

推薦研究論文

両面透過型多層空中像表示技術の提案と実装

巻口 誉宗^{1,2,a)} 高田 英明^{1,b)} 坂本 大介^{2,c)} 小野 哲雄^{2,d)}

受付日 2019年10月15日, 採録日 2019年12月2日

概要: 遠隔地のスポーツのライブビューイングやステージイベントなどのエンターテインメント分野において、半透過スクリーンやハーフミラーを用いて被写体を空中像で表示する演出手法が活用されている。これまでこうした演出手法では、空中像を表示させたい領域に大がかりな装置を設置する必要があり、被写体の移動範囲が制限されていた。そこで我々は、空中像をステージ外や観客席に移動させる演出の実現を目的とし、可搬型のサイズ・構成で臨場感の高い空中像を表示できる両面透過型多層空中像表示技術を提案する。本手法は4台のディスプレイと4枚のハーフミラーを組み合わせたシンプルな光学系で構成される。観察者は装置の正面と背面の2方向から被写体の両面を空中像として観察でき、両面それぞれから近景と遠景の2層の背景空中像を観察できる。提案手法では表示面は4面しか持たないものの、ハーフミラーによる透過と反射によって背景の2層を正面・背面の観察方向で共有することで、両面それぞれから3層、合計6層の空中像を視聴できる。さらに、近景と遠景は正面・背面の観察方向にかかわらずに光学的な奥行き順序関係が保たれることから、複数人が同時に装置両面から、多層化された臨場感の高い空中像を視聴できる。本稿では提案手法の光学構成の詳細から、実用性評価のために行ったプロトタイプ実装とイベントでの活用事例まで広く報告する。

キーワード: 空中像, 透過型ディスプレイ, 両面映像表示ディスプレイ, サイネージ, ハーフミラー

Double-sided See-through Multi-layer Aerial Image Display

MOTOHIRO MAKIGUCHI^{1,2,a)} HIDEAKI TAKADA^{1,b)} DAISUKE SAKAMOTO^{2,c)} TETSUO ONO^{2,d)}

Received: October 15, 2019, Accepted: December 2, 2019

Abstract: The aerial image projection methods using a semi-transparent screen or a half mirror are widely used in the entertainment field. In these conventional method, large scale devices are required for the display area of the aerial image and it is difficult to produce a widely movement of the subject. In this paper, we propose a movable double-sided transmission type multi-layered aerial image display technology for the purpose of achieve the movement of the aerial image out of the stage and to the audience seats. This technology is a simple optical system combining 4 displays and 4 half mirrors. The observer can observe both sides of the object as aerial images from two directions, front and back of the device, and can also observe two layers of near and far background aerial images from both sides by transmission and reflection with a half mirror. Since the order relationship between the depths of the near view and the distant view does not depend on the viewing directions of the front and back faces, multiple people can simultaneously view multi-layered, highly realistic aerial images from both sides of the device. The two background layers are shared for the double-side viewing direction by multiple half-mirror structure. Although the proposed method has only four display surfaces, there are total of six aerial image layers, three from each side. We report widely from optical configuration of the proposed method, prototype implementation and application of actual events.

Keywords: aerial-image, see-through display, double-sided display, signage, half-mirror

¹ 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所
NTT Service Evolution Laboratories, NTT Corporation,
Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

² 北海道大学大学院情報科学研究院
Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido
University, Sapporo, Hokkaido 060-0814, Japan

a) motohiro.makiguchi.gn@hco.ntt.co.jp

b) hideaki.takada.nf@hco.ntt.co.jp

c) sakamoto@ist.hokudai.ac.jp

d) tono@ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

被写体があたかもその場所に実在するかのような高臨場感を実現する映像表現手法の1つとして、空中像が活用されている [1], [2]. 空中像を簡易に表示する手法の一例として、ステージ上に設置した半透過スクリーン [3] やフォグスクリーン [4] に対しプロジェクタで被写体を投影する手法や、ハーフミラー (入射した光の一部を透過し、一部を反射するミラー) によってディスプレイやスクリーンに表示した被写体の虚像をステージ上に重畳する手法 [5], [6] がある. これらの手法は、透過型液晶ディスプレイ [7] や透過型有機 EL ディスプレイ [8] などの特殊な表示器材を用いて空中像を表示する手法や、凹面鏡 [2] や実像鏡 (DCRA [9], Aerial imaging plate [10]) といった結像光学系を用いて空中像を表示する手法と比較して大型化が容易で、大勢の観客へ同時に空中像を提示できることから、遠隔地のスポーツのライブビューイングやバーチャルキャラクターのコンサート、人間の役者とバーチャルキャラクターが共演する舞台など、被写体の等身大表示が必要な大規模イベントで広く実用化されている.

図 1 に半透過スクリーンとハーフミラーによる空中像表示装置の概要を示す. これらの手法で表示される空中像はいずれも 2 次元の映像であるが、被写体以外の背景を黒で置き換えた映像を投影することでステージ上には被写体だけが表示され、さらにステージ上の実物体との位置関係が空中像の奥行き位置の手がかりとなることから、あたかも被写体がステージ上に実在しているかのように感じさせることができる. また、ステージイベントでは観客からステージ上の空中像までは視距離が離れているため、両眼視差が働きにくい. この点も、被写体が 2 次元映像であるにもかかわらず、高い臨場感を提示できる要因である. これらの装置では、空中像の表示可能エリアはいずれもステージに設置されているスクリーンやハーフミラーのサイズによって制限され、ステージ上で被写体を広い範囲に動かすためにはその分大がかりな装置構成が必要となる. さらに、装置構成をステージすべてに拡大したとしても装置の範囲外であるステージ袖からの被写体の登場や、観客席・会場外への被写体の移動といった、ステージから離れた被写体の演出が困難であった.



図 1 ステージ演出で用いられる空中像表示手法の例
Fig. 1 Example of aerial image display method.

そこで我々は、ステージ外へも移動可能な可搬型の空中像表示装置の提案によってこの問題を解決する. 半透過スクリーンやハーフミラーによるステージ上の空中像演出を主体としつつ、その演出を拡大・補助する空中像表示手法の1つとして、被写体を臨場感の高い空中像として表示したまま、ステージや観客席を自在に移動可能な可搬型のサイズ・構成による空中像表示手法を検討した. 手法検討にあたり、可搬型以外の要件として以下の3点を設定した.

要件 1 被写体を等身大で表示できること.
要件 2 少なくとも 2 方向の視点映像提示ができること.
要件 3 被写体以外の奥行き手がかりを提示できること.

要件 1 の等身大表示は、ステージ上の等身大空中像演出の補助として活用する際、投影サイズを合わせるために不可欠な要件である. 要件 2 の少なくとも 2 方向に向けた視点映像提示は、舞台上での演出や観客席間へ移動する用途において、装置内の被写体を視聴できる観客数を増加させるための要件である. 要件 3 の奥行き手がかりは、観客席へ移動させた場合に視距離が近づき、両眼視差やピント調節機能といった生理的な立体視の要因が働きやすくなることで、2 次元の被写体の空中像だけでは十分な臨場感を提示しにくくなる問題を解消するための要件である.

我々はこれらの要件を満たす新たな空中像表示装置として、4 台のディスプレイと 4 枚のハーフミラーを組み合わせ、複数の空中像の光路長を制御して提示する両面透過型多層空中像表示技術を提案する. 本技術は、装置の正面方向と背面方向から視聴する観察者に、被写体の両面の空中像 1 層に加え、2 層の背景をそれぞれ提示できる. さらに 2 層の背景の奥行き方向の順序関係は視聴方向によらず光学的に保たれるため、遠景・近景といった奥行き手がかりを付与した演出が可能であり、これにより、可搬型のサイズ・構成で、臨場感の高い空中像表示装置が実現される.

本稿の構成は下記のとおりである. 2 章では複数方向へ異なる視点映像を提示可能な空中像表示の関連研究について述べ、要件を満たすアプローチを明確化する. 3 章では提案手法について、光学構成と空中像の奥行き位置、空中像の輝度、装置の透過率についてまとめる. 4 章では提案手法の舞台装置としての実用性を評価するため、実装したプロトタイプの詳細と、実イベントでの演出・展示事例について述べる. 最後の 5 章はまとめである.

2. 関連研究

以下では要件 2 の多方向への視点映像提示について、関連研究をまとめ、特に大型化が用意な半透過スクリーンとハーフミラーを用いた関連研究の問題を述べる.

2.1 多方向への視点映像投影

多方向へ異なる視点映像を提示する関連研究として、Jones ら [11] は斜め 45° に設置したミラーを回転させ、上部に設置したプロジェクタから回転に同期させた視点映像を時分割で投影することで、特殊な 3D メガネなしに 360° の視聴方向から両眼視差をとまなう立体像を視聴できる手法を提案している。また、Yoshida [28] や Makiguchi ら [29] は複数のプロジェクタを用いて特殊なスクリーンに視点映像を投影し、360 度から視聴可能な 3D ディスプレイを提案している。これら手法では要件 2 の多方向への視点映像提示が可能なることに加え、両眼視差によって空中像に十分な奥行き手がかりを与えることができるため、要件 3 も満たす。一方で、ミラーを高速で回転させる方式は観客の安全性を保ったまま大型化するためには大がかりな機材構成が必要となり、複数のプロジェクタを用いる方式ではスクリーンの大型化が困難な点に加え、プロジェクタ設置スペースが必要となるため、可搬化や要件 1 の等身大化の実現が困難である。

Kim ら [10] はテーブルトップ型の装置を挟んだ正面と背面のそれぞれからテーブル上の空中像を視聴できる HoVerTable を提案している。この手法は、Aerial imaging plate (AIP) をテーブルの天板に使い、その下に背中合わせにした 2 台のディスプレイを設置し、テーブル上にそれぞれのディスプレイの実像を結像させる。この構成では AIP が結像光学系となり、空中像を視聴するためにはプレートも同時に視界に入るよう、高い視点からプレートを見下ろす視点設計が必要となる。そのため俯角が浅いほどプレートサイズも巨大となり、舞台上などの真横に近い視聴方向の用途では可搬型を維持したままの等身大化は困難である。

2.2 半透過スクリーンを用いた多方向投影

等身大化の問題を解決でき、正面と背面の 2 方向へ空中像を提示する手法として、現状のステージ上の空中像演出でも用いられている半透過スクリーンやフォグスクリーンを用いる手法がある。半透過スクリーンの多方向への空中像表示方法として、遠隔地の音楽パフォーマンスのライブビューイングを行うため、歌手の正面映像と背面映像をリアルタイムに撮影、伝送し、特殊な半透過スクリーンに両面からプロジェクタで映像を投影する取り組みが行われている [12]。Martinez ら [30] は卓上へのプロジェクションと垂直に設置したフォグスクリーンを組み合わせた MisTable を提案している。このシステムではテーブル周囲の 2 方向に向けてフォグスクリーンを設置することでそれぞれの方向に独立した空中像を提示し、卓上ディスプレイを介した協調作業を可能にしている。また、八木ら [13] はフォグスクリーンの拡散角度が狭い点を活用し、円柱形状のフォグスクリーンに多方向から視点映像を投影することで、視域の全周囲化を行っている。

一方で、半透過スクリーンとフォグスクリーンはいずれもプロジェクタによる映像投影が必要となる。可搬化を行うためには投影距離を短縮できる単焦点プロジェクタが望ましいが、単焦点プロジェクタは一般的なリア投影方式のプロジェクタと比較して観察者の視聴方向に対するプロジェクタの投影角度の差が大きく、観察者方向へ拡散される光量が減少する。このことから短焦点プロジェクタでは、使用するプロジェクタの輝度に対して観察される空中像の輝度効率が著しく低下することが懸念される。この輝度低下を補うためには輝度を高めた大型の単焦点プロジェクタを用いる必要があるため、半透過スクリーンやフォグスクリーンでは可搬型の構成を保ったまま輝度の高い空中像を表示可能な装置の実現は困難である。さらにフォグスクリーンには、気流の影響を受けやすいことから可搬化に適さないという問題もある。

2.3 ハーフミラーを用いた多方向投影

ハーフミラーを用いて多方向へ異なる視点映像を提示する方式の例として、Dreamoc [14] は三角形のハーフミラーとディスプレイを組み合わせ、正面方向と側面 2 方向、合計 3 方向に向けて空中像を表示する。この方式に必要なハーフミラーとディスプレイといった部材は等身大表示が可能な大型の市販製品があるため、要件 1 の等身大化、要件 2 の多方向への視点映像投影を満たした表示装置の実装は可能である。一方で、要件 3 の奥行き手がかりの提示については、各観察方向に対して提示できる空中像は 1 層のみであり、遠近感の提示や背景への被写体の影表示といった奥行き手がかりを動的に付与できないという問題がある。

空中像へ奥行き手がかりを付与する従来のアプローチとして、空中像を異なる奥行きで多層に表示する手法が知られている [15], [16]。これまで我々は、複数枚のハーフミラーを組み合わせることで空中像を多層に表示可能なモバイル端末向けの空中像表示装置を提案した (図 2 [16])。この手法では、モバイル端末のディスプレイ 1 台の表示面を 2 分割して被写体映像と背景映像をそれぞれ表示し、被写体は 1 枚の全反射ミラーへの反射で、背景はハーフミラーと全反射ミラーの透過・反射によって光路を折り返して観

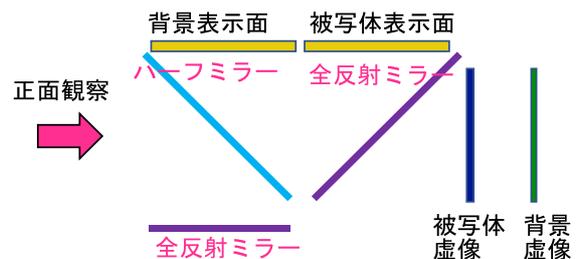


図 2 スマートフォンを用いた多層空中像表示装置の側面図 [16]
Fig. 2 Multilayer aerial image projection system using smartphone [16].

察者に提示することで、任意の奥行き間隔で多層の空中像を表示する。これにより、被写体の空中像だけでなく背景の空中像投影を実現し、背景表示による奥行き感や影による臨場感向上の演出を実現した。

この手法では空中像の数は表示面の数と等しいが、本稿ではこのハーフミラーによる光路長制御の原理を両面視聴に対応した構成に拡張することで、正面・背面のそれぞれから3層、合計6層の空中像を、4面の表示面のみで表示する構成を提案する。

3. 提案手法

図3に提案手法の側面図を示す。この装置では、装置下部に被写体の正面映像を表示する正面用ディスプレイと、被写体の背面映像を表示する背面用ディスプレイを設置する。さらに装置上部に近景用ディスプレイを設置し、近景用ディスプレイよりも高い位置に遠景用ディスプレイを設置する。また、2枚のハーフミラーをV字に設置し、被写体表示用ディスプレイの上面にもそれぞれハーフミラーを設置する。

装置正面からの観察者は、被写体正面用ディスプレイの虚像を視聴し、装置背面からの観察者は被写体背面用ディスプレイの虚像を視聴する。このとき、正面用ディスプレイの光は背面視聴方向には向かわず、背面用ディスプレイの光は正面視聴方向には向かわないことから、被写体の虚像は両面2方向の視聴方向に対して異なる視点映像を独立して提示できる。このことから提案手法は要件2の2方向に向けた視点映像提示を実現する。また、被写体のサイズはディスプレイサイズとハーフミラーのサイズに依存するが、いずれも等身大表示が行える大型のサイズが市販されているため、等身大化も十分可能であり、要件1を満たす。

以下では、提案手法で表示される空中像の数と奥行き位置について、表示装置から観察者までの光路長に基づき整理することで要件3の被写体以外の奥行き手がかりを提示できることを示し、装置の透過率、コンテンツの表示方法、空中像の輝度について述べる。

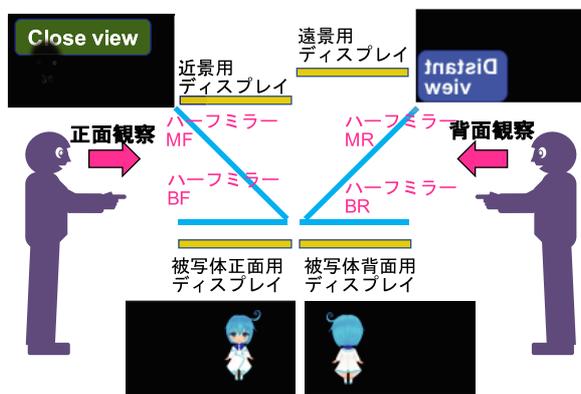


図3 提案手法の側面図

Fig. 3 Side view of proposal method.

3.1 空中像の奥行き知覚について

図4に提案手法によって知覚される空中像の奥行き位置を示す。なお、説明を簡易化するため、ハーフミラーの設置角度を45°とし、ディスプレイの高さと装置の開口部の高さをHとする。

被写体ディスプレイとハーフミラーBFの高さを差を h_b とすると、被写体の正面の空中像は装置手前を基準として奥行き位置 $H + h_b$ に表示される。また、上部に設置した近景用ディスプレイの映像は、ハーフミラーMFを透過したのちハーフミラーBFによって反射され、ハーフミラーMFに反射されて観察者に視認される。これにより光路長が延長され、近景の空中像の奥行き位置は装置手前から $2H$ となる。遠景用ディスプレイの映像は、ハーフミラーMRに反射され観察者に視認される。ここで、遠景用ディスプレイと近景用ディスプレイの高さを差分を h_t とすると、視認される遠景の空中像の奥行き位置は $2H + h_t$ となる。

同様に、背面の観察者は装置手前から距離 $H + h_b$ の位置に被写体の背面の空中像を視認する。また、近景の空中像は奥行き位置 $2H$ に、遠景の空中像はハーフミラーMRを透過したのちにハーフミラーBRに反射し、ハーフミラーMRに反射して観察者に視認されることから、 $2H + h_t$ の位置に知覚される。

これらのことから、正面・背面からの視聴方向の違いにかかわらず、被写体と近景、遠景の空中像の奥行き位置の

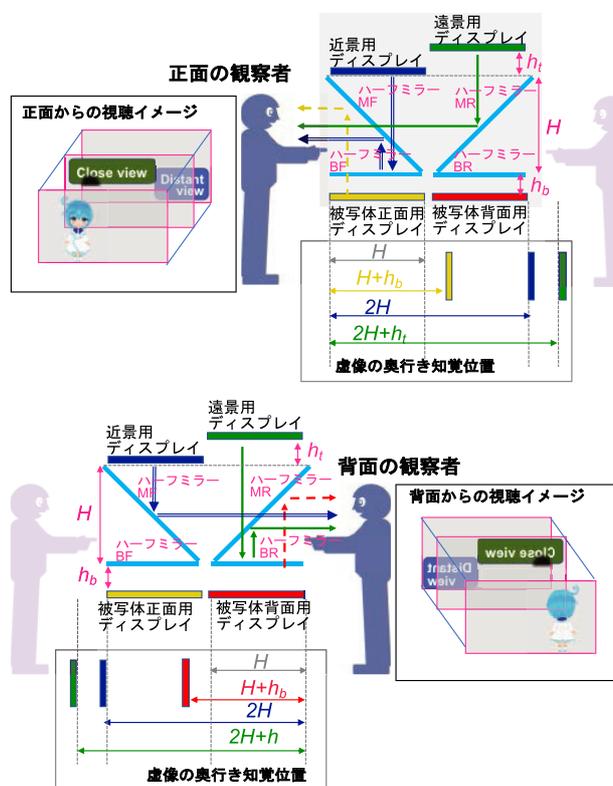


図4 知覚される空中像の位置

Fig. 4 Position of perceived virtual image.

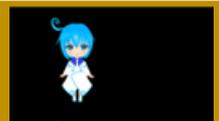
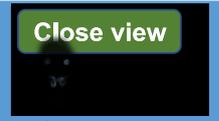
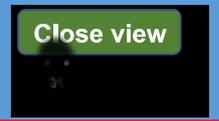
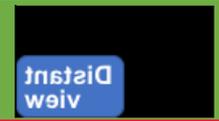
レイヤ	被写体:正面	被写体:背面	近景	遠景
正面から観察される映像	 ↑ 左右反転	-	 ↑ 反転なし	 ↑ 左右反転
表示画像				
背面から観察される映像	-	 ↓ 左右反転	 ↓ 左右反転	 ↓ 反転なし

図 5 正面・背面方向の観察画像と対応する表示画像

Fig. 5 Application for the stage performance.

順序関係は変化しないことが分かる。さらに、被写体と近景の奥行き間隔は被写体用ディスプレイと底面ハーフミラーの高さの差 h_b によって、遠景と近景の奥行き間隔は遠景用ディスプレイと近景用ディスプレイの高さの差 h_t によって制御できる。このように提案手法は複数の異なる奥行き位置に順序を保った空中像を表示できることから、要件 3 の奥行き手がかりの提示を十分に実現できると考えられる。表示するコンテンツの演出として、近景に木々を、遠景に山並みを表示したり、近景に室内を、遠景に窓から見える景色を表示するといった遠近感による奥行き手がかりの付与や Depth-fused3-D (DFD) [17] のような奥行き方向への連続的な立体視効果の付与も期待できる。

3.2 装置の透過率について

本装置では空中像の背景は装置対面の光が透過し、装置越しの実物体などを装置内の被写体と同時に観察させることができる。これにより、ディスプレイの存在が感じにくくなることで被写体の臨場感を高められることに加え、装置後方に設置した大型スクリーンの映像と組み合わせたコンテンツ演出も可能となる。

本装置において、装置背面側の実物体は 2 枚のハーフミラーを透過して視認されるため、ハーフミラーの透過率を 50% とすると観察される輝度は 25% である。本装置の空中像は正面 3 層、背面 3 層の合計 6 層が表示されるため、たとえば半透過スクリーンや半透過ディスプレイと同様の表示を実現する場合、6 枚のスクリーン、もしくはディスプレイが必要となる。この場合、本構成と同様の透過率を実現するためには 1 枚あたりのレイヤの透過率は 80% 以上必要となる。

半透過スクリーンの場合、透過率 80% では最も理想的な

拡散状態でもプロジェクタの光量の 20% しか投影に寄与せず、十分な明るさの空中像を表示するためにはより大光量のプロジェクタが必要となる。また、半透過スクリーンはプロジェクタの光を拡散させるため、ヘイズ（拡散度）が高く、装置背面の実物体が曇った見え方となるという問題もある。一方で、提案手法ではハーフミラーを用いるためヘイズの問題は生じず、背面の実物体を光量の減衰のみで観察できることから、半透過スクリーンよりも自然に観察できる。

また、半透過ディスプレイでは、現状市販されている透過型有機 EL ディスプレイの透過率は 40% 程度であることから、本提案装置と同じ 6 層のレイヤを配置すると対面の光はほとんど透過しない。このことから、提案手法は半透過スクリーンや半透過ディスプレイを用いた多層空中像表示との比較において、ヘイズと透過率の観点で高い優位性があると考えられる。

3.3 コンテンツの表示方法について

図 5 に、提案手法における両面に正確な映像提示を行うためのコンテンツ表示方法を示す。提案手法では、被写体の映像は正面・背面ともに 1 度ハーフミラーに反射されるため、表示画像は観察させたい画像に対して左右反転して表示する必要がある。背景の 2 層は正面観察と背面観察のそれぞれで反射回数が異なる。正面観察において、近景は 1 度ミラーに反射し、遠景は 2 度ミラーに反射する。背面観察において、近景は 2 度ミラーに反射し、遠景は 1 度反射する。よってコンテンツの表示は被写体映像と遠景映像は反転し、近景映像は反転なしで表示することで、正面観察と背面観察で正確な映像提示が可能である。

また、ハーフミラーを用いた多層空中像表示方式は、観

表 1 ディスプレイの輝度を 1 とした場合の空中像の輝度比率

Table 1 Luminance rate of each aerial image.

	被写体	近景	遠景
正面観察	0.25	0.125	0.25
背面観察	0.25	0.25	0.125

察者にはすべてのレイヤの光が加算されて知覚されるため、オクルージョンの矛盾という問題が生じる。これは実物体どうしであれば本来遮蔽されて見えないはずの背景が空中像では被写体が半透明なために透過して観察され、遮蔽の奥行き手がかりが矛盾する問題である。こうした問題を解決する手法の 1 つとして、図 5 の近景に示すように、被写体と重なる背景部分に影を表示するなど、映像を表示しない手法が有効である。

3.4 空中像の輝度について

理想的なハーフミラー（透過率：反射率 = 0.5 : 0.5）を想定し、ディスプレイの輝度を 1 とした場合の各空中像の輝度比率を表 1 に示す。

装置正面の観察者に対し、正面用ディスプレイの光はハーフミラー BR を透過し、ハーフミラー MF に反射するため、その輝度比率は 0.25 となる。また、近景の輝度はハーフミラー MF を透過し、ハーフミラー BF に反射され、ハーフミラー MF に反射されるため、0.125 となる。遠景ディスプレイの光はハーフミラー MR に反射された後にハーフミラー MF を通過するため 0.25 となる。装置背面の観察者に対しても同様に、被写体の背面は 0.25、近景は 0.25、遠景は 0.125 となる。このことから、正面観察と背面観察では近景と遠景の奥行き方向の位置関係は変化しないものの、輝度比率は逆転することが分かる。人間の視覚として、近景の輝度を明るく、遠景の輝度を暗くするといった輝度の差を用いた奥行き手がかり付与手法が考えられるが、提案手法では近景と遠景の輝度差が逆転するため、こうした演出を用いることは困難であると考えられる。また、正面・背面方向からの観察で矛盾を感じさせない手法の一例として、近景と遠景のそれぞれのレイヤのなかに輝度差のあるコンテンツを同時に表示するなど、輝度に意味を持たせないコンテンツ制作方法が必要と考えられる。

4. 実装とアプリケーション

提案手法のエンターテインメント分野での実用性、およびインパクトを評価するため、常設展示、登場演出、観客間移動演出の 3 つの利用シーンを対象に、プロトタイプを用いて実イベントへの適用を行った。

4.1 プロトタイプの実装

プロトタイプは、2018 年 4 月 28 日と 29 日に幕張メッセにおいて開催された“超歌舞伎 supported by NTT「積思

花顔競-祝春超歌舞伎賑-” [18] での適用を想定して実装した。このイベントは、ステージ上に設置された半透過スクリーンによってバーチャルキャラクターの等身大の空中像を表示し、人間の役者と共演する舞台である。プロトタイプ的设计は、半透過スクリーン外（空中像表示エリア外）のステージ裾から被写体が山車に乗って登場する演出の実現を主目的として行った。被写体は山車に座って乗る想定とし、等身大の座高を十分再現できる 65 インチサイズ（表示エリアサイズ横幅約 144 cm、縦幅 81 cm）のディスプレイを選定した。ディスプレイは市販の 4K 有機 EL テレビを 4 枚用い、ハーフミラーには 0.5 cm 厚の市販の日射反射ガラスを 4 枚用いた。有機 EL テレビは、一般に液晶テレビと比較して高輝度なため、空中像の輝度を高められる点に加え、映像のコントラストが高く、空中像の背景として必要な黒の表現にも優れている点からも、空中像表示により適していると考えられる。また、ステージ上の半透過スクリーンによる空中像よりも近い位置から視聴されることを考慮し、有機 EL テレビの解像度は 4K (4,096 × 2,160 px) とした。部材は市販品で揃えることで、低コスト化に加えて予備部材の調達を容易にし、運搬による破損などのトラブル発生時の復旧のしやすさを向上させた。装置はアルミフレームで可能な限り軽量化して作成し、車輪を装着することで人力での移動を可能にした。

h_b を 0 cm とすることで被写体の表示位置を装置中央とし、遠景用・近景用ディスプレイの高さの差分 h_t を 30 cm とすることで、背景の 2 層の奥行き間隔を 30 cm に設定した。今回のプロトタイプでは、65 インチのディスプレイ (144 × 81 cm) を用いているため、装置端からそれぞれの空中像までの奥行き距離は被写体までが 81 cm、近景までが 162 cm、遠景までが 192 cm となる。側面は筐体で覆われているため、3 層すべてを同時に視聴できる範囲はディスプレイの幅と同じ 144 cm に限られる。そのため、常設展示においては観客が被写体を見やすい位置に自由に動ける展示スペースの確保や、登場演出と観客間移動においては筐体の移動や回転といったより多くの観客に被写体を提示するための工夫が必要である。

4.2 常設展示

“超歌舞伎 supported by NTT「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-”の期間中、観客席後方に設けられた展示スペースにプロトタイプを技術展示として常設した。図 6 に展示したプロトタイプの空中像投影の様子を示す。コンテンツは前景に被写体の手を振る動画を、近景には大サイズの桜吹雪、遠景には小サイズの桜吹雪が舞う映像を繰り返し再生した。図 6 から、正面の観察では被写体の正面が、背面からは被写体の背面が観察されることが分かる。

観客の行動観察の結果、本展示は多くの観客が立ち寄り、正面から観察した後に装置の背面に回り込んで空中像の背



図 6 展示に用いたプロトタイプの外観，および観察される空中像 (文献 [19] より抜粋)

Fig. 6 Virtual image by prototype.

面を観察する様子や、被写体の鮮明さ、奥行き感に驚く様子が見られた。また、装置の背面に立ち、正面から別の観客が写真を撮ることで、あたかも被写体空中像と並んだような写真を撮影するといった、本装置の高い透過率を活かした透過型ならではの楽しみ方をする様子も観察された。

4.3 登場演出

プロトタイプに山車の外装を装着し、“超歌舞伎 supported by NTT「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-」”の演目内で活用した様子を図 7, 図 8 に示す [19]。

山車は被写体を表示した状態で正面を見せながらステージの裾から登場し (図 7(A)), ステージ上で一回転して背面を見せ (図 7(B)), ステージ上の半透過スクリーンの前で停止した。そして山車から被写体が降りる映像の後に山

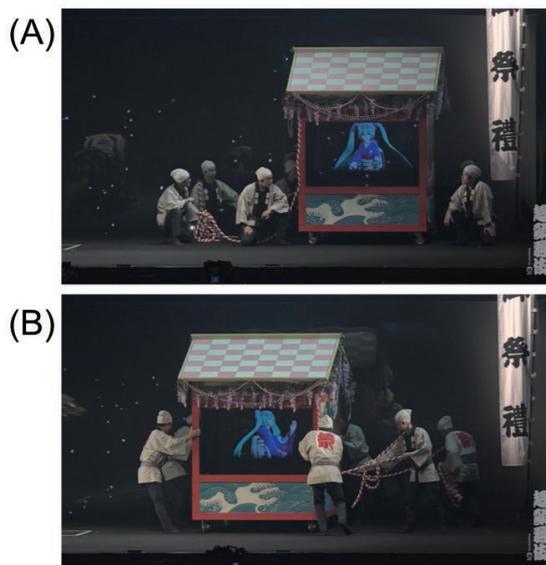


図 7 舞台装置の登場演出としての活用風景。(A) 装置正面を観客席に見せている様子。(B) 舞台上で一周し、装置背面を観客席に見せている様子

Fig. 7 Application for the stage performance.

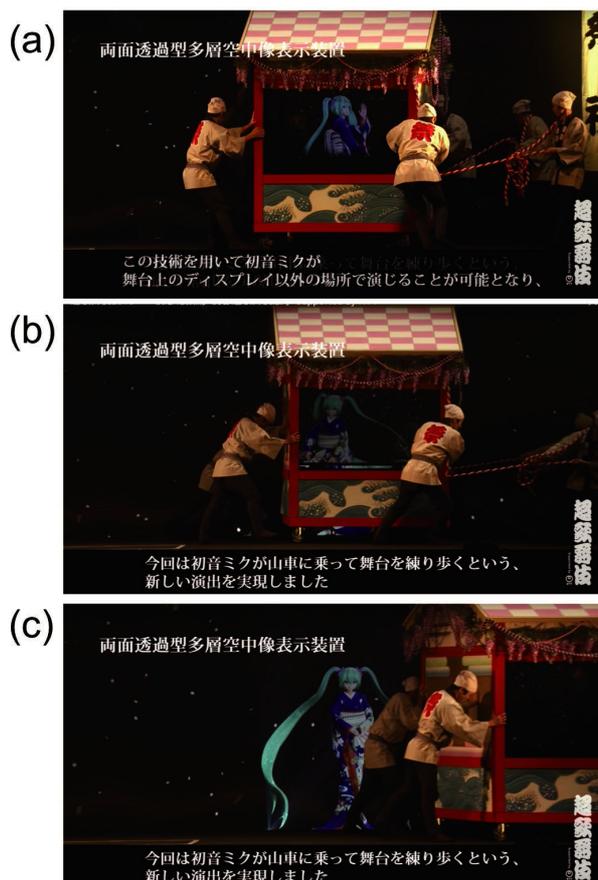


図 8 背景の半透過スクリーンと組み合わせた山車から降りる演出の様子 ([19] より抜粋). (a) 山車に被写体を表示した状態. (b)/(c) 背景の半透過スクリーンに被写体を表示した状態

Fig. 8 Performance combined with the aerial image of the screen.



図 9 移動サイネージとしての活用風景

Fig. 9 Application as the mobilable signage.

車の映像表示を消し、山車背面の半透過スクリーンへ被写体を表示した(図 8)。これにより、あたかも被写体が山車からステージ上に降りたかのように感じさせる演出が実現された。

コンテンツは上記展示と同様、被写体の両面と桜吹雪の近景と遠景が表示されており、ステージ上の半透過スクリーンに投影された桜吹雪と連動することで、山車の中に桜の花びらが入ってきているかのような演出を実現した。また、図 8 の (a) と (c) の比較から、ステージ上の比較的明るい環境においても、プロトタイプ空中像はステージ上の半透過スクリーンによる空中像と同程度の、鮮明な表示を実現できることが分かる。

4.4 観客間移動演出

2019 年 4 月 27 日と 28 日に幕張メッセにおいて開催された“ニコニコ超会議 2019”では、山車の外装を装着したプロトタイプを展示ブース間に移動させ、空中像によってイベントの宣伝を行う移動サイネージとしての活用を行った(図 9)。また、2019 年 7 月 30 日には“南座新開場記念 八月南座超歌舞伎 [26]”の関連イベントとして、京都府の伏見稲荷神社の参道を移動させ、参道の両側にいる観客に空中像を提示する活用を行った。参道は屋外のため、被写体表示用ディスプレイ上部のハーフミラー BF, BR の反射率を下げることで、外光が観客方向に反射することによる被写体の視認性低下を軽減した。

いずれのイベントでも可搬型の特性を活用し、空中像がステージを離れ、観客の間に移動するという演出を実現できた。さらに観客は装置の両面から被写体の空中像を視聴できるため、より多くの観客の興味を引くことができた。

4.5 実用性評価

提案手法は、いずれのイベントでも運搬時のミラーやディスプレイの破損、期間中の機材停止といったトラブル

は生じず、高い安定性を有していた。さらにそれぞれの取り組みはイベント終了後に複数のプレスで紹介されたほか [20], [23], [24], [25], [27], 記事のタイトルで本技術に言及する事例も見られた(“初音ミクがスクリーン外から登場できた理由—「超歌舞伎」で使われた最新技術” [21], “「超歌舞伎」、初音ミクがスクリーンの外に 鏡音リン応援する「鏡屋！」の声も” [22])。これらのことから、提案手法は大規模イベントにおける常設展示・登場演出・観客間移動演出の利用シーンに高い実用性を有するだけでなく、エンターテインメント分野において大きなインパクトを与えることができると考えられる。

5. まとめ

可搬型の両面透過型多層空中像表示技術を提案した。本手法では正面と背面から被写体の両面を観察できることに加え、近景と遠景の 2 層を奥行き手がかりとして提示することによって被写体みの単層の空中像表示と比較してより臨場感の高い空中像の演出を実現できる。前後合わせて 6 層の空中像の表示を 4 面の表示面で実現できること、さらにそれぞれの空中像の奥行き知覚について、表示装置から観測者までの光路長に基づき整理することで、2 層の背景の奥行き方向の順序関係は視聴方向によらず維持できることを示した。また、プロトタイプを大規模イベントにおける演出装置として実装し、常設展示やステージ上の空中像表示装置との連携による登場演出、屋外も含めた観客間移動演出で活用したことで、エンターテインメント分野において十分な実用性を有することを確認した。

一方で、今回実装したプロトタイプの特長としてガラスを用いたことによる装置重量の増加や、常設展示や観客間移動でユーザの視距離が近い場合に、被写体自身の立体感が提示できないという点がある。今後は、部材の見直しによる装置軽量化検討や裸眼 3D ディスプレイを表示面に用いることによる被写体自身の立体感提示といった装置改良に加え、対面型コミュニケーションシステムとしての両面透過型多層空中像の活用手法について検討する。

参考文献

- [1] Ahmed Elmorshidy: Holographic Projection Technology: The World is Changing, *Journal of Telecommunications*, Vol.2, No.2, pp.104-112 (2010).
- [2] 宮崎大介: 三次元像の空中表示技術の現状と展開, 応用物理学会分科会日本光学会, Vol.40, No.12, pp.608-615 (2011).
- [3] 株式会社きもと: DILAD スクリーン, 入手先 (http://www.kimoto.co.jp/products/image/d_screen.html) (参照 2019-10-10).
- [4] Rakkolainen, I., DiVerdi, S., Olwal, A., Candussi, N., Hullerer, T., Laitinen, M., Piirto, M. and Palovuori, K.: The interactive fogscreen, *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, SIGGRAPH '05* (2005).
- [5] DMM VR Theater, available from (<https://vr-theater>).

dmm.com/) (accessed 2019-06-27).

[6] 高田英明: イマーシブテレプレゼンス技術 “Kirari!”, 日本画像学会誌, Vol.56, No.4, pp.366-373 (2017).

[7] Rhodes, T.J., Miller, G., Sun, Q., Ito, D. and Wei, L.-Y.: A Transparent Display with Per-Pixel Color and Opacity Control, *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, Article No.5 (2019).

[8] Samsung: Transparent OLED Display, CES2010 (2010).

[9] Maekawa, S., Nitta, K. and Matoba, O.: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Proc. SPIE, Three-Dimensional TV, Video, and Display V*, Vol.6392, 63920E (2006).

[10] Kim, H., Yamamoto, H., Koizumi, N., Maekawa, S. and Naemura, T.: HoVerTable: Dual-sided Vertical Mid-air Images on Horizontal Tabletop Display, *Proc. 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15)*, pp.1115-1120, ACM (2015).

[11] Jones, A., McDowall, I., Yamada, H., Bolas, M.T. and Debevec, P.E.: Rendering for an interactive 360degree light field display, *ACM Trans. Graph.*, Vol.26, No.3, p.40 (2007).

[12] NTT 持株会社ニュースリリース: SXSW2017 にてイマーシブテレプレゼンス技術 Kirari!®による音楽ライブショーケース “CYBER TELEPORTATION TOKYO at SXSW” を実施, 入手先 (<http://www.ntt.co.jp/news2017/1703/170307a.html>) (参照 2019-10-10).

[13] 八木明日香, 井村誠孝, 黒田嘉宏, 大城 理: 多視点観察可能なフォグディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.4, pp.409-417 (2012).

[14] REALFICTION: Dreamoc, available from (<https://www.realfiction.com/solutions/dreamoc-hd3.2>) (accessed 2019-10-10).

[15] 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, Vol.111, No.478, pp.151-156 (2012).

[16] 巻口誉宗, 高田英明, 新島有信, 松井龍也, 横山正典: モバイル端末で利用可能な小型多層空中像投影装置の提案と実装, 情報処理学会論文誌, Vol.58, No.11, pp.1787-1798 (2017).

[17] 高田英明: 眼に優しい Depth-Fused 3-D ディスプレイ技術, 月刊ディスプレイ, Vol.12, No.4, pp.61-68 (2006).

[18] 超歌舞伎 supported by NTT 「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-」, 入手先 (<http://chokabuki.jp/2018/>) (参照 2019-10-10).

[19] NTT 公式チャンネル: 超歌舞伎 2018 「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-」 Supported by NTT, 入手先 (<https://youtu.be/VYMHkVJT3p4/>) (参照 2019-10-10).

[20] 「超歌舞伎 supported by NTT」, 今年もニコニコ超会議で上演, 入手先 (<https://www.kabuki-bito.jp/news/5296/>) (参照 2019-10-10).

[21] 初音ミクがスクリーン外から登場できた理由—「超歌舞伎」で使われた最新技術, 入手先 (<https://japan.cnet.com/article/35118533/>) (参照 2019-10-10).

[22] 「超歌舞伎」, 初音ミクがスクリーンの外に 鏡音リン応援する「鏡屋!」の声も, 入手先 (<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1804/28/news040.html/>) (参照 2019-10-10).

[23] 歌舞伎と ICT が融合 舞台上で超高臨場感を実現したのは「電話屋!」, 入手先 (<https://withnews.jp/article/k0190118002qq0000000000000000S00110701qq000018347A>) (参照 2019-10-10).

[24] 初音ミクと中村獅童が共演, NTT が導く歌舞伎の新境地, 入手先 (<https://newswitch.jp/p/12874>) (参照 2019-

10-10).

[25] 第 1 回 観客と生み出す祝祭的空間のつくり方超歌舞伎 Supported by NTT, 入手先 (https://wired.jp/series/new-classics/01_chokabuki/) (参照 2019-10-10).

[26] 南座新開場記念 八月南座超歌舞伎, 入手先 (<https://chokabuki.jp/minamiza/>) (参照 2019-10-10).

[27] 「八月南座超歌舞伎」超お練りに獅童、蝶紫、國矢、獅一が登場, 入手先 (<https://www.kabuki-bito.jp/news/5644/>) (参照 2019-10-10).

[28] Yoshida, S.: fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays, *Optics Express*, Vol.24, No.12, pp.13194-13203 (2016).

[29] Makiguchi, M., Takada, H., Kawakami, T. and Sasai, M.: 360-Degree Tabletop Type 3D Screen System Using Linear Blending of Viewing Zones and Spatially Imaged Iris Plane, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.50, No.1, pp.585-588 (2019).

[30] Plasencia, D.M., Joyce, E. and Subramanian, S.: MisTable: Reach-through Personal Screens for Tabletops, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3493-3502 (2014).



巻口 誉宗 (正会員)

2012年北海道大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年、日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所研究員。集合知・クラウドソーシングの研究を経て、現在、3D 映像表示のデバイスやインタラクション手法の研究に従事。



高田 英明

1997年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了。同年、日本電信電話株式会社 NTT 入出力システム研究所入社。2007年早稲田大学大学院国際情報通信研究科博士後期課程修了。現在、NTT サービスエボリューション研究所主幹研究員。立体知覚を中心とした視覚心理、3D ディスプレイに関する研究に従事。2003年電子情報通信学会業績賞、2006年文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)受賞。博士(国際情報通信学)。



坂本 大介

2008年公立ほこだて未来大学大学院システム情報科学研究科博士（後期）課程修了。博士（システム情報科学）。国際電気通信基礎技術研究所（ATR）でインターン，東京大学で日本学術振興会特別研究員 PD，JST ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト研究員，東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻助教，特任講師を経て現在，北海道大学大学院情報科学研究科准教授。人とロボットを含む情報環境とのインタラクション設計に関する研究に従事。



小野 哲雄 （正会員）

1997年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年（株）ATR 知能映像通信研究所客員研究員。2001年公立ほこだて未来大学情報アーキテクチャ学科助教授，2005年同学科教授。2009年北海道大学大学院情報科学研究科教授，現在に至る。博士（情報科学）。ヒューマンエージェント/ロボットインタラクション（HAI/HRI），インタラクティブシステムに関する研究に従事。電子情報通信学会，ヒューマンインタフェース学会，認知科学会，ACM 各会員。