

Field Papers

Implementation of an AR-3D Display System using a Holographic Optical Element Screen and Multiple Small Projectors

Member Yasuyuki Ichihashi †, Mitsuyoshi Wakunami †, Member Shunsuke Yoshida †,††

Abstract We propose a new AR-3D display system that can display people and other objects in 3D on a transparent screen, which is expected to be useful in online face-to-face communication. This display is composed of a newly developed functional reflective film using hologram printing technology and multiple projectors. In the prototype, 32 small projectors arranged horizontally at intervals of 2 degrees were used to project a group of elemental images that generate parallax onto a screen measuring 35 cm diagonally. The reproduced 3D image is full color and has the same resolution as the original projector, and can be viewed simultaneously by multiple people without wearing 3D glasses within a range of 64 degrees horizontally and approximately 10 degrees vertically relative to the image. Furthermore, we have performed an initial implementation of a system that acquires, transmits, and displays shapes, and in a demonstration experiment, high-resolution facial data of a specific person was used as input, and the image was projected over a transparent background. The system succeeded in capturing natural facial expressions.

Keywords:

1. Introduction

In recent years, the speed and capacity of information communication through 5G and XR (AR) have increased.

Augmented Reality, VR: Virtual Reality, MR: Mixed

With the rise of AR (a collective term for augmented reality) technology, research and development into two-way communication with remote locations is accelerating. In particular, visualization technology incorporating AR display, which can overlay digital information on real-world scenery or near objects, is expected to have the potential to expand human capabilities in a variety of fields. For example, communication tools that combine smart glasses and AR are becoming more widespread, and in the medical field, 3D online diagnostics for remote diagnosis of symptoms are becoming more common. In the civil engineering and construction industry, the development of augmented reality (AR) work environments is currently underway, with the aim of reducing travel costs to work sites. In such remote communication scenarios, it is necessary to realize an environment that combines three types of technologies: an environment that can acquire and transmit 3D information of people and space without delay, and ideally, an environment that can display 3D images that can be observed with the naked eye without wearing any equipment.

In the "acquisition" of 3D information, shape acquisition from point clouds using LiDAR and ToF sensors, which are already in practical use, is being considered.

Various methods have been proposed according to the type of object to be acquired and the required accuracy, such as photogrammetry³), which generates polygon mesh data from multi-viewpoint images of an object taken from multiple directions, and more recently NeRF⁴) , which generates new viewpoint images from multi-viewpoint images using deep learning.

Next, when considering remote communication between people, which is the "transmission" of 3D information, if a group of cameras that acquire high-definition shape data of people in real time is installed at each communication point, there are many challenges, such as the need to transmit 3D information without delay even through a wide variety of communication paths, and to develop compression and decoding processing for shape data.

inally, in the case of "displaying" three-dimensional information, wearable devices such as smart glasses and head-mounted displays are being used. While AR display using wearable devices has become commonplace due to their lighter weight and higher functionality, limitations in use, such as the inconvenience of wearing the devices and the inability to share information among multiple people, have become an issue. As a means of resolving limitations in use of wearable devices, various technologies that can present 3D information using stationary devices have been proposed^{5),6)}, and some of these have already been commercialized, such as light field displays based on ray reconstruction⁷⁾ and displays based on viewpoint tracking⁸⁾. However, these have limitations in that they are limited to AR-3D display that can be observed by multiple people at the same time, as described above, due to the presence of obstructions such as high-resolution liquid crystal panels behind the reconstructed image, making transparent AR display impossible and limiting the number of observers to around one.

2023年2月6日受付, 2023年4月28日再受付, 2023年6月4日採録

† (国研) 情報通信研究機構 電磁波研究所

(〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1, TEL 042-327-7637)

†† 京都橘大学 工学部

(〒607-8175 京都府京都市山科区大宅山田町 34, TEL 075-571-1111)

【機械翻訳コンテンツの著作権について】

当サイトに掲載されている原著論文の著作権は映像情報メディア学会に帰属します。原著論文および翻訳論文の無断使用は禁止します。詳細は映像情報メディア学会著作権規定をご覧ください。

ホログラフィック光学素子と複数の小型プロジェクタを用いたAR-3Dディスプレイシステムの実装

Implementation of an AR-3D Display System using a Holographic Optical Element Screen and Multiple Small Projectors

正会員 市橋 保之[†], 涌波 光喜[†], 正会員 吉田 俊介^{†,††}

Yasuyuki Ichihashi[†], Koki Wakunami[†] and Shunsuke Yoshida^{†,††}

あらまし オンラインの対面コミュニケーションなどで期待される、人物などを透明なスクリーンに3D表示できる、新しいAR-3Dディスプレイシステムを提案する。本ディスプレイは、ホログラムプリント技術によって今回新規に開発した機能性反射フィルムと、複数のプロジェクタから構成される。試作機では水平に2度間隔で配列した32台の小型プロジェクタを用い、対角35cmの大きさのスクリーンに視差を生じさせる要素画像群を投影した。再生される3次元映像は、元のプロジェクタ解像度と同等かつフルカラーであり、像に対して水平64度、垂直約10度の範囲内で、3Dメガネを着用せずに複数人が同時に観察できる。さらには、形状の取得-伝送-表示を行うシステムの初期実装を行い、実証実験では特定人物を高精細に計測した顔データを入力として、透過した背景越しに自然な顔の表情を映し出すことに成功した。

キーワード：AR-3Dディスプレイ、ホログラフィック光学素子（HOE）、遠隔コミュニケーション、光線情報処理、パストレース

1. ま え が き

近年、5Gによる情報通信の高速大容量化やXR（AR：Augmented Reality, VR：Virtual Reality, MR：Mixed Realityなどの総称）技術の台頭により、遠隔地との双方向コミュニケーションに関する研究開発が加速している。なかでも、現実の風景や対象物の近傍にデジタルな情報を重畳表示できるAR表示を取り入れた可視化技術は、人間の能力を拡張する可能性を秘めた手段としての期待が、様々な分野で高まっている。例えば、スマートグラスとARを組み合わせたコミュニケーションツールが普及しつつあり、医療分野では症状を遠隔で診断するための3次元オンライン診療システムの開発¹⁾や、土木・建築業界では作業現場への移動コスト削減を目的としたAR作業環境の試験的な導入²⁾などが進められている。こうした遠隔コミュニケーションを想定したシナリオにおいては、人物や空間の3次元情報を遅延なく「取得・伝送」し、理想的には装置を身に着けることなく裸眼で観察可能な3次元映像を「表示」できる3種の技術が連続した環境の実現が求められる。

3次元情報の「取得」においては、すでに実用化されつつあるLiDARやToFセンサによる点群による形状取得をは

じめ、多方向から対象物を撮影した多視点画像よりポリゴン・メッシュデータを生成するフォトグラメトリ³⁾や、近年では深層学習した多視点画像から新規視点画像を生成するNeRF⁴⁾など、取得対象の種類や要求される精度に応じて様々な手法が提案されている。

次に、3次元情報の「伝送」である人物同士の遠隔コミュニケーションを考えた場合、前提として高精細な人物の形状データをリアルタイムに取得するカメラ群を各通信拠点に設置するのであれば、多種多様な通信路を介しても3次元情報を遅延なく伝送する、形状データの圧縮・復号処理を構築する必要があるなど課題も多い。

最後の3次元情報の「表示」においては、スマートグラスやヘッドマウントディスプレイといったウェアラブルデバイスによるAR表示が、装置の軽量化・高機能化によって身近になった一方で、装着が煩わしい、多人数で情報を共有できないといった、使用時における制約が課題となってきた。装着型のデバイスによる使用時の制約を解消する手段として、据え置き型で3次元情報を提示できる技術がこれまでに様々な方式で提案⁵⁾⁶⁾されており、光線再生に基づくライトフィールドディスプレイ⁷⁾や、視点追従に基づくディスプレイ⁸⁾など、すでに商品化されているものもある。しかしながらそれらは、再生像の奥に高解像度な液晶パネルなどの遮蔽物があり、透過的なAR表示ができず、観察者も1名程度に限定されるなど、これまで述べてきたような多人数が同時に観察できるAR-3D表示という

2023年2月6日受付、2023年4月28日再受付、2023年6月4日採録

[†]（国研）情報通信研究機構 電磁波研究所

（〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1, TEL 042-327-7637）

^{††} 京都橘大学 工学部

（〒607-8175 京都府京都市山科区大宅山田町34, TEL 075-571-1111）

こちらは英語原著論文の機械翻訳版です。
次ページが原著論文で、翻訳版と交互に展開されます。機械翻訳のため、誤字や誤訳、翻訳が未反映の部分が含まれている可能性があります。

A display that meets these requirements has not yet been put into practical use.

In this paper, we focus on the holographic optical element (hereafter, Here, we report on the development of a new AR-3D display that consists of a single transparent screen (HOE) and multiple small projectors. The display displays high-resolution, full-color 3D images with a wide horizontal viewing angle , allowing multiple people to view them simultaneously.

The film used for the screen of this 3D display is an HOE made by hologram printing technology (HOPTEC) .

We have now developed a new HOE screen that can accommodate multiple projectors, in addition to the transparent AR-3D display9)10) , which is a type of display that uses light from multiple projectors. This makes it possible to reproduce full-color 3D images based on the light field reproduction principle while maintaining the image quality of each projector.

Furthermore, this paper reports on the initial implementation of a system capable of "acquiring, transmitting, and displaying" the three -dimensional information necessary for remote communication. This time, assuming face-to-face communication, we use the "Light Stage"11) as a means to "acquire" high-definition three -dimensional information of a human face .

By using a 3D display technology, we have implemented a system that can reproduce a specific person's face in full color and high definition on a transparent screen in a state that can be observed by multiple people with the naked eye by combining the 3D information output in a standard file format that can be "transmitted" with a technology that converts the 3D information output in a "transmittable" standard file format and "displays" it

based on the principle of light field. In the following, we first describe the principle of the newly developed AR-3D display, and then show the process from the data acquired as a high-definition face shape to displaying it on the AR-3D display through appropriate light information processing. Finally, we report on the initial implementation of the system and the reproduction results.

2. AR-3D Display System

2.1 3D display configuration

The 3D display we developed has a simple configuration , as shown in Figure 1 , consisting of a transparent screen made of HOPTEC and multiple projectors arranged horizontally.



Figure 1. Overall configuration of a 3D display.

Table 1. Specifications of the display computer.	
Item	Specifications
CPU	AMD Ryzen 7 3700X (3.6GHz, 8cores, 16threads, TDP65W)
M/B	MSI MEG X570 UNIFY
Memory	CORSAIR CMK16GX4M2A2666C16 x 2
GPU	ASUS RX5700XT-8G x 2
SSD	Crucial CT1000P1SSD8JP
Power Supply	CORSAIR CP-9020152-JP
OS	Windows 10 Pro

The projector used for the implementation is a DLP type .

The projector is a ready-made product (854x480 pixels (FWVGA), brightness approximately 60 lumens) , with a projection distance of 800 mm to the center of the HOE, and is arranged on a surface below the center at horizontal angle intervals of 2 degrees. The video signal to each projector is generated by a single display computer shown in Table 1 , which generates 32 channels of 720p video signals, and outputs them to each projector via a distributor and HDMI cable.

The observer stands directly facing the HOE screen at a distance of approximately 1 m (the area behind the projector, on the left side of the paper in Figure 1) and observes the reproduced image while moving left and right within a horizontal range of 64 degrees centered on the normal line of the screen surface, or multiple people can observe the image simultaneously within that range.

2.2 Specifications and fabrication of the HOE

The fabricated HOE screen has the function of a concave mirror as its basic optical performance. With a simple concave mirror, a group of light rays projected from a projector ideally converges to a certain point. Since many projectors are arranged horizontally and project images with parallax, the viewing zone can be formed as a collection of multiple observation points. However, unlike ordinary concave mirrors, the optical element used in this display is designed as an off-axis concave mirror in which the center of curvature of the concave mirror is off the central axis (optical axis) of the optical element. Furthermore, in order to form a viewing zone in the vertical direction, the optical function is recorded in a state where multiple light rays contained in the image projected from the projector are emitted as multiple light rays distributed in a certain vertical angle range when they are reflected. With this function, the horizontal observable range (horizontal viewing angle) of the display coincides with the angular range of the horizontal arrangement of the projectors, while the vertical observable range (vertical viewing angle) is set by the HOE screen.

The angle unit of the amplitude of the reflected light beam is used to control the The main specifications of the fabricated HOE and the entire 3D display are shown in Table 2 .

Table 2. Main specifications of the implemented 3D display.	
Item	specification
Screen size	250mm (horizontal) x 250mm (vertical) Observation distance Viewing
Projection distance	800mm
Observation distance	>=1,000mm
Viewing angle	64 degrees (horizontal) x 10 degrees (vertical)
Reproduction wavelength	473nm, 532nm, 640nm

要求を満たすディスプレイはまだ実用化されていない。

そこで本論文では、ホログラフィック光学素子（以下、HOE）である透明なスクリーン 1 枚と、複数の小型プロジェクタのみで構成される、高解像度かつ広い水平視野角でフルカラー 3 次元映像を複数人が同時に観察できる、新しい AR-3D ディスプレイを開発したので報告する。

本 3D ディスプレイのスクリーンに用いたフィルムは、ホログラムプリント技術（以下、HOPTEC）により作製された HOE である。以前著者らの所属するグループから報告した HOE スクリーンと 1 台のプロジェクタを組み合わせた透明 AR-3D ディスプレイ⁹⁾¹⁰⁾ に対して、今回新たに複数のプロジェクタに対応する機能を付与した HOE スクリーンを開発したことにより、それぞれのプロジェクタの画質を維持したまま、ライトフィールドの再生原理に基づいてフルカラーの 3 次元映像が再生可能となった。

さらに本論文では、遠隔コミュニケーションに必要な 3 次元情報の「取得・伝送・表示」を実現可能なシステムとしての初期実装についても報告する。今回は対面コミュニケーションを想定して人の顔を対象として、高精細な 3 次元情報を「取得」する手段としては「ライトステージ」¹¹⁾ を用い、「伝送」可能な標準的なファイルフォーマットで出力された 3 次元情報を、ライトフィールドの原理に基づき 3 次元像再生する要素画像に変換して「表示」する技術と組み合わせることにより、透明なスクリーン上にフルカラーの高精細な特定人物の顔を多人数かつ裸眼で観察可能な状態で再生できるシステムとして実装した。

以下ではまず、新たに開発した AR-3D ディスプレイの原理について述べ、次に高精細な顔形状として取得されたデータから、適切な光線情報の処理を経て AR-3D ディスプレイに表示するまでの過程について示す。最後に、これらシステムの初期実装と再生結果について報告する。

2. AR-3D ディスプレイシステム

2.1 3D ディスプレイの構成

今回開発した 3D ディスプレイは図 1 に示すように、HOPTEC で作製した HOE による透明なスクリーンと、複数のプロジェクタを水平方向に並べたのみの簡素な構成



図 1 3D ディスプレイ全体の構成。

表 1 表示用計算機の仕様。

項目	仕様
CPU	AMD Ryzen 7 3700X (3.6GHz, 8cores, 16threads, TDP65W)
M/B	MSI MEG X570 UNIFY
メモリー	CORSAIR CMK16GX4M2A2666C16×2
GPU	ASUS RX5700XT-8G×2
SSD	Crucial CT1000P1SSD8JP
電源	CORSAIR CP-9020152-JP
OS	Windows10 Pro

となっている。実装に用いたプロジェクタは DLP 方式の既製品（画素数 854×480 (FWVGA)、輝度約 60 ルーメン）32 台であり、HOE 中心までの投影距離は 800mm で、中心位置より下方の面に水平角度間隔 2 度で配列されている。各プロジェクタへの映像信号は、表 1 に示す表示用計算機 1 台で 32 チャンネル分の解像度 720p の映像信号を生成し、分配器と HDMI ケーブル経由で各プロジェクタに出力している。

観察者は、HOE スクリーンから 1m 程度離れて正対する位置（図 1 では紙面左側、プロジェクタの背後のエリア）に立ち、スクリーン面の法線を中心に水平 64 度の範囲内で左右方向に移動しながら再生像を観察したり、あるいはその範囲内にて複数人が同時に観察することができる。

2.2 HOE スクリーンの仕様と作製

作製した HOE によるスクリーンは、基本的な光学性能として凹面鏡の機能が実装されている。単純な凹面鏡であれば、あるプロジェクタから投射された光線群は、理想的にはある点に集光する。プロジェクタは水平方向に多数並べられて視差を持つ像を投射するため、複数の観察点の集まりとして視域が形成できる。ただし本ディスプレイにて用いる光学素子は、通常の凹面鏡とは異なり、凹面鏡の曲率中心が光学素子の中心軸（光軸）から外してある、軸外し凹面鏡として設計されている。さらには、垂直方向の視域を形成する目的で、プロジェクタから投影される映像に含まれる各々の光線が反射する際に、ある垂直の角度範囲に分布する複数の光線として射出されるよう、光学的な機能が複数多重化された状態として記録されていることに特徴がある。この機能によって、ディスプレイとしての水平方向の観察可能な範囲（水平視野角）は、プロジェクタ群が水平方向に配列された角度範囲に一致するが、垂直方向の観察可能な範囲（垂直視野角）は HOE スクリーンに設定した光線群の反射時の角度単位のふり幅で制御することができる。作製した HOE と本 3D ディスプレイ全体の主な仕様を表 2 に示す。

表 2 実装した 3D ディスプレイの主な仕様。

項目	仕様
スクリーンサイズ	250mm（水平）×250mm（垂直）
投影距離	800mm
観察距離	≥1,000mm
視野角	64 度（水平）×10 度（垂直）
再生波長	473nm, 532nm, 640nm

こちらは英語原著論文の機械翻訳版です。
次ページが原著論文で、翻訳版と交互に展開されます。機械翻訳のため、誤字や誤訳、翻訳が未反映の部分が含まれている可能性があります。

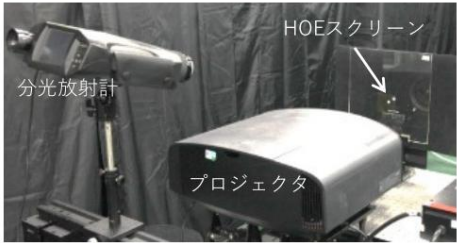


Fig. 2 Optical system for evaluating HOE regeneration.

Next, we will describe the fabrication of the HOE screen. First, the reflection function to be imparted to the film is calculated as a phase distribution and converted into a computer-generated hologram (hereafter referred to as CGH). This CGH is physically reconstructed by an optical device in the exposure equipment, and a volume hologram is recorded on the film by interfering the object light generated by the CGH with the reference light. The exposure equipment is equipped with laser light sources with wavelengths of 473, 532, and 640 nm, and the CGHs corresponding to each wavelength are simultaneously projected onto three reflective liquid crystal panels.

The hologram is reproduced simultaneously and exposed to the recording material, allowing for three wavelengths to be recorded multiplexed. Although the diffraction efficiency is reduced due to crosstalk between wavelengths compared to recording at a single wavelength, the wavelength selectivity of the hologram allows one sheet to function for three wavelengths.

The HOE screen was successfully created. Next, we will discuss the relationship between the spectral reflectance of the HOE and the chromaticity of the reconstructed image. The light incident on the HOE from the projector is Due to the wavelength selectivity of the HOE , the peak is near the recording wavelength Only the light reflected from the HOE is reflected. As a result, the chromaticity of the reconstructed image observed is the product of the spectral characteristics of the projector and the spectral reflectance of the HOE multiplied by the CIE color matching function. In reality, precise control is difficult because the reconstruction wavelength shifts due to the shrinkage of the hologram recording material and the difference in the incident angle of the light during recording and reconstruction. However, in this display, the white point ($x = 1/3, y = 1/3$ in the CIE 1931 color space) is ideally reconstructed without the need for color adjustment involving gradation limitations on the projector side. The optimal diffraction efficiency is calculated from the CIE color matching function, the spectral characteristics of the projector measured in advance, and the peak wavelength during reconstruction of the HOE, and is reflected in the exposure dose when the HOE screen is manufactured. The chromaticity of the reconstructed image in this implementation was measured using a spectroradiometer (Photo Research, PR-670) installed in the center of the viewing zone as shown in Figure 2 . Table 3 and Figure 3 show the diffracted light measured when a white image (R=255, G=255, B=255) was

projected from the central projector onto two types of screens, for an HOE made by adjusting the exposure intensity ratio of the recording wavelengths mentioned above, and an HOE made by using an exposure intensity ratio calculated only from the absorbance of the recording material as a comparison method12) ("Comparison method" in the figure) . The diffracted light was then plotted in the CIE1931 color space. In the proposed method, the projected light from one projector is given the ability to diffract in the reflection direction within a horizontal range of 2 degrees, the same as the angular interval of the projectors. Therefore, the three chromaticity values measured by shifting the angle of the measurement direction relative to the horizontal axis of the screen by 0, 1, and 2 degrees are also shown.

(Comparison method only measures from 0 degrees direction).

From Figure 3 , it was confirmed that the HOE screen created by optimizing the exposure intensity ratio proposed here is closer to the target white point ($x = 1/3, y = 1/3$) than the HOE created by the comparative method that considered only absorbance. It was also confirmed that there was almost no color change within the horizontal range of 2 degrees assigned to one projector .

Since the diffraction efficiency of the reflected light of the HOE responds almost linearly to the brightness and intensity of the incident light, the color creation on the projector side is directly reflected in the reproduced image for gradation expression between 0 and 255. This result shows that in an optimal HOE screen playback environment, the white balance can be improved by optimizing the exposure intensity ratio without the need for color adjustment on the projector side. Note that if the incident angle of the light from the projector deviates from the incident angle of the reference light used when creating the HOE screen, chromatic aberration occurs, mainly due to a shift in the peak wavelength of the diffracted light. In that case, it is necessary to adjust the white balance separately on the projector side.

Figure 4 shows the results of image reconstruction using a color checker (Macbeth chart), a diffuse content placed on the HOE screen . Note that this time, the adjustment is made to the exposure intensity ratio, so only the white balance is the target index. Please note that the color of the reconstructed image is only a reference result, as it does not include color components, it does not compensate for nonlinearity of gradation due to the projector's unique color creation, and the background is transparent and superimposed to show the transparency of the screen. From the reconstruction result of the patch in the lower part of the figure , it was confirmed that reconstruction with a natural white balance was successful in the black-and-white gradation.

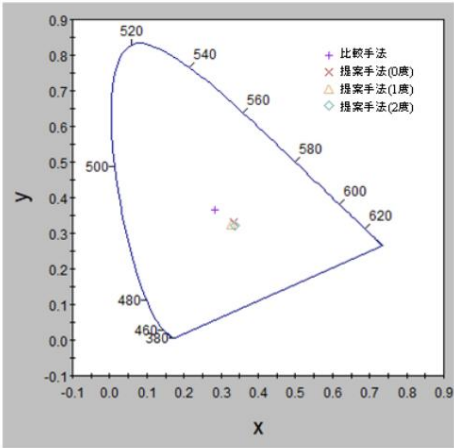


Figure 3. Measurement results plotted in the CIE1931 color space.

Table 3. Measured chromaticity

	Comparison method	0 degrees	1 degree	2nd degree
(x,y)	(0.283, 0.365)	(0.333, 0.330)	(0.328, 0.325)	(0.336, 0.322)



図 2 HOE 再生評価用光学系。

次に、HOE スクリーンの作製について述べる。まず、フィルムに付与する反射機能を位相分布として計算し、計算機合成ホログラム（以下、CGH）に変換する。この CGH は露光装置内の光学デバイスで物理的に再生され、CGH により生成された物体光と参照光とを干渉させることにより、体積ホログラムがフィルムに記録される。露光装置には、波長 473, 532, 640nm のレーザー光源が搭載されており、各波長に対応する CGH を 3 枚の反射型液晶パネルで同時に再生し、記録材料に同時露光することによって 3 波長の多重記録を行っている。これにより単一波長での記録と比べて波長間のクロストークで回折効率は低下するものの、ホログラムの波長選択性によって 1 枚で 3 波長に機能する HOE スクリーンが作製できた。

次に、作製する HOE の分光反射率と再生像の色度の関係について述べる。HOE にプロジェクタから入射する光は、HOE の波長選択性を受けて記録波長付近をピークに持つ光のみが反射する。これにより、観察される再生像の色度は、プロジェクタの分光特性と HOE の分光反射率に CIE 等色関数を掛け合わせたものになる。実際にはホログラム記録材料の収縮や、記録時と再生時の光の入射角度のずれによって再生波長がシフトするため厳密な制御は難しいが、本ディスプレイでは、理想的にはプロジェクタ側の階調制限を伴う色調整を必要とせずに白色点（CIE 1931 色空間で $x = 1/3$, $y = 1/3$ ）が再生できるよう、CIE 等色関数とあらかじめ測定したプロジェクタの分光特性と、HOE の再生時のピーク波長から、最適な回折効率を計算し、HOE スクリーン作製時の露光量に反映している。本実装における再生像の色度を、図 2 に示すように視域中央に設置した分光放射計（フォトリサーチ社, PR-670）を用いて測定した。

表 3 と図 3 は、上述の記録波長の露光強度比を調整して作製した HOE と、比較手法として記録材料の吸光度のみから算出される露光強度比¹²⁾で作製した HOE（図表中の「比較手法」）の、2 種類のスクリーンに対して中央のプロジェクタから白画像（R=255, G=255, B=255）を投影した際の回折光を測定し、CIE1931 色空間にプロットしたものである。また提案手法においては、1 台のプロジェクタからの投影光が、プロジェクタの角度間隔と同じ水平方向 2 度の範囲で反射方向に回折する機能を持たせてある。そこで、スクリーンの水平軸に対する測定方向の角度を水平に 0, 1, 2 度ずらして測色した 3 つの色度値も併せて示す

（比較手法は 0 度方向からでのみ測定）。

図 3 より、比較手法である吸光度のみを考慮して作製した HOE よりも、今回提案する露光強度比を最適化して作製した HOE スクリーンの方が、目標白色点（ $x = 1/3$, $y = 1/3$ ）に近づいていることが確認できた。また、1 台のプロジェクタに割り当てられる水平方向 2 度の範囲においては、ほとんど色が変わらないことを確認した。一般的に HOE は、入射する光の輝度や強度に対して反射光の回折効率がほぼ線形に応答するため、0 から 255 間の階調表現についてはプロジェクタ側の色づくりがそのまま再生像に反映される。この結果より、最適な HOE スクリーンの再生環境においては、プロジェクタ側の色調整を必要とせずに、露光強度比の最適化によりホワイトバランスが改善されることが示された。なお、プロジェクタからの光の入射角度が HOE スクリーン作製時の参照光の入射角度とずれる場合は、主に回折光のピーク波長のシフトに起因する色収差が生じる。その場合は、各プロジェクタ側でホワイトバランスを別途調整する必要がある。

図 4 は、HOE スクリーンに配置された拡散コンテンツであるカラーチェッカー（Macbeth chart）による画像再構成の結果である。なお、今回は露光強度比での調整であるため、ホワイトバランスのみが対象の指標である。色成分を含めた調整ではないことや、プロジェクタ独自の色づくりによる階調の非線形性などを補償できていないこと、スクリーンの透明性を示すために背景が透過・重畳していることなどもあるため、撮影した再生像のカラーは参考結果である点に注意されたい。同図下段のパッチの再生結果より、白-黒のグラデーションにおいて自然なホワイトバランスでの再構成に成功していることが確認できた。

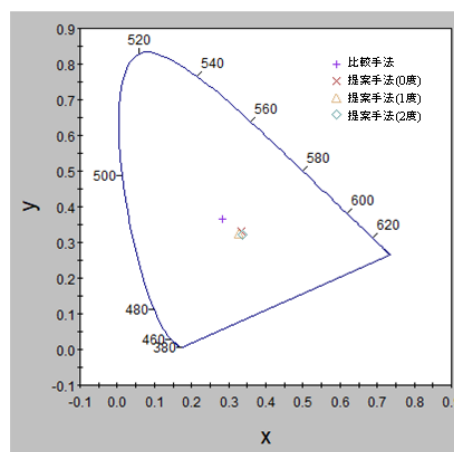


図 3 CIE1931 色空間にプロットされた測定結果。

表 3 測定された色度。

	比較手法	0 度	1 度	2 度
(x, y)	(0.283, 0.365)	(0.333, 0.330)	(0.328, 0.325)	(0.336, 0.322)

こちらは英語原著論文の機械翻訳版です。

次ページが原著論文で、翻訳版と交互に展開されます。機械翻訳のため、誤字や誤訳、翻訳が未反映の部分が含まれている可能性があります。



Figure 4 Comparison of the color checker reconstructed image and the original image.

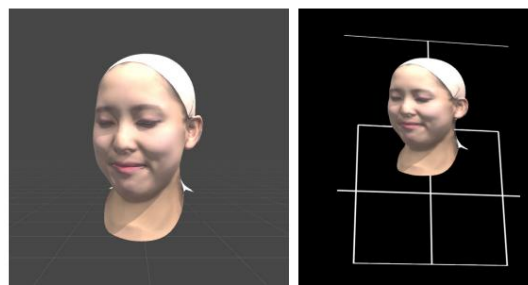


Figure 5: 3D model data displayed on a game engine (left) and elemental images output for a projector (right).

2.3 Light ray data of 3D shape As mentioned

above, the viewing area of this display is defined in one dimension in the horizontal direction, and viewpoints are densely formed in the horizontal direction at or below the interpupillary distance according to the arrangement interval of the projectors. The viewing area is further expanded to a certain volume by the function of the HOE developed this time, and within that, a 3D image is perceived by the principle of image reproduction by a group of light rays. You can realize this.

The elemental images projected by each projector are calculated based on a path tracing method that takes into account the path of the light ray for each pixel. When focusing on a certain pixel of the projector, if you follow the light of the pixel projected through the projection lens, it will reach the HOE (screen), where it will be reflected according to the HOE's functions, and reach a certain point within the viewing area. In other words, the light ray information that this pixel should be responsible for is the light that traces the direction of the light ray vector that arrived at the viewpoint it reached in the opposite direction.

Since it is not realistic to implement all of the high-quality CG rendering algorithms independently, in this paper we attempted to implement the above algorithms using an existing game engine (Unity 3D, manufactured by Unity Technologies), was used in this experiment).

In modern game engines, it is possible to describe the rendering method for each pixel in detail using shaders.

Representing 3D shapes in the rendering pipeline

When raster scanning a polygon mesh in camera space, the images required for 3D video playback in this system can be generated by replacing the line of sight vector provided by default with a vector from the viewpoint that the pixel in question should be responsible for in this system. In this way, by adopting a method of obtaining the desired images by modifying part of the rendering pipeline of the latest game engines, it has become possible to easily achieve the playback of high-quality 3D video.

The left side of Figure 5 shows an image of a 3D model rendered using standard functions within the game engine. The right side of Figure 5 shows an example of an image generated for a certain projector. The projector that projects this is positioned slightly to the left of the observation position facing the HOE screen (toward the back of the paper in Figure 1). The light of the image projected from this position is reflected by the HOE screen, and is projected in the right direction (toward the front of the paper in Figure 1).

It is designed to be observed from the side.

The grid that is added is the physical screen position.

It is an index used when calibrating the image and is not displayed during actual observation. When comparing Figure 5, the perspective of the two images appears to be different, but this is because the elemental image on the right of Figure 5 is for observation from slightly above. By projecting multiple elemental images generated based on the above calculations onto a screen and observing them from the expected viewing zone, a correct 3D image is perceived as shown in the reconstruction results described below.

3. Initial implementation of remote communication system: Flow from "acquisition" to "display"

3.1 Capturing highly accurate facial measurement

data In order to "acquire" information for remote communication, this time we used the "Light Stage," a facial shape measurement platform¹³). Figure 6 shows the capture process. The "Light Stage" used in this experiment

is a device that can measure not only the shape but also the texture of the skin and the entire face in high precision by capturing images of the face while controlling 346 light source devices arranged inside a spherical dome¹¹). A real person (a female staff member at our institute) was used as the subject, and images were taken as shown in Figure 6. Note that since it is difficult to capture data on human hair, the face data was measured after the hair was removed by wearing a hat or similar item in advance.

experiment, 4.91 million trial samples were collected.

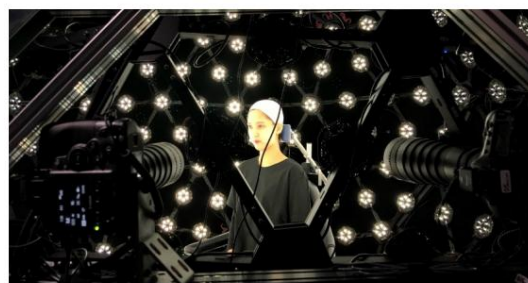


Figure 6. Capturing face measurement data using the "Light Stage."



図 4 カラーチェッカーの再生像と原画像の比較.

2.3 3次元形状の光線データ化

前述のように、本ディスプレイの視域は水平方向1次元に定義され、プロジェクタの配列間隔に応じて水平方向には瞳孔間距離以下で密に視点が形成される。視域はさらに今回開発したHOEの機能で一定の体積に拡大し、その内側において光線群による像の再生原理により立体映像を知覚することができる。

各プロジェクタより投射される要素画像は、画素ごとの光線の経路を考慮したパストレースの手法に基づき計算される。プロジェクタのある画素に着目した場合、投影レンズを通じて投射される画素の光を追うと、スクリーンであるHOEに到達してHOEの機能に従って反射し、視域内のある点に到達する。すなわち、この画素が担当すべき光線情報は、到達した視点へ飛来した光線ベクトルを逆にたどった方向の光となる。

高品位なCGのレンダリングアルゴリズムをすべて独自に実装するのは現実的ではないため、本論文においては、既存のゲームエンジン（本実験に用いたのはUnity Technologies社、Unity 3D）を利用し、上記のアルゴリズムの実装を試みた。

昨今のゲームエンジンでは画素ごとのレンダリング方法をシェーダにて詳細に記述することが可能である。既存のレンダリングパイプラインにおいて3次元形状を表現するポリゴンメッシュをカメラ空間でラスタスキャンする際に、デフォルト状態で用意された視線ベクトルを、当該画素が本来この系において担当すべき視点からのベクトルに置換することにより、本システムでの3次元映像再生に必要な画像を生成することができる。このように、最新のゲームエンジンのレンダリングパイプラインの一部を修正して所望の画像を得る方式を採用することにより、高品質な立体映像の再生が簡便に実現できた。

図5左に、ゲームエンジン内の標準機能でレンダリングした3Dモデルの画像を示す。また図5右には、あるプロジェクタ用に生成した画像を一例として示す。これを投影するプロジェクタは、観察位置からHOEスクリーンに向かってやや左の方角（図1では紙面奥側）に配置されたものであり、この位置から投射される像の光はHOEスクリーンで反射するので、向かって右の方角（図1では紙面手前

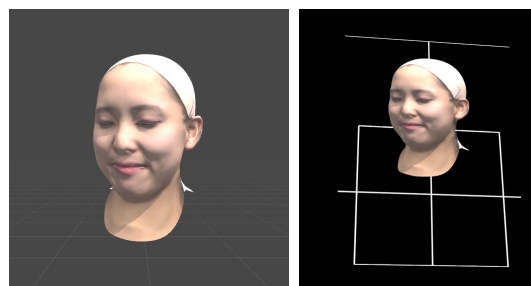


図 5 ゲームエンジン上で表示した 3D モデルデータ（左）と、あるプロジェクタ用に出た要素画像（右）。

側）から観察するためのものである。

追加されているグリッドは物理的なスクリーン面の位置との校正時に利用する指標であり、実際の観察時には非表示にされる。図5の比較においては両者のパースが異なるように見えるがこれは図5右がやや上方から観察するための要素画像だからである。上記計算に基づき生成された複数の要素画像をスクリーンに投影し、想定された視域から観察することにより、後述する再生結果のように正しい立体像として知覚される。

3. 遠隔コミュニケーションシステムの初期実装：「取得」から「表示」までの流れ

3.1 高精度な顔計測データの撮影

遠隔コミュニケーションのための情報の「取得」として、今回は顔形状の計測プラットフォームである「ライトステージ」を用いた¹³⁾。撮影の様子を図6に示す。

本実験で用いた「ライトステージ」は、球状のドーム内に配置された346個の光源装置をコントロールしながら顔を撮影することで、形状だけでなく、肌や顔全体の質感までも高精細に計測可能な機器である¹⁴⁾。実在の人物（弊所女性職員）を被写体として、図6のように撮影を行った。なお人の髪の詳細については撮影が困難であるため、あらかじめ帽子などを被って髪を除いた部分の顔データの計測を行った。

今回の実験においては、計測データとして491万トライア

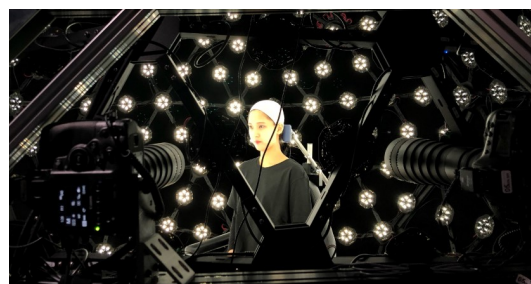


図 6 「ライトステージ」を用いた顔計測データの撮影。

こちらは英語原著論文の機械翻訳版です。

次ページが原著論文で、翻訳版と交互に展開されます。機械翻訳のため、誤字や誤訳、翻訳が未反映の部分が含まれている可能性があります。

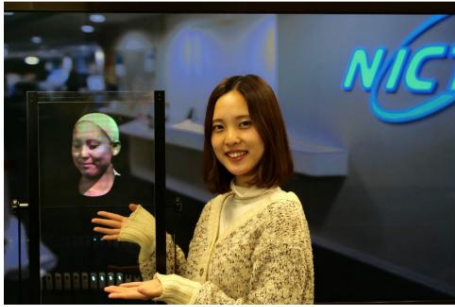


Fig. 7. Results of playback using the AR-3D display (next to the screen)

(The photo is of the subject himself.)



Fig. 8 Viewing of reconstructed image using AR-3D display

Check the difference.

A single polygon mesh and 539MB of associated optical information (multiple texture atlases such as albedo and specular reflection components) were obtained. This was output in a general-purpose format (Wavefront obj format) and passed to the downstream AR-3D display.

3.2 Display of highly accurate face measurement

data Next, the results of playback using the newly developed AR-3D display are shown in Figs. 7 and 8. In Fig. 7, the subject is shown next to the reconstructed image. The person in question was asked to be present during the photo shoot. The background is designed to resemble a reception desk in the PR office, and in the future, By adding hair data to the CG data and combining it with multiple existing technologies such as voice playback technology and lip sync, it is possible to realize a virtual reception system that makes it seem as if the person is right in front of you. In this case, the system is centered on the

"acquisition and display" of video, but it is easy to incorporate multiple existing technologies such as the above-mentioned voice playback technology and lip sync.

Thus, by using the AR-3D display, we can say that we have created a system that easily blends in with the real world. In addition, by setting the screen size to 35 cm diagonally, we were able to obtain a nearly life-size 3D reconstructed image of a face. Figure 8 shows the reconstructed image, which confirmed the presence of actual parallax.

4. Conclusion and future prospects

In this paper, we proposed an AR-3D display that can display naked-eye 3D images on a transparent screen that can be viewed by multiple people at the same time. The display is made of holographic optical elements fabricated using hologram printing technology.

The display is composed of a reflective film (35 cm diagonal) and 32 small projectors, and full-color 3D images equivalent to the projector resolution can be observed within a horizontal viewing angle of 64 degrees and a vertical viewing angle of approximately 10 degrees. In addition, based on a scenario as a remote communication tool, we initially implemented the system to reproduce high-definition face measurement data on this display, and conducted a demonstration experiment. Future issues include improving the image quality of the 3D display.

In order to reproduce high-quality images using the proposed HOE screen, it is preferable for the projector to be a laser projector, which is easy to control the wavelength, and optimally, the reproduction wavelength should be the same as the wavelength at which the HOE was manufactured. In this implementation, we used a projector with an existing LED light source, which is inexpensive and easy to obtain, so the brightness and color of the reproduced image were not corrected to the maximum extent. Our future goal is to improve the display components to make them more suitable.

In addition, although this time we conducted a demonstration experiment using face measurement data with the aim of applying it to remote communication, we can expect applications of AR-3D displays in a variety of fields other than communication, such as construction and education. To achieve this, we will continue to work on supporting 3D data used in various fields (e.g., CAD (Computer-Aided Design) data, BIM (Building Information Modeling) data, point cloud data, etc.), and we will also continue research and development to further improve the resolution of 3D content, simplify the system, and increase flexibility.

Acknowledgment

We would like to express our deep gratitude to everyone at Toppan Printing's Virtual Human Lab for their generous cooperation in photographing face measurement data using the "Light Stage" during this demonstration experiment. We would also like to express our deep gratitude to the members of the Public Relations Department at the National Institute of Information and Communications Technology who readily agreed to be our subjects when we were considering which people to photograph.

References

- 1) “3次元オンライン診療システムを開発”, 学校法人順天堂プレスリリース, (2020年9月17日) <https://www.juntendo.ac.jp/news/00261.html>
- 2) 国井 洋一, 大輪 叡史: “拡張現実 (AR) 技術による景観シミュレーション—東京農業大学世田谷キャンパス新研究棟を事例として—”, 東京農業大学農学集報, **62**, 40–49 (2017)
- 3) S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein and R. Szeliski: “A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms,” 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), New York, NY, USA, 519–528 (2006)
- 4) B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, R. Ng: “NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis,” Computer Vision – ECCV 2020, **12346**, 405–421 (2020)
- 5) S. Yoshida: “fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays,” Opt. Express, **24**, 13194–13203 (2016)
- 6) 吉田 俊介, 岩澤 昭一郎, 奥井 誠人, 井ノ上 直己: “超多視点裸眼立体ディスプレイのためのインタラクティブコンテンツの制作および実行環

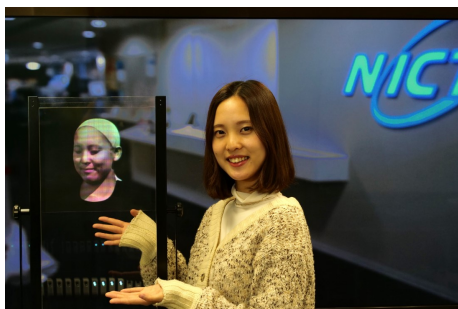


図 7 AR-3D ディスプレイを用いた再生結果 (隣は被写体本人)。



図 8 AR-3D ディスプレイを用いた再生像の視差の確認。

ングルのポリゴンメッシュと 539MB 分の付随する光学情報 (アルベドや鏡面反射成分などの複数のテクスチャアトラス) が得られた。これを汎用的なフォーマット (Wavefront obj 形式) で出力し、後段の AR-3D ディスプレイへと渡した。

3.2 高精度な顔計測データの表示

次に、今回開発された AR-3D ディスプレイを用いた再生結果を図 7 および図 8 に示す。図 7 では再生像の隣に被写体となった人物本人に立ち会ってもらった。背景は広報室における受付をイメージしており、将来的には再生用の CG データに髪の毛のデータを付加したり、音声再生技術やリップシンクなどの複数の既存の技術と組み合わせることで、本人が目の前にいるようなバーチャル受付システムが実現することも可能になる。

今回は映像について「取得・表示」を中心としたシステムとなっているが、上述した音声再生技術やリップシンクなどの複数の既存技術を組み込むことは容易である。このように、AR-3D ディスプレイを用いることで、実世界との融和が容易なシステムが実現できたと言える。また今回スクリーンのサイズを対角 35cm とすることで、ほぼ実物大の顔の 3D 再生像を得ることができた。実際に視差があることを確認した再生像が図 8 である。

4. むすび、今後の展望

本論文では、複数人で同時に観察可能な裸眼 3D 映像を、透明なスクリーン上に表示可能な AR-3D ディスプレイについて提案した。ディスプレイは、ホログラムプリント技術を使って作製したホログラフィック光学素子による機能

性反射フィルム (対角 35cm) と、32 台の小型プロジェクタで構成され、プロジェクタ解像度と同等のフルカラー 3D 映像を、水平視野角 64 度、垂直視野角約 10 度以内で観察可能である。また、遠隔コミュニケーションツールとしてのシナリオに基づき、高精細な顔計測データを本ディスプレイ上に再生するためのシステムとして初期実装し、実証実験を行った。

今後の課題としては、3D ディスプレイの画質の向上が挙げられる。提案する HOE スクリーンを用いて高品質な像を再生するためには、プロジェクタについては波長統制のしやすいレーザープロジェクタであることが好ましく、最適なのは HOE 作製時の波長と同じ再生波長であることが望ましい。今回の実装においては、廉価で調達が容易な既存の LED 光源のプロジェクタを用いたために、再生像の明るさや色味において補正などが最大限になされていない。ディスプレイの構成要素をより適した形へ改良することを、今後目指していきたい。

また、今回は遠隔コミュニケーションへの応用を目的として顔計測データを利用した実証実験を行ったが、AR-3D ディスプレイを用いた応用先としては、コミュニケーション以外に建設分野や教育分野など様々な分野での応用が期待できる。そのためには、各分野で使われている 3D データへの対応 (例えば CAD (Computer-Aided Design) データや BIM (Building Information Modeling) データ、点群データなど) を進めると共に、3D コンテンツの更なる高精細化、システムの簡素化、柔軟性の向上のための研究開発を進めていきたい。

謝 辞

本実証実験を進めるにあたり、凸版印刷バーチャルヒューマンラボの皆様には、「ライトステージ」を用いた顔計測データの撮影にあたり、多大なるご協力を頂き深く感謝申し上げます。また撮影する被写体の検討時に、被写体となることを快くご快諾頂いた情報通信研究機構広報部関係者に深謝致します。

〔文 献〕

- 1) “3 次元オンライン診療システムを開発”, 学校法人順天堂プレスリリース, (2020 年 9 月 17 日) <https://www.juntendo.ac.jp/news/00261.html>
- 2) 国井 洋一, 大輪 徹史: “拡張現実 (AR) 技術による景観シミュレーション—東京農業大学世田谷キャンパス新研究棟を事例として—”, 東京農業大学農学集報, **62**, 40–49 (2017)
- 3) S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein and R. Szeliski: “A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms,” 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’06), New York, NY, USA, 519–528 (2006)
- 4) B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi, R. Ng: “NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis,” Computer Vision – ECCV 2020, **12346**, 405–421 (2020)
- 5) S. Yoshida: “fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays,” Opt. Express, **24**, 13194–13203 (2016)
- 6) 吉田 俊介, 岩澤 昭一郎, 奥井 誠人, 井ノ上 直己: “超多視点裸眼立体ディスプレイのためのインタラクティブコンテンツの制作および実行環

こちらは英語原著論文の機械翻訳版です。

次ページが原著論文で、翻訳版と交互に展開されます。機械翻訳のため、誤字や誤訳、翻訳が未反映の部分が含まれている可能性があります。

- 境の構築”, 映情学誌, **70**, J158-J165 (2016)
- 7) Looking Glass, <https://lookingglassfactory.com/>
- 8) “空間再現ディスプレイ (Spatial Reality Display)”, Sony, <https://www.sony.jp/spatial-reality-display/products/ELF-SR1/>
- 9) K. Wakunami, P. -Y. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. -P. Huang and K. Yamamoto: “Projection-type see-through holographic three-dimensional display, ” Nat. Commun., **7**, 12954 (2016)
- 10) R. Oi, P. -Y. Chou. J. B. Jessie, K. Wakunami, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. -P. Huang and K. Yamamoto: “Three-dimensional reflection screens fabricated by holographic wavefront printer, ” Opt. Eng., **57**, 061605 (2018)
- 11) “凸版印刷, 高精度の人体情報計測が可能な「トッパンパーチャルヒューマンラボ」設立”, 凸版印刷株式会社プレスリリース (2020 年 12 月 23 日) https://www.toppan.co.jp/news/2020/12/newsrelease_201223_1.html
- 12) H. Berneth, F. -K. Bruder, T. Fäcke, D. Jurbergs, R. Hagen, D. Hönel, T. Rölle, G. Walze: “Bayfol HX photopolymer for full-color transmission volume Bragg gratings, ” Proc. SPIE **9006**, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, 900602 (2014)
- 13) P. Debevec: “The Light Stages and Their Applications to Photoreal Digital Actors, ” International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (2012)



いちはし やすゆき
市橋 保之 2010 年, 千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2010 年 7 月 (独) 情報通信研究機構ユニバーサルメディア研究センター研究員, 2011 年 4 月同ユニバーサルコミュニケーション研究所研究員を経て, 2015 年 4 月より (国研) 情報通信研究機構電磁波研究所主任研究員。主にホログラムプリント技術, ホログラム計算技術の研究に従事。博士 (工学)。正会員。



わくなみ こうき
渡波 光喜 2013 年, 東京工業大学大学院物理情報システム専攻博士課程修了。2013 年 4 月 (独) 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所研究員を経て, 現在は (国研) 情報通信研究機構電磁波研究所主任研究員。主にホログラフィ, 計算機合成ホログラム, ホログラフィック光学素子などの研究に従事。博士 (工学)。



よしだ しゅんすけ
吉田 俊介 2001 年, 名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程修了。通信・放送機構本郷リサーチセンター研究員, ATR メディア情報科学研究所研究員, 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所主任研究員を経て, 2021 年より, 京都橋大学工学部情報工学科教授。主にバーチャルリアリティ, 裸眼立体映像提示技術に関する研究に従事。博士 (学術)。正会員。

- 境の構築”, 映情学誌, **70**, J158-J165 (2016)
- 7) Looking Glass, <https://lookingglassfactory.com/>
- 8) “空間再現ディスプレイ (Spatial Reality Display)”, Sony, <https://www.sony.jp/spatial-reality-display/products/ELF-SR1/>
- 9) K. Wakunami, P. -Y. Hsieh, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. -P. Huang and K. Yamamoto: “Projection-type see-through holographic three-dimensional display, ” Nat. Commun., **7**, 12954 (2016)
- 10) R. Oi, P. -Y. Chou. J. B. Jessie, K. Wakunami, Y. Ichihashi, M. Okui, Y. -P. Huang and K. Yamamoto: “Three-dimensional reflection screens fabricated by holographic wavefront printer, ” Opt. Eng., **57**, 061605 (2018)
- 11) “凸版印刷, 高精度の人体情報計測が可能な「トッパンバーチャルヒューマンラボ」設立”, 凸版印刷株式会社プレスリリース (2020 年 12 月 23 日) https://www.toppan.co.jp/news/2020/12/newsrelease_201223_1.html
- 12) H. Berneth, F. -K. Bruder, T. Fäcke, D. Jurbergs, R. Hagen, D. Hönel, T. Rölle, G. Walze: “Bayfol HX photopolymer for full-color transmission volume Bragg gratings, ” Proc. SPIE **9006**, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, 900602 (2014)
- 13) P. Debevec: “The Light Stages and Their Applications to Photoreal Digital Actors, ” International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (2012)



いちはし やすゆき
市橋 保之 2010 年, 千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 2010 年 7 月 (独) 情報通信研究機構ユニバーサルメディア研究センター研究員, 2011 年 4 月同ユニバーサルコミュニケーション研究所研究員を経て, 2015 年 4 月より (国研) 情報通信研究機構電磁波研究所主任研究員. 主にホログラムプリント技術, ホログラム計算技術の研究に従事. 博士 (工学). 正会員.



わくなみ こうき
浦波 光喜 2013 年, 東京工業大学大学院物理情報システム専攻博士課程修了. 2013 年 4 月 (独) 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所研究員を経て, 現在は (国研) 情報通信研究機構電磁波研究所主任研究員. 主にホログラフィ, 計算機合成ホログラム, ホログラフィック光学素子などの研究に従事. 博士 (工学).



よしだ しゅんすけ
吉田 俊介 2001 年, 名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程修了. 通信・放送機構本郷リサーチセンター研究員, ATR メディア情報科学研究所研究員, 情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所主任研究員を経て, 2021 年より, 京都橘大学工学部情報工学科教授. 主にバーチャルリアリティ, 裸眼立体映像提示技術に関する研究に従事. 博士 (学術). 正会員.