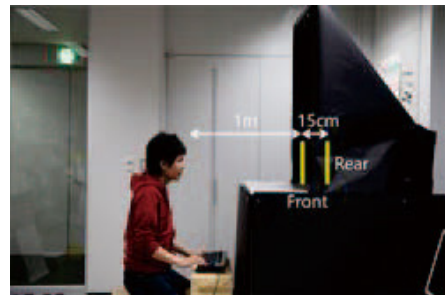


図11 実際の実験の様子

Fig. 11 The actual condition of the experiment.

実験の手順は以下のとおりである。

- (1) 練習のために背景なしのパターンを行った。
- (2) 3パターンの実験を行った。この際パターンの順序は参加者によって変更した。
- (3) 参加者に実験の感想を回答させた。

前後の空中像の輝度が同じになるように、背景映像用のディスプレイに関しては輝度を最大に設定し、前層映像用のディスプレイに関しては輝度を20%に設定した。実験は蛍光灯下520lxの明所で行った。

4.3 結果

16人の参加者の各パターンにおける平均回答時間を図12に示す。エラーバーは標準誤差を示している。

参加者から得た各パターン 50 回の回答時間データは、キーボードの操作ミスや各パターン開始直後などに外れ値があり、それを除外するため上下 4% ずつのデータを無視し、46 回分のデータを平均したものをその参加者の回答時間データとした。各パターンについて、平均回答時間に関してボンフェローニの方法を用いて多重検定を行った。

ボンフェローニの多重検定の結果、マスクなし-マスクありではマスクありが有意に回答時間が短かった ($p < 0.01$)。マスクなし-背景なしでは背景なしが有意に回答時間が短かった ($p < 0.01$)。マスクあり-背景なしでは回答時間に差は見られなかった。

4.4 考 察

4.4.1 回答時間に関する考察

本章の実験の結果から、マスクがあると回答時間が短くなることが分かった。これはマスクによって空中像の混色がなくなり、前層映像の表示の視認性が向上したからだと考えられる。背景の有無による回答時間の差が見られなかったことから、マスクの遮蔽によって混色による視認性の悪さが解消されたことが示唆された。

マスクなしの回答時間が長くなったのは、空中像が混色し、視認性が悪かったからだと考えられるが、時間をかければ識別できるということでもある。実際に参加者の様子を観察していると、マスクなしのパターンの場合は、視点を横に振って見やすい位置を探すような動作が見られた。マスクなしの場合の回答時間が長くなったのは、この視点変更の動作のためと考えることもできる。

4.4.2 内観報告

内観報告の一つとして、「顔を動かして前の数字と背景の数字が重ならないようにした (9 人)」があった。

マスクなしの 2 層の空中像を見たときの報告である。後ろが透過して来るため、前後層の表示が重なってしまうと、数字を識別できなかったためであると考えられる。図 12 の結果とも一致した。

その他の報告として、「マスクありと背景なしは見やすさにあまり差を感じない (3 人)」があった。背景なしとマスクありの見やすさに変化を感じなかったということは、オクルージョン表現があれば識別にほとんど時間がかからなかったからだと考えられる。実際に二つのパターンで有意差が出た参加者はいなかった。図 12 の結果とも一致した。

5. Mid-air Plus: 透過制御可能な水平・垂直像を表示するアプリケーション

実験により多層空中像におけるマスクの有用性が示された。複数の空中像でオクルージョン表現できるのは多層だけではなく、映像が交差する表現にも適用可能である。

本章では、オクルージョン表現可能な空中像の応用として、透過制御可能な水平・垂直像を表示するシステム、Mid-air Plus を設計、実装する。本システムは、模型の断面などの内部構造の理解に活用可能なディスプレイを目指した。図 13 に本システムで表示した水平・垂直な空中像を示す。

5.1 水平・垂直像への遮蔽原理の応用

水平・垂直像を表示できるアプリケーション Mid-air Plus を図 14 に示す。ディスプレイ (D)、プロジェクタ (P)、透明スクリーン (S)、透明液晶 (TLM) 及び 2 枚の AIP (AIP1, AIP2) からなる。

Mid-air Plus が水平・垂直な映像を提示する仕組みは以下のとおりである。D は AIP2 によって D' を結

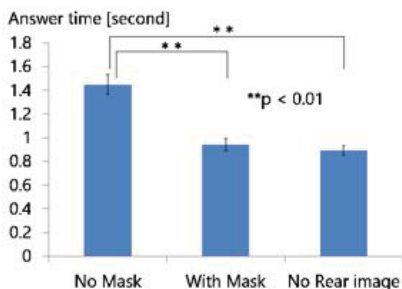


図 12 各パターンの平均回答時間

Fig. 12 The mean time required of each image.

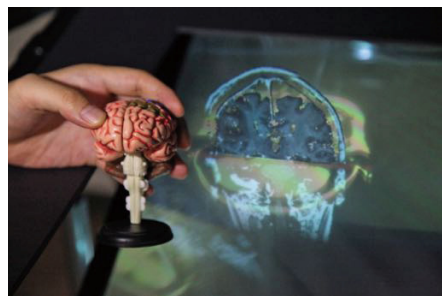


図 13 水平・垂直像を表示できるシステム Mid-air Plus

Fig. 13 Mid-air Plus which can cross vertical and horizontal images.

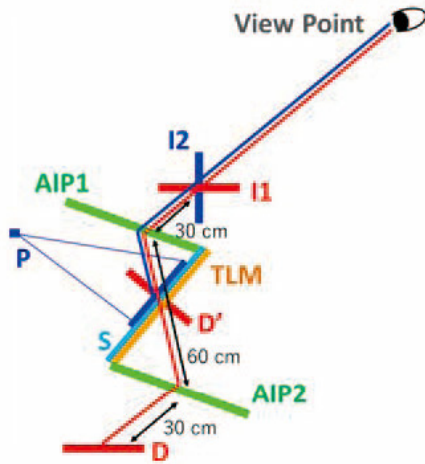


図 14 交差像を表示するための光学系の構成
Fig. 14 Optical design for cross images.

像する。D'はTLMとSを透過し、AIP1によって水平像I1を結像する。ハーフミラーを用いた実装[27]では、光学系が大きくなってしまった上に、輝度が低いという問題があり、ここでは、垂直像とマスクの幾何学的な一致はプロジェクターによって行った。この変更により、二つのAIP間距離を60 cmまで縮めることができた。Pからの光はSで反射・拡散され、AIP1によって垂直像I2を結像する。この二つの光線によって、ユーザはI1とI2が交差した状態を観察できる。更にDをアクチュエータによって上下に動かすことで、D'を下上に動かし、I1を上下に動かした。

本システムでは、背面に置かれたディスプレイから発せられた光を、透明液晶によってカットし、マスクに貼り付けた透明スクリーンにプロジェクションすることで前層の像を重ねる。これによって、マスクと像の位置を同じ位置につくることができるため、視点を動かしてもマスクと前層の間にズレが生じない。

5.2 実 装

Mid-air Plusを実装した様子を図15に示す。今回、使用した機器は以下のとおりである。プロジェクタ(P)としてBenQ製GP10、スクリーン(S)として半透明拡散フィルム(シアターハウス製リアプロジェクションフィルムCF-500-1525)、ディスプレイ(D)や透明液晶(TLM)としては3.5と同じものを用いた。

実装上の課題として、光源の入射角によっては迷光が見えてしまう問題があった[28]。本システムでは、これをDに角度制御フィルムを貼り付けることで解決

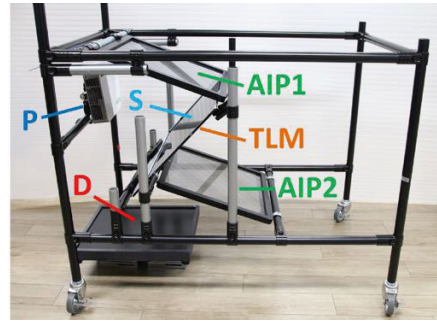
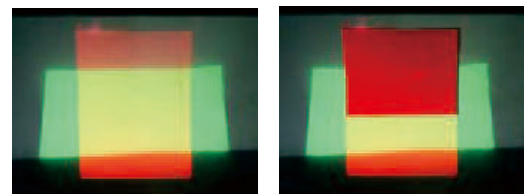


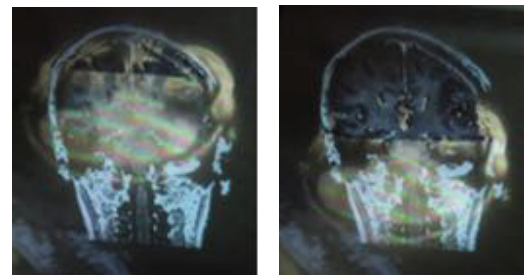
図 15 Mid-air Plus の実装
Fig. 15 Implimented system as Mid-air Plus.



(a) Without mask (b) With mask

図 16 マスクの有無による交差像の見え方

Fig. 16 Visibility control of horizontal and vertical images.



(a) Horizontal image is rising up with mask. (b) Horizontal image is falling down with mask.

図 17 脳の MRI 画像の断面表示

Fig. 17 Application which can display MRI images.

した。角度制御フィルムは正面から見たときの透過率は高く、左右から見たときの透過率は低い。そのため、AIPで結像する光を透過しながら、迷光を抑えることができた。

5.2.1 結 果

Mid-air Plusを実装し、像を表示した結果を図16に示す。図16では、水平像として緑を、垂直像として赤の四角を表示し、垂直像のうち水平像よりも上の部分でマスクを付けた。図17では、水平像脳のMRI

画像を表示し上下に動かした。水平像と垂直像がクロスする様子が観察され、また、マスクによって水平像と垂直像が混色せず、任意の視点位置から水平・垂直像のオクルージョン表現が観察できた。

6. む す び

本研究では、多層空中像のための光源として動的マスクを用いてディスプレイを多層化することで、視点位置に依らずオクルージョン表現の可能な多層空中像が表示できるシステム、OpaqueLusion を提案した。

提案手法の評価のため、2層空中像の光学系を実装し、心理物理実験でオクルージョン表現の有無による数字の回答時間の違いを測定した。実験の結果、オクルージョン表現がある方が回答時間が短いことが分かった。実験の結果から、多層空中像においてマスクを用いてオクルージョン表現をすると、空中像の視認性が向上することが示唆された。オクルージョン表現を有効に使ったアプリケーションとして、透過制御可能な水平・垂直像を表示する光学系、Mid-air Plus を設計、実装した。

謝辞 本研究は、JST, CREST の支援を受けたものである。

文 献

- [1] 坂根巖夫, 立体視テクノロジー: 次世代立体表示技術の最前線, エヌ・ティー・エス, pp.23-25, 2008.
- [2] H. Nii, K. Zhu, H. Yoshikawa, N.L. Htat, R. Aigner, and R. Nakatsu, "Fuwa-Vision: an autostereoscopic floating-image display," SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies Article no.13, 2012.
- [3] Y. Ueda, K. Iwazaki, M. Shibasaki, Y. Mizushima, M. Furukawa, H. Nii, K. Minamizawa, and S. Tachi, "HaptoMIRAGE: mid-air autostereoscopic display for seamless interaction with mixed reality environments," SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Posters, Article no.30, 2014.
- [4] T. Yoshida, K. Shimizu, T. Kurogi, S. Kamuro, K. Minamizawa, H. Nii, and S. Tachi, "RePro3D: Full-parallax 3D display with haptic feedback using retro-reflective projection technology," VR Innovation (ISVRI), 2011 IEEE International Symposium on, pp.49-54, 2011.
- [5] H. Kakeya, "FLOATS V: Real-image-based autostereoscopic display with TFT-LC filter," 2004 SID International Symposium Digest of Technical Papers, pp.490-493, 2004.
- [6] H. Yamamoto and S. Suyama, "Aerial 3D LED display by use of retroreflective sheeting," IS& T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, pp.86480Q-1-86480Q-8, 2013.
- [7] S. Maekawa, K. Nitta, and O. Matoba, "Transmissive optical imaging device with micromirror array," Proc. SPIE 6392, Three-Dimensional TV, Video, and Display V, 63920E, 2006.
- [8] H. Yamamoto, H. Bando, R. Kujime, and S. Suyama, "Multi-layered aerial LED display with occlusions between layers," JSAP-OSA Joint Symposia. 17a D5, 2013.
- [9] 木島竜吾, 渡邊純哉, 近藤大祐, "再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクタ: 動作原理と初期実装," 映像学技報, vol.32, no.22, pp.7-12, 2008.
- [10] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012-155345 (P2012-155345S)
- [11] H. Yamamoto, R. Kujime, H. Bando, and S. Suyama, "Aerial LED signage by use of crossed-mirror array," Proc. SPIE 8643, Advances in Display Technologies III, 864302, 2013.
- [12] H. Kim, I. Takahashi, H. Yamamoto, T. Kai, S. Maekawa, and T. Naemura, "MARIO: Mid-Air Augmented Reality Interaction with Objects," 10th International Conference, Advances in Computer Entertainment, ACE 2013, Boekelo, pp.560-563, The Netherlands, Nov., 2013.
- [13] S. Inoue, K.J. Kobayashi-Kirschvink, Y. Monnai, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "HORN: the hapt-optic reconstruction," SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, Article no.11, 2014.
- [14] 安井雅彦, M. Sakti Alvisalim, 山本裕紹, 石川正俊, "空中映像と高速 3D ジェスチャー認識技術の統合による直感的操作可能なインタラクションシステム," 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 講演会論文集, pp.1404-1407, 2014.
- [15] T. Nakashima, T. Wada, and T. Naemura, "Exflosion: Multi-layered floating vision system for mixed reality exhibition," 16th Intern. Conf. Virtual Systems and MultimediaVSMM2010, pp.95-98, 2010.
- [16] H. Kim, S. Nagao, S. Maekawa, and T. Naemura, "MRsionCase: A glasses-free mixed reality showcase for surrounding multiple viewers," SA '12 SIGGRAPH Asia 2012 Technical Briefs Article no.10, 2012.
- [17] L.S. Smoot, Q. Smithwick, and D. Reetz, "A volumetric display based on a rim-driven varifocal beamsplitter and LED backlit LCD," SIGGRAPH Emerging Technologies, p.22, 2011.
- [18] A. Sullivan, "DepthCube solid-state 3D volumetric display," Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, 279, 2004.
- [19] G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, and R. Raskar, "Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting," ACM Trans. Graph. (TOG) - Proc. ACM SIGGRAPH 2012 TOG Homepage archive, vol.31, Issue 4, Article no.80, 2012.

- [20] 高田英明, 陶山史朗, 伊達宗和, 昼間香織, 中沢憲二, “前後 2 面の LCD を積層した小型 DFD ディスプレイ,” 映像学誌, 映像情報メディア, vol.58, no.6, pp.807–810, 2004.
- [21] K. Kiyokawa, M. Billinghurst, B. Campbell, and E. Woods, “An occlusion-capable optical see-through head mount display for supporting co-located collaboration,” ISMAR ’03 Proc. 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality p.133, 2003.
- [22] T. Nagakura and J. Oishi, “Deskrama,” ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies, p.6, 2006.
- [23] 寛 康明, 飯田 誠, 苗村 健, 松下光範, “Tablespace Plus: インタラクティブな卓上映像シアター,” 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol.11, no.3, pp.377–386, 2006.
- [24] H. Kim, H. Yamamoto, N. Koizumi, S. Maekawa, and T. Naemura, “HoVerTable: Dual-sided vertical mid-air images on horizontal tabletop display,” Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp.1115–1120, 2015.
- [25] L.W. Chan, T.T. Hu, J.Y. Lin, Y.P. Hung, and J. Hsu, “On top of tabletop: A virtual touch panel display, Horizontal Interactive Human Computer Systems,” TABLETOP 2008. 3rd IEEE International Workshop on pp.169–176, 2008.
- [26] 山本紘暉, 梶田 創, 金ハンヨウル, 小泉直也, 苗村 健, “Mid-air Plus: 透過制御可能な水平・垂直な空中像を表示する光学設計,” 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会/講演会論文集, pp.82–85, 2015.
- [27] H. Yamamoto, H. Kajita, H. Kim, N. Koizumi, and T. Naemura, “Mid-air plus: a 2.5 D cross-sectional mid-air display with transparency control,” Proc. SIGGRAPH ’15 ACM SIGGRAPH 2015 Posters, Article no.78, 2015.
- [28] 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 2015, pp.23–26, 2015.

(平成 28 年 2 月 4 日受付, 5 月 25 日再受付,
7 月 15 日早期公開)



山本 紘暉

平 26 東大・工・電子情報卒。現在, 同大大学院・情報理工・電子情報修士課程に在学中。主に, 空中像を用いた複合現実感システム・ディスプレイの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会学生会員。



小泉 直也

平成 16 年電通大・電気通信学部・知能機械工学科卒。平成 18 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 24 年慶大・メディアデザイン研究科・後期博士課程修了。博士 (メディアデザイン学)。日本学術振興会特別研究員 (PD) を経て, 現在, 東京大学情報学環研究員。バーチャルリアリティ, ヒューマンインタフェースの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会, 各会員。



苗村 健 (正員)

平 4 東大・工・電子卒。平 9 同博士課程了。博士 (工学)。米国スタンフォード大学客員助教授 (日本学術振興会海外特別研究員) を経て, 平 14 東京大学大学院情報学環助教授。同情報理工学系研究科電子情報学専攻准教授を経て, 平 25 同情報学環教授, 現在に至る。メディア+コンテンツ, 実写に基づく映像合成, 複合現実感, 実世界指向情報環境, アート&エンタテインメントなどの研究に従事。



梶田 創

平 27 東大・工・電子情報卒。現在, 同大大学院・情報理工・電子情報修士課程に在学中。主に, 空中像の光学的整合性の研究に従事。情報処理学会学生会員。