

複数種類のレンズアレイを用いた表示面多層化による光線再生ディスプレイの奥行き方向表示領域の拡張

白鳥達也, 藤井賢吾, 圓道知博

あらまし ライトフィールドディスプレイの問題点の一つは、ディスプレイ表面から離れるほど解像度が低下することである。その結果、奥行き方向に表示可能な範囲に制限が生じる。この問題を解決するために、ディスプレイ表面は多層化されている。ディスプレイ表面を多層化することで、ディスプレイ奥くとディスプレイ表面の距離が近づき、解像度が向上し、奥行き方向の表示可能範囲が拡大する。ディスプレイ表面を多層化する手法として、本研究では、複数の種類のレンズを持つ2つのレンズアレイの使用を提案する。また、2つのレンズアレイを用いて、ディスプレイ面の間隔を大きくする方法を提案する。シミュレーションを行い、ディスプレイ表面が多層化され、解像度が向上していることを確認した。

キーワード : 光線再生ディスプレイ, 時分割表示, 表示面多層化, レンズアレイ

1. まえがき

近年、デジタルサイネージの分野では、肉眼で複数の人が同時に観察できる3Dディスプレイの開発が注目されている。このような3Dディスプレイの一種にライトフィールドディスプレイがある。ライトフィールドディスプレイとは、物体の表面からの光を再現して3Dディスプレイを作成するディスプレイのことである。実際の物体は拡散し、その表面に周囲の光を反射し、この光が目に入ると、人は物体を認識する。この光は物体から放射される光線であると考えられ、これらの光線を再現することで、3次元ディスプレイを作成することができる。ライトフィールドディスプレイの特徴は、肉眼で複数の人が同時に観察すること、閉眼すること、滑らかな視差の変化などである。

ライトフィールドディスプレイの性能を決定する要因はいくつかあるが、本論文では、光線密度、光スポット密度、視野角の3つのパラメータに焦点を当てる。これらのパラメータの関係を図1に示す。光線密度は単位角度あたりの光線数である。光スポット密度は、単位面積あたりに光線が発生する(光スポット)ディスプレイ表面上の点の数である。そして、視野角は表示されたオブジェクトが見える角度である。これらの要因はトレードオフの関係にあり、そのためには

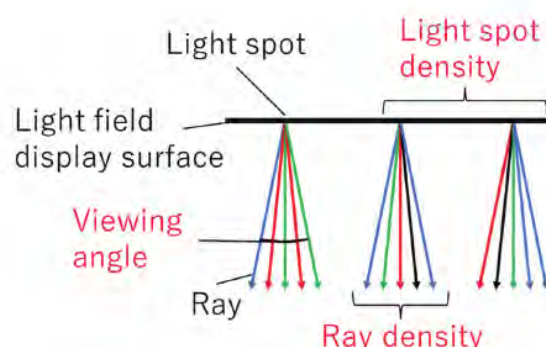


図1 ライトフィールドディスプレイの性能を決定する要因

を他のものを下げることなく、どれか上げる。

ライトフィールドディスプレイの問題点として、ディスプレイ表面から離れた場所に物体が表示されると、ディスプレイ表面から離れるにつれて、表現される物体の解像度が低下することが挙げられる。したがって、ライトフィールド表示で表示できる奥行き範囲には限界がある。この問題は、ライトフィールドディスプレイの構造に起因する。この問題は、レイ密度を上げることで軽減することができ、表示可能な深度範囲を広げることができる。しかし、パラメータ間のトレードオフの関係から、光線密度のみを大きくすることは困難であり、光線密度、光スポット密度、視野角のバランスをとることが重要である。

この問題を解決する方法の一つは、ディスプレイ表面を多層化することである。表示面を多層化することで、表示面が表示対象物から切り離されることを防ぎ、奥行き方向に表示可能な範囲を広げることで解像度を上げることができます(図2)。

Received June 21, 2024; Revised October 7, 2024; Accepted November 12, 2024

† Department of Electrical, Electronics and Information Engineering,
Nagaoka University of Technology
(Niigata, 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。

Depth Enhancement of Light Field Display by Multilayering Display Surface Using Lens Arrays with Multiple Types of Lenses

Tatsuya Shiratori[†], Kengo Fujii[†] and Tomohiro Yendo[†] (member)

Abstract One of the problems with light field displays is that the resolution decreases the further away from the display surface. As a result, there is a limit to the displayable range in the depth direction. To solve this problem, the display surface is multilayered. By making the display surface multilayered, the distance between the display object and the display surface becomes closer, the resolution improves, and the displayable range in the depth direction is expanded. As a method to multilayer the display surface, this study proposes the use of two lens arrays with multiple types of lenses. In addition, this study proposes a method that allows a larger spacing between display surfaces using two lens arrays. Simulations are performed and it is confirmed that the display surfaces are multilayered and the resolution is improved.

Keywords: Light field display, Time multiplexed, Multilayer, Lens arrays.

1. Introduction

In recent years, the development of 3D displays that can be simultaneously observed by multiple people with the naked eye has attracted attention in the field of digital signage. One type of such 3D display is a light field display. A light field display is a display that reproduces light coming from the surface of an object to create a 3D display. Real objects diffuse and reflect ambient light on their surfaces, and when this light enters the eyes, people recognize the objects. This light is considered to be rays emitted from the object, and by reproducing these rays, a three-dimensional display can be created. Features of light field displays include: simultaneous observation by multiple people with the naked eye, occlusion, and smooth parallax change.

Although there are several factors that determine the performance of a light field display, this paper focuses on three parameters: ray density, light spot density, and viewing angle. The relationship between these parameters is shown in Figure 1. Ray density is the number of rays per unit angle. The light spot density is the number of points on the display surface from which rays emerge (light spots) per unit area. And the viewing angle is the angle over which the displayed object is visible. These factors are in a trade-off relationship, and it is difficult to

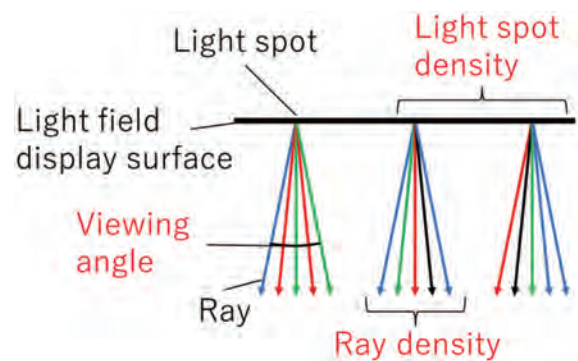


Fig. 1 Factors that determine the performance of light field displays.

raise any one without lowering the others.

One problem with light field display is that when an object is displayed at a distance from the display surface, the resolution of the object represented decreases as it moves away from the display surface. Therefore, there is a limit to the depth range that can be displayed on light field display. This problem is caused by the structure of the light field display. The problem can be alleviated by increasing the ray density, which increases the depth range that can be displayed. However, it is difficult to increase only the ray density due to the trade-off relationship among the parameters, so it is important to balance the ray density, light spot density, and viewing angle.

One method to solve this problem is to multilayer the display surface. Multilayering the display surface prevents the display surface from being separated from the displayed object and increases the resolution, there by expanding the range that can be displayed in the depth direction (Figure 2).

Received June 21, 2024; Revised October 7, 2024; Accepted November 12, 2024

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

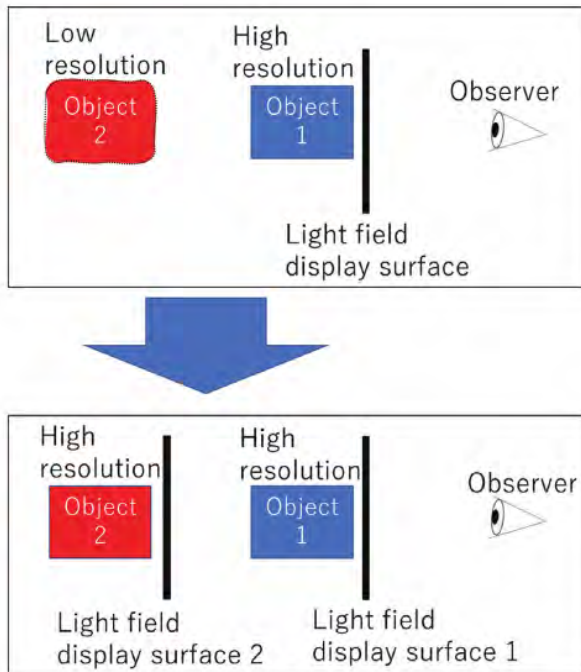


図2 多層ディスプレイ表面

多層ディスプレイ表面を持つライトフィールドディスプレイがいくつか研究されているが、いくつかの問題がある。

ハーフミラーを用いた多層化手法では、ハーフミラーを用いることで、使用するライトフィールドディスプレイの輝度に対して、観察対象物の輝度を低減することができる。また、表示面の数を増やすと、表示面ごとにライトフィールド表示を用意する必要があり、デバイス全体が大きくなる問題が生じます^[1]。

偏光によって透過率や反射率が変化するミラーを用いる方法^[2-3]と、偏光によって焦点距離などが変化するレンズを用いる方法がある^[4-7]。これらの方法は、偏光方向に応じて多層ディスプレイ表面を作成し、3層以上の多層ディスプレイ表面を作成することを困難にしている。

レンズからの距離が異なる(または移動する)ディスプレイデバイスを配置する方法では、表示面ごとに視野面積と光線密度を調整することができないため、表示面ごとに視野面積と光線密度が同じになることがなく、その結果、表示面ごとに解像度と視野面積が異なる^[8-10]。

レンズの焦点距離を変える方法は、各ディスプレイ表面の光スポットの密度を変える^[11-12]。

そこで本研究では、表示層数を物理的に増やすことなく3層以上に作ることができ、各層で同じ視野角、光線密度、

光スポット密度を持つことができる多層ディスプレイ表面を持つライトフィールドディスプレイを提案する。提案手法は、レンズ径と焦点距離の異なるレンズを組み合わせた2つのレンズアレイにより、ディスプレイ表面を光学的に多層化する。第2章では、2つのレンズアレイを用いた基本的な提案手法を説明し、第3章では、第2章の構造を拡張してディスプレイ面間の距離を増加させた提案手法を説明する。

2. 2つのレンズアレイを用いたディスプレイ表面の多層化方法

本研究では、焦点距離とレンズ径の異なる2つのレンズアレイを用いたディスプレイと、ディスプレイ表面を光学的に多層化し、ディスプレイ領域を奥行き方向に広げ、解像度を向上させるプロジェクターを提案する。提案手法の構成を図3に示す。提案手法を説明するために、まず、単一のレンズとプロジェクターの関係を示す。次に、レンズを1つのレンズアレイに置き換え、次に2つのレンズアレイを置き換えた場合について説明する。

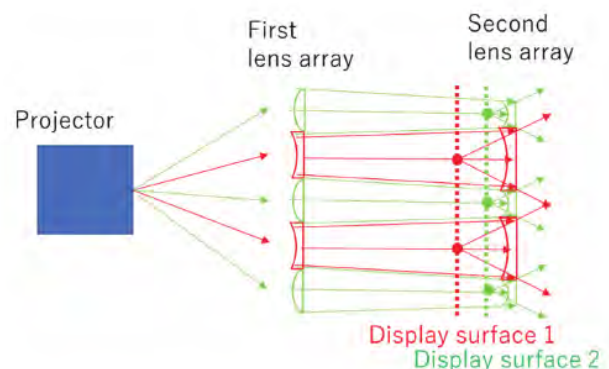


図3 2つのレンズアレイとプロジェクターを備えた提案システム。

2.1 レンズアレイとプロジェクターの組み合わせ まず、レンズアレイとプロジェクターでライトフィールドを構成できることを説明する。図4に示すように、プロジェクターから凹レンズのレンズアレイに画像を投影すると、観察者はレンズごとに1つの光スポットを観察する。レンズアレイの凹レンズに着目すると、レンズの作用により、光点(虚像)から異なる方向に異なる色の光線が放射されているように見える。プロジェクターから投影される画像を変えることで、光線の色を各方向に変えることができる。

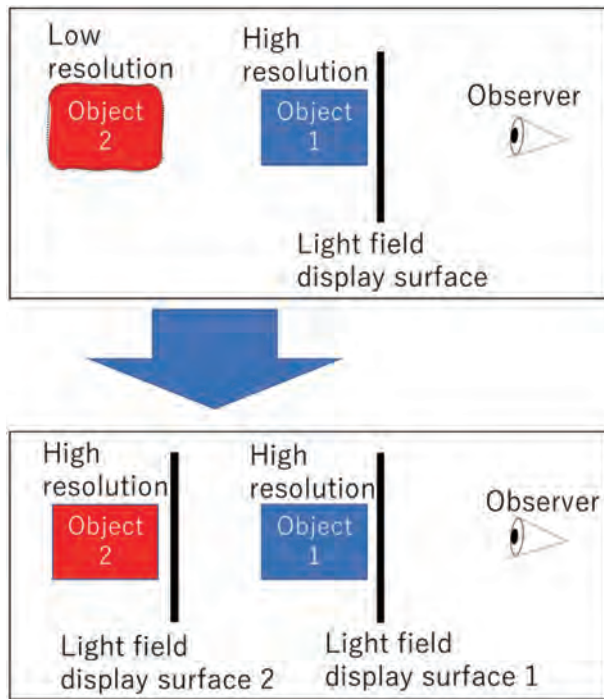


Fig. 2 Multilayered display surfaces.

Several light field displays with multilayered display surfaces have been studied, but there are several problems.

In the method of multilayering using half mirrors, the half mirrors reduce the luminance of the observed object relative to the luminance of the light field display used. In addition, if the number of display surfaces is increased, it is necessary to prepare a light field display for each display surface, resulting in a problem that the entire device becomes larger [1].

There are methods using mirrors whose transmission and reflection change according to polarization [2-3] and methods using lenses whose focal length, etc., change according to polarization [4-7]. These methods make multilayered display surfaces according to the direction of polarization, making it difficult to create multilayered display surfaces with three or more layers.

In the method of placing (or moving) display devices at different distances from the lens, the viewing area and ray density cannot be adjusted for each display surface, so the viewing area and ray density for each display surface cannot be the same, resulting in different resolutions and viewing areas for each display surface [8-10].

The method of varying the focal length of the lens changes the density of light spots on each display surface [11-12].

Therefore, this study proposes a light field display with a multilayered display surface that can be made into three or more layers without physically increasing

the number of display layers and can have the same viewing angle, ray density, and light spot density in each layer. The proposed method optically multilayers the display surface by means of two lens arrays that combine lenses with different lens diameters and focal lengths. In Chapter 2, we describe the basic proposed method using two lens arrays, and in Chapter 3, we describe the proposed method that expands on the structure of Chapter 2 to increase the distance between the display surfaces.

2. Method of multilayering the display surface using two lens arrays

In this study, we propose a display that uses two lens arrays with different focal lengths and lens diameters and a projector to optically multilayer the display surface to expand the display area in the depth direction and improve resolution. The structure of the proposed method is shown in Figure 3. To explain the proposed method, we first show the relationship between a single lens and a projector. Next, the case in which the lens is replaced by a single lens array and then two lens arrays are explained.

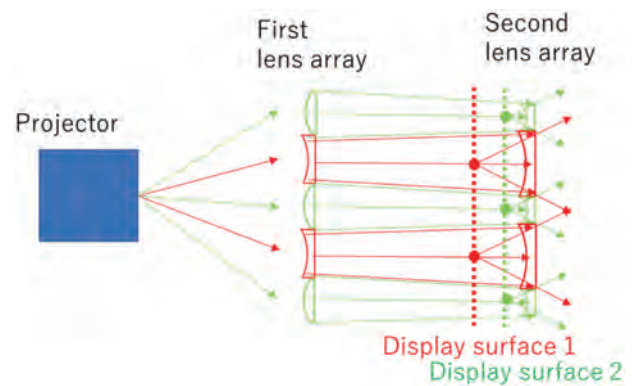


Fig. 3 Proposed system with two lens arrays and projector.

2.1 Combination of one lens array and projector

First, we will explain that a light field can be configured by one lens array and a projector. As shown in Figure 4, when an image is projected from a projector onto a lens array of concave lenses, one light spot per lens is observed by an observer. Focusing on one concave lens in the lens array, it appears to the observer that different colors of rays are emitted in different directions from the light spot (an imaginary image) due to the action of the lens. By changing the image projected from the projector, the color of the rays can be changed in each direction. Therefore, if the relationship between the position of each light spot, the direction of rays emitted from each light spot, and the

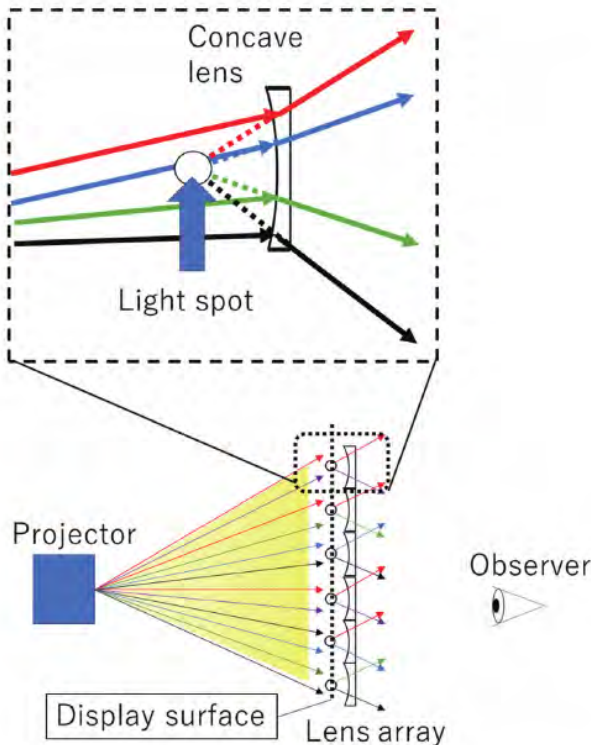


図4 レンズアレイとプロジェクターによるライトフィールド。

したがって、各光スポットの位置、各光スポットから放射される光線の方向、プロジェクターの投影像の関係がわかれば、ディスプレイオブジェクトに合わせて投影像を作成することで、光線再生産によりディスプレイオブジェクトを3次元的に観察することができる。したがって、プロジェクターと単一レンズアレイでライトフィールドディスプレイを実現することができる。この場合、光スポットが整列している平面がディスプレイ面となる。

プロジェクターから画像を投影するレンズアレイに注目する。この時点で、ディスプレイ表面は光スポットで裏打ちされた平面となり、光スポットとレンズの間の距離はレンズの焦点距離によって決定される。

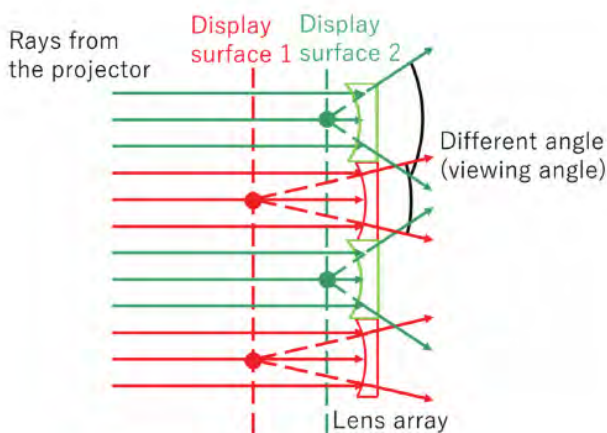


図5 レンズアレイの焦点距離を変化させた場合の多層ディスプレイ表面。

したがって、図5に示すように、焦点距離の異なる2種類のレンズを交互に配置したレンズアレイを考える。レンズの焦点距離には2種類があるので、レンズから光点までの距離は2種類ある。光スポットが配置された平面が表示平面となるため、2つの表示平面も作成される。したがって、焦点距離の異なるレンズでレンズアレイを作成することで、ディスプレイ表面を多層化することができる。しかし、レンズの直径は同じだが焦点距離が異なるレンズアレイの場合、2種類のレンズから放射される光線の範囲(角度)が異なり、その結果、ディスプレイ表面の視野角が異なる。

同じ視野角のディスプレイサーフェスを複数層作成するために、焦点距離とレンズ径を視野角に合わせて調整する。しかし、視野角は同じに保つことができるが、レンズの直径が異なるため、レンズに当たる光線の数が増え、その結果、2種類のレンズの光線密度が異なる。この結果、各ディスプレイ表面の光線密度が異なる。

2.2 2つのレンズアレイの組み合わせと

projector

レンズアレイ(図6の2番目のレンズアレイ)とプロジェクターの間に、焦点距離が異なり、レンズ径が同じレンズアレイ(図6の1番目のレンズアレイ)が追加される。第1レンズアレイの焦点距離は、対応する第2レンズアレイのレンズ径に合わせて調整される。このとき、第一レンズアレイのレンズに入射する光はすべて、対応するレンズに入射する。この結果、プロジェクターからの光線は第1レンズアレイの各レンズに衝突し、第2レンズアレイの各レンズから出る光線は同じ数になる。

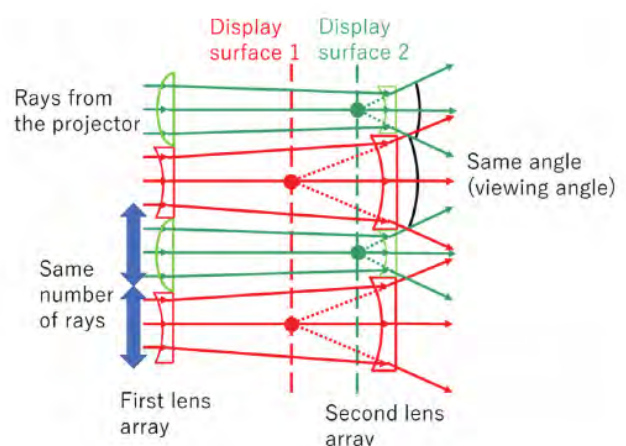


図6 2つのレンズアレイを持つ提案システムの原理。

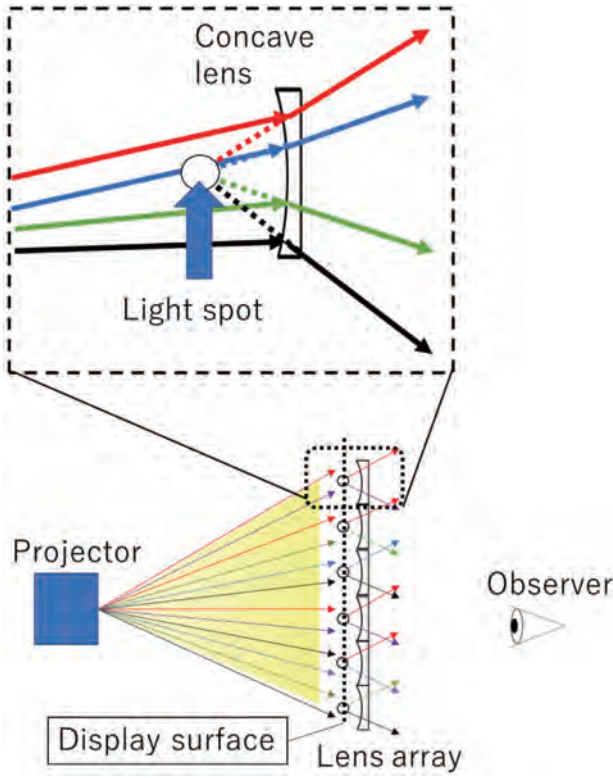


Fig. 4 Light field by lens array and projector.

projected image of the projector is known, the display object can be observed in three dimensions by ray reproduction by creating a projected image in accordance with the display object. Therefore, a light field display can be realized with a projector and a single lens array. In this case, the plane in which the light spots are aligned becomes the display surface.

We focus on a lens array that is projecting an image from a projector. At this point, the display surface becomes a plane lined with light spots, and the distance between the light spots and the lens is determined by the focal length of the lens. Therefore, as shown in

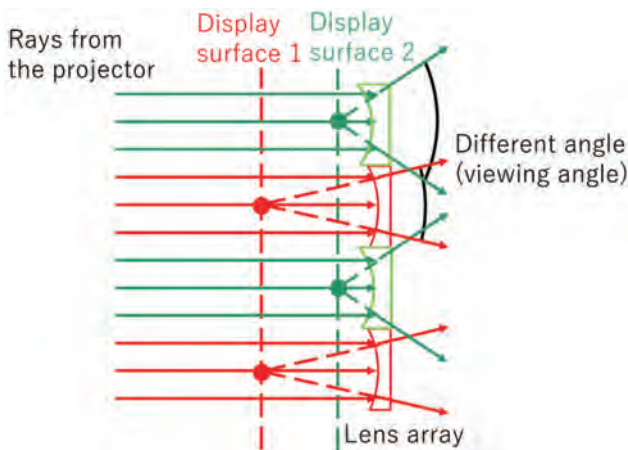


Fig. 5 Multilayered display surface by changing focal length of lens array.

Figure 5, consider a lens array consisting of two types of lenses with different focal lengths arranged alternately. Since there are two types of lens focal lengths, the distance from the lens to the light spot is two different. Since the plane in which the light spots are aligned becomes the display plane, two display planes are also created. Therefore, by creating a lens array with lenses of different focal lengths, the display surface can be multilayered. However, in the case of lens arrays with the same lens diameter but different focal lengths, the range (angle) of rays emitted from the two types of lenses is different, resulting in a different viewing angle on each display surface.

To create multiple layers of display surfaces with the same viewing angle, the focal length as well as the lens diameter is adjusted to match the viewing angle. However, although the viewing angle can be kept the same, the number of rays hitting the lens differs due to the different lens diameters, resulting in different ray densities on each display surface. This results in different ray densities on each display surface.

2.2 Combination of two lens arrays and projector

A lens array with a different focal length and the same lens diameter (first lens array in Figure 6) is added between the lens array (second lens array in Figure 6) and the projector. The focal length of first lens array is adjusted to match the lens diameter of the corresponding second lens array. At this time, all light incident on the lens of first lens array should be incident on the corresponding lens. This results in the same number of rays from the projector hitting each lens of first lens array and the same number of rays exiting each lens of second lens array. This structure allows the display surfaces to be multilayered and the viewing

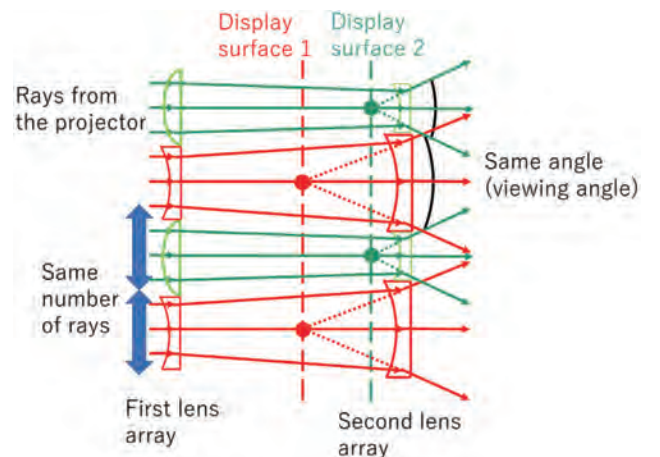


Fig. 6 Principle of the proposed system with two lens arrays.

この構造により、ディスプレイ表面は多層化され、各ディスプレイ表面の視野角と光線密度は同じになる。また、各レンズアレイのレンズ径や焦点距離を変えることで、ディスプレイ面ごとに光スポット密度、光線密度、視野角を調整することができる。

本研究で提案する構造では、各ディスプレイ面の視野角が同じであれば、各レンズのレンズ径が大きいほど、レンズとディスプレイ面の距離が大きくなる。したがって、ディスプレイ表面間の距離を長くするためには、レンズ径の差を大きくする必要がある。

レンズの直径を大きくする場合は、レンズが重ならないようにする必要がある。そこで、本研究では、2層ディスプレイ表面の場合、レンズ径を大きくできる配置を考えた。これを図7に示す。この配置により、

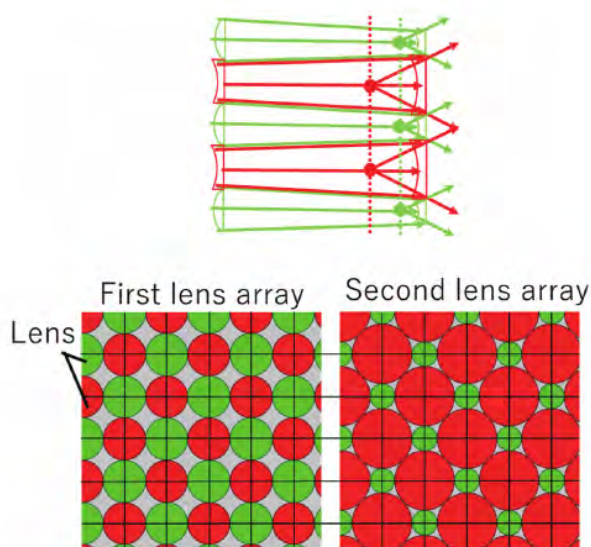


図7 2層の場合のレンズ配置。

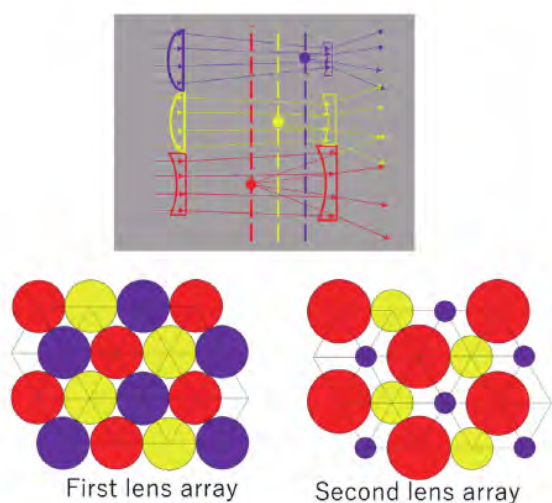


図8 3層の場合のレンズ配置。

-2番目のレンズアレイの大きなレンズのレンズ径は、1番目のレンズアレイのレンズ径の $\sqrt{2}$ 倍になることができる。

また、本研究で提案した構造では、3層以上の表示面を実現できるため、3層の場合のレンズの配置を検討した。その配置を図8に示す。

2.3 時間多重化による光スポット密度の増加

提案構造では、レンズの直径が大きいほど、レンズとディスプレイ表面との距離が大きくなる。レンズ1枚につき1つの光スポットを観察できる。レンズの直径が大きいほど、光スポット密度は低くなる。したがって、レンズアレイを高速で移動させ、レンズアレイの位置に応じてプロジェクターの投影像を高速で切り替えることで、残像効果により光スポットが増加する。これにより、光スポット密度を高めることができる。レンズアレイを移動させる際、図9のようにレンズアレイを傾けることで、移動方向と移動方向に垂直な方向に光スポットの数を増やすことができる。この場合、レンズアレイの傾きは、レンズ径が1サイクルずれるように配置される。

2.4 時間多重化のための構造

レンズアレイはディスプレイ中常に同じ方向に動かさなければならないので、これはレンズアレイを円筒状に回転させることで実現される。提案する構造では、2つのレンズアレイの対応するレンズの相対位置とプロジェクターからの入射光線の角度が変化しないように、2つのレンズアレイを移動させることが重要である。したがって、2つのレンズアレイは同心円状に配置され、プロジェクターはその回転の中心に配置される(図10)。これらの同心レンズアレイを同じ回転速度で回転させることで、2つのレンズアレイの相対位置と入射光線の角度を移動させることができる。

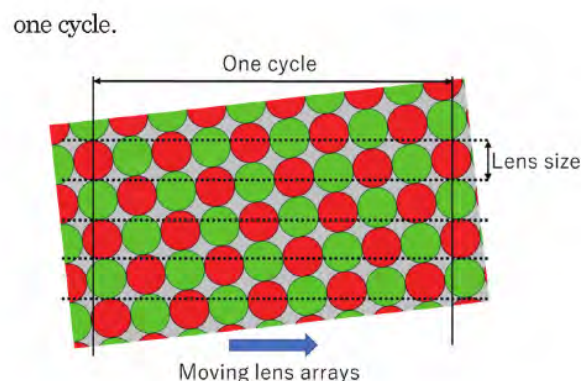


図9 光スポット密度の増加方法

angle and ray density of each display surface to be the same. Also, by changing the lens diameter and focal length of each lens array, the light spot density, ray density and viewing angle can be adjusted for each display surface.

In the structure proposed in this study, when the viewing angle of each display surface is the same, the larger the lens diameter of each lens, the larger the distance between the lens and the display surface. Therefore, to increase the distance between display surfaces, it is necessary to increase the difference in lens diameters.

When increasing the lens diameter, it is necessary to ensure that the lenses do not overlap each other. Therefore, in this study, we considered an arrangement that can increase the lens diameter in the case of a two-layer display surface. This is shown in Figure 7. With this arrangement, the lens diameter of the large lens in

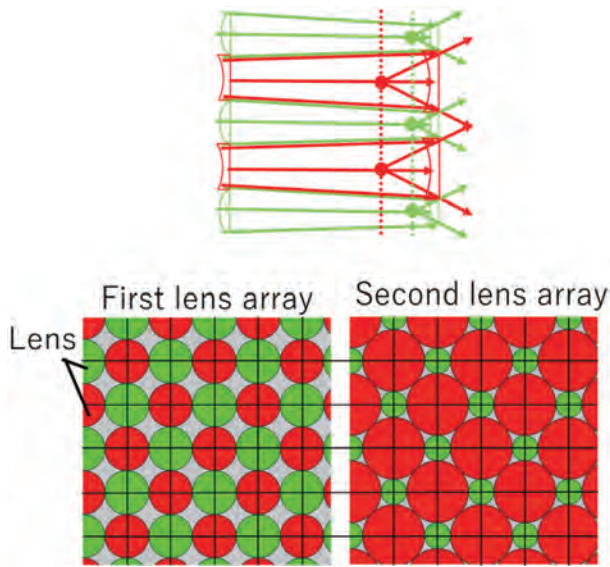


Fig. 7 Lens arrangement in case of two layers.

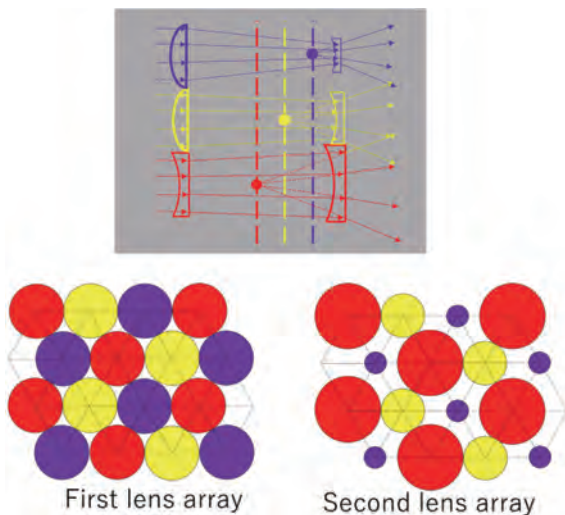


Fig. 8 Lens arrangement in case of three layers.

second lens array can be $\sqrt{2}$ times larger than that of first lens array.

In addition, since the structure proposed in this research allows for more than three layers of display surfaces, we considered the arrangement of lenses in the case of three layers. The arrangement is shown in Figure 8.

2.3 Increased light spot density by time multiplexing

In the proposed structure, the larger the lens diameter, the larger the distance between the lens and the display surface. One light spot can be observed per lens. The larger the lens diameter, the lower the light spot density. Therefore, by moving the lens array at high speed and switching the projected image of the projector at high speed according to the position of the lens array, the light spot is increased by the afterimage effect. This can increase the light spot density. When moving the lens array, the lens array can be tilted as shown in Figure 9 to increase the number of light spots in the direction of movement and in the direction perpendicular to the direction of movement. In this case, the tilt of the lens array is arranged so that the lens diameter is shifted for one cycle.

2.4 Structure for time multiplexing

Since the lens array must constantly move in the same direction throughout the display, this is accomplished by rotating the lens array in a cylindrical shape. In the proposed structure, it is important to move the two lens arrays so that the relative positions of the corresponding lenses in the two lens arrays and the angle of incident ray from the projector do not change. Therefore, the two lens arrays are arranged in a concentric cylindrical shape, and the projector is placed at the center of their rotation (Figure 10). By rotating these concentric lens arrays at the same rotational speed, the relative position of the two lens arrays and the angle of incident ray can be moved

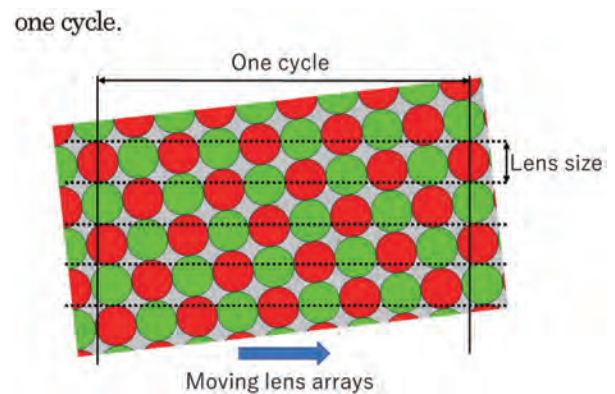


Fig. 9 Method of increasing light spot density.

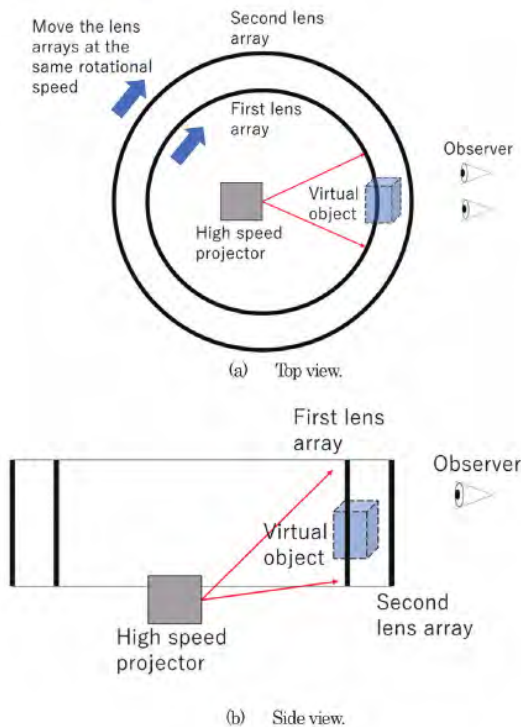


図10 レンズアレイの回転構造

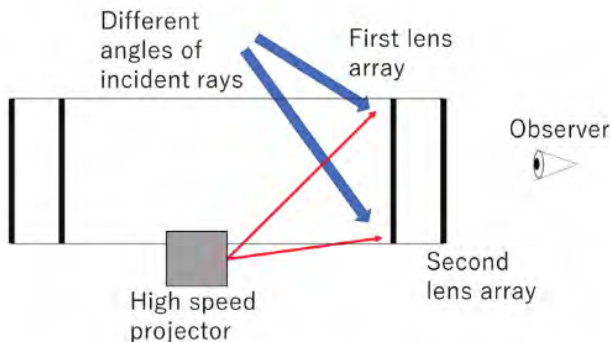


図11 回転構造に関する問題点

変化なし。

提案ディスプレイの同心円筒構造では、プロジェクターからの光線は、回転方向において同じ角度ですべてのレンズに入る。一方、回転軸方向では、図11に示すように、各レンズに入る光線の角度が上と下で異なっている。第一レンズアレイの焦点を変える必要がある。そこで、図12のような構造で問題を解いた。この問題を解くために、プロジェクターと2つのレンズアレイの間に円筒形レンズ(図12のオレンジレンズ)と円筒形レンズアレイ(図12の緑色レンズ)を1つずつ追加した。この構造では、側面から見ると、単一の円筒形レンズがプロジェクターの光線をコリメートされた光に変換する。これにより、レンズアレイの上下位置で入射光線の角度が同じになるようにする。

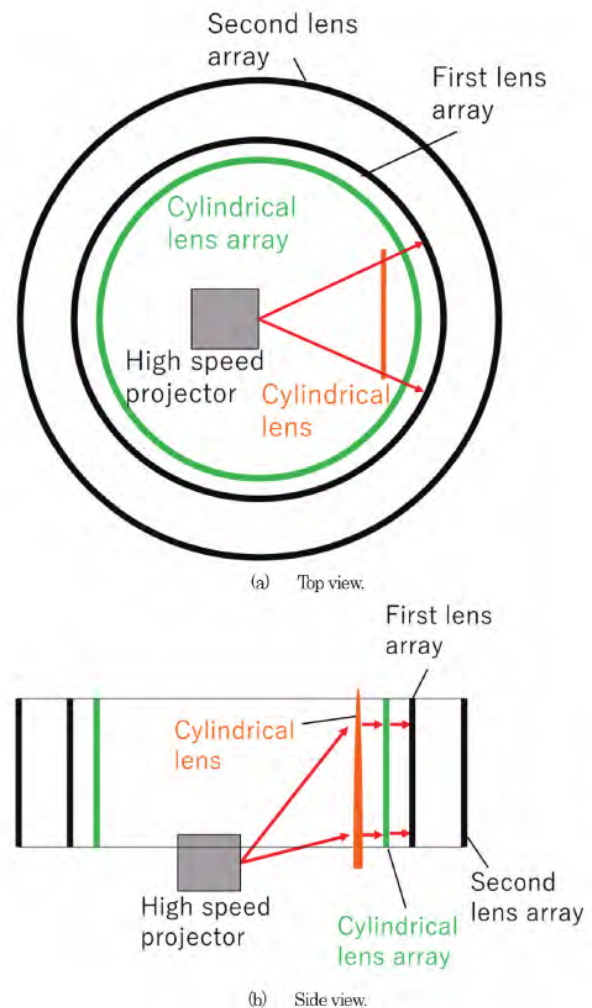


図12 光学部品の配置図

入射光線の角度は上から見たときと横から見たときで異なるので、円筒レンズの角度と異なる方向の円筒レンズアレイを第一レンズアレイの前に挿入し、上から見たときと横から見たときの入射光線の角度が同じになるようにする。この円筒形レンズは、円筒形レンズ(図12の緑色のレンズ)のレンズアレイになるように、各レンズの前に配置されている。円筒形レンズアレイの直径は、円筒形レンズアレイ内にプロジェクターを配置する構造により大きい。フリッカを防ぐために少なくとも30Hzのリフレッシュレートを得るためには、このシリンダーを30Hzで回転させる必要がある。さらに、画像は回転に伴ってプロジェクターから投影されることを考慮すると、円筒レンズアレイの回転率はそれほど高くないはずである。したがって、円筒が1回転完了すると1つの表示画像が完成するのではなく、半分の回転で1つの表示画像が完成することになる。

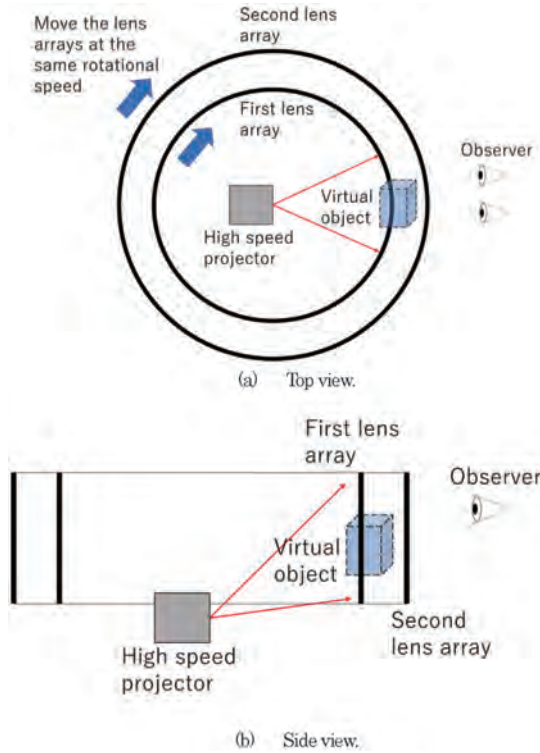


Fig. 10 Rotating structure of lens array.

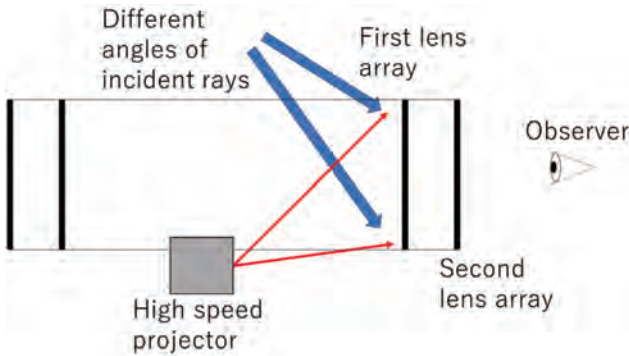


Fig. 11 Problems with rotating structure.

without changing.

In the concentric cylindrical structure of the proposed display, rays from the projector enter every lens at the same angle in the rotation direction. On the other hand, in the direction of the rotation axis, the angle of the rays entering each lens differs between the top and bottom as shown in Figure 11. It is necessary to change the focus of first lens array. Therefore, we solved the problem by making the structure as shown in Figure 12. To solve the problem, one cylindrical lens (orange lens in Figure 12) and a cylindrical lens array (green lens in Figure 12) were added between the projector and the two lens arrays. In this structure, a single cylindrical lens converts the rays of the projector into collimated light when viewed from the side. This ensures that the angle of incident ray is the same at the top and bottom

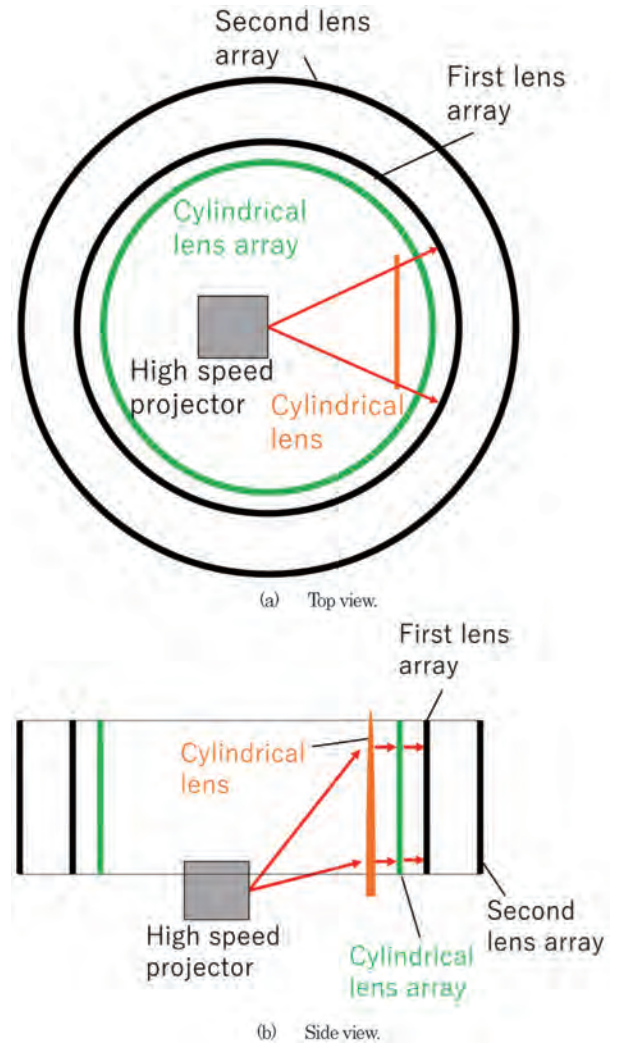


Fig. 12 Arrangement of optical components.

positions of the lens array. Since the angle of incident ray is different when viewed from the top and from the side, a cylindrical lens array with a direction 90° different from that of the cylindrical lens is inserted in front of first lens array, so that the angle of incident ray is the same when viewed from the top and from the side. This cylindrical lens is placed in front of each lens so that it becomes a lens array of cylindrical lenses (green lens in Figure 12).

The diameter of the cylindrical lens array is large due to the structure of placing the projector inside the cylindrical lens array. To obtain a refresh rate of at least 30 Hz to prevent flicker, it is necessary to rotate this cylinder at 30 Hz. Furthermore, considering that images are projected from the projector in conjunction with the rotation, the rotation rate of the cylindrical lens array should not be too high. Therefore, instead of one displayed image being completed when the cylinder completes one revolution, one displayed image should be completed in half a revolution. Even with a refresh rate

of 30 Hz, the number of rotations can be halved to 15 Hz. By making the structure such that multiple images can be completed projected during one rotation of the cylinder, the number of rotations can be lowered by that amount. For this purpose, the number of rotations can be reduced to $1/n$ by making one cycle of the lens array arrangement $1/n$ of the cylinder, instead of one cycle of the cylinder as shown in Figure 9.

2.5 Lens parameter calculation

The formula for determining the focal length of each lens that makes up the display is shown below. A diagram of the relationship between the parameters is shown in Figure 13. The parameters to be input for the calculation are the distance between lenses L , the lens radius r of first lens, the lens radius R of second lens, and the viewing angle θ . When the calculated focal length is positive, the lens is convex; when it is negative, the lens is concave.

For a cylindrical lens, the distance to the projector is the focal length (To make the projector light collimated).

The focal length of first lens, f_1

$$f_1 = \frac{Lr}{r-R} \quad (1)$$

The focal length of second lens, f_2

$$f_2 = -\frac{RL}{L \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) - R + r} \quad (2)$$

Distance from lens to display surface, D

$$D = \frac{R}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3)$$

2.6 Simulation

The purpose of the simulation is as follows. First, to confirm that the proposed structure can realize parallax and display three dimensional images. Second, to confirm that the proposed structure can increase the resolution and expand the displayable area in the depth

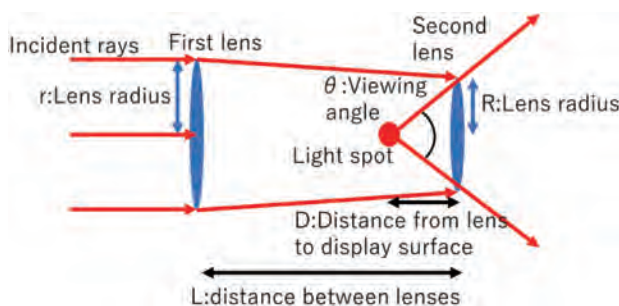


Fig. 13 Relationship between lens parameters.

direction by making the display surface multilayered. For this purpose, a cube and resolution chart was displayed and compared between the proposed method and a single-layer light field display.

The structural parameters of the lens array are the same for both Objective 1 and Objective 2, and are shown in Figure 14. The parameters used in the simulations are shown in Table 1 (negative focal lengths are concave lenses). The lenses in the simulation were assumed to be ideal lenses of thickness 0. The lenses in the lens array were divided into 10 sections of the circumference, which were used as one period of the lens array. 21 lenses were

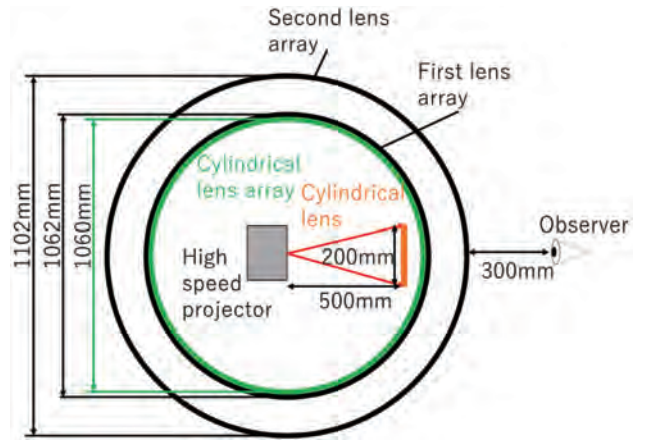


Fig. 14 Lens array parameters in simulation.

Table 1 Simulation Parameters.

Projector	
Lens diameter	30mm
Resolution	300px × 300px
Projection size	200mm × 200mm
Projection distance	500mm
Number of projections	360image/cycle
Cylindrical lens	
Lens size	200mm
Focal length	500mm
Cylindrical lens array	
Diameter	1060mm
Lens diameter	15.8mm
Focal length	530mm
First lens array	
Diameter	1062mm
Lens diameter	15.8mm
Focal length (To small lens)	48.6mm
Focal length (To big lens)	-48.6mm
Second lens array	
Diameter	1102mm
Lens diameter (Small lens)	9.3mm
Lens diameter (Big lens)	22.4mm
Focal length (Small lens)	-8.0mm
Focal length (Big lens)	-44.6mm

この結果、レンズの直径は15.8mmとなった(傾きを考慮して計算)。そこから、レンズの直径を図7に基づき、1サイクルに配置されたレンズを2種類のレンズに交互に配置し、そのレンズ直径に $\sqrt{2}$ と $(2 - \sqrt{2})$ の倍率を乗じた。次に、視野角を 45° (± 22.5)に設定した結果、2つ目のレンズアレイからディスプレイ表面までの距離は、それぞれ27.0mmと11.2mmとなり、その差は15.8mmとなった。

シミュレーション手法はレイトレーシング法を用いる。この手順では、レンズアレイを回転させ、プロジェクターから画像を投影して、ある瞬間に観察者が見ることができる画像を得る。レンズアレイを1サイクルになるまで回転させ、1サイクル分の画像を得る。残像効果については、各瞬間に見える画像の画素値を足し合わせて最終的な結果を得る。

キューブを表示するためのシミュレーション条件を図15と図16に示す。シミュレーションでは、片面50mmの立方体を置き、上下左右 $\pm 15^\circ$ の位置から観察した画像を表示し、3D表示が可能であることを確認した。

解像度チャートを用いたシミュレーション条件を図17に示す。シミュレーションでは、解像度

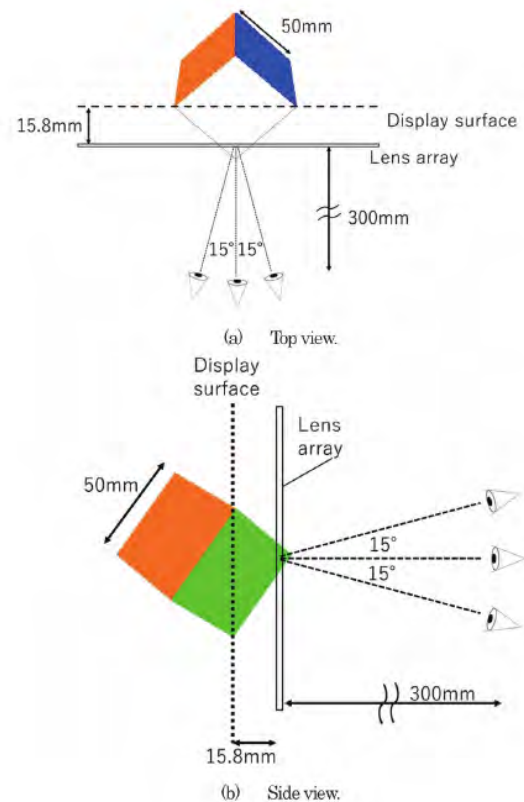


図16 3D視認性を確認するためのシミュレーションパラメータ

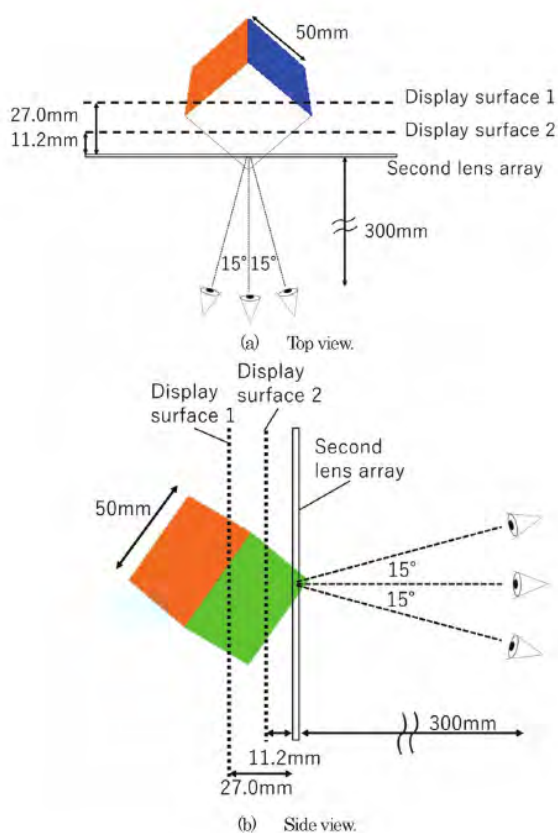


図15 3D視認性を確認するためのシミュレーションパラメータ

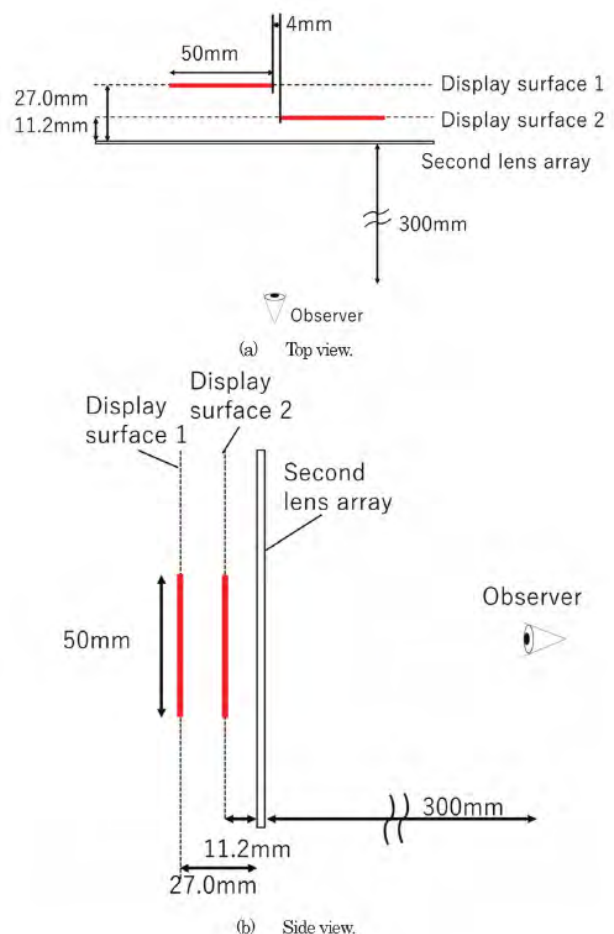


図17 分解能チェックのためのシミュレーションパラメータ

placed in one period. This resulted in a lens diameter of 15.8mm (calculated considering the tilt). From there, the lens diameters were based on Figure 7, and the lenses arranged in one cycle were alternated into two types of lenses, and their lens diameters were multiplied by a factor of $\sqrt{2}$ and $(2 - \sqrt{2})$. Then, the viewing angle was set to 45° (± 22.5), resulting in distance of 27.0mm and 11.2mm from second lens array to the display surface, respectively, a difference of 15.8mm.

The simulation method uses the ray tracing method. The procedure involves rotating the lens array and projecting an image from a projector to obtain an image that can be seen by an observer at a certain instant. The lens array is rotated until it reaches one cycle, and the image for one cycle is obtained. For the afterimage effect, the pixel values of the images visible at each instant are added together to obtain the final result.

Simulation conditions for displaying the cube are shown in Figures 15 and Figures 16. In the simulation, a cube of 50mm per side was placed, and images observed from positions of $\pm 15^\circ$ up, down, left, and right were output to confirm that 3D display was possible.

Simulation conditions using resolution chart are shown in Figure 17. In the simulation, the resolution

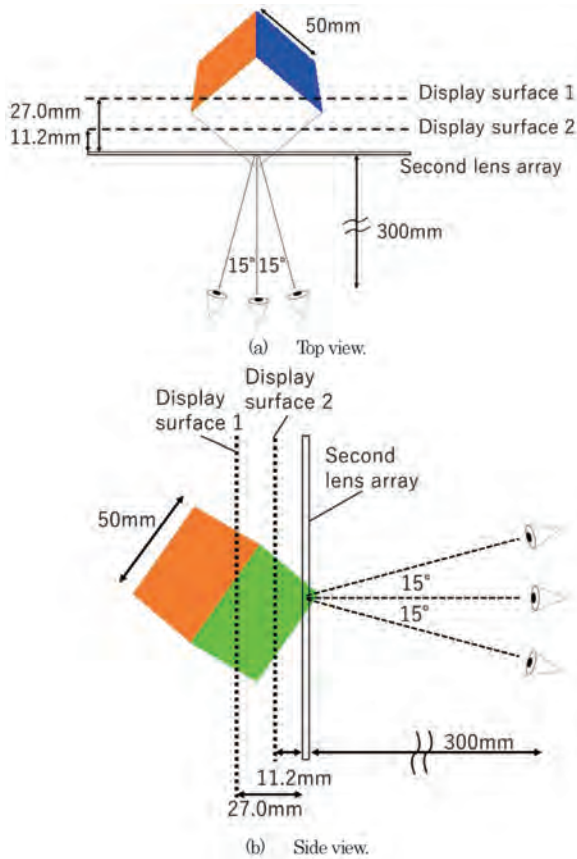


Fig. 15 Simulation parameters for confirmation of 3D viewability.

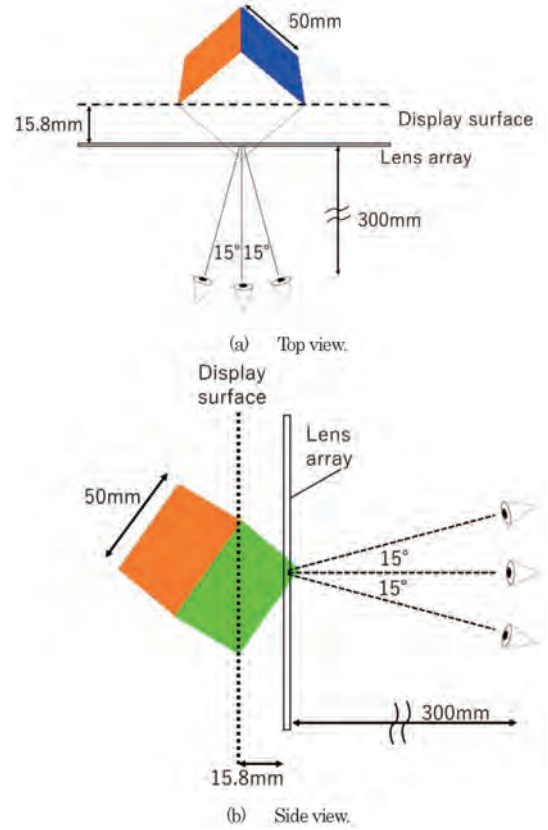


Fig. 16 Simulation parameters for confirmation of 3D viewability.

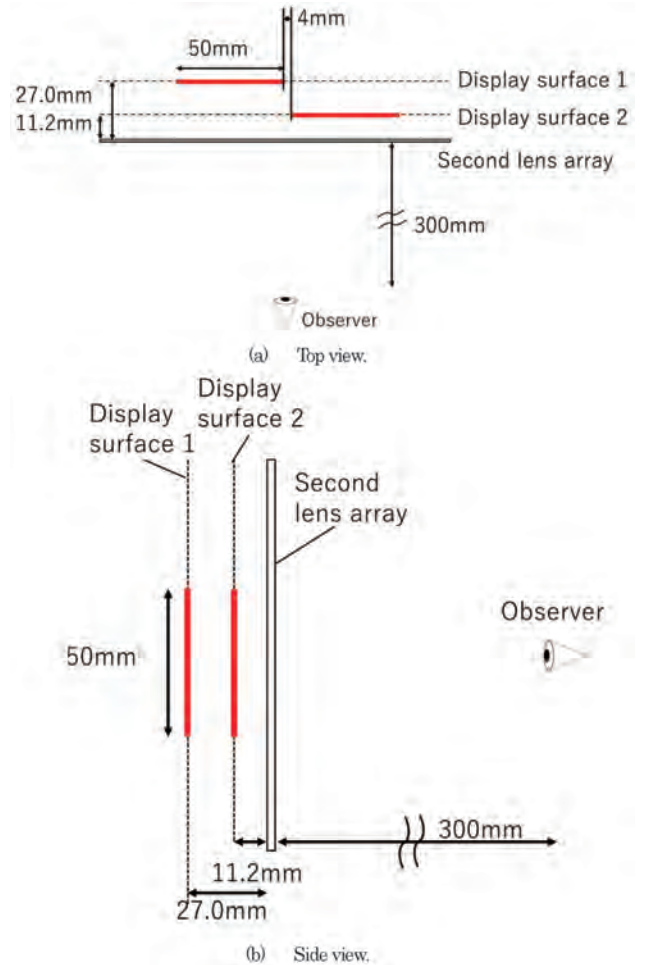


Fig. 17 Simulation parameters for resolution check.

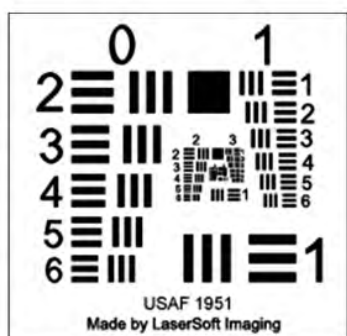


Fig. 18 Resolution chart.

(レーザーソフトイメージングによる、CC BY-SA 3.0)。

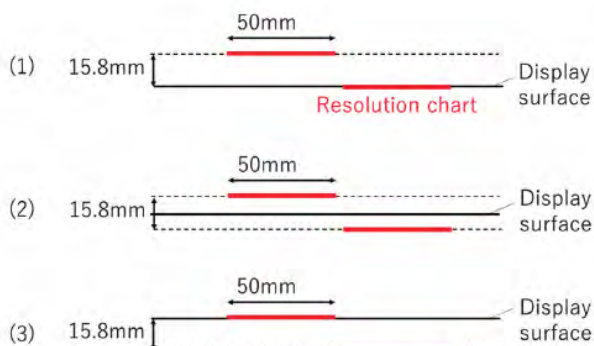


図19 比較画像作成の位置づけ

図17のチャートは、2つの表示面のそれぞれに配置された。比較画像として、図18の解像度チャートを、1層ディスプレイの表示面の差が約15.8mmになるように配置した、

- (1) 前景の解像度チャートがディスプレイ表面上にある場合、
- (2) ディスプレイ表面が解像度チャートの間にある場合、
- (3) 背面の解像度チャートがディスプレイ表面上にある場合。

3つのケースを図19に示す。

2.7 シミュレーション結果

図20に立方体を表示したシミュレーション結果を示す。図20(a)は単層ライトフィールドディスプレイに表示した結果、図20(b)は提案ディスプレイを使用した結果である。図20(b)の各視点の画像を比較すると、立方体の各面の形状や角度が同じであることがわかり、3D表示が可能であることがわかる。単層ディスプレイ表面と提案手法の間で立方体の前角を比較すると、提案手法では立方体のエッジがより明瞭で高解像度に見える。

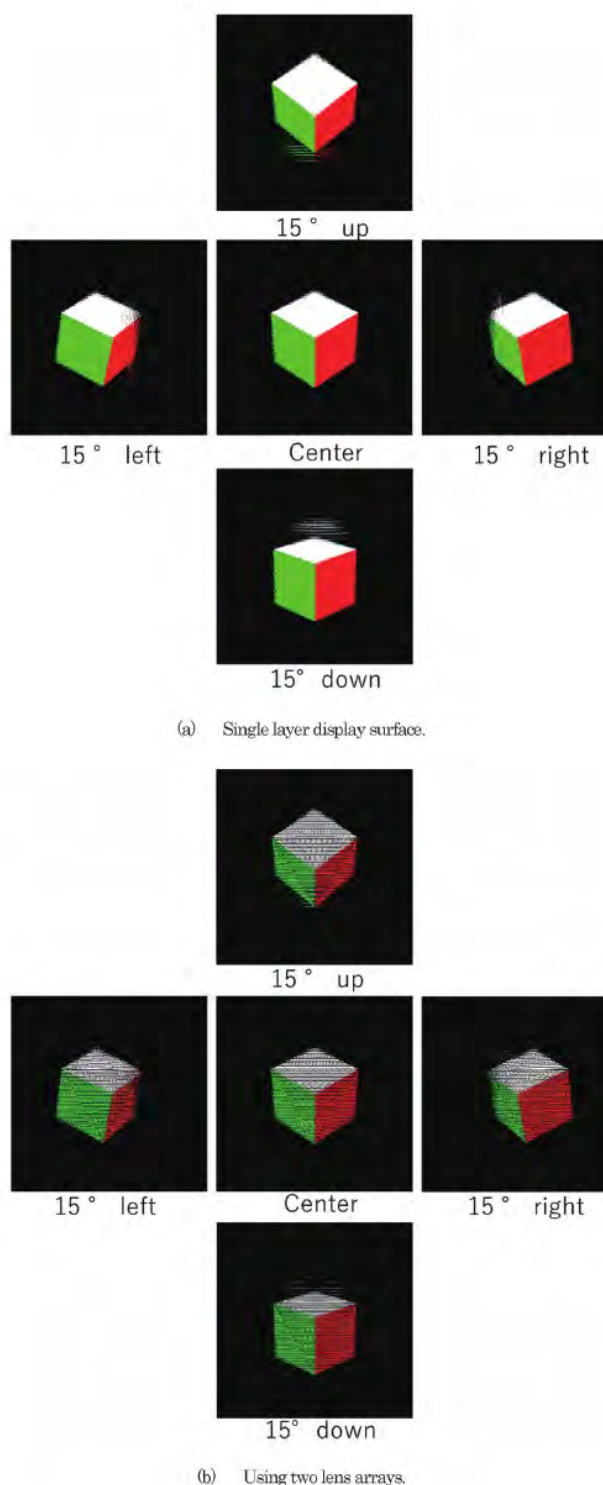


図 20 3D ディスプレイ確認のシミュレーション結果

図21に解像度チャートを用いたシミュレーション結果を示す。一方の解像度チャートがディスプレイ表面の一方の層で高解像度に見える場合、もう一方の解像度チャートは低解像度となる。一方、提案手法では、両解像度チャートの解像度が高くなり、提案手法の方がディスプレイ表面が多層化され、解像度が高くなることが確認された。つまり、表示可能な範囲は

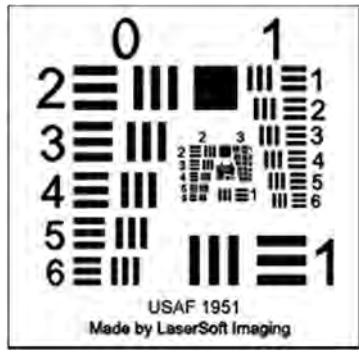


Fig. 18 Resolution chart.

(By LaserSoft Imaging - Own work, CC BY-SA 3.0).

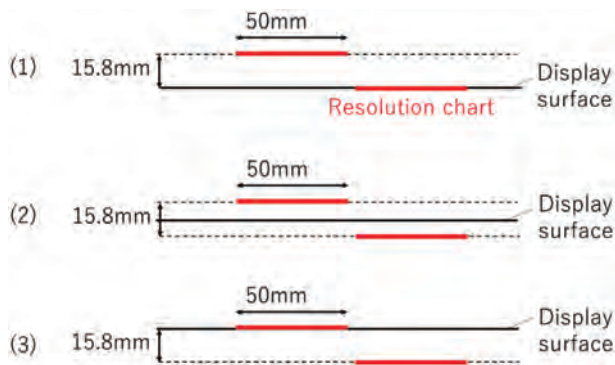


Fig. 19 Positioning of comparative image creation.

chart in Figure 17 was placed on each of the two display surfaces. As a comparison image, the resolution chart of Figure 18 was placed with a difference of around 15.8mm between the display surfaces of the display surfaces of the one-layer display,

- (1) When the resolution chart in the foreground is on the display surface,
- (2) When the display surface is between the resolution charts,
- (3) When the resolution chart in the back is on the display surface.

The three cases are shown in Figure 19.

2.7 simulation results

Figure 20 shows the simulation results displaying a cube. Figure 20 (a) shows the results displayed on a single-layer light field display, and Figure 20 (b) shows the results using the proposed display. Comparing the images from each viewpoint of Figure 20 (b), it was found that the shape and angle of each face of the cube are the same, indicating that 3D display is possible. Comparing the front corners of the cube between the single-layer display surface and the proposed method, the edges of the cube appear clearer and higher resolution in the proposed method.

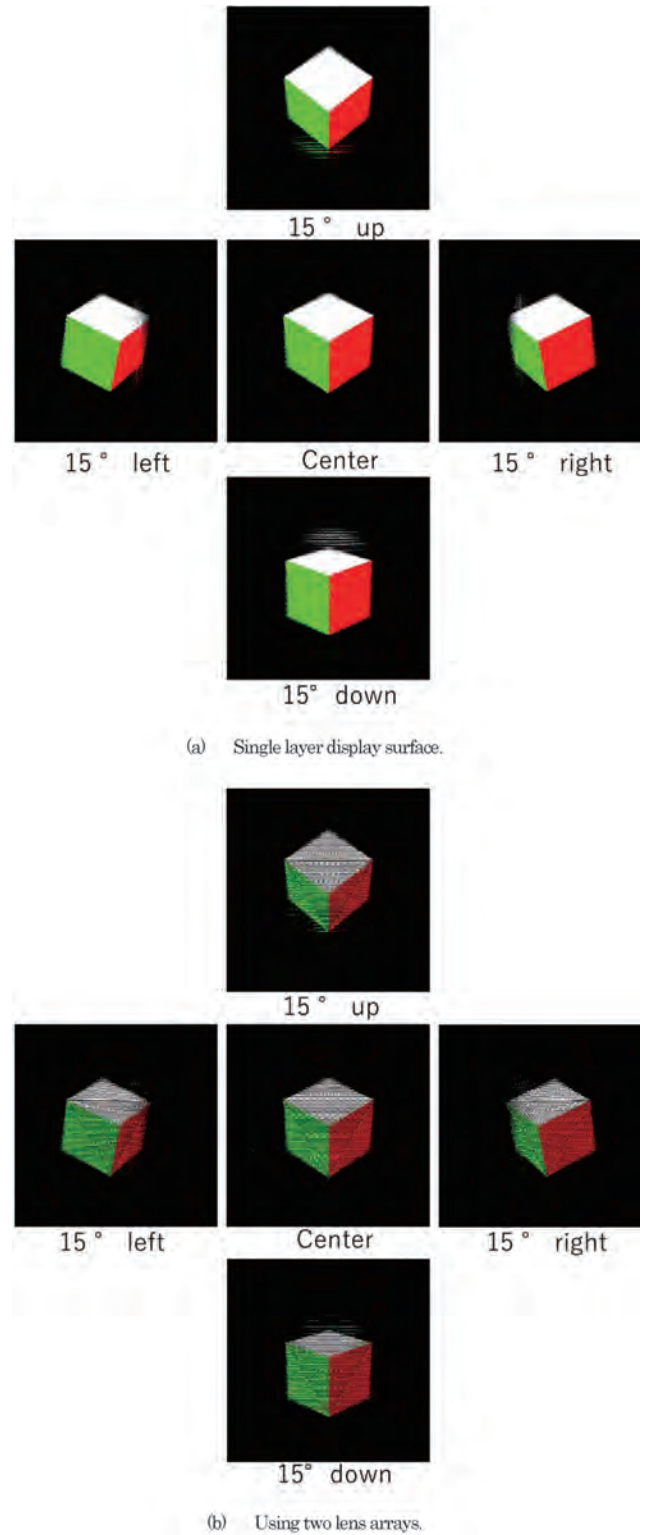
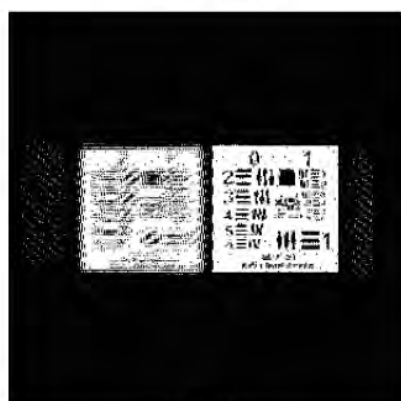


Fig. 20 Simulation results of 3D display confirmation.

The simulation results using resolution charts are shown in Figure 21: when one resolution chart appears high resolution on one layer of the display surface, the other resolution chart is low resolution. On the other hand, with the proposed method, the resolution of both resolution charts is higher, and it is confirmed that the proposed method makes the display surface multilayered and the resolution is higher. This means that the displayable range



Using two lens arrays.



Position (1).



Position (2).



Position (3).

図 21 解像度確認のシミュレーション結果

を深さ方向に拡大することができる。

3 レイスプリッティングによりディスプレイ面間の距離を増加させる方法

第2章で提案するディスプレイの構造では、2番目のレンズアレイからディスプレイ表面までの距離は、2番目のレンズアレイのレンズ径によって制限される。そのため、ディスプレイ面間の距離を長くすることは困難である。レンズからディスプレイ表面までの距離を長くできる構造を考案した。

3.1 提案手法の原理とレンズ外を分割し(図22の水色と緑色の光線)、

第2章で提案した構造では、レンズからディスプレイ表面までの距離は、視野角とレンズ直径によって決定される。したがって、図22に示すように、レンズとディスプレイ表面との距離が大きくなり、レンズに収まらない光線は

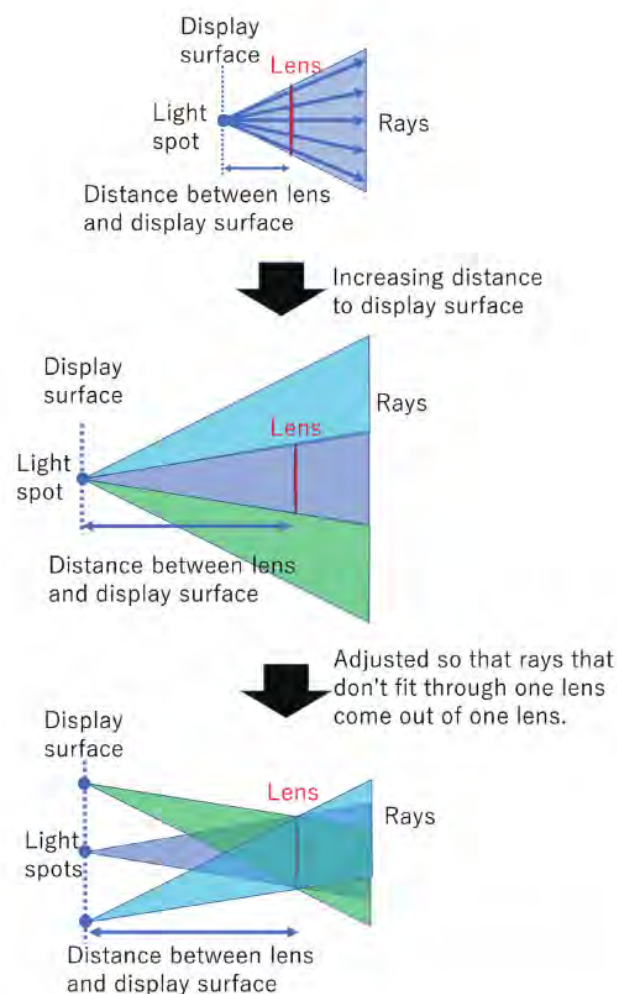


図22 光線分割による表示面までの距離の増加。

【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。

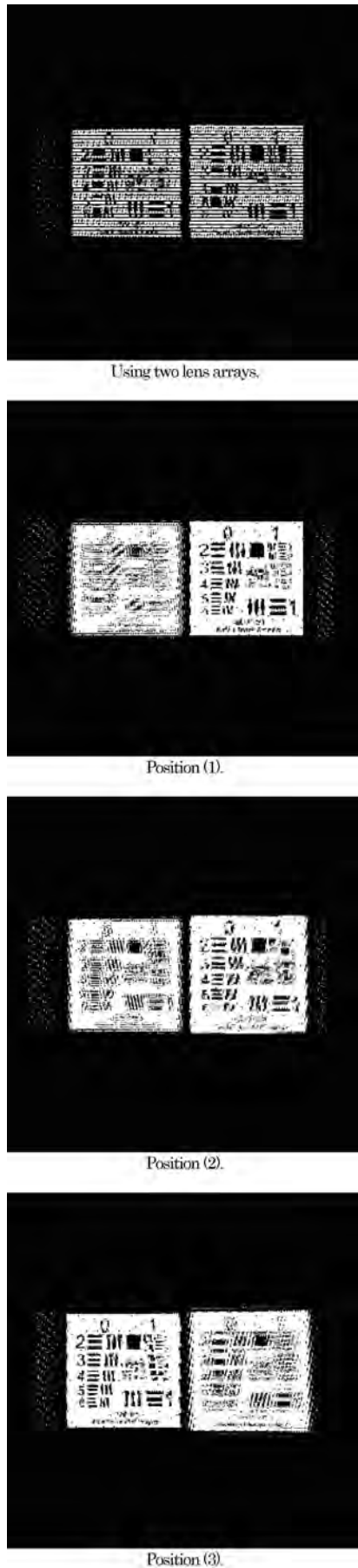


Fig. 21 Simulation results of resolution confirmation.

in the depth direction can be expanded.

3. Method of increasing the distance between display surfaces by ray splitting

In the structure of the proposed display in chapter 2, the distance from the second lens array to the display surface is limited by the lens diameter of the second lens array. Therefore, it is difficult to increase the distance between the display surfaces. We have devised a structure that can increase the distance from the lens to the display surface.

3.1 Principle of the proposed method

In the proposed structure in chapter 2, the distance from the lens to the display surface is determined by the viewing angle and lens diameter. Therefore, as shown in Figure 22, the distance between the lens and the display surface is increased, the rays that do not fit in the lens

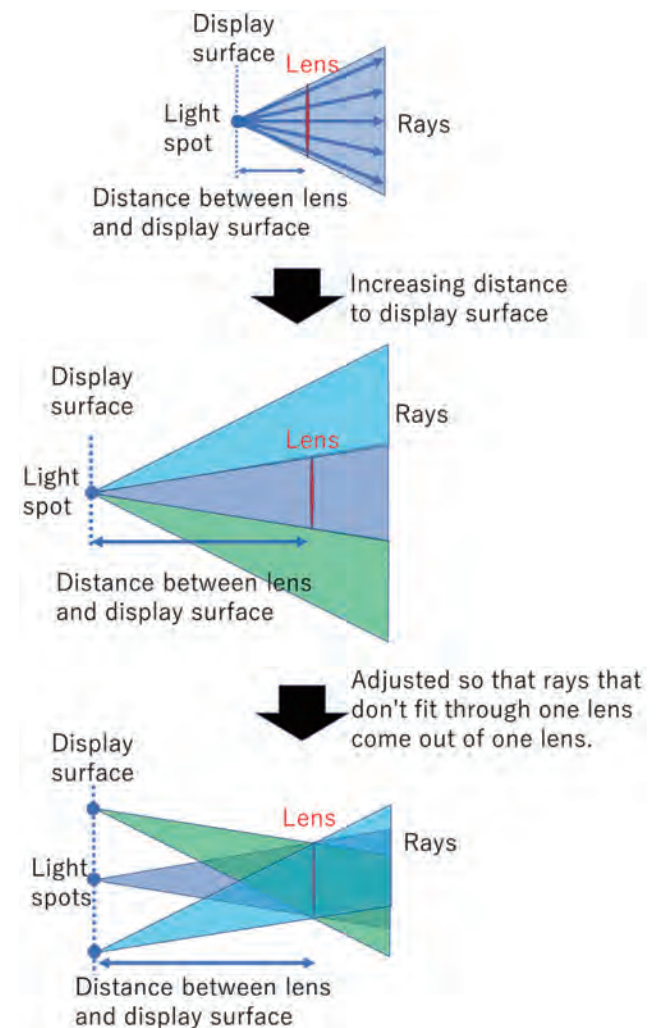


Fig. 22 Increase in distance to display surface due to ray splitting.

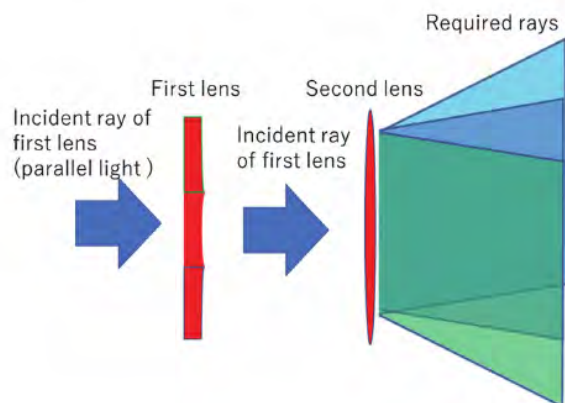


図 23 レンズ構造の概念

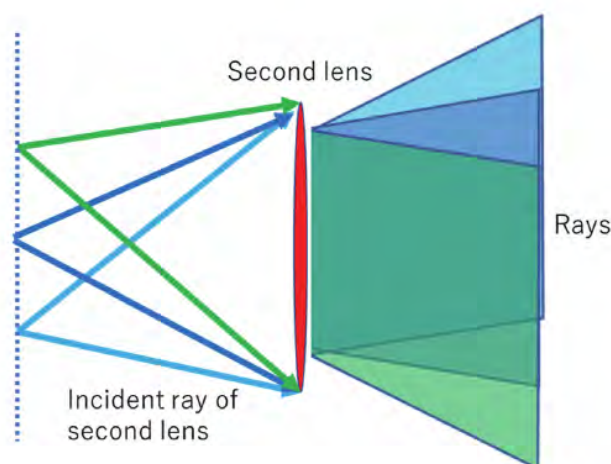


図 25 第 2 レンズの入射光

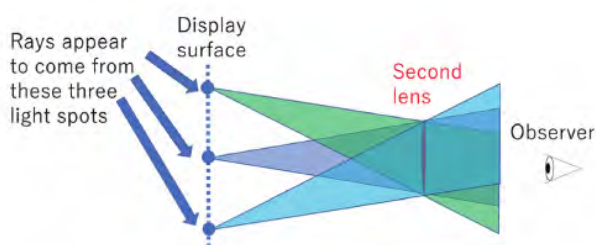


図24 オブザーバからの視認性

分割された光線を1つのレンズから出す。このレンズが動くと、残像効果により、分割前の元の光線が得られる。この単一レンズから分割光線を放射できれば、レンズからディスプレイ表面までの距離を広げ、奥行き方向の表示領域を広げることができる。

この構造を説明するために、どのような光をセカンドレンズに入射させ、その光をファーストレンズでどのように発生させるかを説明します(図23)。提案された構造では、観察者が見た場合、光線は3つの異なる光点から来るように見える(図24)。レンズからこのような光線を放射するためには、図25に示すように、3つの異なる方向からレンズに光線を入射させる必要がある。このとき入射光線は、第二のレンズから放射される光線に従って計算される。

第2レンズに入射する光線は、第1レンズで生成されなければならない。図26に示すように、3つの光線が重なる位置が2つあり、1番目のレンズは凸レンズとなり、2番目のレンズは凹レンズとなる(図27)。

説明ではレンズは側面から見るので、光線は3方向から来るが、実際には図28に示すように、レンズは水平方向に分割され

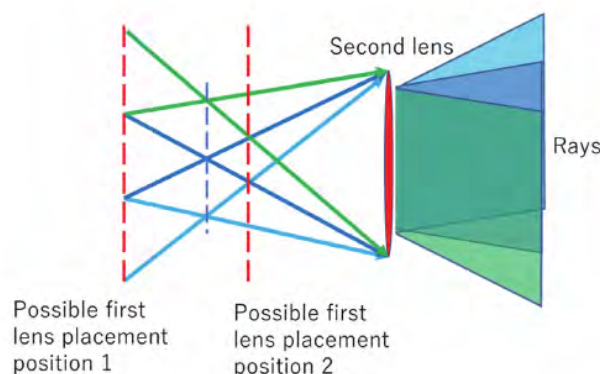


図26 第一レンズの可能な位置

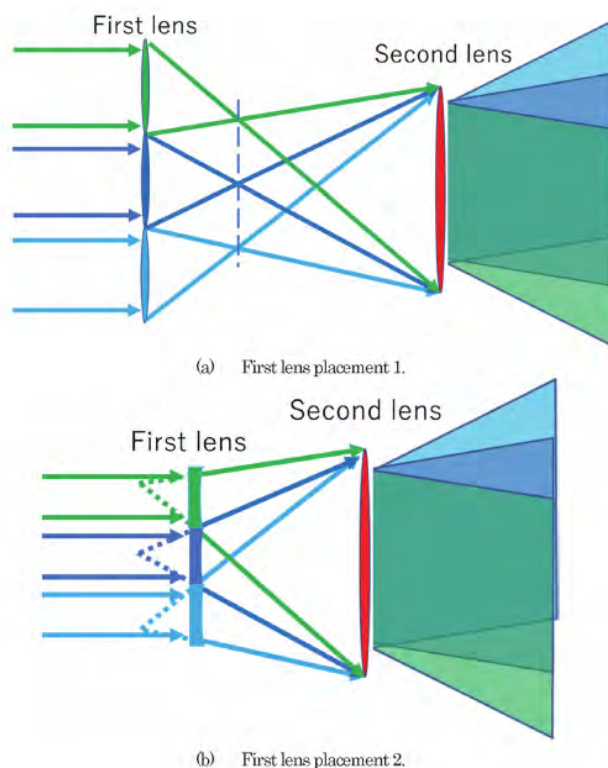


図27 最初のレンズを置いたときの光線。

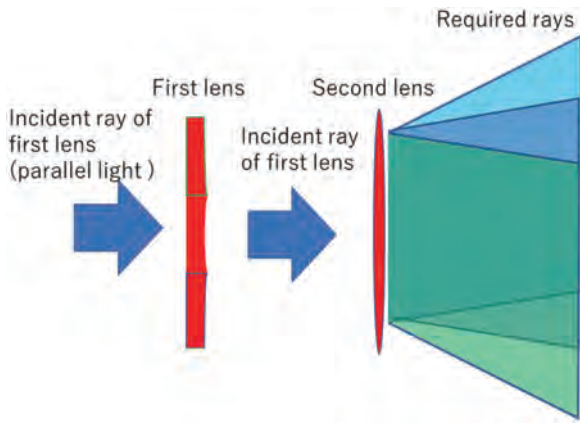


Fig. 23 Concept of Lens Structure.

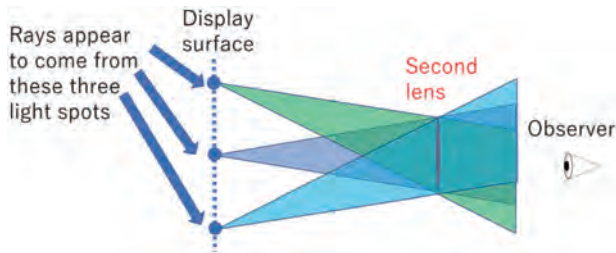


Fig. 24 Visibility from observer.

and are outside the lens are divided (light blue and green rays in Figure 22), and the divided rays exit from one lens. As this lens moves, the original rays before splitting are obtained due to the afterimage effect. If the split rays can be emitted from this single lens, the distance from the lens to the display surface can be increased and the display area in the depth direction can be expanded.

To explain this structure, we will explain what kind of light should be incident on second lens and how to produce that light with first lens (Figure 23).

In the proposed structure, rays appear to come from three different light spots when viewed by an observer (Figure 24). In order to emit such ray from the lens, ray must be incident on the lens from three different directions, as indicated in Figure 25. The incident ray at this time is calculated according to the rays emitted from second lens.

The ray to be incident on second lens must be produced by first lens. As shown in Figure 26, there are two positions where the three rays overlap, and at position 1, first lens becomes a convex lens and at position 2, first lens becomes a concave lens (Figure 27).

In the explanation, the lens is viewed from the side, so the rays come from three directions, but in reality, as shown in Figure 28, the lens is divided horizontally and

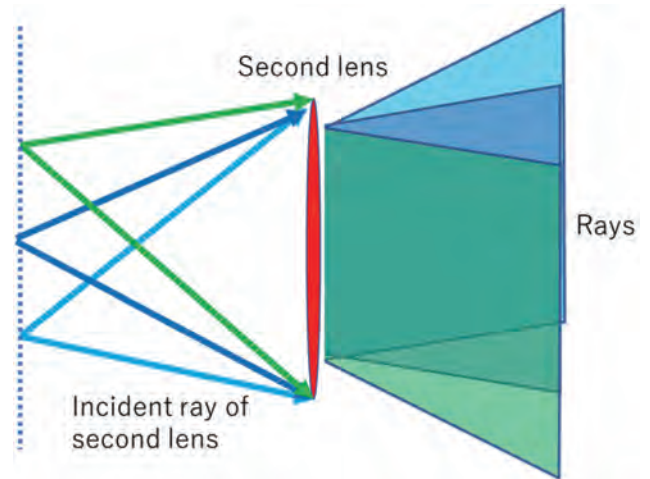


Fig. 25 Incident light on second lens.

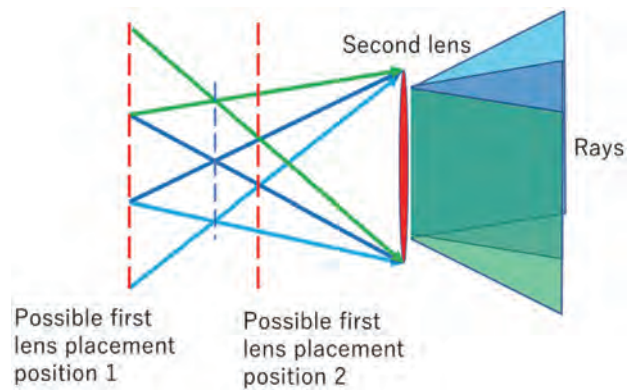
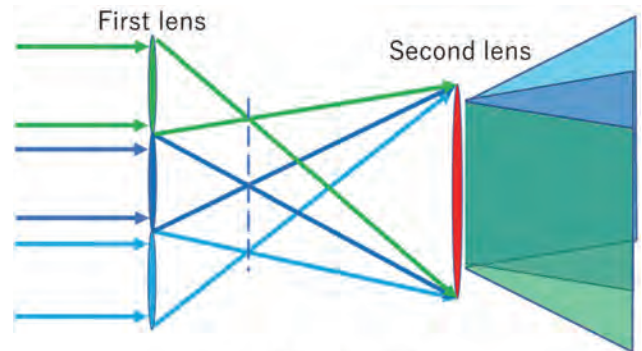
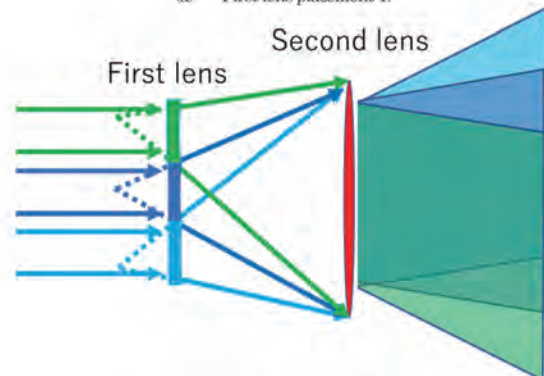


Fig. 26 Possible positions of first lens.



(a) First lens placement 1.



(b) First lens placement 2.

Fig. 27 Rays when first lens is placed.

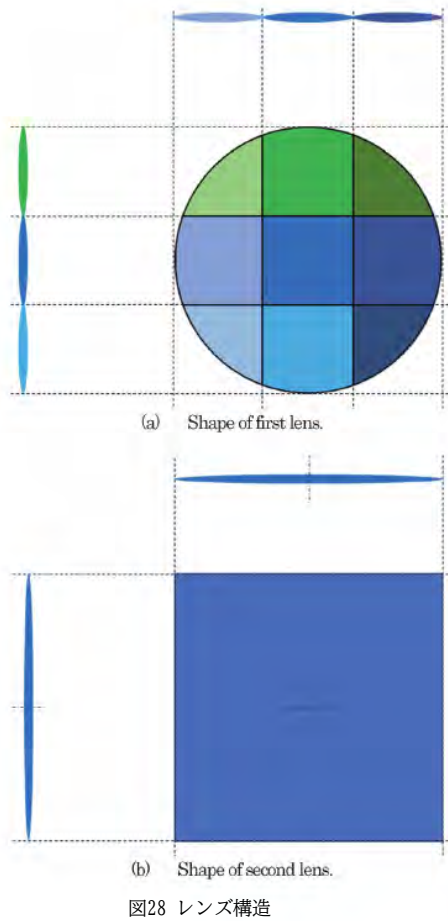


図28 レンズ構造

を縦に3つのセクションに分割する。したがって、中央の部分は図のような青い光線を、周囲の部分は緑と水色の光線を発生させる。第1レンズの中心レンズは長方形なので(図28(a))、対応する第2レンズの形状も長方形になります(図28(b))。

3.2 レンズパラメータ計算

ディスプレイを構成する光学部品のパラメータを決定するための公式を以下に示す。パラメータ間の関係を図29と図30に示す。入力となるパラメータは、第1レンズのレンズ径 r 、第2レンズのレンズ径 R 、視野角 θ 、分割光線の重なり率 O である。オーバーラップ比 O は、分割された光線がどの程度オーバーラップしているかを表すパラメータである

レンズ間の距離

$$L = \frac{2r}{(3-O) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

セカンドレンズの焦点距離

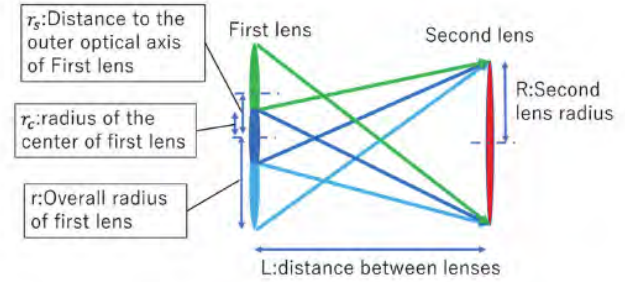


図 29 レンズパラメータ間の関係

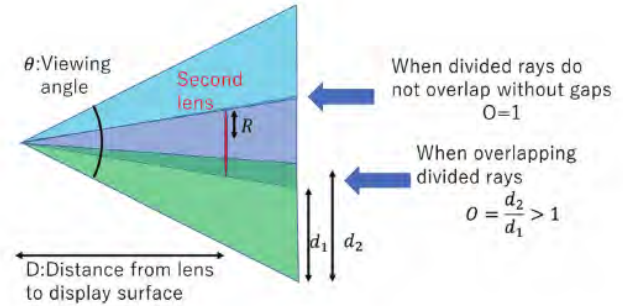


図 30 オーバーラップ比 O の関係

$$f_2 = \frac{3RL}{3R+r-\frac{2rO}{3-O}} \quad (5)$$

第一レンズの中心の大きさ

$$r_c = \frac{r}{3} \quad (6)$$

第一水晶体の焦点距離(同じ焦点距離)。
 center and outside)

$$f_1 = \frac{Lr_c}{r_c+R} \quad (7)$$

第一レンズの外光軸までの距離

$$r_s = \frac{2Rr}{3R+r} \quad (8)$$

セカンドレンズからディスプレイ表面までの距離、 D

$$D = \frac{3R}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (9)$$

3.3 シミュレーション

シミュレーションの目的は、前章までの提案手法と比較して、奥行き方向の表示可能範囲が表示対象物の解像度から拡大できることを確認することである。また、オーバーラップ比 O を変化させた場合の結果への影響を確認するためである。

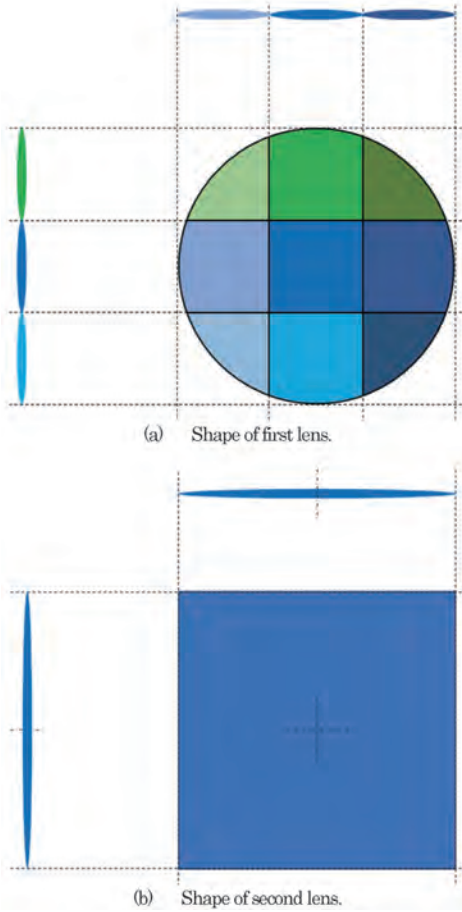


Fig. 28 Lens Structure.

vertically into three sections. Therefore, the center part produces the blue ray shown in the figure, and the surrounding parts produce green and light blue rays. Since the central lens of the first lens is rectangular (Figure 28(a)), the shape of the corresponding second lens is also rectangular (Figure 28(b)).

3.2 Lens parameter calculation

The formulas for determining the parameters of the optical components that make up the display are shown below. A diagram of the relationship between the parameters is shown in Figure 29 and Figure 30. The parameters to be input are the lens diameter r of first lens, the lens diameter R of second lens, the viewing angle θ , and the overlap ratio O of the divided rays. The overlap ratio O is a parameter that expresses the degree to which the divided rays are overlapped

Distance between lenses

$$L = \frac{2r}{(3-O) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

Focal length of second lens

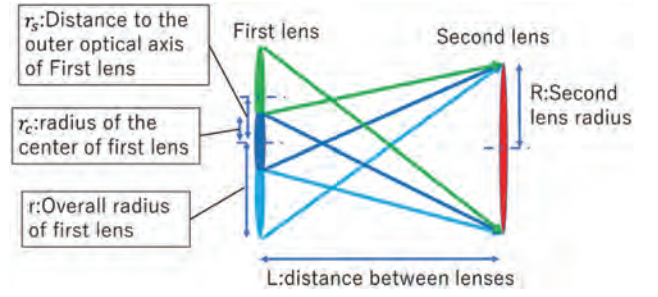
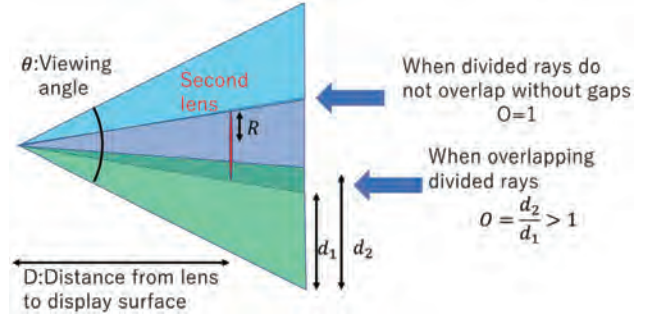


Fig. 29 Relationship between lens parameters.


 Fig. 30 Relationship between overlap ratio O .

$$f_2 = \frac{3RL}{3R+r-\frac{2rO}{3-O}} \quad (5)$$

Size of the center of first lens

$$r_c = \frac{r}{3} \quad (6)$$

Focal length of first lens (same focal length in the center and outside)

$$f_1 = \frac{Lr_c}{r_c+R} \quad (7)$$

Distance to outer optical axis of first lens

$$r_s = \frac{2Rr}{3R+r} \quad (8)$$

Distance from second lens to display surface, D

$$D = \frac{3R}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (9)$$

3.3 Simulation

The purpose of the simulation is to confirm that the displayable range in the depth direction can be expanded from the resolution of the display object compared to the proposed method up to the previous chapter. It is also to confirm the effect of changing the overlap ratio O on the results.

表2 シミュレーションパラメータ

First lens array	
Diameter	1062mm
Lens diameter	15.8mm
Focal length (To small lens)	48.6mm
Focal length (To big lens)	-10.1mm
Second lens array	
Diameter	1102mm
Lens diameter (Small lens)	9.3mm
Lens diameter (Big lens)	15.8mm
Focal length (Small lens)	-8.0mm
Focal length (Big lens)	71.7mm
Overlap ratio	1.1

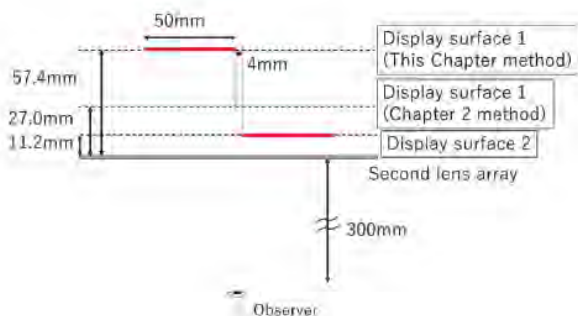


図31 シミュレーションにおけるディスプレイ表面の配置

円筒形レンズアレイの配置は図14と同じで、第1レンズと第2レンズのレンズ径は15.8mmである。その結果、2つ目のレンズからディスプレイ面までの距離は57.4mm、2つのディスプレイ面間の距離は46.2mmとなった。オーバーラップ比0は1.1とした。シミュレーション中の第1レンズアレイと第2レンズアレイのパラメータを表2に示す。プロジェクター、円筒レンズアレイ、円筒レンズアレイのパラメータは表1のものを使用した。シミュレーションにおけるディスプレイ(図18)とディスプレイ表面の位置関係を図31に示す。ディスプレイは前後に46.2mmずらして、前景のディスプレイが2つ目のディスプレイ面になるように配置した。

オーバーラップ比0の影響を確認するため、0=1.0、0=1.1で計算を行った。

3.4 シミュレーション結果

表示可能範囲を確認するためのシミュレーション結果を図32に示す。両者の結果を比較すると、右(前)解像度のチャートの解像度は同じである。一方、左側(裏側)の解像度チャートから、本章で提案した(b)の方法がより高い解像度を示すことができることがわかる。このことから、2つの表示面間の距離を長くすることができ、表示可能な範囲は



(a) Proposed structure up to the previous chapter.

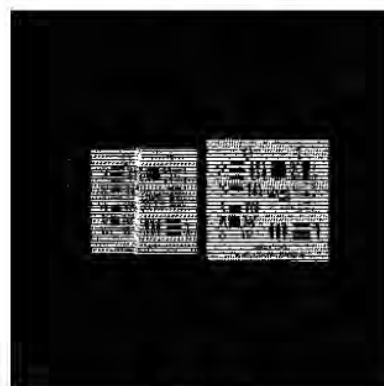


(b) Proposed structure in this chapter.

図32 解像度を確認するためのシミュレーション結果



(a) $O=1.0$.

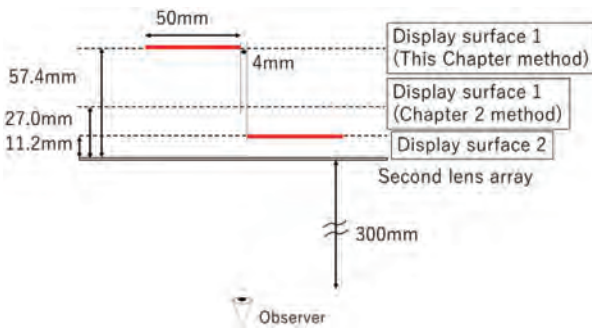


(b) $O=1.1$.

図33 オーバーラップ比0の影響に関するシミュレーション結果。

Table 2 Simulation parameters.

First lens array	
Diameter	1062mm
Lens diameter	15.8mm
Focal length (To small lens)	48.6mm
Focal length (To big lens)	-10.1mm
Second lens array	
Diameter	1102mm
Lens diameter (Small lens)	9.3mm
Lens diameter (Big lens)	15.8mm
Focal length (Small lens)	-8.0mm
Focal length (Big lens)	71.7mm
Overlap ratio	1.1

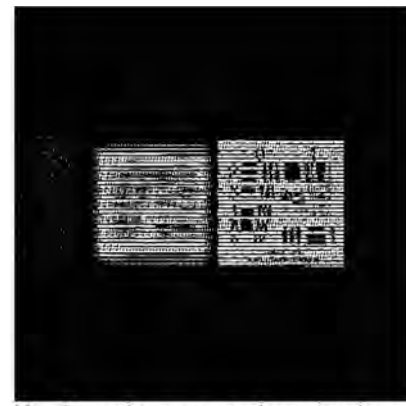
**Fig. 31** Placement of display surface in simulation.

The arrangement of the cylindrical lens array is the same as in Figure 14, and the lens diameters of first lens and second lens are 15.8 mm. As a result, the distance from second lens to the display surface was 57.4 mm, and the distance between the two display surfaces was 46.2 mm. The overlap ratio O was set to 1.1. The parameters of the first and second lens arrays during the simulation are shown in Table 2. The parameters for the projector, cylindrical lens array, and cylindrical lens array were those in Table 1. The positional relationship between the display (Figure 18) and the display surface in the simulation is shown in Figure 31. The displays were displaced 46.2 mm back and forth and placed so that the display in the foreground was on the second display surface.

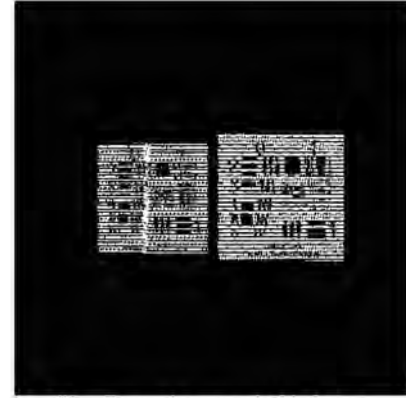
In checking the influence of the overlap ratio O , calculations were performed with $O = 1.0$ and $O = 1.1$.

3.4 Simulation results

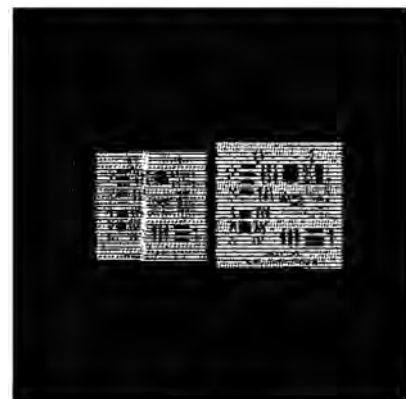
The results of the simulation to confirm the displayable range are shown in Figure 32. Comparing the results, the resolution of the right (front) resolution chart is the same. On the other hand, the resolution chart on the left side (back side) shows that the proposed method in this chapter in (b) is able to display higher resolution. This confirms that the distance between the two display surfaces can be increased and the displayable range in the



(a) Proposed structure up to the previous chapter.



(b) Proposed structure in this chapter.

Fig. 32 Result of simulation to check resolution.(a) $O=1.0$.(b) $O=1.1$.**Fig. 33** Simulation results of the effect of overlap ratio O .

深さ方向を拡大することができる。

重なり率0の影響を確認したシミュレーション結果を図33に示す。シミュレーション結果では、重なり率0=1.0では表示オブジェクトが大きく不足し、0=1.1では表示オブジェクトが接続されている。この結果は、0=1.0を非重畳にした場合、分割された光線は分割された光線の境界で完全には連結していないことを示している。

4 ディスカッション

第2章のシミュレーション結果から、2つのレンズアレイを使用することで、立体視が可能になり、解像度が向上することが確認された(図20、図21)。しかし、図20と図21は輝度の低下を示しており、各層で表示される画像の解像度も低下している。これは、1つのプロジェクターで2つのレイヤーを表示するためである。提案手法では、1つのプロジェクターから放出される光線(画素)の総数をディスプレイ表面ごとに分割する。したがって、各ディスプレイ面に使用できる光線の本数は、プロジェクターから放射される光線の総数をディスプレイ面の数で割ったものである。つまり、ディスプレイ面の数が増え、レイヤーあたりの解像度や輝度が低下する。これは第3章の構成と同じように起こる。この問題は、プロジェクターの輝度と解像度を上げることで改善できる。シミュレーションの結果、ディスプレイ上に縞模様が描かれている。これは、図9に示すように、レンズ(光点)が横方向に移動する提案手法の構造によるものである。ストライプ間隔を小さくするためには、レンズ間隔とレンズ傾斜を小さくし、プロジェクターのレンズサイズを大きくする必要がある。

第3章のシミュレーション結果(図33)をもとに、重なり率0に関する考察を述べる。シミュレーション結果では、重なり率0=1.0のとき表示オブジェクトが大きく不足し、0=1.1のとき表示オブジェクトが接続されている。その理由は、重なり率0=1.0の光線の境界では、わずかな光線の広がりさえ許されないからだと考えられる。光線を観察するためには、光線の広がりが必要であるが、光線が分割された境界では、光線の広がりはいくつにもなる。そのため、境界付近の光線を観察することは困難である。したがって、重なり率0>1を設定し、境界をある程度重なることで、光線の広がりの抑制がなくなり、光線が容易に観察される。

分割光線の境界付近の光線が観察しにくくなるというこの現象は、ディスプレイの実際の作成にも大きな影響を与えると考えられる。これは、境界付近の光線がレンズの端を通過する光線であり、重なり率0=1.0で重なりが全くない場合、レンズ作成時にレンズの歪みやレンズの固定に大きく影響されると考えられるからである。このことから、境界付近の光線が重なるように、重なり率0 > 1を設定する必要があると考えられる。

5 むすび

本研究では、ディスプレイ表面から離れるにつれて解像度が低下するライトフィールドディスプレイの問題を解決するために、ディスプレイ表面を多層化する方法を検討した。

まず、レンズ径と焦点距離が異なり、レンズアレイを重ね合わせた2種類のレンズアレイを作製し、ディスプレイ表面を光学的に多層化することを提案した。本提案手法により、各ディスプレイ面の視野角と光線密度を同じにすることができる。提案手法によるライトフィールドディスプレイのシミュレーション結果から、提案構造により3次元ディスプレイが可能であることが確認された。また、表示面が2層になっていることが確認され、表示可能領域が奥行き方向に拡大され、解像度が向上していることがわかった。提案手法1では、2つ目のレンズとディスプレイ面との距離はレンズ径によって制限されるため、ディスプレイ面間の距離を増加させることができなかった。

そこで、第2レンズから離れた光点から入射する光線を9分割し、分割した光線を1つのレンズから出射する構造を提案した。この方法では、分割された光線が1つのレンズから出ることができるように、9つの異なる方向から2つ目のレンズに光線を入射する。提案した2つの方法をシミュレーションで比較した結果、提案した光線分割法では、ディスプレイ表面をレンズから遠くに配置できることが確認された。これにより、提案手法がディスプレイ表面間の距離を増加させることができることが確認された。

提案手法とシミュレーションの有効性は確認できたが、実際のデバイスを作成することで、提案手法の有効性はまだ確認されていない。したがって、レンズやレンズアレイの作成方法、レンズアレイ、プロジェクター、投影画像などのキャリブレーションを行い、実際のデバイスを作成する方法について検討する必要がある。

depth direction can be expanded.

The simulation results of the confirmation of the influence of the overlap ratio O are shown in Figure 33. In the simulation results, the overlap ratio $O=1.0$ causes a large lack of displayed objects, while $O=1.1$ connects the displayed objects. This result indicates that the divided rays are not completely connected at the boundary of the divided rays when $O=1.0$ is made non-overlapping.

4. Discussion

From the simulation results in Chapter 2, it was confirmed that the use of two lens arrays enables stereoscopic display and improves the resolution (Figure 20 and Figure 21). However, Figure 20 and Figure 21 shows a decrease in luminance, and the resolution of the images displayed in each layer is also reduced. This is because two layers are displayed by one projector. In our proposed method, the total number of rays (pixels) emitted from one projector is divided for each display surface. Therefore, the number of rays that can be used on each display surface is the total number of rays emitted from the projector divided by the number of display surfaces. This means, the resolution and luminance per layer decreases as the number of display surfaces is increased. This occurs in the same way with the structure in Chapter 3. This problem can be remedied by increasing the luminance and resolution of the projector. The simulation results show stripes on the display. This is due to the structure of the proposed method in which the lens (light spot) moves laterally as shown in Figure 9. To reduce the stripe spacing, the lens spacing and lens tilt should be reduced, and the lens size of the projector should be increased.

Based on the simulation results in Chapter 3 (Figure 33), we will discuss our thoughts on the overlap ratio O . In the simulation results, there is a large lack of display objects when the overlap ratio $O = 1.0$, and the display objects are connected when $O = 1.1$. The reason for this is thought to be that at the boundary of rays with overlap ratio $O = 1.0$, even a small spread of rays is not allowed. In order to observe rays, it is necessary to have some spread of the rays, but the spread of the rays becomes small at the boundary where the rays are divided. Therefore, it is difficult to observe the rays near the boundary. Therefore, by setting the overlap ratio $O>1$ and overlapping the boundaries to some extent, the suppression of the spread of the rays is eliminated and the rays are easily observed. This phenomenon of the rays near the boundary of the divided rays becoming

difficult to observe is also thought to have a significant impact on the actual creation of the display. This is because the rays near the boundary are rays that pass through the edge of the lens, and if the overlap ratio $O = 1.0$, which allows no overlap at all, the lens is considered to be greatly affected by distortion and lens fixation during lens creation. From this reason, it is considered that the overlap ratio $O > 1$ should be set so that the rays near the boundary overlap.

5. Conclusion

In this study, we investigated a method of multilayering the display surface in order to solve the problem of light field displays in which the resolution decreases as one moves away from the display surface.

First, we proposed to optically multilayer the display surfaces by preparing two types of lens arrays with different lens diameters and focal lengths and overlapping the lens arrays. With this proposed method, the viewing angle and ray density of each display surface can be made the same. Simulation results of a light field display using the proposed method confirmed that a three-dimensional display is possible with the proposed structure. It was also confirmed that the display surface is two-layered, which expands the displayable area in the depth direction and improves the resolution. In the proposed method 1, the distance between the second lens and the display surface is limited by the lens diameter, so the distance between the display surfaces could not be increased.

Therefore, we proposed a structure in which rays coming from a light spot further away from second lens are divided into 9 segments, and the divided rays exit from a single lens. In this method, rays are injected into the second lens from nine different directions so that the divided rays can exit from a single lens. Comparing the two proposed methods by simulation, it was confirmed that the proposed method of splitting the rays allows the display surface to be placed farther from the lens. This confirmed that the proposed method can increase the distance between the display surfaces.

Although we confirmed the effectiveness of the proposed method and the simulation, we have not yet confirmed the effectiveness of the proposed method by creating an actual device. Therefore, it is necessary to study the method of creating lenses and lens arrays, and the calibration of lens arrays, projectors, projected images, and other aspects of creating actual devices.

References

- 1) X.-L. Ma, H.-L. Zhang, R.-Y. Yuan, T.-Y. Wang, M.-Y. He, Y. Xing and Q.-H. Wang, "Depth of field and resolution-enhanced integral imaging display system," Opt. Express 30(25), pp.44580-44593 (2022)
- 2) N.-Y. Jo, H.-G. Lim, S.-K. Lee, Y.-S. Kim and J.-H. Park, "Depth enhancement of multi-layer light field display using polarization dependent internal reflection," Opt. Express 21(24), pp.29628-29636 (2013)
- 3) J. Hong, J. Park, S. Jung and B. Lee, "Depth-enhanced integral imaging by use of optical path control," Opt. Lett. 29(15), pp.1790-1792 (2004)
- 4) C.K. Park, S.S. Lee and Y.S. Hwang, "Depth-extended integral imaging system based on a birefringence lens array providing polarization switchable focal lengths," Opt. Express 17(21), pp.19047-19054 (2009)
- 5) H. Lee et al., "Flicker-free dual-volume augmented reality display using a pixelated interwoven integral floating technique with a geometric phase lens", Opt. Exp., vol. 30, no. 23, pp.42186-42198 (2022)
- 6) X. Shen, Y.J. Wang, H.S. Chen, X. Xiao, Y.H. Lin and B. Javidi, "Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens," Opt. Lett. 40(4), pp.538-541 (2015)
- 7) G. Borjigin, Y. Ding, J. Semmen, H.T. Safa, H. Kakeya and S.-T. Wu, "Coarse Integral Volumetric Imaging Display with Time and Polarization Multiplexing", Photonics, 11(1), 7 (2024)
- 8) Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho and B. Lee, "Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices," Appl. Opt. 45, pp.4334-4343 (2006)
- 9) B. Lee, S. Jung, S.W. Min and J.H. Park, "Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes," Opt. Lett. 26(19), pp.1481-1482 (2001)
- 10) G. Borjigin, H. Omori and H. Kakeya, "Integral imaging systems using interleaved Fresnel lenses and transmissive display panels," Opt. Continuum 3, pp.1103-1115 (2024)
- 11) J. Jang and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes," Opt. Lett. 28(20), pp.1924-1926 (2003)
- 12) C.J. Kim, M. Chang, M.Y. Lee, J. Kim and Y.H. Won, "Depth plane adaptive integral imaging using a varifocal liquid lens array," Appl. Opt. 54, pp.2565-2571 (2015)



Tatsuya Shiratori received M.E. degree from Nagaoka University of Technology, Niigata, Japan, in 2024. He worked on research in 3D display when he was a graduate student. He has been with Tokyo Electron Ltd., since 2024.



Kengo Fujii received Ph. D. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2022. 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 Ph.D degree from Tokyo Institute of Technology in 2001. He now is a professor at Nagaoka University of Technology. His research interests include 3D display, 3D image capturing and image sensor communications.

References

- 1) X.-L. Ma, H.-L. Zhang, R.-Y. Yuan, T.-Y. Wang, M.-Y. He, Y. Xing and Q.-H. Wang, "Depth of field and resolution-enhanced integral imaging display system," *Opt. Express* 30(25), pp.44580-44593 (2022)
- 2) N.-Y. Jo, H.-G. Lim, S.-K. Lee, Y.-S. Kim and J.-H. Park, "Depth enhancement of multi-layer light field display using polarization dependent internal reflection," *Opt. Express* 21(24), pp.29628-29636 (2013)
- 3) J. Hong, J. Park, S. Jung and B. Lee, "Depth-enhanced integral imaging by use of optical path control," *Opt. Lett.* 29(15), pp.1790-1792 (2004)
- 4) C.K. Park, S.S. Lee and Y.S. Hwang, "Depth-extended integral imaging system based on a birefringence lens array providing polarization switchable focal lengths," *Opt. Express* 17(21), pp.19047-19054 (2009)
- 5) H. Lee et al., "Flicker-free dual-volume augmented reality display using a pixelated interwoven integral floating technique with a geometric phase lens", *Opt. Exp.*, vol. 30, no. 23, pp.42186-42198 (2022)
- 6) X. Shen, Y.J. Wang, H.S. Chen, X. Xiao, Y.H. Lin and B. Javidi, "Extended depth-of-focus 3D micro integral imaging display using a bifocal liquid crystal lens," *Opt. Lett.* 40(4), pp.538-541 (2015)
- 7) G. Borjigin, Y. Ding, J. Semmen, H.T. Safa, H. Kakeya and S.-T. Wu, "Coarse Integral Volumetric Imaging Display with Time and Polarization Multiplexing", *Photonics*, 11(1), 7 (2024)
- 8) Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho and B. Lee, "Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices," *Appl. Opt.* 45, pp.4334-4343 (2006)
- 9) B. Lee, S. Jung, S.W. Min and J.H. Park, "Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes," *Opt. Lett.* 26(19), pp.1481-1482 (2001)
- 10) G. Borjigin, H. Omori and H. Kakeya, "Integral imaging systems using interleaved Fresnel lenses and transmissive display panels," *Opt. Continuum* 3, pp.1103-1115 (2024)
- 11) J. Jang and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes," *Opt. Lett.* 28(20), pp.1924-1926 (2003)
- 12) C.J. Kim, M. Chang, M.Y. Lee, J. Kim and Y.H. Won, "Depth plane adaptive integral imaging using a varifocal liquid lens array," *Appl. Opt.* 54, pp.2565-2571 (2015)



Tatsuya Shiratori received M.E. degree from Nagaoka University of Technology, Niigata, Japan, in 2024. He worked on research in 3D display when he was a graduate student. He has been with Tokyo Electron Ltd., since 2024.



Kengo Fujii received Ph. D. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2022. 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 Ph.D degree from Tokyo Institute of Technology in 2001. He now is a professor at Nagaoka University of Technology. His research interests include 3D display, 3D image capturing and image sensor communications.