

スマートフォンで利用可能な 小型多層空中像投影装置の提案

巻口 誉宗^{1,a)} 新島 有信^{1,b)} 高田 英明^{1,c)} 松井 龍也^{1,d)} 藪本 康之^{1,e)} 横山 正典^{1,f)}

概要: デジタル情報をあたかも実空間に存在するかのように投影する「空中像投影技術」が注目され、近年はスマートフォンを用いた小型の空中像投影装置も実用化されている。一方で、既存のスマートフォンを用いた空中像投影装置では、複数の空中像を多層に投影する際に「空中像同士の奥行間隔を任意設計できない」、「空中像同士の重なり表現が困難」といった課題があり、空中像で表現可能なコンテンツや適用先、適用可能技術が制限されるといった問題を生じている。そこで本稿では、ハーフミラーとフルミラーを組み合わせる空中像を多層に投影するV字ミラー方式(V字式)を提案し、この方式により前面の空中像と後面の空中像の奥行間隔を任意に設計できることを示す。また、空中像同士の重なり表現について、前面の空中像の輝度を後面の空中像より高めるアプローチに注目し、前後の空中像の奥行位置を反転する奥行反転V字ミラー方式(DR式)を提案する。これら2つの方式に対し被験者による透過性の印象評価を行うことで、前後の空中像の輝度比調整によって空中像同士の重なり表現が可能なること、DR式がV字式と比較して空中像をより鮮明に投影できることを示す。

Proposal of Compact Multilayer Floating-Image Projection System Using Smartphone

MOTOHIRO MAKIGUCHI^{1,a)} ARINOBU NIIJIMA^{1,b)} HIDEAKI TAKADA^{1,c)} TATSUYA MATSUI^{1,d)}
YASUYUKI YABUMOTO^{1,e)} MASANORI YOKOYAMA^{1,f)}

Abstract: A system that projecting floating-image is used for many scenes like live concerts, exhibitions and smartphone's gadgets. In this paper, we solved 2 problems of existing system for multilayer floating-image projection using smartphone that "adjusting the depth distance between floating-images" and "expressing the overlap of floating-images". We propose "V-shaped mirror system(V-system)" and "Depth Reversed V-shaped mirror system(DR-system)", and show the both system can solve the problem of adjusting the depth distance between floating-image. We evaluate the expression of the transparency between foreground floating-image and background, and show the DR system can project the foreground floating-image more brightly and clearly than the V-system.

1. はじめに

デジタル情報をあたかもその場に存在するかのように実

空間へ投影する「空中像投影技術」が注目され [1]、舞台装置におけるアーティストの等身大投影 [2] や、パブリックビューイングにおけるスポーツ中継 [3]、展示システムにおける情報重畳 [4]、[5] やバーチャルキャラクタ投影 [6]、[7] 等、様々な応用が提案されている。

上記のような、舞台や展示物で使われる空中像投影装置は大掛かりな構成のものが多く、ユーザは設置場所に行かねば視聴できないが、近年はスマートフォンを用いて空中像を視聴できる手のひらサイズの空中像投影装置も実用化されている [8]、[9]、[10]、[11]。こうしたスマートフォンを

¹ NTT サービスエボリューション研究所
1-1 Hirarinooka, Yokosuka-shi, Kanagawa-ken 239-0847, Japan

a) makiguchi.motohiro@lab.ntt.co.jp

b) niijima.arinobu@lab.ntt.co.jp

c) takada.hideaki@lab.ntt.co.jp

d) matsui.tatsuya@lab.ntt.co.jp

e) yabumoto.yasuyuki@lab.ntt.co.jp

f) yokoyama.masanori@lab.ntt.co.jp

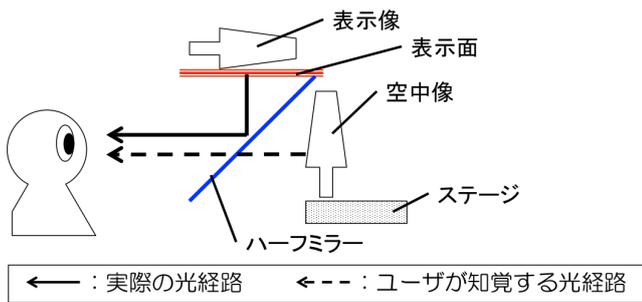


図 1 ハーフミラーを用いた空中像投影の仕組み

Fig. 1 The principle of the projecting system for floating-image using a half mirror

用いた小型空中像投影装置は、大掛かりな装置との比較において空中像を個人で手軽に楽しめる点に加え、空中像のサイズも小型であるためにジオラマ鑑賞のようなミニチュアとしての楽しみ方や、装置を手を持って鑑賞することによるパーソナル感・覗き込むことによる没入感の向上等、小型ならではの利点があると考えられる。我々は、こうした利点からスマートフォンで利用可能な小型空中像投影装置に注目し、ユーザへの新たな空中像視聴体験の提供、デジタルコンテンツ市場における空中像分野の確立、空中像の新たな適用先の発掘等を目的として技術検討を進めている。

以下で、スマートフォンを用いた既存の小型空中像投影装置の原理と、本稿で注目する課題を述べる。

1.1 小型空中像投影装置の先行事例

空中像を投影する手法のひとつとして、図 1 のようなハーフミラーを用いた構成がある。ディスプレイやスクリーン等の表示面に黒背景のオブジェクトを表示し、ハーフミラーによってユーザ方向に反射させることで、ユーザはオブジェクトの虚像をステージ上に空中像として知覚する。この手法はシンプルな構成で安価に高精細な空中像を投影できることから、スマートフォンを用いた小型空中像投影装置に広く用いられている [8], [9], [10], [11]。例として、株式会社タカラトミーアーツの「おえかきすいそうピクチャリウム」[8] は、ユーザが描いた手書きの魚をスマートフォンに表示し、上記の仕組みによって空中像として水槽内に投影する装置である。また、株式会社バンダイの「ハコビジョン」[9] は、空中像を装置内の建物のフィギュア（実物体）に重畳することで、手軽にプロジェクションマッピングを楽しめる装置である。

これらはいずれも 1 層の空中像を投影する装置であるが、空中像が 1 層では立体感が低く [4]、重畳する実物体と比べて平面的になりやすい [5] 等の課題が指摘されており、この課題を解決するために複数のモニターを用いて空中像を 2 層以上に重ねて投影する多層空中像投影手法が提案されている [4], [5], [7]。また、スマートフォンを用いた小

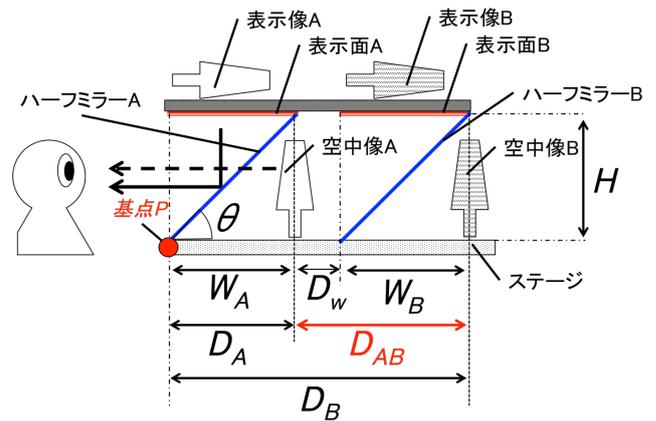


図 2 ハーフミラーによる多層空中像投影の例

Fig. 2 The example of the projecting system for multilayer floating-image using half mirrors

型の空中像投影装置としても、Palm Top Theater B.V. 社の「Palm Top Theater」[10] や株式会社ポニーキャニオンの「スマホロ」[11] では、図 2 のようにスマートフォンの表示面を分割し、複数のハーフミラーを分割した表示面の下にそれぞれ設置することで、多層空中像投影を実現している。この手法ではハーフミラー同士が平行に配置されることから、以下ではこの既存手法を「平行ミラー方式（平行式）」と定義する。

1.2 課題と要件

平行式はひとつのモニタの表示面を分割するだけで手軽に空中像を多層化できる一方で、以下の 2 つの課題がある。

課題 1 空中像同士の奥行間隔を任意設計できない。

課題 2 空中像同士の重なり表現が困難。

以下にそれぞれの課題の詳細を述べる。

まず説明を単純化するため、図 2 のハーフミラーの設置角度を $\theta = 45^\circ$ とし、それぞれの表示面の幅 W_A, W_B と、空中像の高さ H に下記の関係が成り立つものとする。

$$W_A = W_B = H \quad (1)$$

図 2 において、装置の左端 P を基点とした空中像 A の奥行方向の表示位置 D_A は、ハーフミラーが 45° に設置されているため基点 P と表示面 A までの距離（空中像の高さ H ）と等しく、 $D_A = H = W_A$ となる。また、空中像 B の表示位置 D_B は、表示面 A と表示面 B の間隔を D_w とすると、

$$D_B = W_A + D_w + W_B \quad (2)$$

となり、表示像 A と B との奥行間隔 D_{AB} は、

$$\begin{aligned} D_{AB} &= |D_B - D_A| \\ &= |(W_A + D_w + W_B) - (W_A)| \\ &= D_w + W_B \end{aligned}$$

となる。また、式 (1) $W_B = H$ の条件を適用すると、

$$D_{AB} = D_w + H$$

となる。すなわち、この手法では空中像同士の奥行間隔 D_{AB} は、空中像の高さ H より短くすることができず ($D_{AB} \geq H$)、任意に設計できない (課題 1)。

平行式はこの課題により、既存の舞台装置や展示システム等の任意の奥行位置に空中像を投影可能な装置と比較して以下の 3 つの制約が生じる。

コンテンツへの制約

再生するコンテンツが空中像の距離設計範囲内のものに限定される。例えばライブコンサートにおける歌手とバンドメンバ等、奥行間隔が比較的近い被写体を別々の層に表示したい場合、平行式では表示したい位置関係で複数の空中像が投影できない。

適用先への制約

特に MR (Mixed Reality) において、適用先が限定される。例えば実物体へ空中像を重畳表示するハコビジョンのような用途において、平行式では実物体の任意の位置に複数の情報を提示することができない。

適用可能技術への制約

空中像をより高臨場化するための 3 次元立体表示技術や AR (Augmented Reality) 技術等の適用が制限される。

3 つ目の「適用可能技術への制約」の対象となる技術例として、DFD (Depth-fused 3-D) [12] と呼ばれる立体表示技術がある。DFD は二つの透過表示面を奥行間隔 3 mm ~ 5 mm で前後に設置し、前後表示面の輝度比の変化によって見かけの奥行距離を変化させる技術である。この技術を空中像に適用することで、ユーザに体積を持った空中像を知覚させることが可能になると考えられるが、平行式では空中像の高さを 3 mm ~ 5 mm にする以外に 2 つの空中像の奥行間隔を短くすることができず、適用が困難である。また、AR では影をつけることで現実空間の景色に重畳したデジタル情報の臨場感が向上することが知られており [13]、空中像の足元に影を投影する展示システムも提案されている [6]。この手法を多層空中像に適用し、例えば前面に表示した空中像の影を後面の空中像に投影することで臨場感が向上すると考えられるが、平行式では後面の空中像が前面の空中像から離れた位置に表示されるため、違和感なく影を投影できる範囲や効果が限定される。

上記の奥行間隔設計の課題に加え、ハーフミラーを用いた多層空中像投影では、それぞれの空中像の光が加算してユーザに知覚されることで、前面の空中像 (以下、前面空中像) に対して、後面の空中像 (以下、後面空中像) や背景に設置した実物体が透過し、空中像同士の重なりを表現できない [7], [14] という課題も指摘されている (課題 2)。

そこで本稿では、課題 1、課題 2 を解決する下記 2 点を

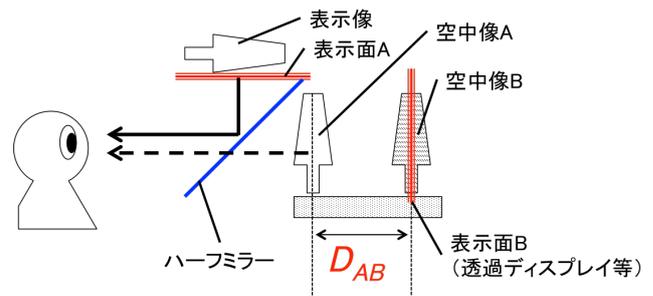


図 3 複数ディスプレイによる多層空中像投影の例

Fig. 3 The example of the projecting system for multilayer floating-image using multi displays

要件とし、これらを解決可能な小型多層空中像投影装置を提案する。

要件 1 空中像同士の奥行間隔の任意設計を可能とする。

要件 2 空中像同士の重なり表現を可能とする。

2 章では、上記要件を満たす手法について、空中像を投影する舞台装置や展示システムでの関連研究の手法とその適用可能性について述べる。3 章では、提案手法「V 字ミラー方式」の説明と、プロトタイプに対して空中像の輝度測定を行った結果を述べる。4 章では、空中像の重なり表現のために、前面空中像の輝度を高める方式として「奥行反転 V 字ミラー方式」を提案し、輝度測定による前面空中像の輝度向上効果を検証する。5 章では、空中像の重なり表現について被験者による印象評価実験とその結果、及び考察を述べる。6 章では、プロトタイプとして実装したアプリケーションについて述べる。最後の 7 章ではまとめを述べる。

2. 関連研究

以下では 1 章で定義した要件について、舞台装置、展示システムでの多層空中像投影装置における解決手法と、我々が対象とするスマートフォン向け小型多層空中像投影装置への適用可能性を述べる。

2.1 空中像同士の奥行間隔の任意設計手法

多層空中像投影を実現するシンプルな手法として空中像の後面にスクリーン等の表示面を追加する手法がある (図 3)。この手法では、背景と空中像の奥行間隔 D_{AB} は表示面 B の位置を変えることで任意に設計できる。しかし、この手法では独立して設置可能な表示面が 2 平面以上必要となり、1 平面しか表示面を持たないスマートフォンには適用できない。

別の多層空中像投影手法として、中島ら [5] は展示システム Exfloasion において、ハーフミラーとレンズを組み合わせることで空中像の結像位置を制御し、展示物の任意の場所に多層の空中像を投影する手法を提案している。また、金ら [4] は、凹面鏡によって空中像を実像として投影し、結

像位置を制御する手法を提案している。これらの手法はレンズや凹面鏡の焦点距離を設ける必要があるため小型化が困難で、スマートフォンでの利用に適さない。

よってスマートフォンでの利用を想定した場合、1平面の表示面で構成可能で、レンズ等の焦点距離が不要な構成を新たに考案する必要がある。

2.2 空中像同士の重なり表現手法

村瀬ら [14] は、等身大の人を空中像として投影可能な装置 ARView において、空中像とステージ上の実物体との重なりを照明プロジェクタによって表現する手法を提案している。これはステージ上の実物体によって空中像が透過するのを防ぐため、空中像と重なる部分が影となるようマスクを生成し、実物体を照らすプロジェクタからの光線の形状・範囲を制御する手法である。この手法を空中像同士の重なり表現に適用し、前面空中像と重なる範囲の後面空中像をソフトウェアでマスクすることで、同様の効果が得られると考えられる。一方でこの手法では、被験者の片目の位置を基準として前面空中像の重なりを判定し、マスク範囲を定めるため、被験者と空中像が近づくほど両眼視差によって奥行表現が正確にできなくなるという問題が挙げられている。我々が対象とするスマートフォンを用いた多層空中像投影装置でも、ユーザの鑑賞位置が近いと両眼視差が働きやすく、さらにユーザの頭の動きによる運動視差も働きやすくと考えられるため、この手法の効果は低いと考えられる。

梶田ら [7] は、ハーフミラーと実像鏡を組み合わせるバリエーションを空中像として投影可能な展示システム OpaqueLusion において、液晶シャッターを用いて前面空中像の形状にあわせて動的にマスクを生成し、後面空中像の重なり部分の光を物理的に遮断してオクルージョンを再現する手法を提案している。この手法は前面空中像の奥行位置で後面空中像の光を遮断するため、村瀬らの手法のような両眼視差、運動視差による問題は生じないと考えられる。一方で、この手法は液晶シャッターを追加する必要があるため、小型化の観点でスマートフォンでの利用に適さない。

よって、両眼視差、運動視差による影響も考慮し、スマートフォンのみで空中像同士の重なりを表現する手法が必要である。

3. V字ミラー方式 (V字式) の提案

我々は要件 1 の「空中像同士の奥行間隔の任意設計」を実現するため、図 2 で平行に配置していたハーフミラーを V 字に配置し、前面のハーフミラーのステージ部分にフルミラーを配置する「V 字ミラー方式 (V-shaped mirror system. 以下、V 字式)」を考案した (図 4)。

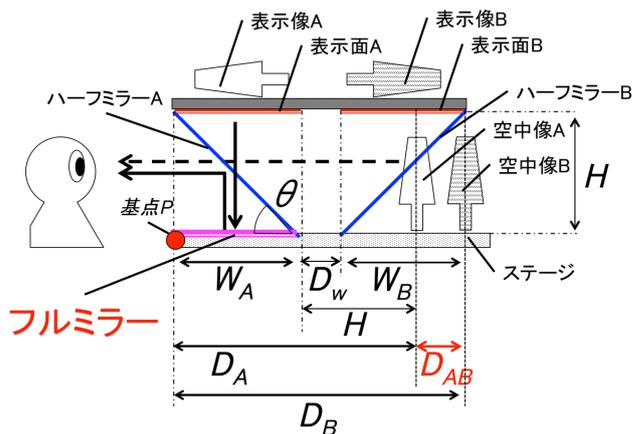


図 4 V 字ミラー方式の仕組み

Fig. 4 The principle of the V-shaped mirror system for projecting multilayer floating-image

3.1 要件 1 「奥行間隔の任意設計」の充足性検討

まず V 字式によって要件 1 の「空中像同士の奥行間隔の任意設計」が可能であることを示す。V 字式は、凹面鏡やレンズ等の光学系を用いず、平面鏡のみの組み合わせで構成されるため、空中像の奥行方向への投影位置を単純な計算式で算出できる。図 4 において、ハーフミラー A はフルミラーで反射された表示像 A をユーザ方向へ反射する。そのため、ハーフミラー A は、図 2 の平行式と比較して空中像の高さ H 離れた位置の表示面 A を反射することと等しく、空中像 A の表示位置 D_A は $D_A = W_A + H$ となる。よって空中像同士の奥行間隔 D_{AB} は、式 (1)、式 (2) より、

$$\begin{aligned}
 D_{AB} &= |D_B - D_A| \\
 &= |(W_A + D_w + W_B) - (W_A + H)| \\
 &= |D_w + W_B - H| \\
 &= D_w
 \end{aligned}$$

となり、空中像の高さ H に依存せず、表示面 A, B の奥行間隔 D_w によって任意に設計できる。よって V 字式は要件 1 を充足する。

3.2 要件 2 「空中像同士の重なり表現」の充足性検討

V 字式において要件 2 の空中像同士の重なり表現が可能かを検証するため、プロトタイプを作成した。プロトタイプは、画面サイズ 5 インチのスマートフォンでの利用を想定し、空中像の高さ $H = 40$ mm, 横幅 $W = 60$ mm, 奥行間隔 $D_{AB} = 15$ mm として設計した。筐体はレーザカッターで黒マットアクリル板を加工し、ハーフミラー A・B には、0.5 mm 透明樹脂板、フルミラーには樹脂ミラー板を用いた。

作成したプロトタイプにスマートフォンで空中像を投影し観察したところ、前面空中像に対して後面空中像が透過し、重なり表現ができないという課題 2 の現象が確認され

表 1 スマートフォンの画面輝度を 1 とした際の V 字式における空中像の輝度比

Table 1 The luminance rate of the floating-image by V-shaped mirror system

測定対象	輝度比
空中像 A (前面)	0.10
空中像 B (後面)	0.09

た. 一方で, 前面空中像に対して後面空中像の明るさを十分に下げることによって, 前面空中像の透過が軽減される現象も確認できた. 我々はこの現象を重なり表現に適用することで, 両眼視差や運動視差に依存せずに空中像同士の重なりを表現できると考えた.

このアプローチの適用可能性を検証するため, まずは V 字式のプロトタイプにおける前面空中像, 後面空中像の輝度を測定した.

3.3 V 字式における空中像の輝度測定

輝度計はコニカミノルタ社の CS-100A を用いた. スマートフォンは SAMSUNG 社の Galaxy S5 (画面サイズ約 5.1 インチ, 解像度 1920×1080) を用い, 画面の輝度は最大に設定した. 空中像は 1 辺約 20 mm の白色 (RGB[255,255,255]) の正方形とし, 前面空中像, 後面空中像それぞれを独立して表示させ, 輝度を測定した. 測定は暗室で行い, プロトタイプと輝度計の距離は 1 m に設定した.

表 1 に, スマートフォンの画面輝度を 1 とした際の空中像 A (前面空中像), 空中像 B (後面空中像) の輝度比を示す. 表 1 から, 空中像の輝度に反映されるのは前面空中像, 後面空中像ともに画面輝度の 1 割程度であることがわかる. また, プロトタイプを周囲が明るい環境で観察した際, 空中像が暗く, 視認しにくい現象も観察されたことから, 後面空中像の輝度を重なり表現のためにさらに低下させると, 空中像の視認自体が困難になる可能性がある. そこで我々は, 後面空中像の輝度を低下させるのではなく, 前面空中像の輝度を後面空中像よりも向上させるアプローチとして, 前面と後面の空中像の奥行位置関係を反転させる「奥行反転 V 字ミラー方式」を提案する.

4. 奥行反転 V 字ミラー方式 (DR 式) の提案

奥行反転 V 字ミラー方式 (Depth Reversed V-shaped mirror system:以下, DR 式) の構成を図 5 に示す. 図 5 では, フルミラーの位置を図 4 と比較して表示面から遠ざける方向へ D_h 移動させる. これにより, $D_A = W_A + (H + 2D_h)$ となることから, 式 (1), 式 (2) より,

$$\begin{aligned} D_{AB} &= |D_B - D_A| \\ &= |(W_A + D_w + W_B) - (W_A + H + 2D_h)| \\ &= |D_w + W_B - H - 2D_h| \end{aligned}$$

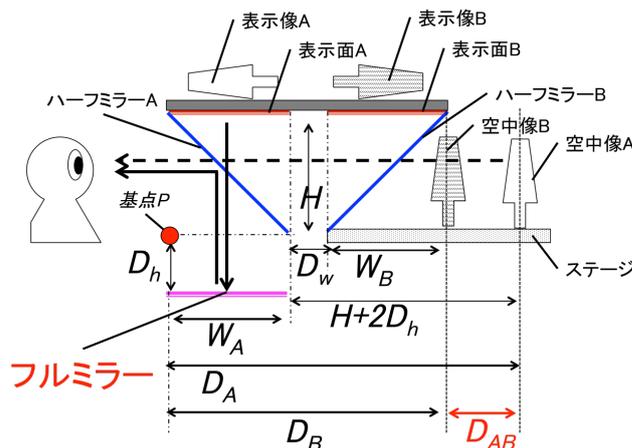


図 5 奥行反転 V 字ミラー方式の仕組み

Fig. 5 The principle of the Depth Reversed V-shaped mirror system for projecting multilayer floating-image

$$= |D_w - 2D_h| \quad (3)$$

となる. よって $D_h > D_w/2$ の時, 空中像 A が後面空中像に, 空中像 B が前面空中像となり, 空中像同士の奥行位置関係が反転する. そのため, ハーフミラー B の反射率を高めることで, 空中像 A (後面空中像) の輝度を維持したまま前面に表示される空中像 B の輝度を向上できると考えられる.

DR 式では, 式 (3) から空中像同士の奥行間隔 D_{AB} は, 表示面同士の距離 D_w と, フルミラーと表示面までの距離 D_h を調整することで任意に設計できるため, V 字式同様, 要件 1 を満たす. また, V 字式では, 奥行間隔 D_{AB} を大きくするほど表示面 A と B の間隔 D_w が増加し, 表示面積が相対的に減少する一方で, DR 式では奥行間隔はフルミラーの位置を下げることで増加できるため, 表示面を効率的に利用できるというメリットも生じる.

以下で, DR 式のプロトタイプにおける前面空中像と後面空中像の輝度を測定し, V 字式における前面空中像の輝度と比較する.

4.1 DR 式における空中像の輝度測定

空中像 A が後面空中像, 空中像 B が前面空中像となるよう, $D_w = 5 \text{ mm}$, $D_h = 10 \text{ mm}$ とし奥行間隔 $D_{AB} = 15 \text{ mm}$ のプロトタイプを作成した. ハーフミラー A には V 字式と同様に 0.5 mm 透明樹脂板を, ハーフミラー B にはフルミラーの樹脂ミラー板を用いた.

表 2 に輝度測定結果を示す. DR 式の前面空中像の輝度は V 字式の前面空中像の輝度と比較して約 7 倍の明るさとなり, 後面空中像の輝度変化は見られない. よって, DR 式は V 字式よりも前面空中像の輝度を高められ, 後面空中像の輝度を大きく落とさずとも, 要件 2 の空中像同士の重なりを表現できると考えられる.

以下では, 空中像同士の重なりについて, V 字式と DR

表 2 スマートフォンの画面輝度を 1 とした際の DR 式における空中像の輝度比

Table 2 The luminance rate of the floating-image by Depth Reversed V-shaped mirror system

測定対象	輝度比
1. 空中像 A (後面)	0.10
2. 空中像 B (前面)	0.71

式それぞれにおいて、後面空中像の輝度を前面空中像よりも下げることで重なり表現が可能かどうか、及び上記で検証した DR 式の前面空中像の輝度向上が重なり表現に効果的かどうかを被験者による印象評価によって検証する。

5. 透過性の印象評価

V 字式, DR 式それぞれのプロトタイプを用い, 前面空中像と後面空中像に半径約 10 mm の円を投影し, 重なり部分の透過性の印象評価を行った。

円の色は人間の視感度の高い緑 RGB[0,255,0] とした。円は前面, 後面ともに左右に約 5 mm ずつずらして表示することで, 部分的な重なりが生じるよう提示した。前面空中像の輝度出力は RGB[0, 255, 0] に固定し, 後面空中像の輝度出力を線形に 10 段階に変化させた表示パターンを作成した。この 10 パターンを被験者にランダムに提示し, 「後面の空中像による前面の空中像の透けが気になるか」という質問に「気にならない」「気になる」の 2 値で回答させた (0:気にならない, 1:気になる)。各パターンの回答後は 2 sec の間, 何も表示しないインターバルを設け, 空中像の左右を入れ替えて次のパターンを表示した。この 10 パターンの回答を 1 試行とし, 1 人の被験者につき V 字式, DR 式それぞれで 10 試行を行った。

被験者は 20 代後半 ~30 代前半の 8 名 (男性 5 名, 女性 3 名) で, 装置の高さを椅子に座った状態の目線の高さに, 装置と被験者の頭部の距離が約 50cm となるよう設置した。

また, 透過性の印象評価終了後に V 字式と DR 式のプロトタイプをランダムに装置 1, 装置 2 として同時に提示し, 「前面の像が鮮明なのはどちらか」「装置が持ちやすいのはどちらか」という 2 項目に対し, 「装置 1」「どちらでもない」「装置 2」の選択式アンケートと, 自由記述とヒヤリングによるフィードバックを取得した。前面空中像の鮮明さは, V 字式では透明樹脂板, DR 式ではフルミラーそれぞれによって投影される空中像の印象を比較する項目である。装置の持ちやすさは, DR 式ではフルミラーを下げる分, V 字式より筐体の高さが増加するため, この違いが小型空中像投影装置の利点の一つである持ちやすさに影響するかを評価する項目である。

なお, 実験の順序による偏りを防ぐため, 印象評価実験, アンケート共に V 字式と DR 式の提示順序は被験者ごとに入れ替えた。



図 6 作成したプロトタイプ, 左: V 字式, 右: DR 式
 Fig. 6 The prototype of V-shaped mirror system(Left) and DR V-shaped mirror system(Right).



図 7 実験の様子
 Fig. 7 The experiment image

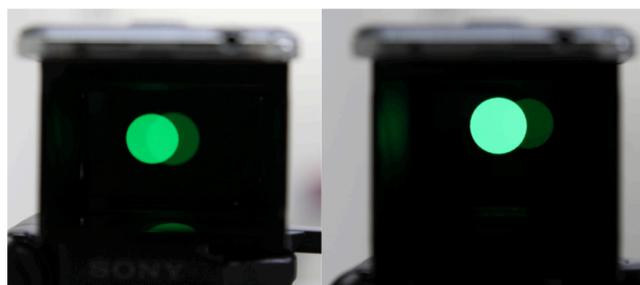


図 8 後面空中像の輝度出力 0.6 における透過性比較. 左) V 字式, 右) DR 式

Fig. 8 The occlusion of rate 0.6

5.1 結果と考察

5.1.1 要件 2 「空中像同士の重なり表現」の充足性検討

図 9 に, 後面空中像の輝度による前面空中像の透過性の変化について, 全被験者の平均値を示す。横軸は, V 字式, DR 式それぞれにおいて 10 段階で輝度出力値を変化させて実測した後面空中像の輝度値である。x 軸 (後面空中像の輝度) におけるデータ間隔が不均等なのはスマートフォンの画面輝度が輝度出力値に対して非線形であることによる。縦軸の「前面空中像の透けが気になると回答した

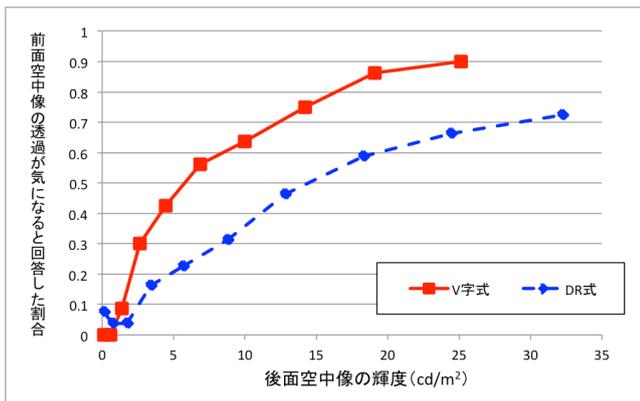


図 9 後面空中像の輝度による前面空中像透過性の変化

Fig. 9 The occlusion rate for brightness of the background floating-image.

表 3 アンケート結果

Table 3 The questionnaire survey result

比較項目	V 字式	どちらも差がない	DR 式
前面空中像の鮮明さ	0	0	8
装置の持ちやすさ	5	3	0

割合」は、各輝度出力に対して全被験者が前面空中像の透過が気になると答えた回数を足し合わせ、試行数 10 と被験者数 8 で割って平均化した値である。よってこの値は前面空中像の透過が気にならないほど 0 に、気になるほど 1 に近づく。

図 9 から、V 字式、DR 式ともに後面空中像の輝度が高まるにつれ、前面空中像の透過が気になると回答する割合が増加する傾向が見られる。また、後面空中像の輝度を V 字式では約 5 cd/m² 以下、DR 式では約 13 cd/m² 以下にすることで、前面像の透過が気になる割合を 0.5 以下に下げられることがわかる。このことから V 字式、DR 式いずれの手法でも後面空中像の輝度を落とすことで要件 2 の空中像同士の重なり表現を実現できる可能性が示される。

また、図 9 から、V 字式と比較して DR 式の方が後面空中像の輝度が高い場合でも前面空中像の透過が気にならないという傾向が見られる。これは DR 式の前面空中像の輝度向上の効果と考えられ、このことから DR 式では、V 字式と比較して前面、後面共により明るく空中像を提示できると考えられる。

5.1.2 前面空中像の鮮明さについて

表 3 より、8 名全ての被験者が、V 字式より DR 式の方が前面空中像が鮮明であると回答した。その要因の一つとして、DR 式が V 字式より前面空中像の輝度が約 7 倍明るいという点が考えられる。また、アンケートの自由記述では V 字式において空中像の輪郭線が 2 重に見えるという報告があった。これはハーフミラーに用いた 0.5 mm 透明樹脂板の反射時に、板の前面と後面の 2 面に反射される「2 重反射」が要因と考えられる。2 重反射は透明樹脂板を薄

くすることで回避できるが、板が薄くなることによる歪みや強度の低下、固定方法の複雑化が懸念される。この問題に対して DR 式は、片面のみが反射するフルミラーによって空中像を生成するため、こうした像の 2 重化を防ぐことができ、この点も「空中像の鮮明さ」に貢献したと考えられる。

5.2 今後の課題

5.2.1 空中像透過性の定量評価

透過性の印象評価について、今回の実験では被験者数の制約のため結果の統計解析には至らなかった。今後の課題として、被験者数を増やすことで定量的な解析を行い、前面空中像の透過が気にならなくなる後面空中像の輝度限界をより具体的に示したい。

また、今回の実験では V 字式と DR 式の比較を主目的としたため、スマートフォンやプロトタイプ装置の制約から被験者に提示できる空中像の最大輝度やコンテンツの大きさが限定されており、人間の視覚特性の観点から輝度と透過性の関係性を評価するに至らなかった。今後は実験装置や手法を検討することで、視覚特性の観点から空中像の透過性解消に向けた輝度設計手法を検討したい。

5.2.2 DR 式装置の改良

表 3 において、「装置の持ちやすさ」という項目では、V 字式の方が持ちやすいとの回答がやや多い傾向が見られた。ヒアリングでは、V 字式の方が装置の高さが低く、手が小さくとも持ちやすいとの報告や、スマートフォンを抑えて固定する際に高さが低い V 字式の方が力を入れやすいとの報告があった。今回作成したプロトタイプでは空中像同士の奥行間隔 15 mm の仕様において、V 字式では装置の高さが 50 mm であったが、DR 式では高さは 60 mm であり、この 10 mm の差によって V 字式の方が持ちやすいという傾向が生じたと考えられる。

一方で、DR 式は前章までの結果から、表示面の利用率、空中像の輝度、鮮明さの観点で V 字式よりも利点が多い。そこで、今後は DR 式におけるスマートフォンの固定方法や持ちにくさの改善等、欠点の解消に向けた検討を行いたい。

6. アプリケーション

上記 DR 式のアプリケーションを実装した (図 10)。図 11 では、ワイヤレステレホンのオブジェクトを前面空中像に、後面空中像にその影を投影した背景を表示している。背景に影を表示することで空中像の存在感を高める効果が期待される。

図 11 にコンテンツの画面表示例を示す。ワイヤレステレホンが表示されている表示面 B はハーフミラー B に 1 回反射するため、上下方向への垂直反転が必要である。背景となる表示面 A は、フルミラーとハーフミラー A に計



図 10 実装したアプリケーション

Fig. 10 The application image of DR V-shaped mirror system.

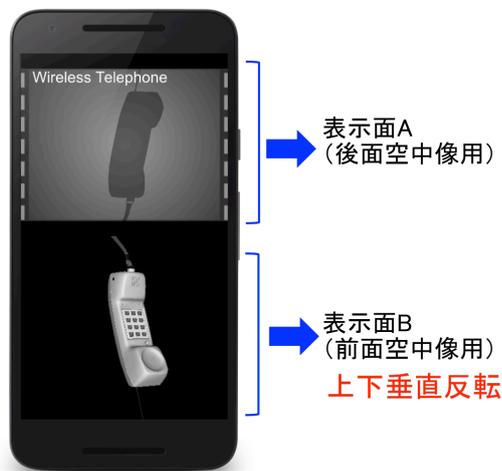


図 11 DR 式における画面表示

Fig. 11 The example of display image for DR V-shaped mirror system.

2 回反射するため、反転は不要である。

また、今回のプロトタイプでは、装置内部に空中像が生成されるため、ユーザが空中像に触れる等の直接的なインタラクシオンは困難である。一方で、スマートフォンを用いる点や装置を手を持って鑑賞するという特徴を生かすことで、空中像との間接的なインタラクシオンは可能と考えられる。図 10 のアプリケーションでは、間接的なインタラクシオンの例として、ジャイロセンサを用い端末の上下左右の向きに応じてオブジェクトを中心とする 360 度視点移動機能と、加速度センサによって装置のシェイクに基づきコンテンツを切り替えるインタラクティブ機能を実装している。

7. おわりに

本稿では、スマートフォンで利用可能な小型多層空中像

投影装置について、空中像同士の奥行間隔の任意設計、空中像同士の重なり表現を実現する V 字ミラー方式を提案した。また、奥行反転型 V 字ミラー方式によって V 字ミラー方式より鮮明に空中像を投影できることを示した。

今後は空中像の重なりについての定量的な評価や装置の改良に加え、空中像のインタラクティブ要素の検討を進めていきたい。

参考文献

- [1] Ahmed Elmorshidy: "Holographic Projection Technology: The World is Changing", Journal of Telecommunications, Volume 2, Issue 2, pp104-112 (2010).
- [2] DMM VR Theater: http://www.dmm.com/hidden_radiosity/index.html (2015.10.30).
- [3] NTT 持株会社ニュースリリース: "あたかもその場にいるかのような超高臨場感をリアルタイムに世界へ配信～イマーシブテレプレゼンス技術「Kirari!」の研究開発を推進～", <http://www.ntt.co.jp/news2015/1502/150218b.html>, 2015/2/18 (2015.10.18).
- [4] 金 ハンヨウル, 前川 聡, 苗村 健: "複合現実感展示システム MRsionCase における多層空中像のための実像光学系の検討", 電子情報通信学会技術研究報告.IE, 画像工学 111(478), pp.151-156 (2012).
- [5] 中島 統太郎, 中島 統太郎, 笥 康明, 杉田 馨, 山内 康晋, 苗村 健: "ExFloasion:多層空中像を用いた複合現実感展示システム", 電子情報通信学会技術研究報告.MVE, マルチメディア・仮想環境基礎 109(466), pp.35-40 (2010).
- [6] Hanyuool Kim, Hiroki Yamamoto, Takayuki Kai, Satoshi Naekawa, 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).
- [7] 梶田 創, 小泉 直也, 苗村 健: "OpaqueLusion: 多層空中像におけるオクルージョン表現の基礎検討", 情報処理学会インタラクシオン 2015, pp.1010-1015(2015).
- [8] おえかきすいそう ビクチャリウム, 株式会社タカラトミーアーツ: <http://www.takaratomy-arts.co.jp/specials/suisou/> (2015.10.18).
- [9] ハコビジョン, 株式会社バンダイ: <http://www.bandai.co.jp/candy/hakovision/> (2015.10.18).
- [10] Palm Top Theater B.V., Palm Top Theater: <http://www.palmtoptheater.com/ja/> (2015.10.18).
- [11] スマホロ, PONY CANYON INC: <http://smaholo.com/> (2015.10.19).
- [12] Shiro Suyama, Hideaki Takada, and Sakuichi Ohtuka: "A Direct-Vision 3-D Display Using a New Depth-fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depths", IEICE TRANSACTIONS on Electronics, Vol.E85-C, No.11, pp.1911-1915(2002).
- [13] Natsuki Sugano, Hiroyuki Kato, and Keihachiro Tachibana, "The Effects of Shadow Representation of Virtual Objects in Augmented Reality", in Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality: IEEE Computer Society (2003).
- [14] 村瀬香緒里, 小木哲朗, 齋藤康太, 小山尚英: "大画面ーフミラーによる没入型拡張現実環境の構築とオクルージョン表現", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.141-150(2008).