

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,a)} 高田 英明^{1,b)}

概要：遠隔地のスポーツのライブビューイングや仮想アイドルの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として投影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掛かりな装置を設置する必要があり、被写体をステージの袖から登場させるといった場所を限定しない演出は困難であった。そこで我々は、被写体を空中像として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、さらにハーフミラーによる映像の透過と反射を組み合わせることで、近景と遠景の2層の背景空中像を観察できる。この近景と遠景は正面・背面の観察方向に関わらずに光学的に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からプロトタイプ実装、実イベント適用まで広く報告する。

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

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ひとつとして、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のみの映像を投影する手法、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表示する手法 [5], [6] がある。これらの手法は、凹面鏡 [2] や実像鏡 (DCRA[7], Aerial imaging plate[8]) といった結像光学系によって空中像を表示する手法との比較において大型化が容易であることから、遠隔地のスポーツのライブビューイングや仮想アイドルのコンサート・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フォグスクリーン、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

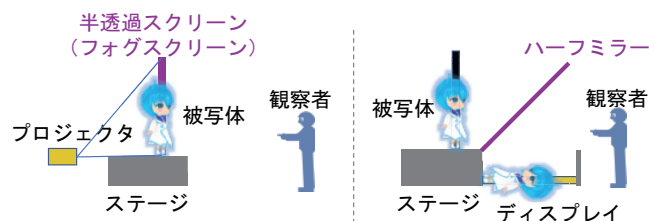


図 1 ステージ演出で用いられる空中像表示手法の例
Fig. 1 Example of aerial image display method

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投影しないことで被写体だけがステージ上に表示され、ステージ上の実物体とのオクルージョンや位置関係が空中像の奥行き位置の手がかりとなり、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、大規模イベントでは観客から空中像までの視距離が離れており、両眼視差が働きにくくなる点も、2 次元の空中像で十分な臨場感を提示できる要因となっている。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クリーンサイズや、ハーフミラーによる虚像のサイズによって制限され、ステージ上の被写体の移動範囲が広いほど大掛かりな装置構成が必要となる。さらに、被写体の表示位置はスクリーン面や虚像面に固定されるた

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,
Kanagawa, Japan

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

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

め、従来の方法では投影装置の表示エリア外となるステージ裾からの被写体の登場や、観客席への被写体の移動といった演出は困難であった。

そこで我々は、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とし、その演出を拡大・補助するための手法の一つとして、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装置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、舞台装置としての利用において装置内の被写体を視聴できる観客数が限られないようにす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て、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依らず光学的に保たれるため、遠景・近景といった役割をもたせた演出が可能である。

本稿の構成は下記のとおりである。2章では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章では実イベントでの活用に向けたプロトタイプの実装と、実イベントでの展示の様子、舞台での演出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

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[9]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伴う立体像を視聴できる手法を提案している。この手法では要件2の多方向への視点映像提示が可能なことに加え、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大型化のための機材が大掛かりとなり、可搬化や要件1の等身大化の実現が困難である。

Kimら[8]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。この手法では、Aerial imaging plate (AIP)をテーブルの天板に用い、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、テーブル上にディスプレイの実像を結像させることで、両面からの視聴を実現している。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な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必要なプレートサイズも巨大となり、可搬型を維持したままの等身大化は困難である。

2.1 半透過スクリーンによる多方向投影

こうした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活用する手法がある。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[10]。また、フォグスクリーンについても八木ら[11]は円柱形状の霧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なっていることから、平面形状の等身大フォグスクリーン[4]への両面映像投影も原理的に可能と考えられる。

一方で、半透過スクリーン・フォグスクリーンともに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光源の入射角度が大きく異なり、スクリーンによって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の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高輝度な大型の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。

2.2 ハーフミラーによる多方向投影

ハーフミラーを用いて多方向へ異なる視点映像を提示

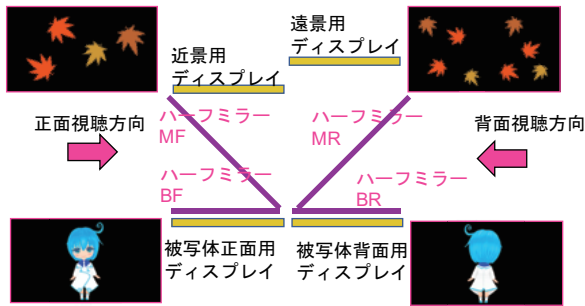


図 2 提案手法の側面図

Fig. 2 Side view of proposal method

する方式の例として, Dreamoc[12] で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 方向の全 3 方向に向けて視点映像の空中像を表示している. この方式に必要なハーフミラーとディスプレイの部材は等身大表示が可能な製品が市販されており, 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ている. 一方で, 要件 3 の奥行き手がかりについては, 各観察方向に対して提示できる情報量が限られ, 背景表示による遠近感の提示や, 被写体の影の表示といった臨場感を高める情報を動的に付与できないという問題がある.

こうした問題に対し, 空中像へ奥行き手がかりを付与するアプローチとして, 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 [13]. 我々はこれまで, 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てきた [14]. この手法では, モバイル端末のディスプレイ 1 台を 2 分割して前景映像と背景映像を表示し, 前景は 1 枚のハーフミラーへの反射で, 背景は 2 枚のハーフミラーの透過・反射によって光路を折り返して観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. 本稿ではこのハーフミラーによる光路長制御の原理を拡張し, 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ることで, 空中像を両面から多層で視聴できる構成を提案する.

3. 提案手法

図 2 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を表示する正面用ディスプレイと, 被写体の背面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ため, 被写体の正面と背面をそれぞれ視聴できる. 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

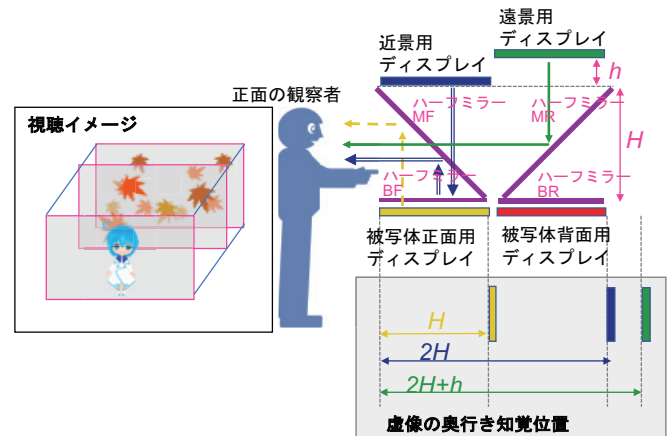


図 3 知覚される空中像の位置

Fig. 3 Position of perceived virtual image

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提示できる. このことから提案手法は要件 2 を満たす. また, 被写体のサイズは, 使用するディスプレイサイズとハーフミラーのサイズによって決まり, 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る. よって要件 1 も満たす.

以下では, 提案手法において空中像が形成される奥行き位置をまとめ, 要件 3 の被写体以外の奥行き手がかりの付与について述べる.

3.1 空中像の奥行き知覚について

図 3 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. h 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分である.

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. 正面の観察者は装置手前を基準とすると, 被写体の正面の空中像を奥行き距離 H , すなわち装置の奥行き中央位置に視認する. 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

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

察者に視認される。これにより光路長が延長され、装置手前から $2H$ の位置、すなわち反対側の開口部の奥行き位置に空中像を表示する。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とから、視認される遠景の空中像は奥行き $2H + h$ となる。

同様に、背面の観察者は装置手前から距離 H の位置に被写体の背面の空中像を視認する。また、近景用ディスプレイは奥行き $2H$ に、遠景用ディスプレイはハーフミラー 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、 $2H + h$ の位置に知覚される。

これらのことから、正面方向・背面方向の観察方向の違いに関わらず、被写体の空中像、近景・遠景の空中像の奥行き位置の順序関係は変化しないことがわかる。よって近景に木々を、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をもった奥行き手がかりの付与が可能になる。さらに、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 によって制御できることから、近景と遠景の 2 層を用いて Depth-fused 3-D (DFD)[15] のような立体視効果を付与することも可能である。このように提案手法は複数の異なる奥行き位置に空中像を表示できることから、要件 3 の奥行き手がかりを十分に付与できると考えられる。

3.2 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遠景と近景の奥行き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わかる。

3.3 装置の透過率について

本装置ではハーフミラーを用いているため、装置対面側の実空間の光も透過され、装置内の空中像と同時に観察できる。これにより、ディスプレイの存在をより感じにくくなり、被写体の臨場感を高められることに加え、ステージ上の実物体や大型スクリーンなどと組み合わせたコンテンツの演出も可能である。本装置の対面側の実物体に対する透過率は、ハーフミラーの透過率を 50% とすると 2 枚のハーフミラーを透過して視認されるため、25% となる。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、例えば半透過スクリーンで同様の構成を実現する場合は 6 枚のスクリーンが必要となる。この場合、本構成と同様の透過率とするためには 1 枚あたりのスクリーンの透過率は 80% 以上必要となり、その分プロジェクタの輝度の利用効率が大きく低下する。このことから、提案手法の構成は高い透過率を保ちながら、効率的な多層空中像表示を実現できると考えられる。

4. 実装とアプリケーション

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-」」[16] では、ステージ上に半透過スクリーンを設置し、空中像による仮想アイドルの舞台出演が行われた。この空中像の演出の中で、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シーンを実現するため、提案手法のプロトタイプを実装した。

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）のディスプレイを用いた。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(4096 × 2160 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、運搬による破損等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。遠景用、近景用ディスプレイの高さの差分 h 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。

プロトタイプは 2 台作成し、1 台は「超歌舞伎 supported by NTT 「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-」」において観客席後部の展示スペースに常設し、1 台は山車として演目で

利用した。

4.1 大規模イベントでの展示

図4に展示スペースに設置したプロトタイプでの空中像投影の様子を示す。コンテンツは前景に被写体を、近景には大サイズの桜吹雪、遠景には小サイズの桜吹雪を投影した。図4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わかる。また、肉眼での観察では被写体と近景、遠景の間にそれぞれ両眼視差による奥行き差が知覚され、特に近景と遠景は桜吹雪の大きさの差分によっても奥行き感が強調され、より自然な奥行き手がかりを付与できた。

本展示は演目の合間に観客が自由に観察できたことから、多くの観客が興味を持って立ち止まり、技術パネルで原理を確認しながら間近で正面と背面に回り込んで空中像を観察する様子や、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取ることで被写体空中像と並んだ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。

4.2 大規模イベントでの舞台装置としての活用

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5に示す[17]。

山車は被写体を表示した状態でステージの裾から登場し、ステージ上で一回転して背面を見せたあと半透過スクリーンの前で停止する。その後、山車から被写体を消すのと同時に、山車背面のステージ上の半透過スクリーンへ被写体を表示させた。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。また、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も演出として桜吹雪が舞っていたことから、空中像の映像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効果を発揮することができた。表示ディスプレイとして有機ELモニターを用いたことで、ステージ上の比較的明るい環境でも鮮明な被写体と背景の空中像が視認できた。

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層の表示による奥行き手がかりの補強によって、空中像をより臨場感高く表示できる。プロトタイプの実装によって、前後合わせて6層の空中像の表示を、背景の2層を共通化することで4台のディスプレイで実現できること、さらに2層の背景の奥行き方向の順序関



図4 プロトタイプの外観、および観察される空中像 ([17] より抜粋)

Fig. 4 Virtual image by prototype

係を視聴方向に依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山車の演出装置として実装し、ステージ上の演出や空中像表示装置との連携によって、あたかも被写体が山車に乗って登場したかのような演出を実現した。

今後は演出装置としての実用性を高めるため、部材の見直しによる装置軽量化の検討や視聴方向の増加の検討、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したい。

参考文献

- [1] Ahmed Elmorshidy: “Holographic Projection Technology: The World is Changing”, Journal of Telecommunications, Volume 2, Issue 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: http://www.kimoto.co.jp/products/image/d_screen.html,

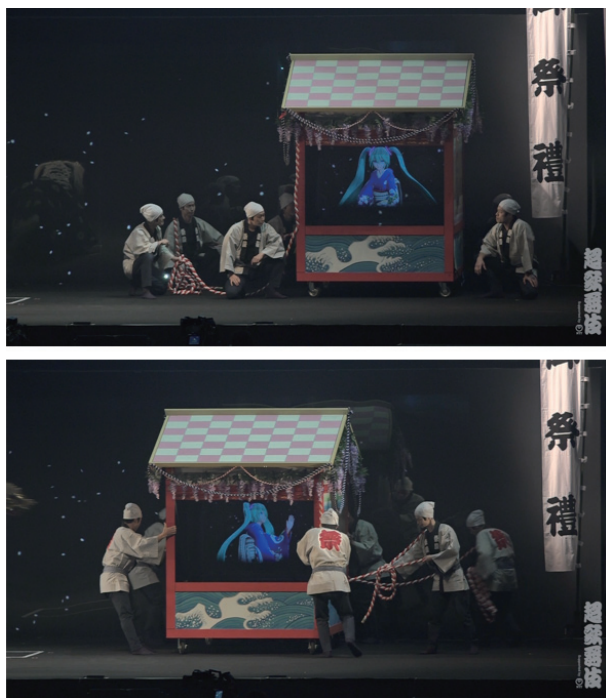


図 5 舞台装置としての活用風景

Fig. 5 Application for the stage performance

- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 超歌舞伎 supported by NTT 「積思花顔競-祝春超歌舞伎賑-」: <http://chokabuki.jp/>, (2018.12.17).
- [17] 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,” <https://youtu.be/VYMHkVJT3p4/>, (2018.12.17).
- (2018.12.17).
- [4] I. Rakkolainen, S. DiVerdi, A. Olwal, N. Candussi, T. Hullerer, M. Laitinen, M. Piirto, and K. Palovuori: “The interactive fogscreen,” In ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, SIGGRAPH '05, ACM,(2005).
- [5] DMM VR Theater: <http://www.dmm.com/>, (2018.12.17).
- [6] 阿久津 明人, 小野 明, 高田 英明, 外村 喜秀, 井元 麻衣子: “2020 Public Viewing -イマーシブテレプレゼンス技術「Kirari!」,” NTT 技術ジャーナル, Vol 28, No. 10, pp.26-29 (2016).
- [7] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, Osamu Matoba: “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” Proc. SPIE 6392, Three-Dimensional TV, Video, and Display V, 63920E (2006).
- [8] Hanyuool Kim, Hiroki Yamamoto, Naoya Koizumi, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura: “HoV-erTable: Dual-sided Vertical Mid-air Images on Horizontal Tabletop Display,” In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '15). ACM, pp. 1115-1120 (2015).
- [9] Andrew Jones, Ian McDowall, Hideshi Yamada, Mark T. Bolas, Paul E. Debevec: “Rendering for an interactive 360degree light field display,” ACM Trans. Graph. 26(3), 40 (2007).
- [10] 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,” <http://www.ntt.co.jp/news2017/1703/170307a.html>, (2018.12.17).
- [11] 八木 明日香, 井村 誠孝, 黒田 嘉宏, 大城 理: “多視点観察可能な Fog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, No4, pp.409-417 (2012).
- [12] REALFICTION, Dreamoc: <https://www.realfiction.com/solutions/dreamoc-hd3.2>, (2018.12.17).