

RK-001

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

梶田 創† 小泉 直也‡ 苗村 健†‡  
Hajime Kajita Naoya Koizumi Takeshi Naemura

### 1. まえがき

空中像とは、ディスプレイ光源からの光を光学系によって反射・屈折させることで、映像を空中に表示したものである。空中像は現実空間と映像空間の境界となってしまうスクリーンを必要としないため、像に手を伸ばすことによる映像とのインタラクションが可能である。また、映像空間と現実空間を融合させた情報提示も可能であり、その性質を活かしてミュージアムの展示などに利用されている。

空中像の光源として 1 つの 2 次元ディスプレイを用いる場合、空中像の表示範囲は 1 平面に限られる。空中像に奥行きをもたせ、より豊かな情報提示をするためには、光源として立体ディスプレイを用いる方法や、ディスプレイをハーフミラーなどで多層化する方法がある。ハーフミラーによるディスプレイ多層化には、両眼視差を原理とした立体ディスプレイよりも広範囲な奥行きに映像を表示できるという利点がある。一方で前後層の光が加算されて、透けて見えてしまいオクルージョン表現ができないという問題（オクルージョン問題）がある。この問題の原因はハーフミラーが光の加算装置であり、前後層どうしで加法混色が生じていることにある。

本研究の目的は、空中像の前後関係の光学的整合性をとり、視点位置に依らずに後層が前層に遮蔽される空中像を実現することである。この目的の実現手法として、本稿では光の加算と減算の両方を用いる方法を提案する。光の加算とはハーフミラーによる前後層の重ね合わせであり、光の減算とは透明液晶ディスプレイを用いた動的マスクによる後層の光の遮蔽である。さらに本手法の有用性を示すためにマスクの有無による像の見やすさに関する心理物理実験を行った。図 1 にマスクの有無によって、実際に空中像の見えが変化している結果を示す。

### 2. 関連研究

#### 2.1. 空中像

空中像を結像する光学系は、よく知られているものでは凹面鏡やフレネルレンズがある。フレネルレンズを用いている空中像の例としては、Fuwa-Vision[1]やHaptoMIRAGE[2]などがある。また、レンズアレイを用いて結像するRepro3D[3]などの例もある。しかし、これらの光学系は収差の影響で奥行き方向に像の歪みが出てしまうという問題があった。

像の歪みがない光学系としては、実像鏡と呼ばれる光学

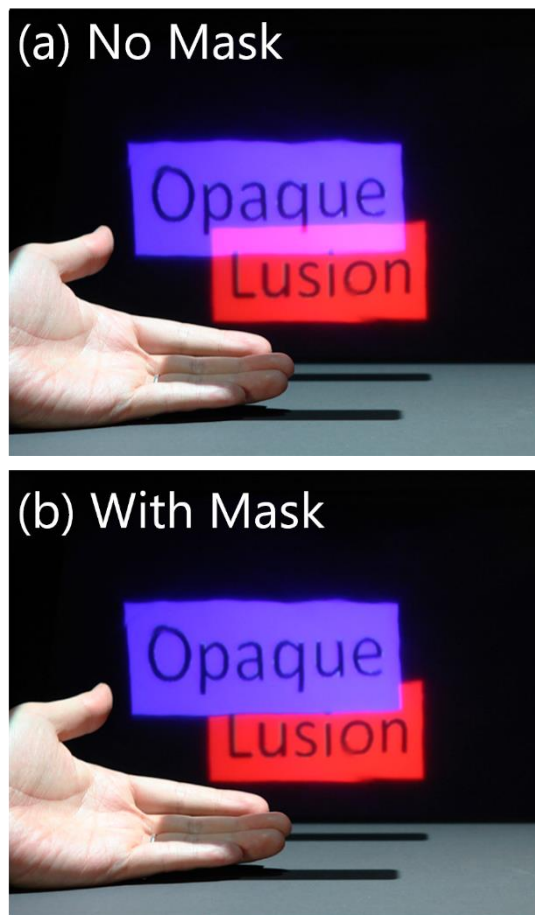


図 1 オクルージョン表現の有無による見えの変化

系がある。実像鏡は微小なミラーアレイによって入射光を 2 軸再帰反射させて鏡面对称の位置に結像させる。実像鏡に分類される素子は、2006 年に登場した DCRA[4]をはじめとして、再帰透過性素材[5]、AI プレート[6]、CMA[7]などがある。実像鏡によって結像される空中像は、光源位置と結像位置が線形であり、視点位置による歪みがなく従来の実像光学系より扱いやすいという利点がある。

空中像は光学系の手前に表示できるので、その性質を利用したインタラクションシステムが提案されている。例としては MARIO [8]、HORN [9]、AIRR Tablet [10]が挙げられる。いずれも空中像に手を伸ばしてインタラクションするシステムであるが、操作できる映像レイヤは 1 層のみであった。

空中像とインタラクションすることを考えると、より豊かな情報提示をするために、複数の奥行きに映像を提示する方法が考えられる。光源を立体ディスプレイにすると奥行きのある映像を出すことはできるが、融合限界によって表示可能な奥行き範囲の制限がある[11]。そこで、より広

† 東京大学大学院 情報理工学系研究科,  
Graduate School of Information Science and  
Technology, The University of Tokyo

‡ 東京大学大学院 情報学環,  
Interfaculty Initiative in Information Studies, The  
University of Tokyo

範囲の奥行きへ映像を提示するために多層化したディスプレイを光源とする方法が用いられる。ハーフミラーなどでディスプレイを多層化すれば、融合限界以上の奥行き範囲に複数の像を表示することが可能である。

多層の空中像を表示するには、フレネルレンズを用いると収差の問題で奥行きに歪みが出てしまうという難点があった。実像鏡を用いた光学系では、光源と像で奥行き線の線形性が保たれるため、多層空中像を出すことが現実的になってきている。ただし、像の奥行きは反転されるため、正しい奥行き向きに直すためには、2枚の実像鏡を通して結像させる必要がある[12]。

## 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2つの方法がある。

光を加算していく方法の例としては、パリオフォーカルミラーによる方法[13]や、DepthCube[14]のように複数枚の液晶拡散スクリーンを用いる方法、Exfloasion[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とともに、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おうという欠点がある。

光を減算する方法は透明液晶ディスプレイを並べる方法がある。Tensor displays[17]では、多層の透明液晶で光を減算していくことで、光線空間を再現することで立体を形成することを目的としている。DFDディスプレイ[18]は前後の輝度差によって奥行きを融合させる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、HMDの分野ではオプティカルシースルーHMDのELMO[19]で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例がある。この例では、実世界と映像をハーフミラーによる光の加算によって重ね合わせ、実世界の一部を見えなくするために、透明液晶による光の減算を行っている。多層ディスプレイの場合も、光の加算(=映像の多層化)と、光の減算(=動的マスクング)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。

## 3. 提案手法

空中像の前後関係の光学的整合性をとり、視点位置に依らずに後層が前層に遮蔽される空中像を実現するために、本研究では光源をハーフミラーで多層化し、さらに動的マスクによって遮蔽する方法を提案する。本章では、その光学系の構成について述べる。

### 3.1. オクルージョン表現可能な多層化手法

ディスプレイを多層化する方法として、ハーフミラーを用いる方法を図2に示す。ハーフミラーに反射されるディスプレイの虚像と、透過されるディスプレイが重なるため、2つのディスプレイの表示を重ねて見ることができる。

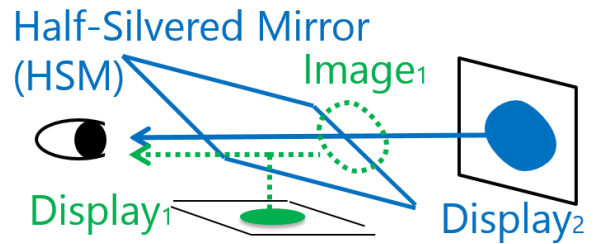


図2 ハーフミラーによる多層化

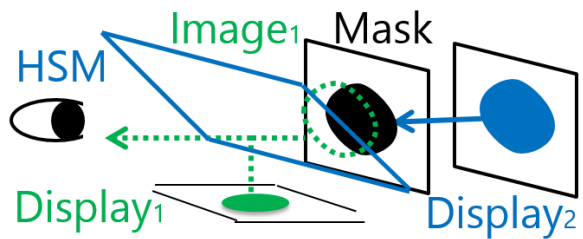


図3 ハーフミラーと動的マスクによる多層化

しかし、この多層化方法には、後層の光線が前層と重なって、透けて見えてしまい、オクルージョン表現できないという問題がある。ハーフミラーは光の加算装置であるため、前後の層の加法混色が起こってしまうのが原因である。このオクルージョン問題を解決するためには、次に示すような光の減算装置である動的マスクによる遮蔽が必要になる。

オクルージョン表現可能な多層化手法は、図3に示すように後層からの光を動的にマスクすることで実現できる。このときマスクは前層ディスプレイの虚像と同位置に設置する。光学では光源と像の位置を共役な位置と呼ぶが、この手法では前層ディスプレイとマスクをハーフミラーに対して共役な位置に置くことが重要な要素である。このような配置にすることで、前層の像とマスクがぴったりと重なり、ユーザの視点位置によらず正しく後層の像をマスクすることができる。

マスク用の装置としては透明液晶ディスプレイを用いる。透明液晶ディスプレイ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。本稿では透明液晶ディスプレイのことを、液晶マスクと呼ぶ。

今までの論をまとめると、この遮蔽手法は多層化の際に起こる加法混色を、マスクの減算作用によって防ぐというものである。

これをN層化したときの構成を図4に示す。ディスプレイ*i*の輝度を $D_i$ 、マスク*i*の透過率を $T_i$ 、ハーフミラー*i*の透過率 $H_i$ 、反射率 $1 - H_i$ とおくと、多層化された*k*層目の輝度 $L_k$ は次のように表される。

$$L_1 = (1 - H_1)D_1 \quad (1)$$

$$L_k = (1 - H_k) \prod_{i=1}^{k-1} (T_i H_i) D_k \quad (2 \leq k \leq n - 1) \quad (2)$$

$$L_n = \prod_{i=1}^{n-1} (T_i H_i) D_n \quad (3)$$

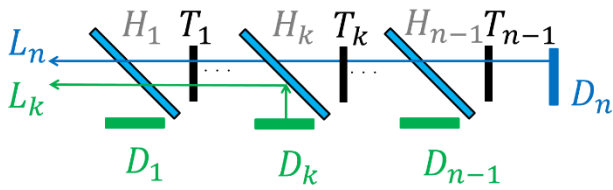


図 4 オクルージョン表現可能な N 層化

### 3.2. 光学系の構成

以下、実装は 2 層で進める。本システムは図 5 のように構成した。

遮蔽原理を担うのは図 5 の右下部分である。前層ディスプレイとマスクはハーフミラーに対して光学共役の位置に配置されている。このように配置することで、後層ディスプレイからの光は、あたかも前層の像によってマスクされているように見える。

本システムでは、後層からの光を前層がマスクするためディスプレイの前後関係が重要な要素である。しかし、実像鏡によって結像された像は奥行き方向に反転するという性質がある。そのため実像鏡を用いてディスプレイ光源を多層空中像として結像するには、実像鏡を 2 枚用いて一度反転した奥行きを再反転させる必要がある。

本システムで表示される各層の輝度  $I_k$  は、実像鏡の輝度効率を  $R$  とおくと以下の式であらわされる。

$$I_k = R^2 L_k \quad (4)$$

$$= \begin{cases} R^2(1 - H_1)D_1 & (k = 1) \\ R^2(1 - H_k) \prod_{i=1}^{k-1} (T_i H_i) D_k & (2 \leq k \leq n-1) \\ R^2 \prod_{i=1}^{n-1} (T_i H_i) D_n & (k = n) \end{cases} \quad (5)$$

$$(6)$$

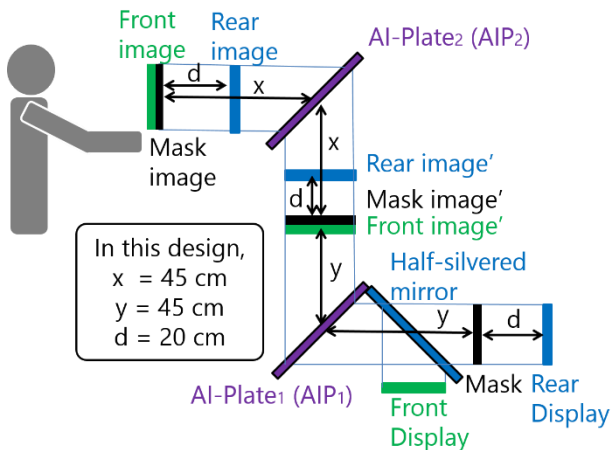


図 5 提案する多層空中像光学系

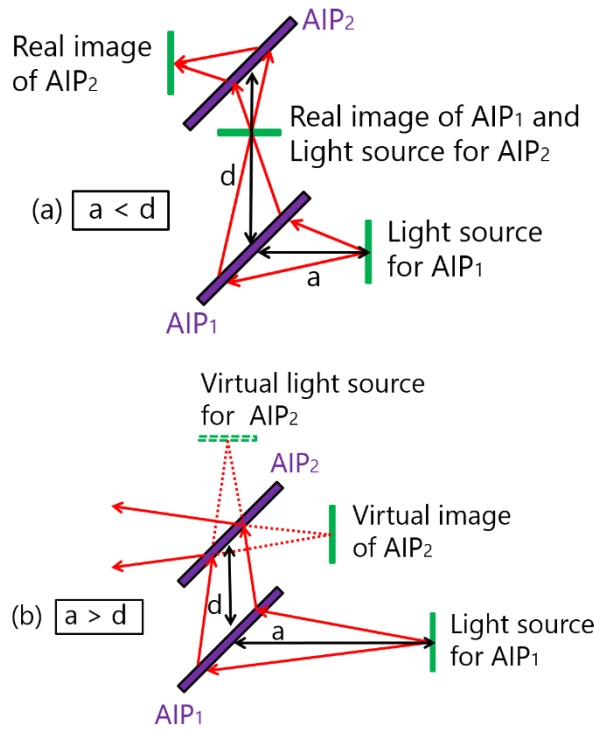


図 6 実像鏡の間隔による空中像の結像位置の違い

#### 3.2.1. 各光学系の間隔の設計

2 つの実像鏡の間隔と光源の配置によっては、空中像が手元に結像されないことがある。図 6 (a)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。その実像がさらに光源となり、2 つめの実像鏡に入射することで、2 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)では実像鏡の間隔が光源位置よりも狭く、実像鏡間で実像を結像しない。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 6 (b)のように  $a > d$  となる配置にすると、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

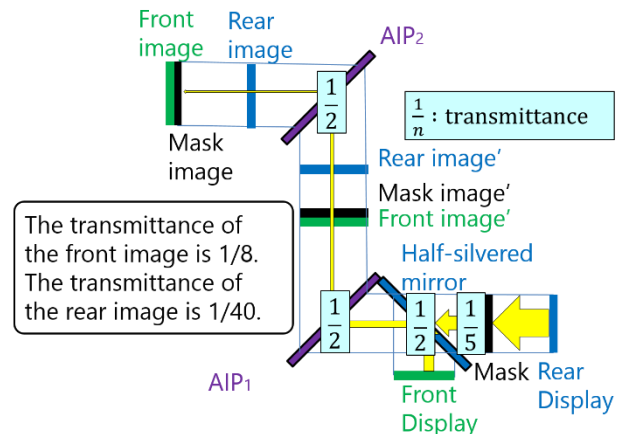


図 7 各光学装置の透過率

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。

2枚の実像鏡の間隔は、空中像の飛出し距離  $x$  と、ディスプレイ距離  $y$  によって決定される。図 5 をみると、ディスプレイ距離  $y$  はハーフミラーに最接近したときに最小値をとる。空中像の飛び出し距離  $x$  に関しては、インタラクションしやすい距離を選んだ。本システムでは、 $x = 45$  cm,  $y = 45$  cm に設定した。 $x, y$  の設定から、2つの実像鏡の間隔が  $x + y = 90$  cm となるように配置した。

### 3.2.2. 表示される空中像の輝度設計

表示される空中像の輝度は各層すべて等しいことが望ましい。N 層化されたディスプレイの各層の輝度をそろえるためには、以下の関係式を満たすように k 層目のディスプレイ輝度を調整する必要がある。

$$D_k = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} (T_i H_i)}{(1 - H_k) \prod_{i=1}^{k-1} (T_i H_i)} D_n \quad (1 \leq k \leq n-1) \quad (7)$$

本システムの光線経路と輝度減衰箇所を図 7 に示す。なお、液晶マスクに関しては、最大透過率  $T$  が  $1/5$  であるものとし、ここではマスクをオフにしている場合を考える。各層の輝度減衰率は(4)~(6)式を用いて計算することができる。この図が示すように、前層ディスプレイから出た光は、まずハーフミラーによる反射時に減衰し ( $1 - H_1 = 1/2$ )、2つの AIP を通るごとに減衰され ( $R = 1/2$ )、結果として表示される空中像の輝度は、(4)式を用いて光源ディスプレイの輝度の  $1/8$  まで減衰することがわかる。後層ディスプレイから出た光は、前層での減衰箇所に加えてマスクの減衰分 (透過率  $T = 1/5$ ) があるため、後層空中像の輝度は、(6)式を用いて光源ディスプレイの輝度の  $1/40$  まで減衰することがわかる。

ここで 3 層の空中像を作ることを考えると、一番輝度減衰が大きいのは最後層の空中像であり、その輝度は光源ディスプレイの  $1/400$  まで減衰する。現在、高輝度ディスプレイとして入手できるものの輝度は、高々  $2000$  cd/m<sup>2</sup> であるので、3 層空中像の最後層の輝度は高々  $5$  cd/m<sup>2</sup> である。この輝度では暗室であれば見ることが可能だが、屋内の通常の照明条件では見るのは困難である。

先の議論で分かるように、本手法では 4 層以上の実装は輝度の面で難しく、3 層であっても暗室であれば見えるという程度に輝度が減衰してしまう。本手法は現実的には 2 層、多くても 3 層での実装が適しているといえる。

### 3.2.3. 光学系の実装

プロトタイプ 1 として、以下の機器を使用した。ディスプレイが前後同種で EIZO FlexScan S1903 (19 インチ, SXGA 1280x1024 ピクセル,  $250$  cd/m<sup>2</sup>, コントラスト 1000:1), 液晶マスクが SAMSUNG LTI220MT02 (22 インチ, WXGA 1680x1050 ピクセル, 最大透過率 20%), 実像鏡が ASUKANET, AI プレート (340x340mm), ハーフミラーが Edmund プレート型ビームスプリッター (50/50 R/T(%), 254x356mm) である。

装置の概観を図 8 に示す。この図ではディスプレイ類がむき出しになっているが、実際は吸光材で覆うことで、外光の影響を小さくした。

本装置で表示した空中像の例を 2 つ示す。図 9 はマスクの有無による空中像の見えの違いを示している。マスクなしの場合は前後層で混色が生じているが、マスクありの場

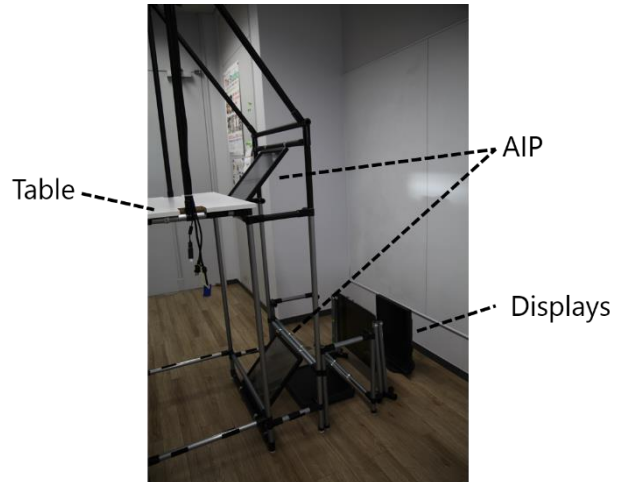


図 8 実装した 2 層空中像光学系

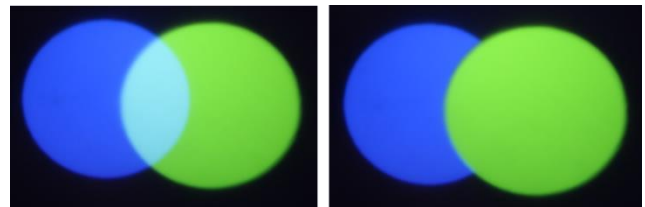


図 9 マスクの有無による空中像の見えの変化  
左: マスクなし 右: マスクあり

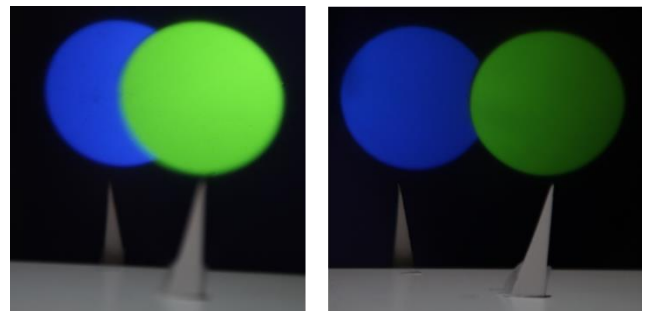


図 10 視点位置による空中像の見えの変化  
左: 左視点 右: 右視点

合は前後層の混色が生じていないのがわかる。図 10 は視点位置による空中像の見えの違いを示している。図中の右の円の方が手前に位置しているため、観測者の視点位置によって、前後層の重なり部分の占める領域が変化することが見てとれる。

## 4. 実験

### 4.1. 概要

本章では 2 つの実験によって、提案手法の遮蔽に関する評価と見やすさに関する評価を行う。1 つめの実験では、マスクの階調を 0 から 255 まで変化させることによるマスクされている空中像の輝度の変化を測定し、遮蔽に関する評価を行う。2 つめの実験では、マスクの有無を条件として、参加者に前の層の数字を回答させ、その回答時間を調べ、見やすさに関する評価を行う。

## 4.2. 光学的遮蔽効果の輝度測定実験

### 4.2.1. 目的

液晶マスクによって遮蔽が実現されているか輝度測定によって確認した。また、液晶マスクは階調を変えられることができるので、各階調における空中像の輝度変化を計測した。

### 4.2.2. 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。液晶マスクの階調設定変化によるマスク透過率の変化を測定した。

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。使用した液晶マスクの階調は 256 段階だが、測定は 5 ずつ変化させ、52 点で行った。実験は蛍光灯下 520lx の明所で行った。実験の様子を図 11 に示す。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。

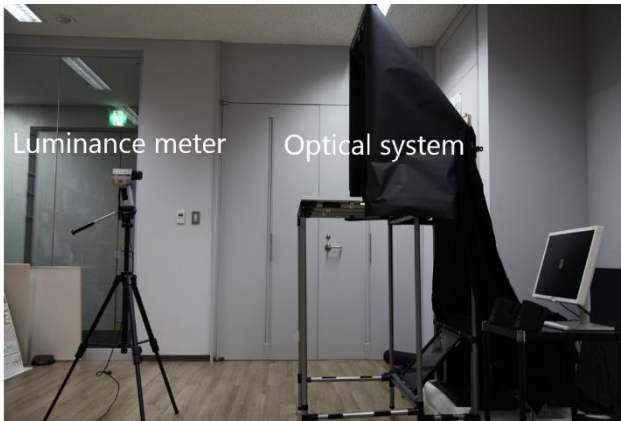


図 11 輝度計測の様子

### 4.2.3. 結果

実験の結果を図 12 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。

液晶マスク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マスク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わかる。

## 4.3. 読字課題におけるマスク効果に関する実験

### 4.3.1. 目的

空中像をマスクすると、前に表示される空中像の視認性が向上すると考えられる。ここでは後層の空中像をマスクすることで前層の空中像が見やすくなるか評価した。

The transmittance of the mask

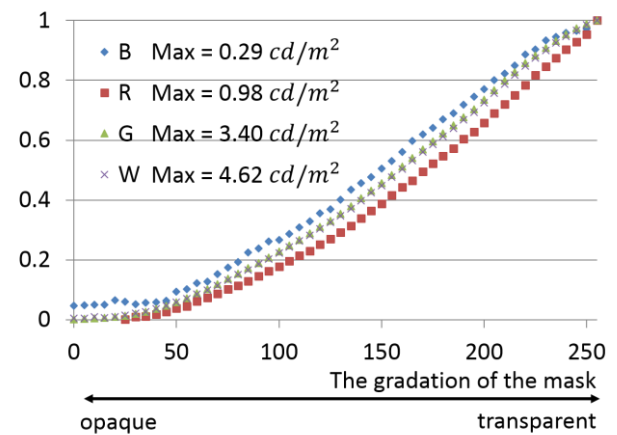


図 12 最大透過率を 1 としたときのマスクの階調と透過率の関係

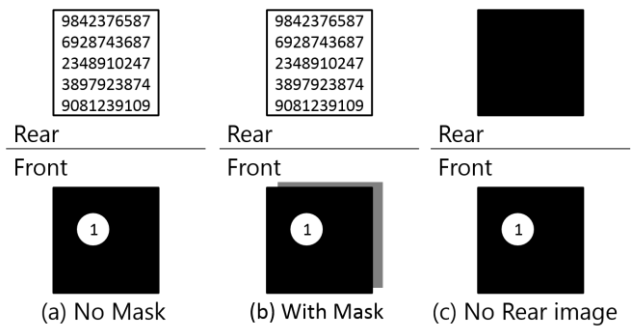


図 13 参加者に見せた画像の模式図

### 4.3.2. 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。

参加者には前層に表示される 1 から 9 までの数字を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指示した。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。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。

表示する 3 パターンは図 13 にあるように、「マスクなし」、「マスクあり」、「背景なし」の 3 種類である。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 × 15 cm 内に敷き詰めた。各パターンの実際の見え方を図 14 に示す。

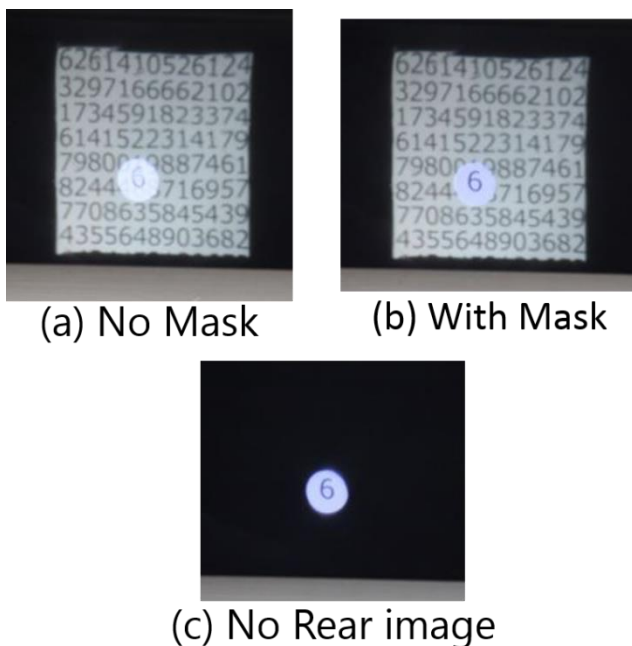


図 14 被験者に見せた実際の画像

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。3 つのパターンの実験順序は参加者ごと変えた。参加者が回答している様子を図 15 に示す。

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えた。
3. 参加者に実験の感想を聞いた。

前後の空中像の輝度が同じになるように、背景用のディスプレイに関しては輝度を最大に設定し、前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。

#### 4.3.3. 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 16 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

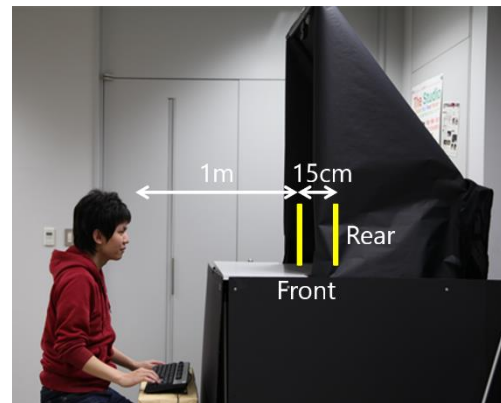


図 15 参加者が回答している様子

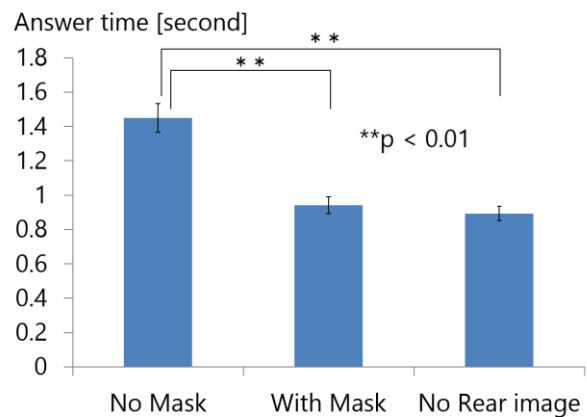


図 16 各パターンの平均回答時間

#### 4.4.1. 解答時間に関する考察

心理実験の結果から、マスクがあると回答時間が短くなることがわかった。これはマスクによって空中像の透過がなくなり、表示が見やすくなったからだと考えられる。空中像が透明でない場合は、背景の有無による回答時間の差は見られなかった。

マスクなしの回答時間が長くなったのは、空中像が透けてしまって見にく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 1 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。後ろが透過してくるため、前と後ろの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 16 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

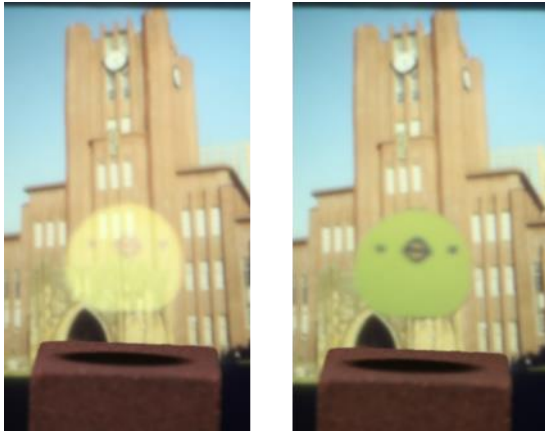


図 17 バーチャルキャラクタとインタラクション可能なアプリケーション  
左：マスクなし 右：マスクあり

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 2 つのパターンで有意差がでた参加者はいなかった。図 16 の結果とも一致した。

#### 4.4.3. 本システムの応用例

本節では本システムの応用例を 2 つ示す。輝度測定実験にて表示される空中像の輝度が小さかったことから、アプリケーション制作時にはプロトタイプ 1 からディスプレイを変更して、高輝度ディスプレイ SLD1968 V2 (1600 cd/m<sup>2</sup>) を用いたプロトタイプ 2 に変更した。

本システムの応用例の 1 つとして、映像内のキャラクタを現実空間に空中像として表示した例を図 17 に示す。空中像とインタラクションするためにデプスセンサでテーブル上のオブジェクトの高さをリアルタイムに測定し、空中像はテーブル上の一番高いオブジェクトの上にジャンプするようにした。また、空中像は表示されている奥行きがわかりにくいという問題があるので、奥行き知覚の補助として結像位置にプロジェクタで影を投影している。マスクがあることで空中像の見やすさが向上していることがわかる。

2 つめの応用例として、ミュージアム展示での利用を目的としたアプリケーションを図 18 に示す。先行研究 [15][16]においても、展示物のそばに空中像を表示し演出するという試みはなされてきた。しかし、これらは空中像を重ねて表示することができなかった。図 18 のアプリケーションは背景に上空の映像が映し出され、飛行機に触れるとその部分の名称が表示されるようになっている。本システムを用いることで後層の背景映像が適切にマスクされ、前層の説明を見やすい状態に保つことができる。

## 5. 結論

本研究では、多層空中像のための光源として液晶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、輝度測定と心理物理実験の 2 つの実験を行った。輝度測定では、液晶マスクの階調によって遮蔽されている空中像の輝度変化を計測した。実験の結果、液晶マスクによってオクルージョン表現が実際に可能であることが確認できた。

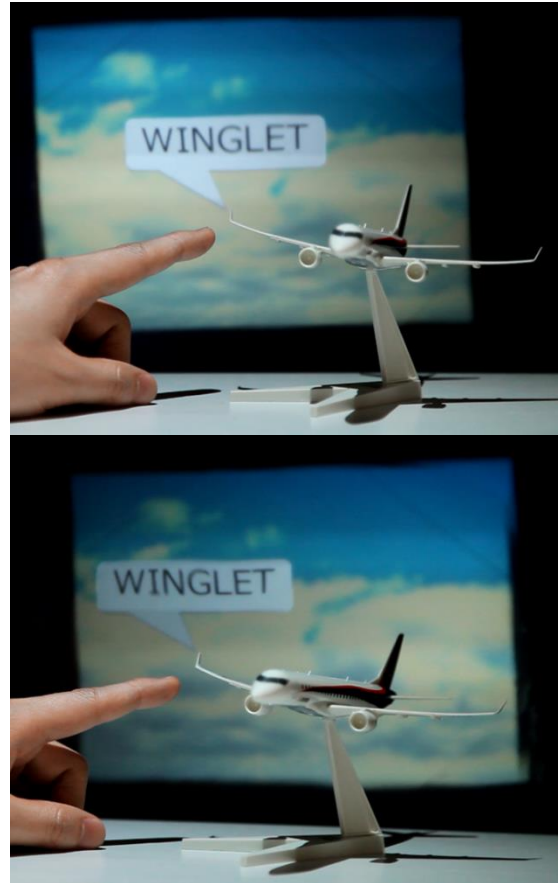


図 18 展示物へのキャプション  
上：左視点 下：右視点

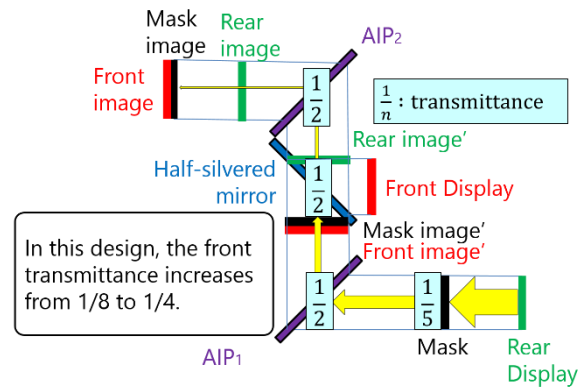


図 19 最前層はハーフミラー位置の変更によって高輝度化が可能

心理物理実験では、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わかった。

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、空中像の見やすさが向上することが示唆された。

今後の展望として、輝度効率を上げることを考えると、1 層目だけはハーフミラーによる加算位置を変更することで輝度を上げることができる。例えば 2 層で実装するときには図 19 のように配置する。このようにすれば 1 層目の輝度

$I_1$ は $R^2L_1$ から $RL_1$ となり、 $1/R$ だけ効率を上げることができる。

輝度効率を上げるもう1つの方法は、ハーフミラーの代わりに反射型偏光子を用いることが考えられる。反射型偏光子はp波とs波で反射・透過率が異なる光学素子である。これを用いることで、最奥層とその1つ手前の層の輝度を上げることができると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部はJST CREST「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」領域「局所性・指向性制御に基づく多人数調和型情報提示技術の構築と実践」による助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Hideaki Nii, Kening Zhu, Hiromi Yoshikawa, Nyan Lin Htat, Roland Aigner, and Ryohei Nakatsu: "Fuwa-Vision: an auto-stereoscopic floating-image display", SIGGRAPH Asia 2012 Emerging Technologies Article No. 13 (2012).
- [2] Yuta Ueda, Karin Iwazaki, Mina Shibasaki, Yusuke Mizushina, Masahiro Furukawa, Hideaki Nii, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi: "HaptoMIRAGE: mid-air autostereoscopic display for seamless interaction with mixed reality environments", SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Posters Article No. 30 (2014).
- [3] Yoshida Takumi, Shimizu, K., Kurogi, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H., Tachi, S.: "RePro3D: full-parallax 3D display with haptic feedback using retro-reflective projection technology", VR Innovation (ISVRD), 2011 IEEE International Symposium on. pp.49-54, (2011).
- [4] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba: "Transmissive optical imaging device with micromirror array", Proc. SPIE 6392, Three-Dimensional TV, Video, and Display V, 63920E (2006).
- [5] 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". 映像情報メディア学会技術報告 32(22), 7-12, (2008).
- [6] ASUKANET: "AI Plate", <http://aerialimaging.tv/> (2015.6.24 access).
- [7] Hirotsugu Yamamoto, Ryouyuke Kujime, Hiroki Bando, Shiro Suyama: "Aerial LED signage by use of crossed-mirror array", Proc. SPIE 8643, Advances in Display Technologies III, 864302 (2013).
- [8] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Takayuki Kai, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura: "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).
- [9] Seki Inoue, Koseki J. Kobayashi-Kirschvink, Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda: "HORN: the hapt-optic reconstruction", SIGGRAPH '14 ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, Article No. 11 (2014).
- [10] 安井雅彦, M. Sakti Alvissalim, 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).
- [11] 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" pp.23-25 (2008).
- [12] Hirotsugu Yamamoto, Hiroki Bando, Ryouyuke Kujime, and Shiro Suyama: "Multi-layered aerial LED display with occlusions between layers", JSAP-OSA Joint Symposia. 17a\_D5, (2013).
- [13] Smoot, Lanny S., Quinn Smithwick, and Daniel Reetz: "A volumetric display based on a rim-driven varifocal beamsplitter and LED backlit LCD." SIGGRAPH Emerging Technologies. (2011).
- [14] Alan Sullivan: "DepthCube solid-state 3D volumetric display", Proc. SPIE 5291, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, 279 (2004).
- [15] Totaro Nakashima, Takuro Wada, and Takeshi Naemura: "Exflosion: Multi-layered Floating Vision System for Mixed Reality Exhibition", 16th Intern. Conf. Virtual Systems and MultimediaVSMM2010, pp. 95-98 (2010).
- [16] Hanyuool Kim, Shun Nagao, Satoshi Maekawa, Takeshi Naemura: "MRsionCase: a glasses-free mixed reality showcase for surrounding multiple viewers", SA '12 SIGGRAPH Asia 2012 Technical Briefs Article No. 10 (2012).
- [17] Gordon Wetzstein, Douglas Lanman, Matthew Hirsch, and Ramesh Raskar: "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).
- [18] 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", 映像情報メディア学会誌 映像情報メディア 58(6), 807-810, (2004).
- [19] Kiyoshi Kiyokawa, Mark Billingham, Bruce Campbell, and Eric Woods: "An Occlusion-Capable Optical See-through Head Mount Display for Supporting Co-located Collaboration", ISMAR '03 Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality p. 133, (2003).