

偏光選択性を有する半透過型異方性反射スクリーンを用いたAR 3Dディスプレイ

梅本 遼太郎、佐藤 成、藤井 賢吾、圓道 知博、岩橋 政宏

本論文では、偏光選択性を持つ半透明異方性反射スクリーンを用いた新しいAR 3Dディスプレイシステムを紹介する。提案する画面は、プロジェクター光を効率的に反射して視差を発生させ、背景光に対して透明な状態を維持することで、ディスプレイの視認性を向上させ、背景オブジェクトの不要な照明を低減する。このスクリーンは、エンボスされたディンプルを持つワイヤーグリッド偏光子から作製され、異方性反射率と偏光選択性の両方を達成している。システム原理、製造方法、実験的評価について述べる。実験結果より、画面は高い視認性と水平視差を実現していることがわかる。没入型、大型、高視認性のAR 3Dディスプレイの開発に貢献する。

キーワード：AR、3D ディスプレイ、マルチプロジェクション、異方性反射、偏光選択性、光学シースルー

1. まえがき

3Dディスプレイ技術は大きく進歩し、没入型でインタラクティブな視覚体験の開発を可能にしている^{1,2}。ネイキッドアイ3Dディスプレイは、特別なアイウェアを必要とせずに3D画像を提供するため、広告、エンターテインメント、教育などの分野で使用されている^{3,4}。マルチプロジェクションディスプレイ、ポリウムディスプレイ、ホログラフィックディスプレイ⁵⁻⁷など、裸眼3Dディスプレイの実装方法にはいくつか存在する。このうち、マルチプロジェクション3Dディスプレイは、複数のユーザー、大きなスクリーン、広い視野角、高解像度⁸をサポートする上で注目すべきものである。これらのシステムの中には、複数のプロジェクターと凹型リフレクタを使用して、明確なビューイングゾーンを作成し、各ユーザーが視差⁹を通して独自の3Dパースペクティブを知覚できるようにするものがある。

拡張現実感(AR)は、デジタル画像を実世界のシーンやオブジェクトに重ね合わせ、没入感、インタラクティブ性、視覚的に魅力的な体験を提供する¹⁰。光学シースルーとビデオシースルーの2種類がある。光学式シースルーARディスプレイは、ビデオシースルーよりもリアルさを感じることができる。なぜなら、ユーザーはカメラの仲介なしに実際のオブジェクトを直接見ることができるか

らである¹¹。

ARとマルチプロジェクション3Dディスプレイを統合することで、ユーザーが3次元で現実と仮想のオブジェクトを同時に知覚できるようになり、没入感をさらに高めることができる。この統合を達成するためには、プロジェクター光を反射し、背景光を送信するスクリーンが必要であり、仮想コンテンツを表示しながら実世界のオブジェクトの視認性を維持する。

これまでの研究では、これらの要件に対処するために、様々なスクリーン設計が検討されてきた。例えば、プロジェクターと異方性ディフューザーとインデックスマッチングオイルで構成された特殊スクリーンを用いたシステムが提案され、水平視差のみのマルチプロジェクション3Dディスプレイを実現した。彼らのアプローチは、画面の拡散率を垂直方向に強く、水平方向に弱くすることで、プロジェクターの少ない十分な3Dイメージングを可能にする¹²。

同様に、半透明で異方的な反射を持つ彫刻された透明パネルを用いたマルチプロジェクションAR 3Dディスプレイを開発した。このシステムは、製造が容易で安価であり、大型ディスプレイにも拡張可能である。しかし、プロジェクターライトは背景の物体も照らして、ディスプレイの視認性を低下させるという重大な問題がある¹³。

本研究では、ほとんど全てのプロジェクター光を反射させ、偏光選択性を利用して背景物体への透過を防止する新しいスクリーンを提案する。スクリーンは1つの偏光に対して透明であるが、直交する偏光を反射し、異方性反射板として機能する。

Received June 21, 2025; Revised 9, 2025; Accepted November 28, 2025

† Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering, Nagaoka University of Technology (Nagaoka, Japan)

†† Dept. of Computer Science, Tokyo City University (Tokyo, Japan)

[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。引用の際には、必ず原著論文の書誌情報をご記載ください。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。

AR 3D Display with Semi-Transparent Anisotropic Reflective Screen having Polarization Selectivity

Ryotaro Umemoto [†], Sei Sato [†], Kengo Fujii [†],
Tomohiro Yendo ^{††}, Masahiro Iwahashi [†]

Abstract This paper presents a novel AR 3D display system using a semi-transparent anisotropic reflective screen with polarization selectivity. The proposed screen efficiently reflects projector light to generate parallax, while remaining transparent to background light, thus improving display visibility and reducing unwanted illumination of background objects. The screen is fabricated from a wire grid polarizer with embossed dimples, achieving both anisotropic reflectivity and polarization selectivity. We describe the system principle, fabrication method, and experimental evaluation. Experimental results show that the screen achieves high visibility and horizontal parallax. The display will contribute to the development of immersive, large, and high-visibility AR 3D displays.

Key words: AR, 3D display, multi-projection, anisotropic reflection, polarization selectivity, optical see-through

1. Introduction

3D display technologies have advanced significantly, enabling the development of immersive and interactive visual experiences ^{1,2)}. Naked-eye 3D displays are used in fields such as advertising, entertainment, and education because they provide 3D images without the need for special eyewear ^{3,4)}. Several implementation methods exist for naked-eye 3D displays, including multi-projection displays, volumetric displays, and holographic displays ⁵⁻⁷⁾. Among these, multi-projection 3D displays are notable for supporting multiple users, large screens, wide viewing angles, and high resolution ⁸⁾. Some of these systems use multiple projectors and a concave reflector to create distinct viewing zones, enabling each user to perceive a unique 3D perspective through parallax ⁹⁾.

Augmented Reality (AR) displays superimpose digital images onto real-world scenes or objects, offering immersive, interactive, and visually engaging experiences ¹⁰⁾. There are two main types: optical see-through and video see-through. Optical see-through AR displays provide a higher sense of realism than video see-through, as users can directly view real ob-

jects without camera mediation ¹¹⁾.

Integrating AR with multi-projection 3D displays can further enhance immersion by allowing users to simultaneously perceive real and virtual objects in three dimensions. Achieving this integration requires a screen that both reflects projector light and transmits background light, maintaining visibility of real-world objects while displaying virtual content.

Previous research has explored various screen designs to address these requirements. For instance, a system using projectors and a special screen composed of an anisotropic diffuser and index-matching oil was proposed, achieving a multi-projection 3D display with only horizontal parallax. Their approach enables sufficient 3D imaging with fewer projectors by making the screen's diffusivity strong in the vertical direction and weak in the horizontal direction ¹²⁾.

Similarly, we developed a multi-projection AR 3D display using an engraved transparent panel with semi-transparency and anisotropic reflection. This system is easy and inexpensive to fabricate, and scalable for large displays. However, a significant problem is that projector light can also illuminate background objects, reducing display visibility ¹³⁾.

In this research, we propose a new screen that reflects almost all projector light and prevents it from being transmitted to background objects by using polarization selectivity. The screen is transparent to one polarization but reflects the orthogonal polarization, func-

Received June 21, 2025; Revised October 9, 2025; Accepted November 28, 2025

[†] Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering, Nagaoka University of Technology
(Nagaoka, Japan)

^{††} Dept. of Computer Science, Tokyo City University
(Tokyo, Japan)

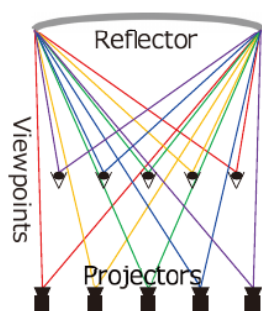


図1: マルチプロジェクション3Dディスプレイの原理。

本研究の目的は、偏光選択性を持つ半透明異方性反射スクリーンを用いた高視認性マルチプロジェクションAR 3Dディスプレイを導入することである。

2. メソッドの概要

2.1 凹型リフレクターによるマルチプロジェクション3Dディスプレイ

マルチプロジェクション3Dディスプレイは、肉眼3Dディスプレイの一種である。その原理を図1に示す。システムは複数のプロジェクターと凹型リフレクターで構成されている。各プロジェクターの画像は凹型リフレクターで反射され、反射された画像は明瞭な視野ゾーンに向けられる。各ゾーンは各プロジェクターに対応する画像を表示し、視聴者の各目が異なるゾーンを占めるようにすることで、立体視を可能にする。

水平視差のみを実現するため、プロジェクターを水平線上に配置し、異方性反射板を使用する。この反射鏡は、垂直方向に光を拡散させながら、水平方向に鏡面反射するように設計されている。その結果、視聴ゾーンが水平方向に分離され、水平方向の視差が生じる。垂直的には、システムは視差を提供せず、広い視野を提供する。

このアプローチでは、凹型反射鏡のサイズを大きくすることができ、ディスプレイの解像度はプロジェクターの解像度によって直接決定される。この方法は、複数のユーザー、大きなディスプレイサイズ、広い視野角、高解像度をサポートする。

2.2 半透明異方性反射スクリーンを用いたマルチプロジェクションAR 3Dディスプレイ

我々の先行研究¹³では、従来の凹型反射鏡の代わりに、彫刻された透明凹型パネルを用いたマルチプロジェクションAR 3Dディスプレイを提案した。図2(a)に本システムの原理を示す。このパネルは、半透明と異方的な反射特性の両方を示した。

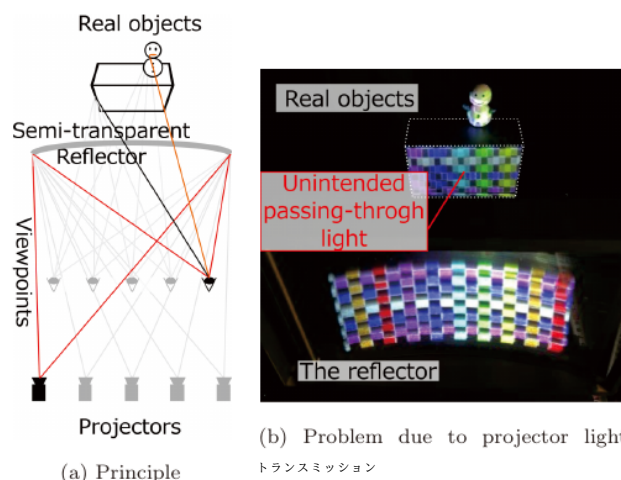


図2: 半透明異方性反射スクリーンを用いたマルチプロジェクションAR 3Dディスプレイの原理とプロジェクター光透過による問題点。

これらの特性により、AR 3Dアプリケーションでは、スクリーンを通して背景光を透過させると同時に、投影された画像を反射させて明瞭なビューイングゾーンを形成することが可能となった。

しかし、半透明であるため、プロジェクターライトの一部が通過することもでき、意図せずスクリーンの後ろにある物体を照らし出すことができた。この不要な透過光は、投影されたコンテンツと背景のコントラストを低下させるため、ディスプレイの視認性を低下させ、投影画像の明瞭性を低下させた。この問題を図2(b)に示す。

2.3 ワイヤグリッド偏光板

ワイヤグリッド偏光板は、サブ波長間隔の透明基板上に並列に配置された微細な金属ワイヤで構成されている。偏光選択性は、偏光状態に対する表面電流カップリングの有効性の違いに由来する。ワイヤの向きに平行に偏光した入射光の場合、電界成分はワイヤの向きに一致し、電磁エネルギーを金属導体に沿った表面電流に効率よく結合させることができ、強い鏡面反射が生じる。金属線は電界振動に平行な連続的な導電路を提供するため、表面電流は線材の長さに沿って容易に流れる。逆に、電界が細いワイヤ幅を横切って振動するため、ワイヤに垂直に偏光した光では表面電流を効果的に誘導することができず、電流の流れや電磁結合効率が著しく制限される。この平行偏光状態と垂直偏

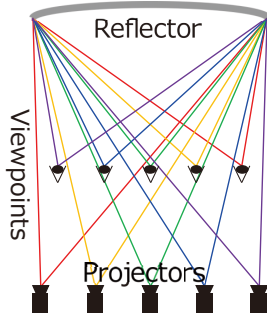


Fig. 1: Principle of the multi-projection 3D display.

tioning as an anisotropic reflector. The purpose of this study is to introduce a high-visibility multi-projection AR 3D display using the semi-transparent anisotropic reflective screen with polarization selectivity.

2. Method Overview

2.1 Multi-projection 3D display with Concave Reflector

The multi-projection 3D display is a type of naked-eye 3D display. Its principle is shown in Fig. 1. The system consists of multiple projectors and a concave reflector. Each projector's image is reflected by the concave reflector and the reflected images are directed into distinct viewing zones. Each zone displays the image corresponding to each projector, enabling stereoscopic viewing by allowing each eye of the viewer to occupy a different zone.

To achieve only horizontal parallax, the projectors are arranged in a horizontal line, and an anisotropic reflector is used. This reflector is designed to provide specular reflection in the horizontal direction while diffusing light vertically. As a result, the viewing zones are separated horizontally, producing horizontal parallax. Vertically, the system does not provide parallax but instead offers a wide viewing area.

With this approach, the size of the concave reflector can be increased and the display resolution is directly determined by the resolution of the projectors. This method supports multiple users, large display sizes, wide viewing angles, and high resolution.

2.2 Multi-Projection AR 3D display with Semi-Transparent Anisotropic Reflective Screen

Our previous research¹³⁾ proposed a multi-projection AR 3D display using an engraved transparent concave panel instead of a traditional concave reflector. Figure 2(a) shows the principle of this system. This panel exhibited both semi-transparency and anisotropic reflec-

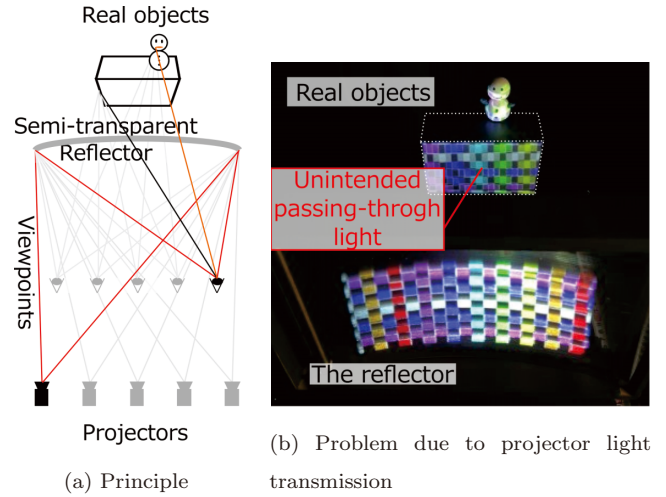


Fig. 2: Principle of the Multi-Projection AR 3D display with Semi-Transparent Anisotropic Reflective Screen and the problem due to projector light transmission.

tion properties. These characteristics enabled AR 3D applications by allowing background light to be transmitted through the screen while simultaneously reflecting projected images to form distinct viewing zones.

However, the semi-transparency also permitted a portion of the projector light to pass through, unintentionally illuminating objects behind the screen. This unwanted transmission reduced display visibility and diminished the clarity of the projected images, as the transmitted light decreased the contrast between the projected content and the background. The problem is shown in Fig. 2(b).

2.3 Wire grid polarizer

Wire grid polarizers consist of fine metallic wires arranged in parallel on a transparent substrate with sub-wavelength spacing. The polarization selectivity originates from the differential effectiveness of surface current coupling for polarization states. For incident light polarized parallel to the wire orientation, the electric field component aligns with the wire direction, enabling efficient coupling of electromagnetic energy into surface currents along the metallic conductors, resulting in strong specular reflection. The surface currents flow readily along the wire length because the metallic wire provides a continuous conductive path that is parallel to the electric field oscillations. Conversely, light polarized perpendicular to the wires cannot effectively induce surface currents because the electric field oscillates across the narrow wire width, severely limiting current flow and electromagnetic coupling efficiency. This fundamental difference in coupling efficiency between par-

光状態の結合効率の根本的な違いにより、ワイヤグリッド偏光板は直交偏光成分を送信しながら1つの偏光を選択的に反射することができる。

2.4 ワイヤグリッド偏光板を用いた偏光選択性を有する半透明異方性反射スクリーンを用いたマルチプロジェクションAR 3Dディスプレイ

我々は、ほぼ全てのプロジェクター光を反射し、偏光選択性を用いて背景物体への光の透過を防ぐ新しいスクリーンを提案する。このアプローチは、プロジェクター光を背景物体に透過させ、ディスプレイの視認性を低下させるという、これまでの手法の問題に対処するものである。

スクリーンは、水平に整列したディンプルで塞栓されたワイヤグリッド偏光子から構成される。ワイヤグリッド偏光板は、一方向に配置された薄い金属線で構成される。線方向に平行に偏光した光を反射し、線に垂直に偏光した光を透過する。プロジェクター光の偏光をワイヤ方向に揃えることで、投影された光のほとんどすべてが反射され、ワイヤ方向に垂直に偏光された背景光成分のみが透過される。

さらに、エンボスされたディンプルは、第2節で説明した異方的な反射を提供する。1.ディンプル方向に沿った鏡面反射と、ディンプルに垂直な拡散反射を生じる。この水平ディンプル構造により、先行研究の彫刻パネルと同様に、スクリーンがプロジェクターライトを効率的に反射することができる。

3. 実験方法について

提案システムのユーザビリティを評価するために、画面の光学特性を測定した。

図3に実験に使用した画面を示す。このスクリーンは、ワイヤグリッド偏光子を熱プレスして水平に整列したディンプルを形成することで作製した。母材はワイヤグリッド偏光板(浅海化成株式会社)である。環状オレフィンポリマー(COP)基板とアルミニウム線からなるSC12。スクリーンは半径500mmの凹曲率を持ち、プロジェクターの瞳孔画像を設計された視距離に位置決めする。ディンプルの周期は1.6mm、高さは0.2mmである。

実験では、表1に示す仕様のプロジェクター(Firstage PJT2020)を使用した。実験に使用した光源は、白色画像を表示するプロジェクターである。のスペクトル特性は以下の通りである。

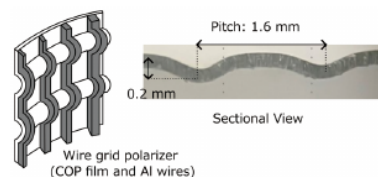


図3: 実験に使用した画面。

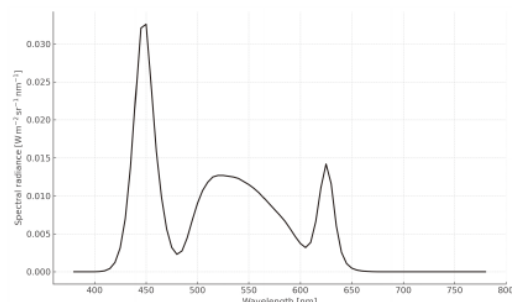


図4: 白画像を投影したときのプロジェクター出力のスペクトル分布。

プロジェクター出力を図4に示す。スペクトル特性は、白画像を標準拡散反射鏡(TOPCON WS3)に投影して測定した。

表 1: プロジェクターの仕様

Parameter	Value
Resolution	854 × 480
Contrast Ratio	2000:1
Light Source	LED
Device	DMD (Texas Instruments DLP2010)
Frame Rate	60 Hz

3. 1 各視点での観察画像表示システムが水平視差を提供することを確認するため、複数の視点から観察画像を撮影した。実験セットアップを図5に、パラメータを表2にまとめた。プロジェクターは図6に示すようなテストパターンを表示した。対応する投影画像を撮影するために、指定された各視点位置の周囲にカメラを配置した。さらに、垂直視聴特性を評価するために、プロジェクターNo.4に対応する指定視点の上にカメラも配置した。

視差の機能は、指定された視点に配置された各カメラが、対応するプロジェクターから画像を観察できることを確認することで検証され、適切なビューゾーン分離が実証された。垂直視野の存在は、同じ水平位置で異なる垂直位置で撮影された画

allel and perpendicular polarization states enables the wire grid polarizer to selectively reflect one polarization while transmitting the orthogonal polarization component.

2.4 Multi-Projection AR 3D display using Semi-Transparent Anisotropic Reflective Screen having Polarization Selectivity with Wire Grid Polarizer

We propose a novel screen that reflects nearly all projector light and prevents the light from being transmitted to background objects by using polarization selectivity. This approach addresses the issue in previous methods, where projector light was transmitted to background objects and reducing display visibility.

The screen is constructed from a wire grid polarizer embossed with horizontally aligned dimples. A wire grid polarizer consists of thin metal wires arranged in a single direction. It reflects light polarized parallel to the wire direction and transmits light polarized perpendicular to the wires. By aligning the projector light polarization with the wire direction, almost all the projected light is reflected, and only the background light component polarized perpendicular to the wire direction is transmitted.

In addition, the embossed dimples provide the anisotropic reflection described in Sec. 2.1. They produce specular reflection along the dimple direction and diffuse reflection perpendicular to it. This horizontal dimple structure enables the screen to efficiently reflect projector light, similar to the engraved panel in previous research.

3. Experimental Methods

To evaluate the usability of the proposed system, we measured the optical characteristics of the screen.

Figure 3 shows the screen used in the experiments. The screen was fabricated by heat-pressing a wire grid polarizer to form horizontally aligned dimples. The base material is a wire grid polarizer (Asahi Kasei Corp. SC12) consisting of Cyclic Olefin Polymer (COP) substrate and aluminum wires. The screen has a concave curvature with a radius of 500 mm to position the projector pupil images at the designed viewing distance. The period of the dimples is 1.6 mm and the height is 0.2 mm.

In the experiments, projectors (Firstage PJT2020) with the specifications shown in Table 1 were used. The light source used in the experiments was the projectors displaying white images. The spectral characteristics of

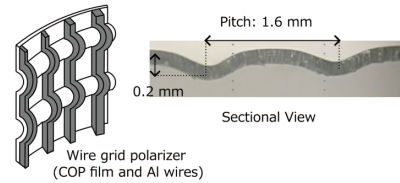


Fig. 3: The screen used in the experiments.

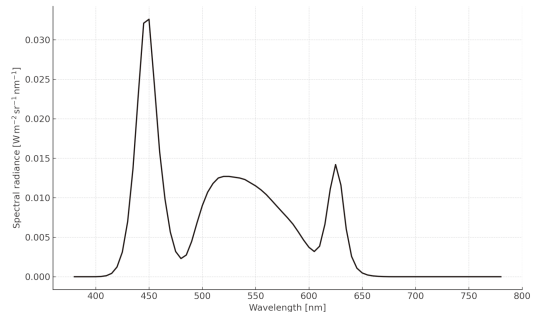


Fig. 4: Spectral distribution of the projector output when projecting a white image.

the projector output are shown in Fig. 4. The spectral characteristics were measured by projecting a white image onto a standard diffusing reflector (TOPCON WS-3).

Table 1: Projector specifications.

Parameter	Value
Resolution	854 × 480
Contrast Ratio	2000:1
Light Source	LED
Device	DMD (Texas Instruments DLP2010)
Frame Rate	60 Hz

3.1 Observation Images at Each Viewpoint

To confirm that the display system provides horizontal parallax, observation images were captured from multiple viewpoints. The experimental setup is shown in Fig. 5 and the parameters are summarized in Table 2. The projectors displayed a test pattern as shown in Fig. 6. A camera was positioned around each designated viewpoint location to capture the corresponding projected images. Additionally, the camera was also positioned above the designated viewpoint corresponding to the projector No.4 to evaluate the vertical viewing characteristics.

The parallax functionality is verified by confirming that each camera positioned at the designated viewpoints could observe the image from its corresponding projector, demonstrating proper view zone separation. The presence of a vertical viewing area is confirmed by comparing images captured at the same horizontal

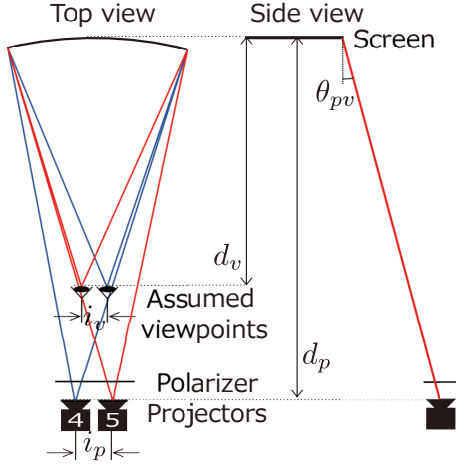


Fig. 5: Experimental setup and camera positions for observation images.



Fig. 6: Test pattern displayed by each projector.

position but at different vertical positions, demonstrating that the observed images remain consistent despite changes in vertical position.

Table 2: Parameters for Sec. 3.1.

Parameter	Symbol	Value
Curvature radius of screen	r_s	500 mm
Designed inter-viewpoint distance	i_v	14.6 mm
Distance from screen to viewpoint	d_v	385 mm
Distance from screen to projector	d_p	711 mm
Projector pitch	i_p	27 mm

3.2 Measurement of Anisotropic Reflectivity

To achieve horizontal parallax functionality, the screen must exhibit anisotropic reflectivity characteristics. Specifically, the screen should provide narrow angular response in the horizontal direction to enable parallax discrimination between adjacent viewpoints, while maintaining wide angular response in the vertical direction to ensure accessibility from various vertical positions. The anisotropic reflectivity of the screen was evaluated using the experimental setup shown in Fig. 7. A linearly polarized light source, with its polarization axis aligned parallel to the reflection axis of the screen, was used to illuminate the screen. The reflected luminance was measured with a luminance meter (TOPCON SR-5) as the observation angle was varied in both the horizontal and vertical directions.

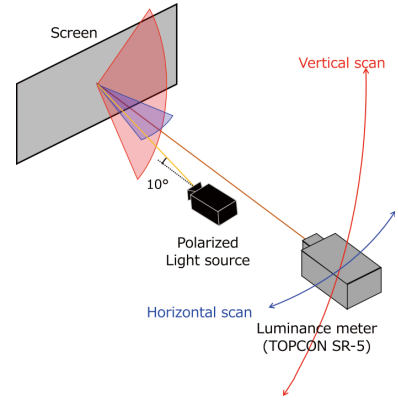


Fig. 7: Experimental setup for measuring anisotropic reflectivity.

At each observation angle, reflectivity was defined as the measured luminance normalized by the maximum luminance observed within the measurement range. The observation angle was defined such that zero degrees corresponded to the luminance meter being positioned at the center of the screen, with its optical axis parallel to the surface normal.

The horizontal observation angle was scanned from -4° to 4° , with increments of 0.2° near the peak and 1° elsewhere. The vertical observation angle was scanned from -60° to 60° , with increments of 1° near the peak and 5° elsewhere. All measurements were performed under controlled ambient lighting conditions to minimize external influences.

3.3 Transmittance for projector light

For effective AR display functionality, the screen must minimize projector light transmission to background objects to enhance display visibility and contrast. Therefore, low transmittance of the screen for projector light is essential for optimal system performance. This experiment was conducted to evaluate the transmittance of the screen to projector light. The experimental setup is shown in Fig. 8. A linearly polarized light source was used to illuminate the screen and its polarization axis was aligned with the screen's reflection axis. The optical power transmitted through the screen was measured using a power meter (THORLABS PM100A). Transmittance was calculated as the ratio of the measured transmitted power with the screen in place to that without the screen.

For comparison, the transmittance of a previous system using an engraved transparent panel¹³⁾ was also measured under identical conditions. This comparison enables evaluation of the improvement in projector light blocking performance achieved by the proposed screen.

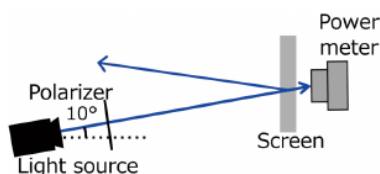


図8: 透過率測定のための実験セットアップ。

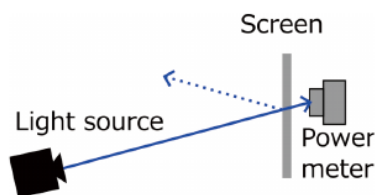


図9: 背景オブジェクトの透過率を測定するための実験セットアップ。



図10: 画面の後ろに置かれたオブジェクト。

3. 4 背景オブジェクトの透過率 ARの機能を効果的に維持するために、画面は背景オブジェクトがユーザーにはっきりと見えるように十分な透明性を提供しなければならない。したがって、バックグラウンド光に対するスクリーンの高い透過率は、光学シースルー能力を維持するために重要である。本実験は、偏光していない背景光に対するスクリーンの透過率を評価するために実施した。実験セットアップを図9に示す。無偏光光源を用いてスクリーンを照射し、パワーメーター(THORLABS PM 100A)を用いてスクリーンを透過する光パワーを測定した。透過率は、スクリーンを装着して測定した透過電力と、スクリーンを装着していない透過電力の比として算出した。

さらに、背景オブジェクトの実用的な視認性を評価するために、図10に示すテストオブジェクトをスクリーンの後ろに配置し、提案されたスクリーンを介した背景シーンの伝送の視覚的品質を評価するために画像をキャプチャした。

4. 実験結果

4.1 各視点における観察画像

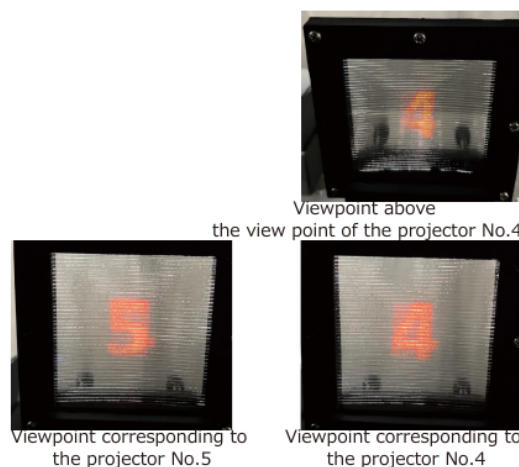


図11: 各アイポイントにおける観察画像。

図11に各視点で撮影した観察画像を示す。設計された各視点位置において、図6に示す対応する画像が正常に観測され、提案システムの水平視差機能が確認された。さらに、カメラをプロジェクターNo. 4に対応する設計された視点の上に配置すると、そのプロジェクターからの同じ画像が観測され、垂直な視野領域の存在が実証された。

これらの結果は、システムが水平視差を提供し、3D知覚を可能にし、垂直視領域の存在を確認するものである。

4.2 異方性反射率の測定

図 12 に異方性反射率の測定結果を示す。

水平方向では、反射率は半値幅約1.9度の鋭いピークを示し、その中心は0度であり、これは鏡面反射角に相当する。この結果は、水平方向の視野が狭く、観察者が水平方向に約1.9度移動すると、観察された画像が顕著に変化することを示している。このような狭い水平視野により、システムは異なる水平位置に明瞭な画像を提示することができ、それによって水平視差を提供し、多視点3D知覚を可能にする。

一方、垂直方向の反射率はより緩やかに変化し、10度を中心とした半値幅は約23.4度であり、これは鏡面反射角でもある。これは、観察された画像に大きな変化がないことから、垂直視認領域は約23.4度にわたっていることがわかる。

これらの結果は、広い垂直視野を維持しながら、水平視差とマルチユーザー3Dディスプレイ

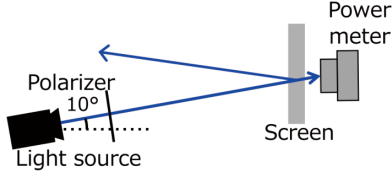


Fig. 8: Experimental setup for measuring transmittance.

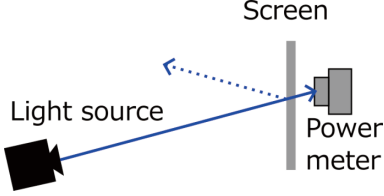


Fig. 9: Experimental setup for measuring transmittance for background objects.



Fig. 10: Object put behind the screen.

3.4 Transmittance for background objects

To maintain effective AR functionality, the screen must provide sufficient transparency for background objects to remain clearly visible to users. Therefore, high transmittance of the screen for background light is important for preserving the optical see-through capability. This experiment was conducted to evaluate the transmittance of the screen for unpolarized background light. The experimental setup is shown in Fig. 9. An unpolarized light source was used to illuminate the screen, and the optical power transmitted through the screen was measured using a power meter (THORLABS PM100A). Transmittance was calculated as the ratio of the measured transmitted power with the screen in place to that without the screen.

Additionally, to evaluate the practical visibility of background objects, a test object shown in Fig. 10 was positioned behind the screen, and images were captured to assess the visual quality of background scene transmission through the proposed screen.

4. Experimental Result

4.1 Observation Images at Each Viewpoint

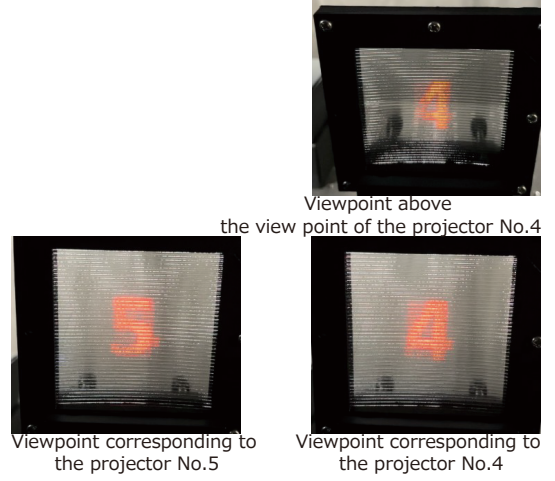


Fig. 11: Observation images at each eyepoint.

Figure 11 shows the observation images captured at each viewpoint. At each designed viewpoint position, the corresponding images shown in Fig. 6 were successfully observed, confirming the horizontal parallax functionality of the proposed system. Furthermore, when the camera was positioned above the designed viewpoint corresponding to projector No.4, the same image from that projector was observed, demonstrating the presence of a vertical viewing area.

These results confirm that the system provides horizontal parallax, enabling 3D perception, and the presence of vertical viewing area.

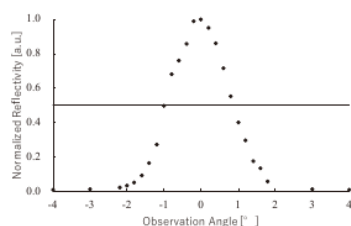
4.2 Measurement of Anisotropic Reflectivity

Figure 12 shows the measurement results of anisotropic reflectivity.

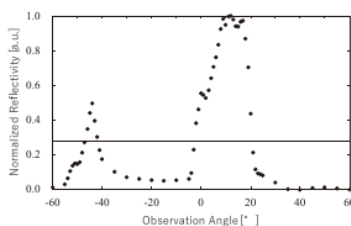
In the horizontal direction, the reflectivity exhibits a sharp peak with a half-width of approximately 1.9 degrees, centered at 0 degrees, which corresponds to the specular reflection angle. This result indicates that the horizontal viewing area is narrow, and the observed image changes noticeably when the observer moves by about 1.9 degrees horizontally. Such a narrow horizontal viewing area enables the system to present distinct images at different horizontal positions, thereby providing horizontal parallax and allowing multi-view 3D perception.

In contrast, the reflectivity in the vertical direction changes more gradually, with a half-width of approximately 23.4 degrees centered at 10 degrees, which is also the specular reflection angle. This indicates that the vertical viewing area spans about 23.4 degrees without significant changes in the observed image.

These results confirm that the screen exhibits anisotropic reflectivity, which is essential for achiev-

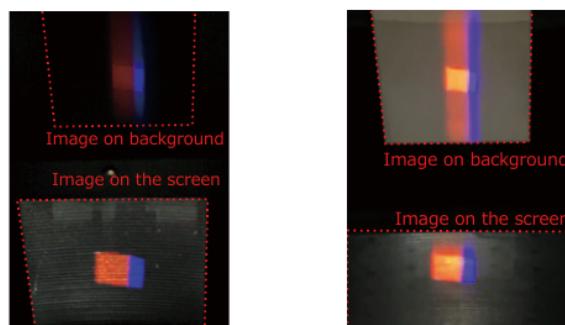


(a) 水平反射率



(b) 垂直反射率

図12: 異方性反射率の測定結果。



(a) 提案画面

(b) Previous screen

図13: 送信されたプロジェクター光のキャプチャ画像。

レイを実現するために不可欠な異方性反射率を示すスクリーンであることを裏付けている。

4.3 プロジェクターライトの透過率

図13は、白画面上の送信プロジェクター画像の視覚的比較である。提案するスクリーンは、従来のシステムと比較して、背景照明が大幅に低減されている。これらの実験結果は、視聴者が提案画面で暗い意図しない背景投影を観察できることを示している。表3に透過率の測定結果を示す。提案画面の透過率は2.9%であったのに対し、従来画面の透過率は89.2%であった。この結果は、提案されたスクリーンが、彫刻された透明パネル¹³⁾を用いた以前のデザインと比較して、プロジェクター光が背景オブジェクトを通過するのを防ぐのに有意に効果的であることを示している。

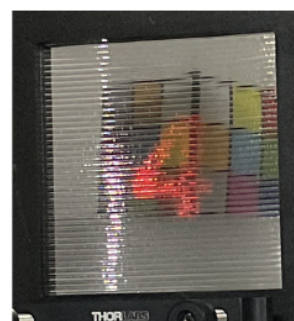


図14: 画面と背景にキャプチャされた画像。

表3: プロジェクターライト用スクリーンの透過率。

Type	Proposed Screen	Previous Screen
透過率(%)	2.9	89.2

4.4 背景オブジェクトの透過率 図14は、提案する画面構成による背景オブジェクトの視認性の視覚的評価を示す。定量的な測定により、提案した背景物体に対する画面の透過率は35.4%であることがわかった。

実験結果は、提案された画面の後ろに位置する背景オブジェクトが、効果的なAR機能のために可視性を維持することを示している。

5. 考察

5.1 作製プロセスの効果

半透明異方性反射スクリーンの作製プロセスは、その光学性能に影響を与える。本研究では、2枚の金属ディンプル板の間にワイヤグリッド偏光板を熱プレスし、所望の表面構造を実現することでスクリーンを作製した。しかし、この方法では2つの問題が指摘された。

まず、加工スクリーンのディンプル高さの測定値は約0.192mmであり、設計値0.25mm以下であった。この不完全なディンプル形成は、現在の熱プレス法では意図した表面形状を完全に実現できないことを示唆している。その結果、画面の垂直方向の拡散特性は最適ではなく、垂直方向の視聴範囲を制限する可能性がある。

次に、セクション4.3に示すように、処理後の画面の透過率は2.9%であるのに対し、オリジナルのワイヤグリッド偏光板は、そのカタログによると0.025%と非常に低い透過率を示している。処理後の透過率の大幅な増加は、熱プレスプロセス中の金属ワイヤーの損傷または破損に起因すると思われる、偏光選択性の喪失を示している。

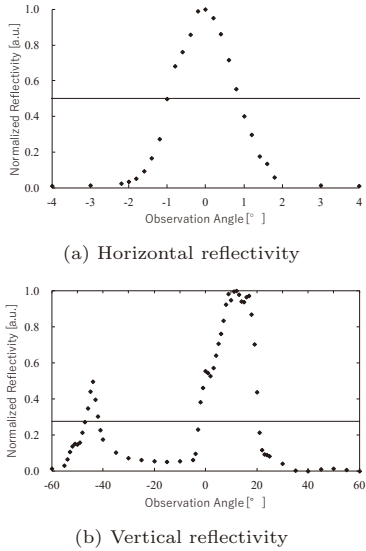


Fig. 12: Measurement results of anisotropic reflectivity.

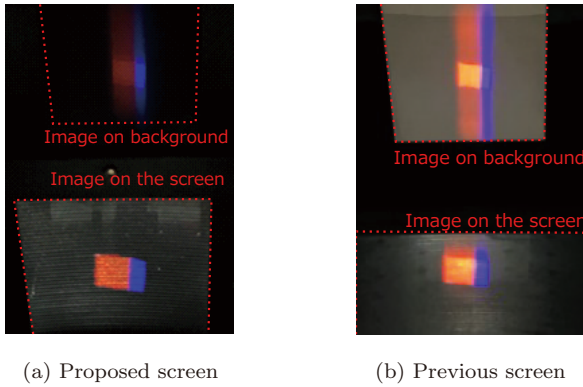


Fig. 13: Captured images of transmitted projector light.

ing horizontal parallax and multi-user 3D display, while maintaining a wide vertical viewing area.

4.3 Transmittance for projector light

Figure 13 shows the visual comparison of transmitted projector images on the white screen. The proposed screen exhibits substantially reduced background illumination compared to the previous system. These experimental results indicate that viewers can observe darker unintended background projections with the proposed screen. Table 3 shows the measured transmittance. The transmittance of the proposed screen was 2.9%, whereas the previous screen exhibited a ratio of 89.2%. This result indicates that the proposed screen is significantly more effective at preventing projector light from passing through to background objects compared to the previous design using an engraved transparent panel¹³).

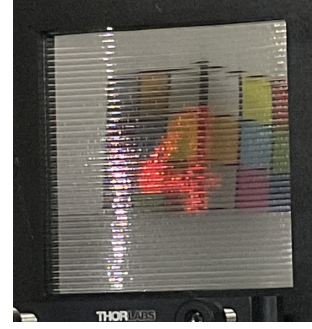


Fig. 14: Captured image on the screen and background.

Table 3: Transmittance of screens for projector light.

Type	Proposed Screen	Previous Screen
Transmittance (%)	2.9	89.2

4.4 Transmittance for background objects

Figure 14 shows the visual assessment of background object visibility through the proposed screen configuration. Quantitative measurements revealed that the transmittance of the proposed screen for background objects is 35.4%.

The experimental results demonstrate that background objects positioned behind the proposed screen maintain visibility for effective AR functionality.

5. Discussion

5.1 Effect of the Fabrication Process

The fabrication process of the semi-transparent anisotropic reflective screen affects its optical performance. In this research, the screen was fabricated by heat-pressing a wire grid polarizer between two metal dimpled plates to achieve the desired surface structure. However, two issues were identified with this method.

First, the measured dimple height of the processed screen was approximately 0.192 mm, which is less than the designed value of 0.25 mm. This incomplete dimple formation suggests that the current heat-pressing method cannot fully realize the intended surface profile. As a result, the vertical diffusion characteristics of the screen are suboptimal, potentially restricting the vertical viewing range.

Second, as shown in Section 4.3, the transmittance of the processed screen is 2.9%, whereas the original wire grid polarizer exhibits a much lower transmittance of 0.025% according to its catalog. The substantial increase in transmittance after processing indicates a loss of polarization selectivity, likely due to damage or breakage of the metal wires during the heat-pressing

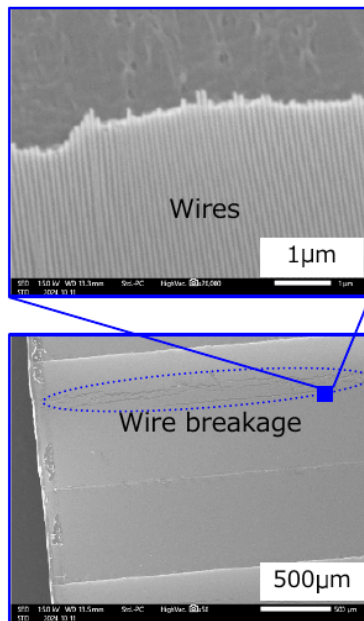


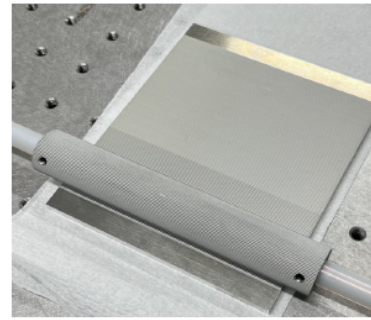
図15: ヒートプレス後のワイヤグリッド偏光板の状態。

図 15 は、ワイヤグリッド偏光板をヒートプレスした後の状態を示しており、ワイヤーが破損している様子が確認できる。これらの問題に対処するため、加熱されたディンプルローラーを用いたスポット加熱・プレスを用いた改良型製作方法を提案する。このアプローチは、ワイヤグリッド構造へのダメージを最小化し、より正確なディンプル形成を可能にすることで、偏光選択性を維持し、所望の異方性光学特性を達成することが期待される。この改良された処理方法のコンセプトを図16に示す。

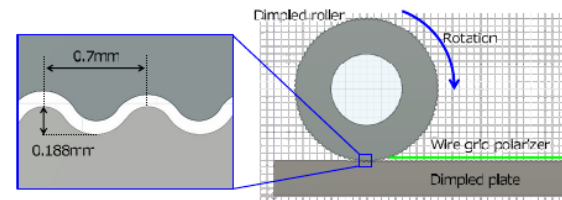
5.2 垂直反射率の不自然な形

垂直反射率の結果(図12)を解析すると、2つのピークが存在することがわかる。10度付近の一次ピークは予想された挙動と一致し、二次的な予期せぬピークも観測された。この二次ピークは、画面の表面形状に起因するもので、垂直方向の視野角が変化すると輝度が不均一になる。

図17に示すように、実際のスクリーンプロファイルは、滑らかなディンプルではなく、破線で示すように3つの傾斜した表面から構成されている。各傾斜面は鏡面反射を生じさせることができ、その結果、垂直方向の反射率に複数のピークが生じる。例えば、-10度で入射する入射光は、-40度に向かって光を方向付ける30度で傾斜した表面によって反映されることがある。



(a) 改良された加工のための実際の設備



(b) Side view

図16: 改良された処理方法の概念。

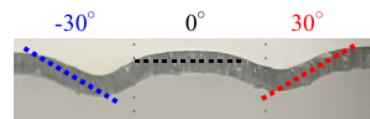


図17: 垂直反射率に複数のピークを引き起こす複数の傾斜面を示すスクリーンの断面プロファイル。

改良された処理によって、より滑らかなディンプルプロファイルを達成することは、これらの不要なピークをなくし、より連続的で均一な垂直視野を提供することが期待され、これは快適で高品質な3Dディスプレイに不可欠である。

5.3 隣接する視点間のクロストーク

本節では、クロストークの影響について考察する。図11は、隣接する視点間でクロストークが発生することを示している。マルチ視点3Dディスプレイでは、観測者の位置によるディスプレイの輝度の変動を低減するために、隣接するアイボックス間のクロストークが利用される。

図12(a)の水平反射率の半値幅は約1.9度である。視聴領域全体の輝度を一定に保つため、半値幅で間隔をあける視点を設計した。

図18は、それぞれ1.9度間隔の水平反射率プロファイルである。黒線は各視点の正規化反射率分布を表し、赤線はその和を表す。

各プロジェクターに対応する水平反射率分布が同じであれば、観測された輝度は

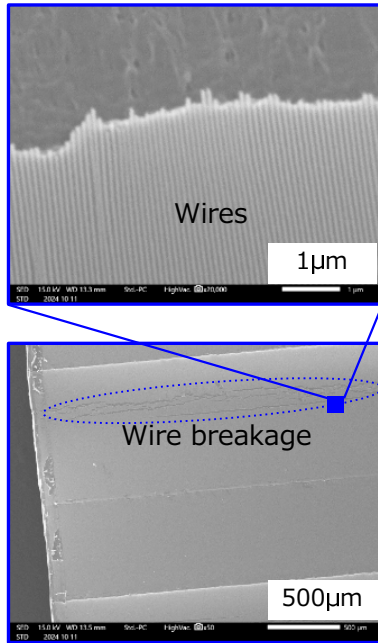


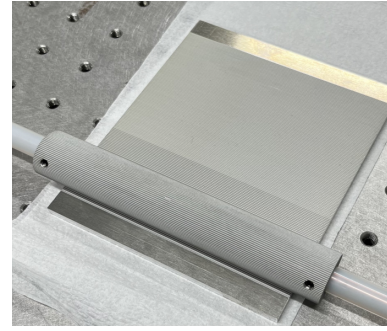
Fig. 15: Condition of the wire grid polarizer after heat-pressing.

process. Figure 15 shows the condition of the wire grid polarizer after heat-pressing, where broken wires are visible. To address these issues, we propose an improved fabrication method that uses spot heating and pressing with a heated dimpled roller. This approach is expected to minimize damage to the wire grid structure and enable more precise dimple formation, thereby preserving polarization selectivity and achieving the desired anisotropic optical properties. The concept of this improved processing method is illustrated in Figure 16.

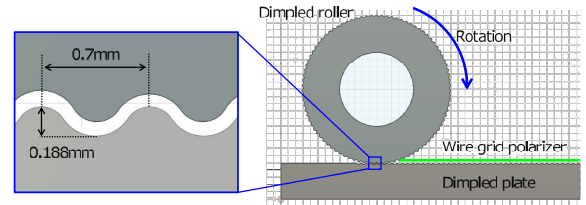
5.2 Unnatural Form of the Vertical Reflectivity

Analysis of the vertical reflectivity results (Fig. 12) reveals the presence of two peaks. The primary peak around 10 degrees is consistent with the expected behavior, while a secondary unexpected peak is also observed. This secondary peak is attributed to the screen's surface geometry, which causes non-uniform luminance as the vertical viewing angle changes.

As shown in Fig. 17, the actual screen profile consists of three inclined surfaces, as indicated by the break lines, rather than a smooth dimple. Each inclined surface can produce specular reflection, resulting in multiple peaks in the vertical reflectivity. For example, incident light entering at -10 degrees can be reflected by a surface inclined at 30 degrees, directing the light toward -40 degrees.



(a) Actual equipment for the improved processing



(b) Side view

Fig. 16: Concept of the improved processing method.

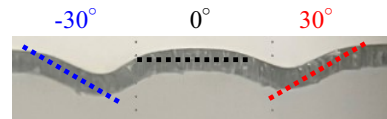


Fig. 17: Cross-sectional profile of the screen showing multiple inclined surfaces, which cause multiple peaks in vertical reflectivity.

Achieving a smoother dimple profile through improved processing is expected to eliminate these unwanted peaks and provide a more continuous and uniform vertical viewing area, which is essential for comfortable and high-quality 3D display.

5.3 Crosstalk between adjacent viewpoints

In the section, we discuss the effect of crosstalk. Figure 11 demonstrates that crosstalk occurs between adjacent viewpoints. In multi-viewpoint 3D displays, crosstalk between adjacent eyeboxes is utilized to reduce fluctuations in display luminance depending on observer's position.

The horizontal reflectance has a half-width of about 1.9 degrees in Fig. 12 (a). To remain constant luminance across the viewing area, we designed the viewpoints to be spaced by the half-width.

Figure 18 shows the horizontal reflectance profiles, each spaced by 1.9 degrees. The black lines represent the normalized reflectance distribution for each viewpoint, while the red line indicates their sum.

If horizontal reflectance distribution corresponding to each projector are the same, the observed luminance is

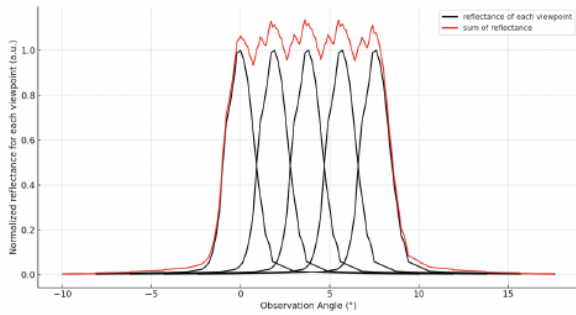


図18:水平反射率特性を持つクロストークの考察。

反射率の和に比例し、1.123~0.957の間で変動する。したがって、観測者の水平方向の移動に伴い、観測される画像の輝度は15%変化する。提案システムでは、視点は2.2度間隔になるように設計されている。したがって、設計された視点間隔と画面の半値幅を一致させることで、システムを改善することができる。

左右の目のクロストークについては、瞳孔間距離が65mmで、設計された視聴距離では、各目は少なくとも4つのアイボックスで区切られており、その結果、クロストーク比は0.36%未満となる。先行研究¹⁴によると、このレベルのクロストークは3D知覚を損なわない。

5.4 異方性反射率の測定精度について

異方性反射率測定の精度は、いくつかの要因に影響される。

誤差の主な原因の1つは、輝度計の視野内に存在するディンプルの数の変動である。本研究の測定条件では、常に約6~7個のディンプルが視野に含まれていた。垂直反射率測定では、水平方向に整列したディンプルを輝度計を垂直方向に移動させると、視野内のディンプルの数が増える。照射されたスクリーンはディンプル周期に対応する微細な輝度分布を示すため、視野内のディンプル数の変化により、測定された輝度にばらつきが生じる。

水平反射率測定では、視野をディンプルに平行に移動させるが、実験セットアップにおける不完全な平行移動も輝度変化をもたらす。

これらの効果が測定精度に与える影響を評価するため、光源と輝度計の位置を固定し、視野内のディンプル数を変化

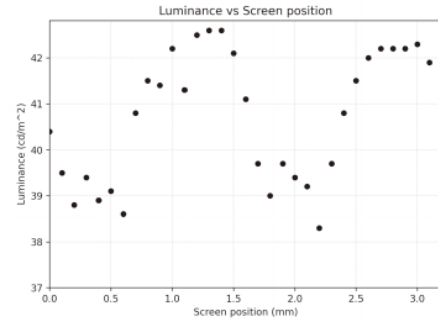


図19:視野内のディンプル数の変化による輝度の変化。

させるためにスクリーンを水平に移動させる実験を行った。スクリーンを2回の完全なディンプル期間(3.2mm)にわたって0.1mm刻みで移動させ、その結果生じる輝度の変化を各位置で測定した。光源と輝度計は最も高い反射率を観察するために配置されたため、実験結果は水平方向の反射率のピークにおける誤差を表している。

測定精度の限界を表している。図19に測定結果を示す。その結果、輝度変化は9.5%であった。したがって、測定された反射率には、この効果による誤差が少なくとも9.5%含まれている。この値はディンプル数の単純な変化の比(6~7ディンプルで14%)と一致しないが、これは視野が円形であるためと思われる。円形磁場の端にある明るい部分からの応答は小さいので、その変動は単純な比率が示唆するよりも小さい。

この誤差は、輝度計の視野内にできるだけ多くのディンプルを含めることで、部分的に抑制することができる。視野を広げると、ディンプル数の変化の影響が軽減されるが、測定の角度分解能も低下する。今後の測定では、狭い視野を使用し、ディンプル数の揺らぎの影響を最小限に抑えながら、高い角度分解能を維持するために、より大きな距離から測定することが望ましい。

6. おわりに

本論文では、偏光選択性を持つ半透明異方性反射スクリーンを用いた新しいAR 3Dディスプレイシステムを発表した。提案するスクリーンは、ワイヤーグリッド偏光板にディンプルをエンボス加工して作製され、異方性反射率と選択的透明性の両方を達成し、背景の視認性を維持しながらプロジェクター光の効率的な反射を可能にする。

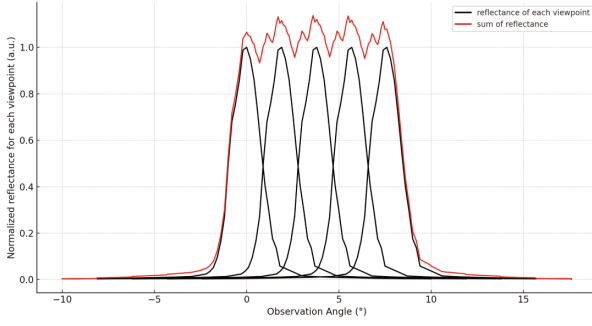


Fig. 18: Consideration of crosstalk with horizontal reflectivity characteristics.

proportional to the sum of reflectance and it fluctuates between 1.123 and 0.957. Therefore, the observed image luminance changes in 15% as the observer moves horizontally. In the proposed system, the viewpoints are designed to be spaced by 2.2 degrees. Therefore, the system can be improved by matching the designed viewpoint interval with the half-width of the screen.

Regarding crosstalk between the left and right eyes, when the interpupillary distance is 65 mm and at the designed viewing distance, each eye is separated by at least four eyeboxes, resulting in a crosstalk ratio of less than 0.36%. According to previous research¹⁴⁾, this level of crosstalk does not impair 3D perception.

5.4 Measurement accuracy of anisotropic reflectivity

The accuracy of anisotropic reflectivity measurements is influenced by several factors.

One of the primary source of error is the fluctuation in the number of dimples present within the luminance meter's field of view. Under the measurement conditions in this study, about 6 to 7 dimples were always included in the field of view. For vertical reflectivity measurements, moving the luminance meter vertically across the horizontally aligned dimples changes the number of dimples within the view. The illuminated screen exhibits a fine luminance distribution corresponding to the dimple period, so changes in the number of dimples within the field of view lead to variations in the measured luminance.

For horizontal reflectivity measurements, the field of view is moved parallel to the dimples, but imperfect parallel movement in the experimental setup also introduces luminance variations.

To assess the impact of these effects on measurement accuracy, an experiment was conducted in which the positions of the light source and luminance meter were

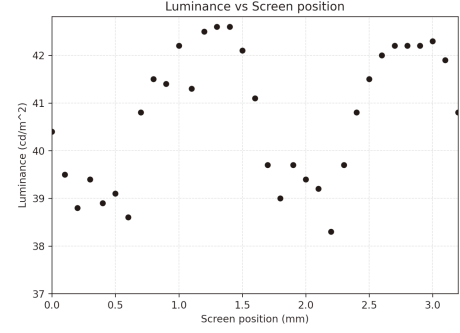


Fig. 19: Variation in luminance due to changes in the number of dimples within the field of view.

fixed, and the screen was moved horizontally to vary the number of dimples within the field of view. The screen was moved in 0.1 mm increments over two complete dimple periods (3.2 mm), and the resulting changes in luminance were measured at each position. The light source and luminance meter were positioned to observe the highest reflectivity, so the experiment result represents the error at the peak of horizontal reflectivity.

It represents the limit of measurement accuracy. Figure 19 shows the measurement results. The results show a luminance variation of 9.5%. Therefore, the measured reflectivity includes at least 9.5% error due to this effect. This value does not match the simple ratio of dimple number variation (14% for 6 to 7 dimples), likely because the field of view is circular. The response from the brighter areas at the edge of the circular field is smaller, so the variation is less than the simple ratio would suggest.

This error can be partially suppressed by including as many dimples as possible within the luminance meter's field of view. Increasing the field of view reduces the impact of dimple number changes, but also decreases the angular resolution of the measurement. For future measurements, it is desirable to use a narrow field of view and measure from a greater distance to maintain high angular resolution while minimizing the effect of dimple number fluctuations.

6. Conclusions

This paper presented a novel AR 3D display system using a semi-transparent anisotropic reflective screen with polarization selectivity. The proposed screen, fabricated by embossing dimples onto a wire grid polarizer, achieves both anisotropic reflectivity and selective transparency, enabling efficient reflection of projector light while maintaining background visibility. Experi-

実験の結果、スクリーンは強い水平視差と広い垂直視野を提供し、マルチユーザー3Dディスプレイアプリケーションをサポートすることが実証された。しかし、現在の製造工程では、ディンプル形成が制限され、ワイヤー破損による分極選択性が低下するため、透過率が向上することがわかった。垂直反射率の解析でも、スクリーンの表面形状に起因する不要なピークが明らかになった。これらの問題点を解決するために、スポット加熱と加熱されたディンプルローラーを用いた改良された製造方法を提案した。このアプローチは、ディンプル精度を向上させ、ワイヤグリッド構造を保持し、より良い光学性能につながることを期待される。本研究で得られた知見は、高視認性AR 3Dディスプレイのための提案スクリーンの可能性を示し、将来の開発のための精密な製造技術の重要性を強調するものである。

7. 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 JP22K19789, JP23K19998, JP24K17235, JP25K03154 の助成を受けた。本研究で使用したワイヤグリッド偏光板を提供していただいた旭化成株式会社に感謝する。また、ワイヤグリッド偏光板の破損を写真撮影して下さった長岡技術科学大学分析計装センターに感謝する。

References

- 1) S. Yang, X. Sang, X. Yu, X. Gao, L. Liu, B. Liu, and L. Yang, "162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen", *Opt. Express* 26, 33013-33021 (2018)
- 2) E. Bouzbib, I. Sarasate, U. J. Fernández, I. Fernández, M. Lopez-Amo, I. Ezcurdia, and A. Marzo, "FlexiVol: a Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction", *Proc. of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (CHI '25), no. 977, pp. 1-16 (2025)
- 3) N. S. Holliman, N. A. Dodgson, G. E. Favalora, and L. Pockett, "Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis", *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 57, no. 2, pp. 362-371 (2011)
- 4) M. Hackett, M. Proctor, "The effect of autostereoscopic holograms on anatomical knowledge: a randomised trial", *Medical Education*, vol. 52, no. 11 pp. 1147-1155 (2018)
- 5) G. E. Favalora, "Volumetric 3D displays and application infrastructure", *Computer*, vol. 38, no. 8, pp. 37-44 (2005)
- 6) N. A. Dodgson, "Autostereoscopic 3D displays", *Computer*, vol. 38, no. 8, pp. 31-36 (2005)
- 7) P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and A. J. Underkoffler, "Electronic Display System for Computational Holography", *Proc. SPIE Practical Holography IV*, 1212 (1996)
- 8) J. H. Lee, J. Park, D. Nam, S. Y. Choi, D. S. Park, and C. Y. Kim, "Optimal projector configuration design for 300-Mpixel multi-projection 3D display", *Optics Express*, vol. 21, no. 22, pp. 26820-26835 (2013)
- 9) Q. Zhong, B. Chen, H. Li, W. Shen, X. Liu, Y. Peng, "Surround-type Light Field Display with Immersive Experience", *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 45, no. 1 pp. 517-519 (2014)
- 10) M. Billinghurst, A. Clark, and G. A. Lee, "A survey of augmented reality", *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, vol. 8, no. 2-3, pp. 73-272 (2015)

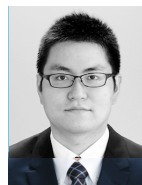
- 11) J. P. Rolland, R. L. Holloway, and H. Fuchs, "A comparison of optical and video see-through, head-mounted displays", *Proc. SPIE* 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies (1995)
- 12) J.-Y. Hong, S.-g. Park, C.-K. Lee, S. Moon, S.-J. Kim, J. Hong, Y. Kim, and B. Lee, "See-through multi-projection three-dimensional display using transparent anisotropic diffuser", *Opt. Express*, vol. 24, pp. 14138-14151 (2016)
- 13) S. Sato, K. Fujii, and T. Yendo, "Development of Vertical Diffusive Reflection Screen with Background Transparency for AR 3D Display", *Proc. Int. Display Workshops (IDW)*, vol. 30, 3D4/3DSA4-4 (2023)
- 14) E. O'Keefe, C. Lloyd, T. Bullock, A. V. Atta, and M. Winterbottom, "Evaluating the effect of stereoscopic display crosstalk on simulated remote vision system depth discrimination", *Proc. IS&T Electronic Imaging (Stereoscopic Displays and Applications XXX)*, SDA-639, pp. 639-1-639-7 (2019)



Ryotaro Umemoto received his B.Eng. degree from Nagaoka University of Technology, Japan, in 2023. He is currently a master's student in the Department of Electrical, Electronics and Information Engineering at Nagaoka University of Technology. His research interests include light field displays and AR 3D displays.



Sei Sato received his B.Eng. and M.Eng. degrees from Nagaoka University of Technology, Japan, in 2025. His research interests include 3D displays and optical see-through AR displays.



Kengo Fujii received his B. Eng., M. Eng., and Ph. D. degrees from Utsunomiya University, Japan. After graduation, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University as a postdoctoral researcher. From 2023, he joined Nagaoka University of Technology as an assistant professor in the Department of Electrical, Electronics and Information Engineering. His research interests include the method combining aerial imaging with display, heat and sound. Furthermore, he is working on the application of aerial displays as video calling devices.



Tomohiro Yendo received his B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology in 1996, 1998, and 2001, respectively. He served as an assistant professor at Nagoya University, then as associate professor and subsequently professor at Nagaoka University of Technology. Since 2025, he has been a professor at Tokyo City University. His research interests include 3D displays, 3D image capturing, and visible light communication.



Masahiro Iwahashi received the B.Eng., M.Eng., and D.Eng. degrees in electrical engineering from Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, in 1988, 1990, and 1996, respectively. In 1990, he joined Nippon Steel Company, Ltd., Chiyoda, Japan. Since 1993, he has been with Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan, where he is currently a Professor with the Department of Electrical, Electronics, and Information Engineering. His research interests include digital signal processing, multirate systems, and image compression.

mental results demonstrated that the screen provides strong horizontal parallax and a wide vertical viewing area, supporting multi-user 3D display applications. However, the current fabrication process was found to limit dimple formation and reduce polarization selectivity due to wire breakage, resulting in increased transmittance. Analysis of the vertical reflectivity also revealed unwanted peaks caused by the screen's surface geometry. To address these issues, an improved fabrication method using spot heating and a heated dimpled roller was proposed. This approach is expected to improve dimple accuracy and preserve the wire grid structure, leading to better optical performance. The findings of this research indicate the potential of the proposed screen for high-visibility AR 3D displays and highlight the importance of precise fabrication techniques for future development.

7. Acknowledgments

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP22K19789, JP23K19998, JP24K17235, JP25K03154. We thank Asahi Kasei Corporation for providing the wire grid polarizer used in this research. We also thank the Analysis and Instrumentation Center, Nagaoka University of Technology, for photographing the breakage of the wire grid polarizer.

References

- 1) S. Yang, X. Sang, X. Yu, X. Gao, L. Liu, B. Liu, and L. Yang, "162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen", *Opt. Express* 26, 33013-33021 (2018)
- 2) E. Bouzbib, I. Sarasate, U. J. Fernández, I. Fernández, M. Lopez-Amo, I. Ezcurdia, and A. Marzo, "FlexiVol: a Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction", *Proc. of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '25)*, no. 977, pp. 1-16 (2025)
- 3) N. S. Holliman, N. A. Dodgson, G. E. Favalora, and L. Pockett, "Three-Dimensional Displays: A Review and Applications Analysis", *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 57, no. 2, pp. 362-371 (2011)
- 4) M. Hackett, M. Proctor, "The effect of autostereoscopic holograms on anatomical knowledge: a randomised trial", *Medical Education*, vol. 52, no. 11 pp. 1147-1155 (2018)
- 5) G. E. Favalora, "Volumetric 3D displays and application infrastructure", *Computer*, vol. 38, no. 8, pp. 37-44 (2005)
- 6) N. A. Dodgson, "Autostereoscopic 3D displays", *Computer*, vol. 38, no. 8, pp. 31-36 (2005)
- 7) P. St. Hilaire, S. A. Benton, M. Lucente, M. L. Jepsen, J. Kollin, H. Yoshikawa, and A. J. Underkoffler, "Electronic Display System for Computational Holography", *Proc. SPIE Practical Holography IV*, 1212 (1996)
- 8) J. H. Lee, J. Park, D. Nam, S. Y. Choi, D. S. Park, and C. Y. Kim, "Optimal projector configuration design for 300-Mpixel multi-projection 3D display", *Optics Express*, vol. 21, no. 22, pp. 26820-26835 (2013)
- 9) Q. Zhong, B. Chen, H. Li, W. Shen, X. Liu, Y. Peng, "Surround-type Light Field Display with Immersive Experience", *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 45, no. 1 pp. 517-519 (2014)
- 10) M. Billinghurst, A. Clark, and G. A. Lee, "A survey of augmented reality", *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, vol. 8, no. 2-3, pp. 73-272 (2015)
- 11) J. P. Rolland, R. L. Holloway, and H. Fuchs, "A comparison of optical and video see-through, head-mounted displays", *Proc. SPIE 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies* (1995)
- 12) J.-Y. Hong, S.-g. Park, C.-K. Lee, S. Moon, S.-J. Kim, J. Hong, Y. Kim, and B. Lee, "See-through multi-projection three-dimensional display using transparent anisotropic diffuser", *Opt. Express*, vol. 24, pp. 14138-14151 (2016)
- 13) S. Sato, K. Fujii, and T. Yendo, "Development of Vertical Diffusive Reflection Screen with Background Transparency for AR 3D Display", *Proc. Int. Display Workshops (IDW)*, vol. 30, 3D4/3DSA4-4 (2023)
- 14) E. O'Keefe, C. Lloyd, T. Bullock, A. V. Atta, and M. Winterbottom, "Evaluating the effect of stereoscopic display crosstalk on simulated remote vision system depth discrimination", *Proc. IS&T Electronic Imaging (Stereoscopic Displays and Applications XXX)*, SDA-639, pp. 639-1-639-7 (2019)



Ryotaro Umemoto received his B.Eng. degree from Nagaoka University of Technology, Japan, in 2023. He is currently a master's student in the Department of Electrical, Electronics and Information Engineering at Nagaoka University of Technology. His research interests include light field displays and AR 3D displays.



Sei Sato received his B.Eng. and M.Eng. degrees from Nagaoka University of Technology, Japan, in 2025. His research interests include 3D displays and optical see-through AR displays.



Kengo Fujii received his B. Eng., M. Eng., and Ph. D. degrees from Utsunomiya University, Japan. After graduation, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University as a postdoctoral researcher. From 2023, he joined Nagaoka University of Technology as an assistant professor in the Department of Electrical, Electronics and Information Engineering. His research interests include the method combining aerial imaging with display, heat and sound. Furthermore, he is working on the application of aerial displays as video calling devices.



Tomohiro Yendo received his B.Eng., M.Eng., and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology in 1996, 1998, and 2001, respectively. He served as an assistant professor at Nagoya University, then as associate professor and subsequently professor at Nagaoka University of Technology. Since 2025, he has been a professor at Tokyo City University. His research interests include 3D displays, 3D image capturing, and visible light communication.



Masahiro Iwahashi received the B.Eng., M.Eng., and D.Eng. degrees in electrical engineering from Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, in 1988, 1990, and 1996, respectively. In 1990, he joined Nippon Steel Company, Ltd., Chiyoda, Japan. Since 1993, he has been with Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan, where he is currently a Professor with the Department of Electrical, Electronics, and Information Engineering. His research interests include digital signal processing, multirate systems, and image compression.