

アーク3D像とAIRRによる空中像を積層した空中DFD表示における奥行き知覚測定

日野響也, 玉野賢祐, 陶山史朗, 山本裕紹

概要 DFD 画像の奥行き位置を自由に変更することができ、観察者が DFD 画像と背景の両方を画像を通して観察することができる空中シースルー型 Depth-Fused 3D (DFD) ディスプレイを提案する。この奥行き知覚に関する心理物理学実験について調査する。Arc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像と、AIRR(Airrive imaging by retroreflection)による空中画像の位置を変えることができるため、空中シースルーDFDディスプレイにより、DFD画像の位置を自由に表現することができる。また、円弧状の3次元基板はほぼ無色透明に見えるため、DFD画像を通して背景を観察することができる。

キーワード: 空中像, 再帰反射, AIRR, アーク3D表示, DFD表示, Edge-based DFD, アークDFD

1. まえがき

3Dディスプレイ技術は様々な分野で注目されている。ゲーム機、モバイル機器、医療機器などの機器に組み込むことで、2D画像よりもリアルな画像を生成し、ユーザビリティと信頼性を向上させる。3Dディスプレイ技術を搭載したデバイスの構成を簡素化することで、より幅広い分野での応用が可能になる。これにより市場が拡大する。

DFD(深度融合3D)ディスプレイは、輝度^{1), 2)}の異なる2つの画像を単純に重ねることで、3D画像を容易に実現する。DFDディスプレイでは、視聴者の疲労は従来の2D画像で経験される疲労と同等である^{3), 4)}。このため、DFDディスプレイは長期視聴に適しており、現在広く使用されている様々なデバイスに適用することができる。また、このDFDディスプレイを空撮画像にすることで、インタラクティブなシステムへの応用が容易に実現でき、その利用が大きく広がる。

2Dディスプレイと再帰反射による空中撮像(AIRR)を組み合わせた空中3Dディスプレイが報告されている^{5), 6)}。2Dディスプレイとアーク3Dディスプレイを組み合わせた別のDFDディスプレイが提案されており、アーク状の傷を照射して浮遊画像を形成することで、デバイス構造を薄くし、奥行きを大きくしている^{7, 8)}。

しかし、AIRRを用いた旧空中DFDディスプレイは、前後両画像とも奥行きが固定されており、奥行きの範囲が限定されている。後者のDFDディスプレイとArc 3Dディスプレイは、照明角度を変えることで知覚される奥行きを変えることができるため、奥行き範囲を変えることができるが、空中画像ではないため、ユーザーインターフェースには不向きである。

本論文では、Arc 3D 画像の可変深度機能と AIRR による空中画像を組み合わせることで、知覚深度を可変とした新しい空中 DFD ディスプレイを提案する。アーク3D基板は透明であるため、この方法により、観察者はDFD画像と背景の両方を見ることができる。本論文の目的は、AIRRによる空中画像とArc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像を組み合わせた空中シースルーDFDディスプレイを構築することである。構築された光学システムの有効性を、知覚される奥行きに関する心理物理学実験によって調査する。

2. 原理

2.1 DFD ディスプレイ

DFDディスプレイは、奥行きの異なる2つの画像を重ね合わせ、輝度比を変化させ、前後の画像間で任意の知覚奥行きを形成する。DFDディスプレイの原理を図1に示す。右の正方形はフロントディスプレイで、左の正方形はリアディスプレイで形成される。中央の正方形は、フロントディスプレイとリアディスプレイの画像を重ねることで形成される。

Received June 21, 2024; Revised October 3, 2024; Accepted October 27, 2024

† Utsunomiya University
(Utsunomiya, 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。

Verification of Depth Perception of Aerial See-Through DFD Display System by Fusing Arc 3D and AIRR

Kyoya Hino[†], Kensuke Tamano[†], Shiro Suyama[†] and Hirotugu Yamamoto[†]

Abstract We propose the aerial see-through Depth-Fused 3D (DFD) display that allows the depth position of the DFD image to be freely changed and enables the observer to observe both the DFD image and the background through the image. We investigate this psychophysical experiments on depth perception. Since the position of the floating edge image by the Arc 3D display and the aerial image by aerial imaging by retro-reflection (AIRR) can be changed, the aerial see-through DFD display allows the position of the DFD image to be freely expressed. In addition, since the arc 3D substrate appears to be nearly colorless and transparent, the background can be observed through the DFD image.

Keywords: Aerial image, Retro-reflection, AIRR, Arc 3D display, DFD display, Edge-based DFD, Arc DFD.

1. Introduction

3D display technology is getting attention in various fields. When they are incorporated into devices such as gaming consoles, mobile devices, and medical equipment, they produce more realistic images than 2D images, enhancing usability and reliability. Simplifying the configuration of devices equipped with 3D display technology will enable them to be applied in a wider range of fields. This will expand the market.

The DFD (Depth-Fused 3D) display easily achieves 3D images by simply overlapping two images with different luminance^{1), 2)}. In DFD display, viewer fatigue is comparable to that experienced with traditional 2D images^{3), 4)}. This makes the DFD display suitable for long-term viewing, and it can be applied to various devices currently in widespread use. In addition, if this DFD display can be made into an aerial image, its application to interactive systems will be easily realized and its use will expand greatly.

Aerial 3D displays combining 2D display with aerial imaging by retro-reflection (AIRR) have been reported^{5), 6)}. Another DFD display combining 2D display with Arc 3D display, which forms floating images by illuminating arc-shaped scratches, has been proposed to achieve a thinner device structure and a large depth^{7), 8)}. However,

the former aerial DFD display with AIRR has fixed depth for both the front and rear images, limiting the range of depth. Although the latter DFD display with Arc 3D display can change the depth range because Arc 3D display can change perceived depth by changing illumination angle, it is not an aerial image, making it unsuitable for the user interface.

In this paper, we propose a new aerial DFD display with variable perceived depth, by combining the variable depth capability of Arc 3D image with the aerial image by AIRR. Since the arc 3D substrate is transparent, this method enables observers to view both the DFD image and the background. The purpose of this paper is to construct an aerial see-through DFD display that combines aerial images by AIRR and floating edge images by Arc 3D display. The effectiveness of the constructed optical system will be investigated psychophysical experiments on perceived depth.

2. Principle

2.1 DFD Display

The DFD display overlaps two images with different depths and changes their luminance ratio to form an arbitrary perceived depth between the front and rear images. The principle of the DFD display is illustrated in Fig. 1. The right square is formed by the front display, and the left square is formed by the rear display. The central square is formed by overlapping the images from the front and rear displays. This central square image as the DFD image allows the arbitrary perceived depth

Received June 21, 2024; Revised October 3, 2024; Accepted October 27, 2024

[†] Utsunomiya University
(Utsunomiya, Japan)

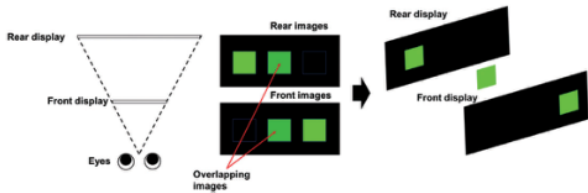


図1 DFDディスプレイの原理

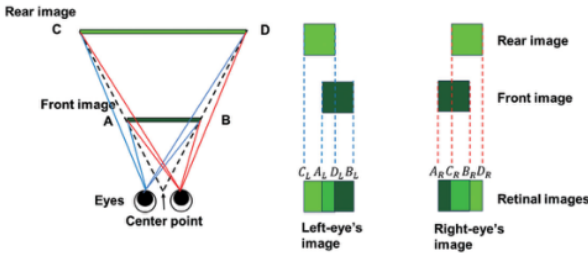


図2 中間から見た画像の重なりに対するDFD表示モデル。

この中央の正方形画像はDFD画像として、前後の正方形画像の輝度比から任意の知覚深度を許容する。

図2は、DFDディスプレイによる知覚深度を示している。この図は、観察者が前面画像のエッジA、Bと背面画像のエッジC、Dを見たときの原理を示している。眼球の中間点から奥行き方向に2つの画像を観察すると、重なり合うように、網膜画像内のエッジが二重に見える。左の網膜画像上のエッジの配置は左から右へCADB、右から左から右へACBDである。この場合、2つの画像を別々の物体として認識するために両眼視差を使用することは困難である。その結果、重なった2つの画像は融合され、観察者によって1つの画像として認識される。

2.2 アーク3Dディスプレイ

アーク3Dディスプレイは、空中で感じる浮遊画像の原理に基づき、透明な基板にアーク状の傷を1つの光源から照射することで動作する。円弧状の傷で光が基板に照らされると、傷の各点で円錐状に散乱する。この散乱光が眼球に入り、弧状の傷の特定の点が明るい斑点として知覚される。

図3は、光源、円弧状のスクラッチの中心 "0"、および視線を直線に並べた場合の原理を示している。この場合、弧状のスクラッチが明るく見える。図4は、光源と視線を結ぶ線がアーク3次元基板の中心を通過しない場合の原理を示したものである。ここで、光源と視線を結ぶ線と円弧3次元基板との交点を "0'" とすると、円弧状のスクラッチ上の点P1とP2は、0' に対して接線方向または外部接線方向に明るく見える。

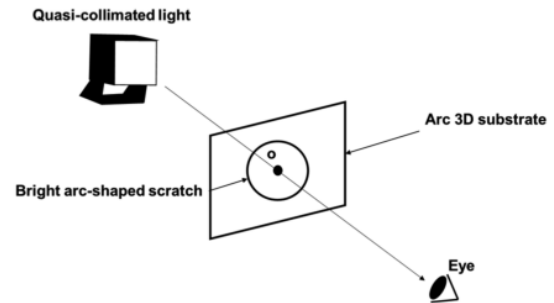


図3 光源、円弧状スクラッチの中心 "0"、視線が直線上にある場合の原理。

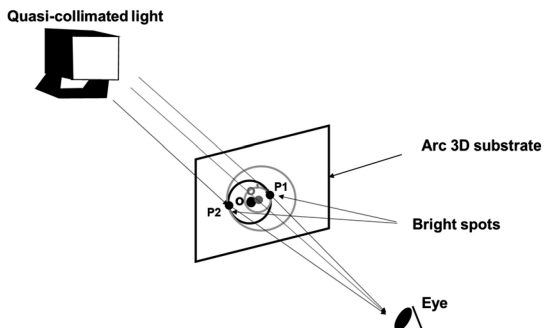


図4 光源と視線を結ぶ線路の原理は、スクラッチの中心を円弧上を通過しない。

Bright spots: P1L, P1R, P2L, P2R

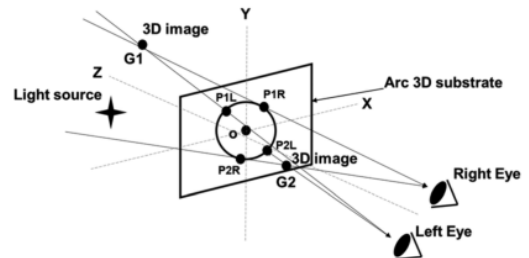


図5 両目とも円弧状のスクラッチを観察する原理。

図5は、両目によって観察された弧状のスクラッチである。P1RとP2Rは右目に明るい斑点として現れ、P1LとP2Lは左目に明るい斑点として現れる。左右の目の明るいスポットの位置が異なるため、画像G1とG2は弧状3D基板の後方と前方に飛び出しているように見える。

2.3 エッジベースDFD表示

図2に示すように、DFD表示はダブルエッジ部分のみで実現できる。これは、DFDディスプレイの知覚深度には、所望の3D画像のエッジ部分のみが必要であることを示している。したがって、投影された2次元画像と所望の3次元画像のエッジ部分からなるエッジベースのDFDディスプレイが実現される^{11, 12)}。

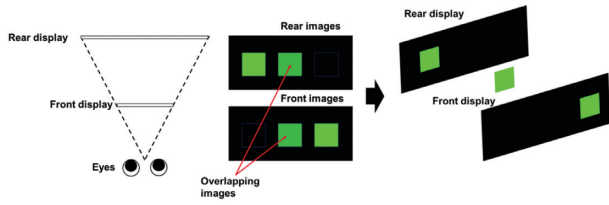


Fig. 1 The principle of DFD display.

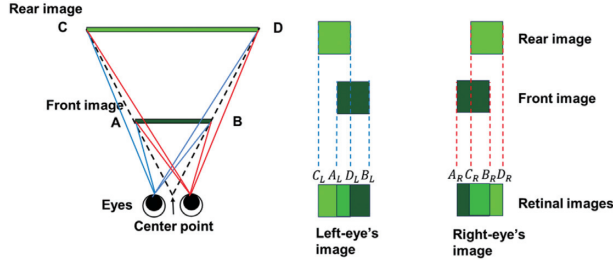


Fig. 2 DFD display model for overlapping images from mid-eye view.

based on the luminance ratio of the front and rear square images.

Figure 2 shows a perceived depth by DFD display. This figure shows the principle when an observer views edges A and B of the front image and edges C and D of the rear image. When observing two images from the midpoint between the eyes in the depth direction, such that they overlap, the edges in the retinal images appear duplicated. The arrangement of edges on the left retina image is CADB from left to right, while on the right, it is ACBD from left to right. In this case, using binocular disparity to perceive the two images as separate objects is difficult. As a result, the overlapped two images are fused and perceived by the observer as a single image.

2.2 Arc 3D Display

Arc 3D display operates on the principle of perceived floating images in mid-air by illuminating a transparent substrate with arc-shaped scratches from a single light source. When light is illuminated onto the substrate with arc-shaped scratches it scatters in a conical shape at each point of the scratches. This scattered light enters the eye, and specific points of the arc-shaped scratches are perceived as bright spots.

Figure 3 shows the principle when the light source, the center "O" of the arc-shaped scratch, and the eye are aligned in a straight line. In this case, arc-shaped scratch appear bright. Figure 4 shows the principle when the line connecting the light source and the eye does not pass through the center of the arc 3D substrate. Here, if we denote the intersection of the line connecting the light source and the eye with the arc 3D substrate as "O'", points P1 and P2 on the arc-shaped scratch appear bright,

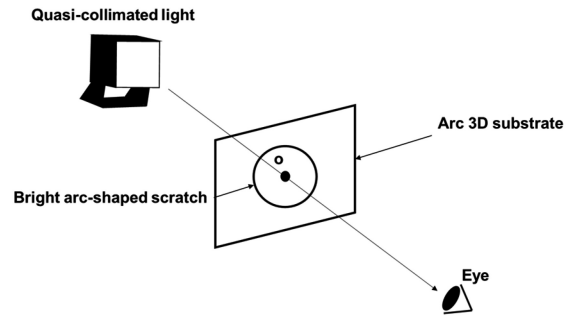


Fig. 3 The principle of the case when the light source, the center "O" of the arc-shaped scratch, and the eye are on a straight line.

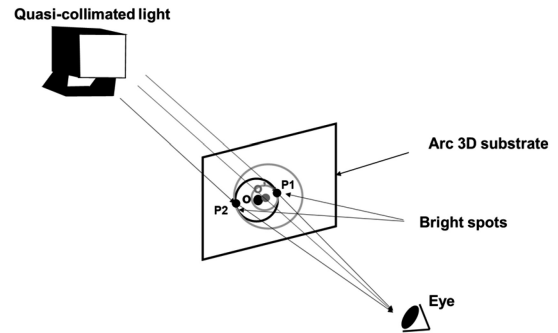


Fig. 4 The principle of the line connecting the light source and the eye does not pass through the center of the scratch on the arc.

Bright spots: P1L, P1R, P2L, P2R

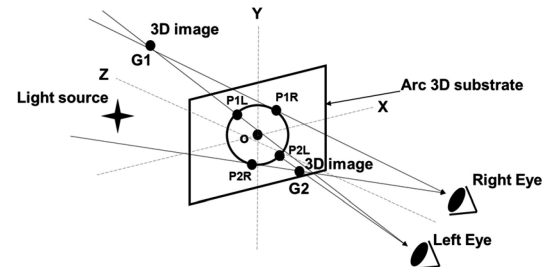


Fig. 5 The principle of observing arc-shaped scratch with both eyes.

either tangential or externally tangent to O'. Figure 5 shows the arc-shaped scratch observed by both eyes. P1R and P2R appear as bright spots in the right eye, while P1L and P2L appear as bright spots in the left eye. Since the bright spots perceived by the left and right eyes have different positions, images G1 and G2 appear to pop out rear and in front of the arc 3D substrate.

2.3 Edge-based DFD Display

As shown in Fig. 2, DFD display can be achieved using only the double-edge parts. This indicates that only the edge portions of the desired 3D image are required for the perceived depth of the DFD display. Therefore, an edge-based DFD display consisting of the projected 2D image and the edge parts of the desired 3D image is realized^{[11], [12]}. Figure 6 shows the principle of the edge-

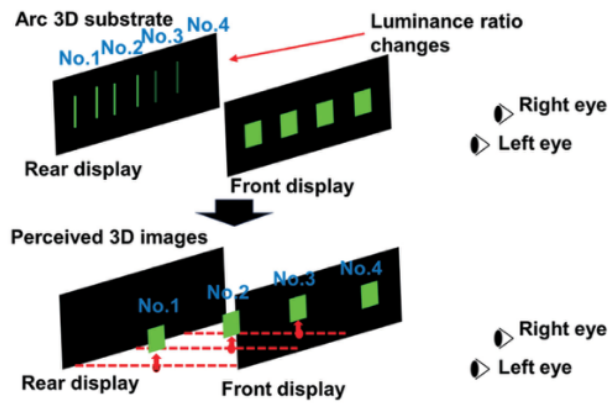


図6 エッジベースDFD表示の原理。

図6にエッジベースDFDディスプレイの原理を示す。本手法は、従来のDFDディスプレイと同様に、エッジ画像の輝度比を変化させることで3次元画像を表示することができることが報告されている。前面表示と背面表示のどちらかをエッジに設定した場合、前面表示を空中画像に設定しても、DFD表示と同じ効果が得られます¹³⁾。

2.4 アークDFD表示

Arc 3DディスプレイとDFDディスプレイを組み合わせることで、薄いデバイス構成で奥行き表現を増やすことができる。図7にアークDFDディスプレイの原理を示す。アークDFDディスプレイは、アーク3Dディスプレイと前縁または後縁を形成することで、エッジベースDFDディスプレイの厚みを低減することができる。

2.5 光学シースルーAIRR

本研究では、光学シースルーAIRRの原理を利用して光学系を提案する¹⁰⁾。光学式シースルーAIRRは、光源、レトロ反射器、ビームスプリッタから構成される。図8は、光学式シースルーAIRRで航空画像を表示する原理を示したものである。光源から放出された入射光はビームスプリッタを通して透過され、

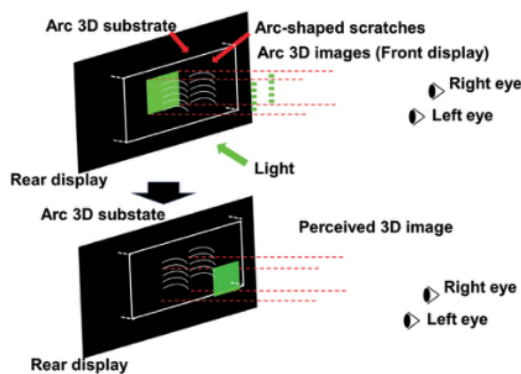


Fig. 7 The principle of arc DFD display.

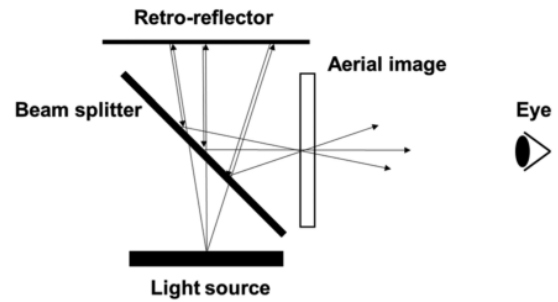


Fig. 8 The principle of optical see-through AIRR.

透過光はレトロ反射鏡によって反射され、反射光はビームスプリッタに対して平面对称の位置に集光され、航空画像が形成される。

3. 空中シースルーDFDディスプレイ

3.1 原則

提案する空中シースルーDFDディスプレイシステムの原理を図9と図10に示す。このシステムは、光源、レトロ反射鏡、ビームスプリッタ、円弧状の傷のある透明な平面で構成されている。フロントディスプレイは、光学シースルーAIRRで形成された航空写真である。リアディスプレイは、Arc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像である。Arc 3Dディスプレイの光源はプロジェクターである。図11は、空中シースルーDFDディスプレイのリアディスプレイの輝度を変化させることにより、DFD画像の奥行きがどのように変化するかを示している。アーク3D基板はほぼ無色透明であるため、背景はDFD画像を通して見ることができる。

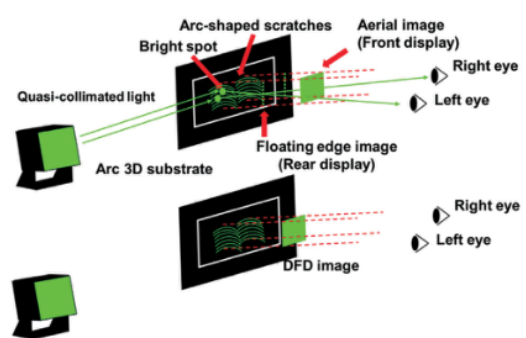


図9 空中シースルーDFDディスプレイの原理。

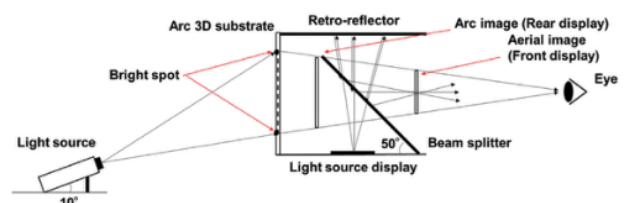


図10 空中シースルーDFDディスプレイの原理(側面図)。

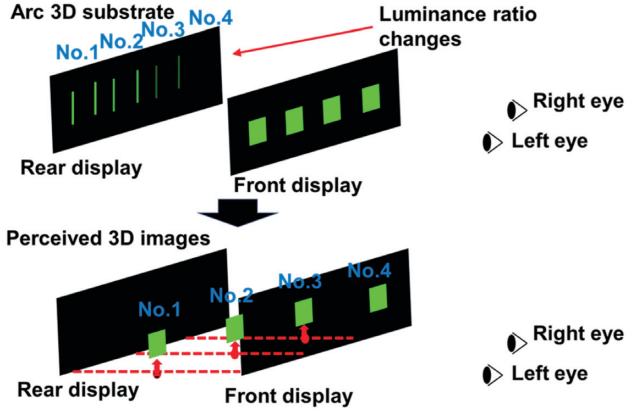


Fig. 6 The principle of edge-based DFD display.

based DFD display. It has been reported that this method can display 3D images by changing the luminance ratio of the edge image, similar to the conventional DFD display. If either the front or rear display is set to the edge, the same effect as the DFD display can be obtained by setting the front display to an aerial image as well¹³.

2.4 Arc DFD Display

By combining the Arc 3D display with the DFD display, it is possible to increase the depth expression with a thin device configuration. Figure 7 shows the principle of the arc DFD display. The arc DFD display can reduce the thickness of the edge-based DFD display by forming either the front or rear edge with the Arc 3D display.

2.5 Optical See-Through AIRR

The principle of optical see-through AIRR is used to propose the optical system for this research¹⁰. The optical see-through AIRR consists of a light source, a retro-reflector, and a beam splitter. Figure 8 shows the principle of displaying aerial images with the optical see-through AIRR. Incident light emitted from a light source is transmitted through a beam splitter, the transmitted light is reflected by a retro-reflector, and the

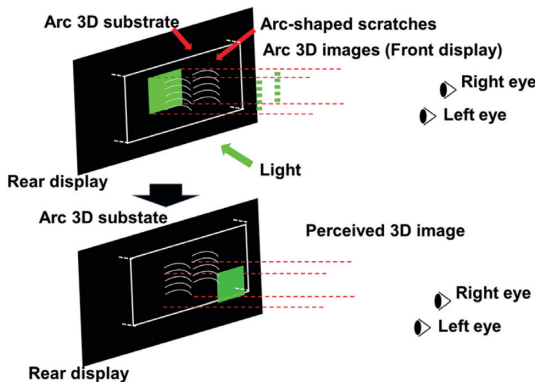


Fig. 7 The principle of arc DFD display.

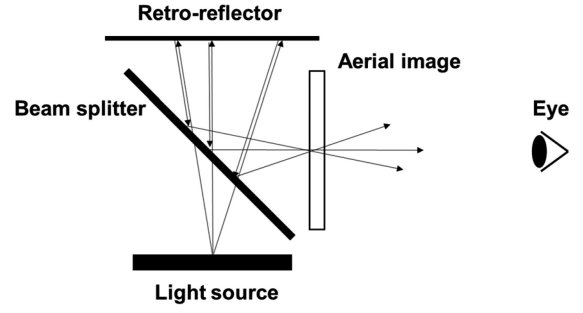


Fig. 8 The principle of optical see-through AIRR.

reflected light is focused at a position that is plane-symmetrical to the beam splitter, and an aerial image is formed.

3. Aerial See-Through DFD Display

3.1 Principle

The principle of the aerial see-through DFD display system proposed is shown in Fig. 9 and Fig. 10. The system consists of a light source, a retro-reflector, a beam splitter, and a transparent plane with arc-shaped scratches. The front display is an aerial image formed by the optical see-through AIRR. The rear display is a floating edge image by the Arc 3D display. The light source for the Arc 3D display is a projector. Figure 11 shows how the depth of the DFD image changes by changing the luminance of the rear display in the aerial see-through DFD display. The background can be seen through the DFD image because the arc 3D substrate is nearly colorless and transparent.

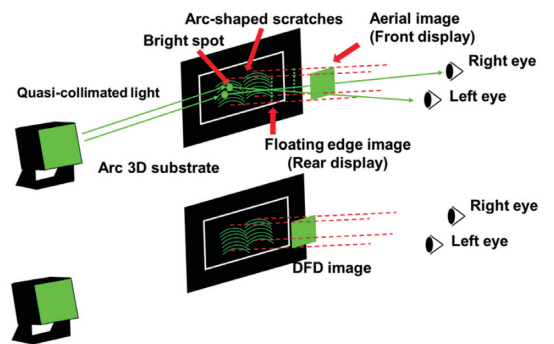


Fig. 9 The principle of aerial see-through DFD display.

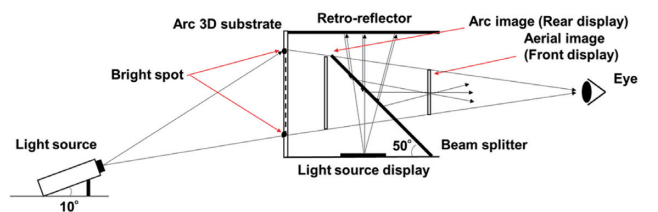


Fig. 10 The principle of aerial see-through DFD display (side view).

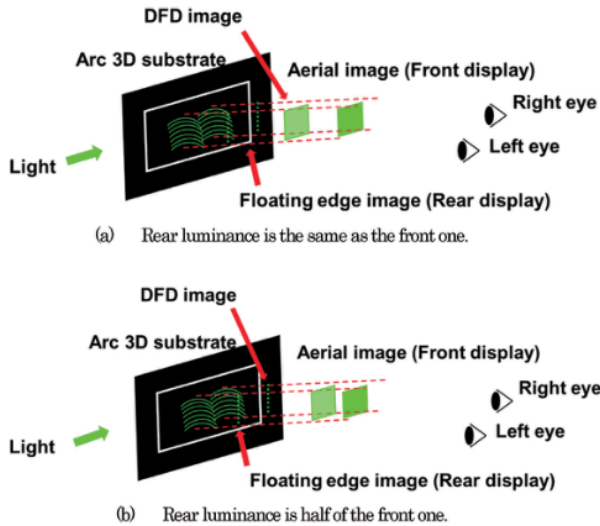


図11 背面の輝度を変化させた空中シースルーDFDディスプレイの知覚深度。

3.3 使用ディスプレイの輝度測定

空中シースルーDFDディスプレイでは、画像の奥行き感は前方画像と後方画像の輝度比に依存します。輝度関係が重要です。そこで、輝度計(Radiant Vision Systems: ProMetric Y2 9)を用いて、前後画像の輝度値の関係を調べた。図12に前面航空画像の輝度測定実験を示す。

図 13 は、アーク 3 次元基板上のアーク状スクラッチの輝度を実験的に測定したものである。0~255の範囲にある15パターンの画素値の輝度が、前面と背面の両方に表示された。

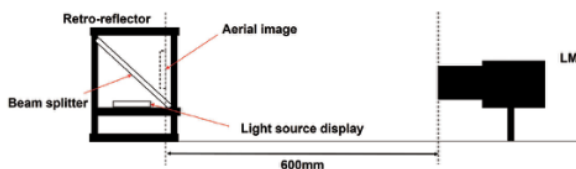


図12 フロントディスプレイの航空画像の輝度を測定するための実験のシーン。

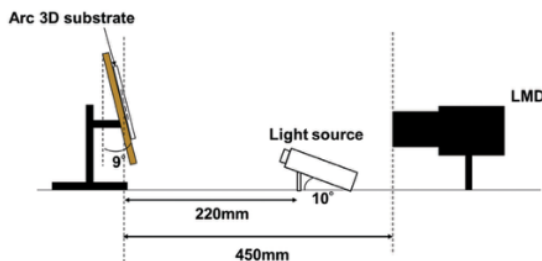


図 13 アーク 3 次元基板上のアーク状スクラッチの輝度測定実験。

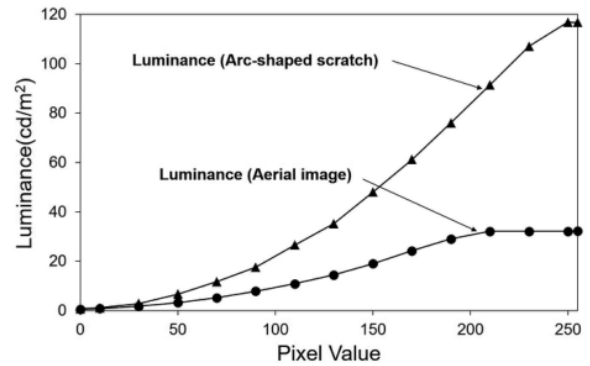


図14 ピクセル値と正面航空画像および背面Arc-3D画像の輝度との関係。

フロントディスプレイとリアディスプレイの輝度値の関係を調べた結果を図14に示す。航空画像の輝度測定結果から、航空画像の輝度最大値32.2cd/m²を標準とし、その輝度値の100%、75%、50%、25%、0%をそれぞれ算出した。計算値を表 1 に示す。また、表1に示すように、表側の最大輝度値の100%を基準として、裏側の画素値を算出した。リアディスプレイに使用した画素値は、フロントディスプレイと同様に、各輝度値比について算出した。計算値を表 2 に示す。

表1 航空画像の輝度測定結果から算出したフロントディスプレイの画素値。

Front display		
Luminance ratio	Luminance (cd/ m ²)	Pixel value
100%	32.2	255
75%	24.1	170
50%	16.1	137
25%	8.05	91
0%	0	0

表2 アーク3D基板上のアーク状スクラッチの輝度測定結果から算出したリアディスプレイの画素値。

Rear display		
Luminance ratio	Luminance (cd/ m ²)	Pixel value
100%	32.2	123
75%	24.1	105
50%	16.1	85
25%	8.05	56
0%	0	0

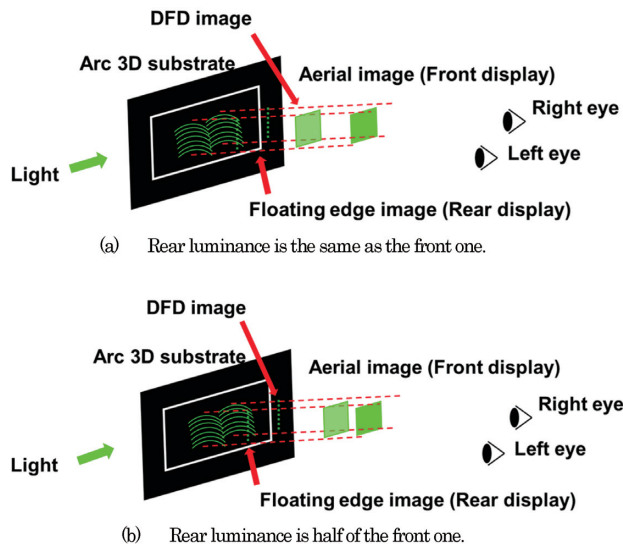


Fig. 11 Perceived depth of aerial see-through DFD display with luminance changed in the rear.

3.3 Luminance Measurement of the Display Used

In aerial see-through DFD display, the perceived depth of the image depends on the luminance ratio of the front and rear images. Luminance relationship is important. Therefore, we investigated the relationship between the luminance values of the front and rear images by using a luminance meter (Radiant Vision Systems: ProMetric Y29). Figure 12 shows the luminance measurement experiment of the front aerial image.

Figure 13 shows the experimental luminance measurement of the luminance of the arc-shaped scratches on the arc 3D substrate. The luminance of 15 patterns of pixel values in the range of 0~255 was

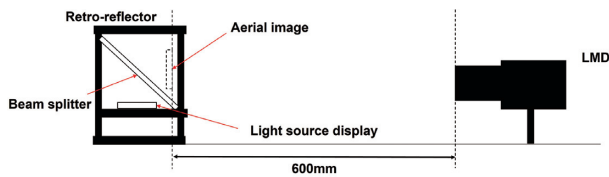


Fig. 12 Scene of an experiment to measure the luminance of the aerial image of the front display.

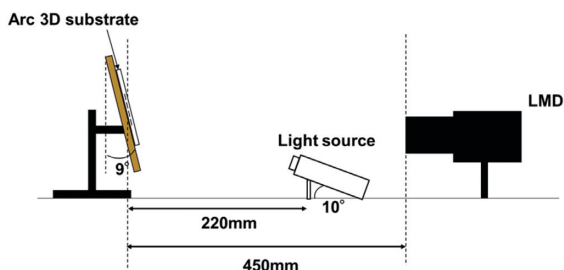


Fig. 13 The luminance measurement experiment of the luminance of the arc-shaped scratches on the arc 3D substrate.

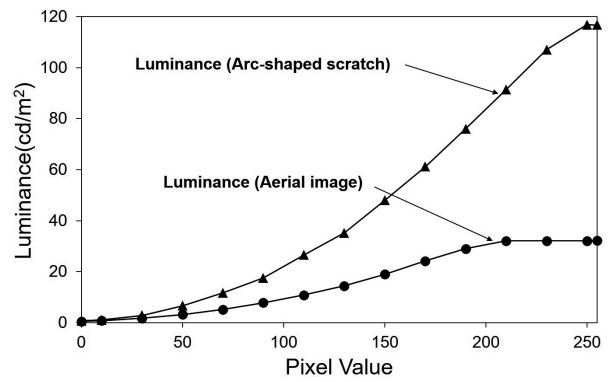


Fig. 14 Relationships between pixel value and the luminance of the frontal aerial image and the rear Arc-3D image.

displayed on both the front and rear. The results of the investigation of the relationship between the luminance values of the front and rear displays are shown in Fig. 14. Based on the luminance measurement results of the aerial image, the maximum luminance value of 32.2 cd/m^2 of the aerial image was used as the standard, and 100%, 75%, 50%, 25%, and 0% of that luminance value were calculated, respectively. The calculated values are shown in Table 1. The pixel values for the rear side were calculated using 100% of the maximum luminance value of the front side as a reference. The pixel values used for the rear display were calculated for each luminance value ratio in the same as for the front display. The calculated values are shown in Table 2.

Table 1 Pixel value of the front display calculated from the luminance measurement results of the aerial image.

Front display		
Luminance ratio	Luminance (cd/m^2)	Pixel value
100%	32.2	255
75%	24.1	170
50%	16.1	137
25%	8.05	91
0%	0	0

Table 2 Pixel value of the rear display calculated from the luminance measurement results of the arc-shaped scratches on the arc 3D substrate.

Rear display		
Luminance ratio	Luminance (cd/m^2)	Pixel value
100%	32.2	123
75%	24.1	105
50%	16.1	85
25%	8.05	56
0%	0	0

3.4 提案する光学系の実験的デモンストレーション

図15は、空中シースルーDFDディスプレイを表示するための光学系を構築したものである。この光学系では、光学シースルーAIRR原理により、正面ディスプレイ上に航空画像を表示する。背面ディスプレイにArc 3Dディスプレイで浮動小数点画像を表示する。提案システムは、図16に形成されたArc 3Dディスプレイの浮動小数点画像に正面画像を重ねることで表示された。

図17は、リアディスプレイ上のArc 3Dディスプレイによる浮動小数点数100%の航空画像と、フロントディスプレイ上の光学シースルーAIRRによる輝度100%の航空画像の実際の状況を示している。

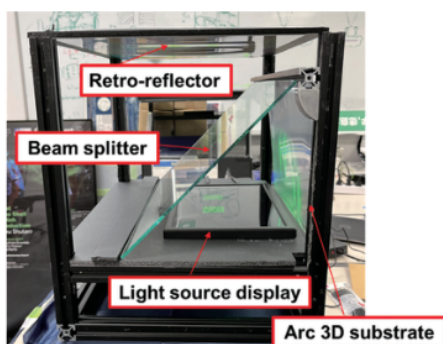


図15 構築された空中シースルーDFDディスプレイシステム。

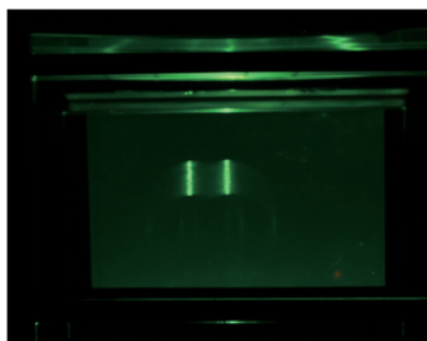


Fig. 16 Floating edge image formed by Arc 3D display.

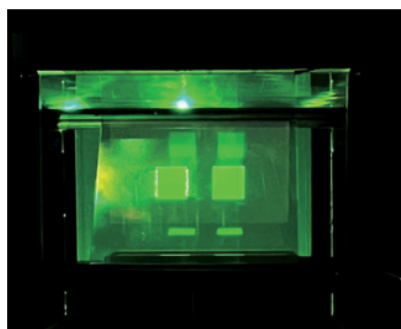


図17 背面のArc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像と正面のAIRRによる航空画像を合成したもの。

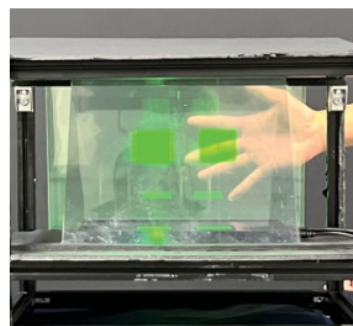


Fig. 18 View of background image over DFD image.

2つのディスプレイは重なっている。浮動小数点画像上で正面の航空画像が重なっている左の正方形は、航空画像の右の正方形よりも深いと認識される。図18は、DFD画像を通して背景画像がどのように見ることができるかを示している。

4. 空中シースルー DFD ディスプレイの深度評価

4.1 実験セットアップ

これらの実験では、実験前に実オブジェクトを用いた学習とステレオフライテストを行う。実験に必要な立体視能力を満たした人を対象とした。学習では、2つの画像を提示するディスプレイを利用する。ディスプレイには正方形の画像が表示されます。訓練では、被験者は画面に表示された2つのマスの表示間の距離を報告するよう求められる。実験環境を図19に示す。フロントディスプレイとオブザーバ間の距離は1.5mとした。フロント画像とリア画像の距離は127mmであった。実験では、光学シースルーAIRRによる航空画像をフロントディスプレイに表示した。Arc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像がリアディスプレイに表示された。フロントディスプレイの輝度は100%に保ち、リアディスプレイの輝度は0、25、50、75、100%に変更した。知覚された奥行きは電子ノギスで測定され、奥行き評価実験の実験値として使用された。図20に示すように

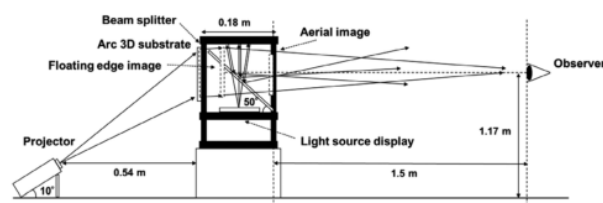


図19 実験環境の様子 Fig.

【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。

3.4 Experimental Demonstration of Proposed Optical System

Figure 15 shows the constructed optical system for displaying aerial see-through DFD display. In this optical system, an aerial image is displayed on the front display by the optical see-through AIRR principle. A floating edge image is displayed on the rear display by Arc 3D display. The proposed system was displayed by overlapping a floating edge image from the Arc 3D display formed in Fig. 16 on the front image.

Figure 17 shows the actual situation in which an aerial image with a luminance value of 100% of the floating edge image by Arc 3D display on the rear display and an aerial image with a luminance value of 100% by optical see-

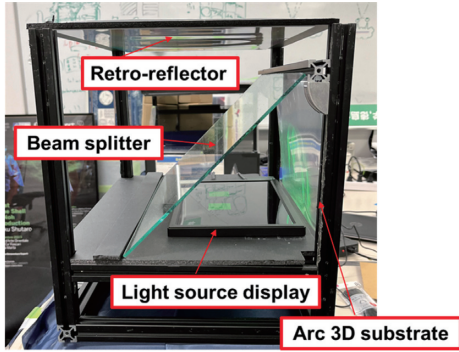


Fig. 15 Constructed aerial see-through DFD display system.

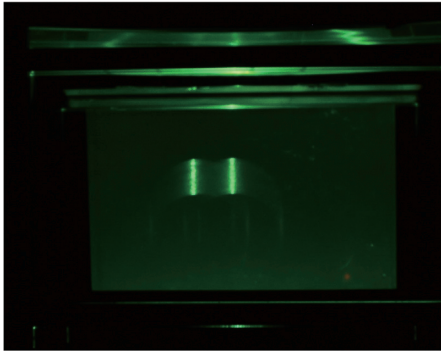


Fig. 16 Floating edge image formed by Arc 3D display.

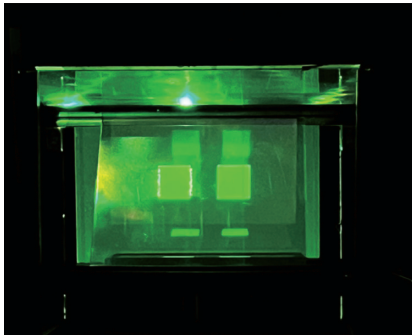


Fig. 17 Floating edge image by Arc 3D display in the rear and the aerial image by AIRR in the front are combined.

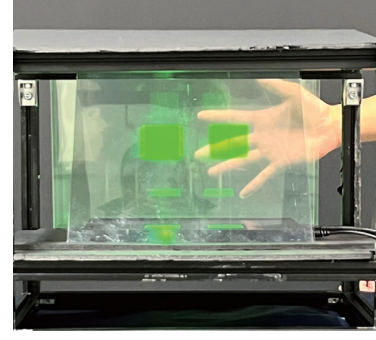


Fig. 18 View of background image over DFD image.

through AIRR on the front display. The two displays are overlapped. The left square, in which the front aerial image is overlapped on the floating edge image, is perceived to be deeper than the right square of the aerial image. Figure 18 shows how the background image can be seen through the DFD image.

4. Depth evaluation of aerial see-through DFD display

4.1 Experimental Setup

In these experiments, training using real objects and a stereo fly test will be conducted before the experiments. Those who met the stereoscopic ability required for the experiments were used. The training will utilize a display that presents two images. The display will show images of squares. In the training, subjects will be asked to report the distance between the displays of the two squares displayed on the screen. The experimental environment is shown in Fig. 19. The distance between the front display and the observer was set to 1.5 meters. The distance between the front and rear images was 127 mm. In the experiments, an aerial image by optical see-through AIRR was displayed on the front display. A floating edge image by the Arc 3D display was displayed on the rear display. The luminance of the front display was kept at 100%, while that of the rear display was changed from 0, 25, 50, 75, to 100%. The perceived depth was measured with an electronic caliper and used as the experimental value for the depth evaluation experiments. As shown in Fig. 20,

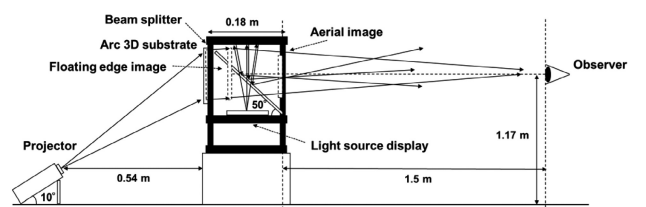


Fig. 19 The experimental environment.

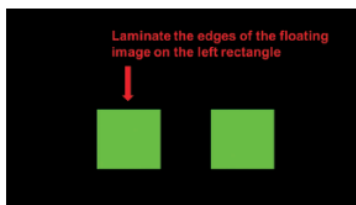


図20 被写体が観察した正面画像。

評価対象として2つの正方形を用い、左の正方形をArc 3Dディスプレイで浮動小数点画像と重ね合わせ、エッジベースのDFDディスプレイを実施した。被験者には、左の正方形の知覚された奥行きを右の正方形と比較して評価するよう求めた。被験者は20代で男性5名であり

各輝度比は3回の試行で測定され、合計15回の測定が行われた。輝度比の変化の順序はランダムとした。

4.2 知覚奥行き評価実験結果

実験前に実施したトレーニングの結果を図21に示す。トレーニングの結果、被験者は実際の奥行きを5mm以下の誤差で報告していることがわかる。知覚される奥行きの理論値は、前後に表示される画像の輝度比によって直線的に変化する。図22は、各被験者から得られた知覚された奥行きの評価結果である。図22の実線は理論線を示している。

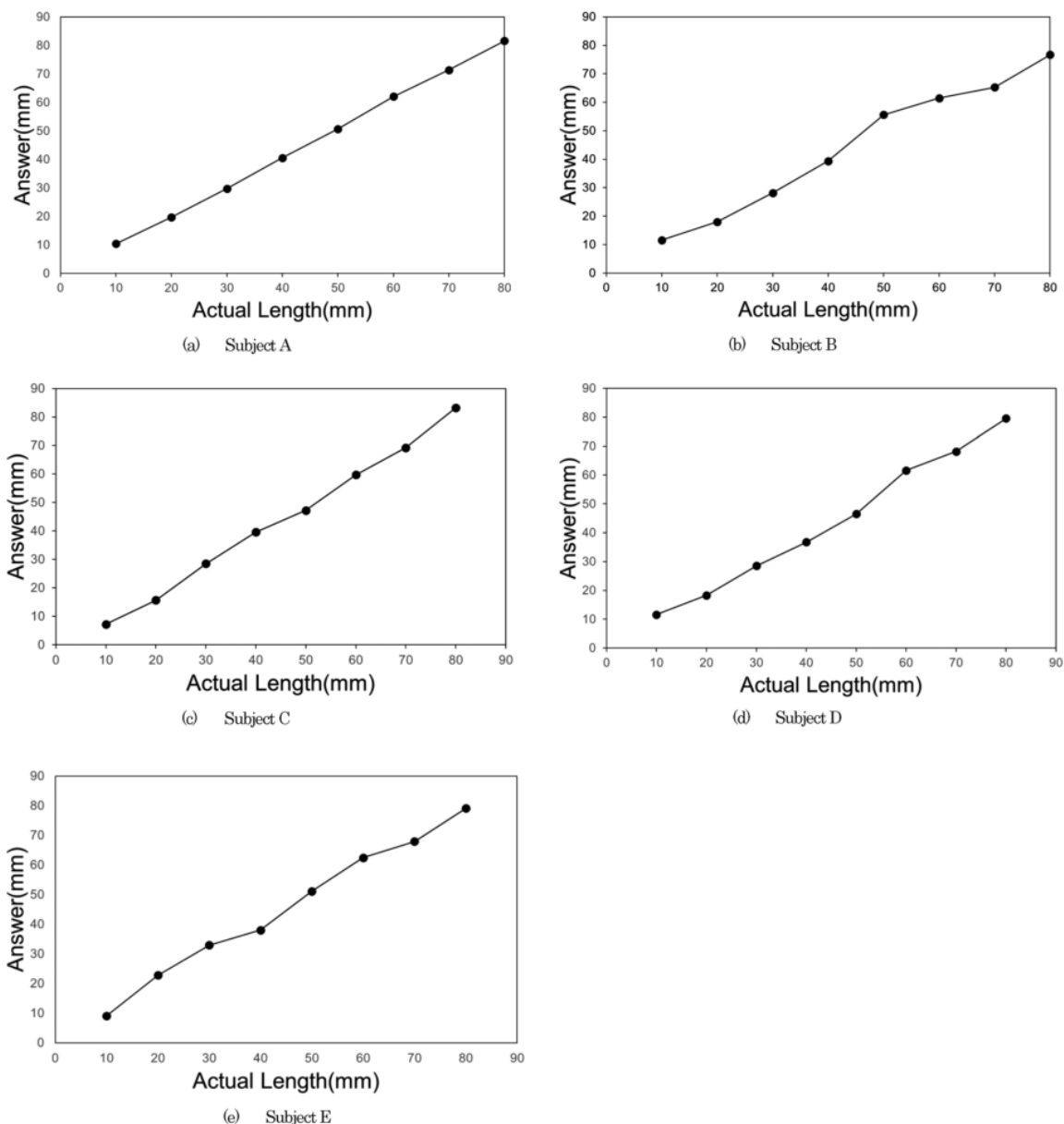


図21 知覚された奥行きに関するトレーニング結果

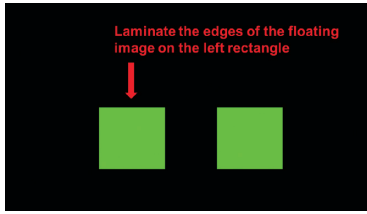


Fig. 20 The front image as observed by the subject.

two squares were used as evaluation targets, the left square was overlapped with a floating edge image by Arc 3D display, and an edge-based DFD display was performed. The subjects were asked to evaluate the perceived depth of the left square compared to the right square. The subjects were five males in their 20s, and

each luminance ratio was measured in three trials, for a total of 15 measurements. The order of the luminance ratio changes was randomized.

4.2 Perceived Depth Evaluation Experimental

Results

The results of the training conducted before the experiments are shown in Fig. 21. The training results indicate that subjects reported the actual depth with an error of less than 5 mm. The theoretical value of perceived depth varies linearly with the luminance ratio of the images displayed on the front and rear. Figure 22 shows the evaluation results of perceived depth obtained from each subject. The solid line in Fig. 22 indicates the theoretical lines.

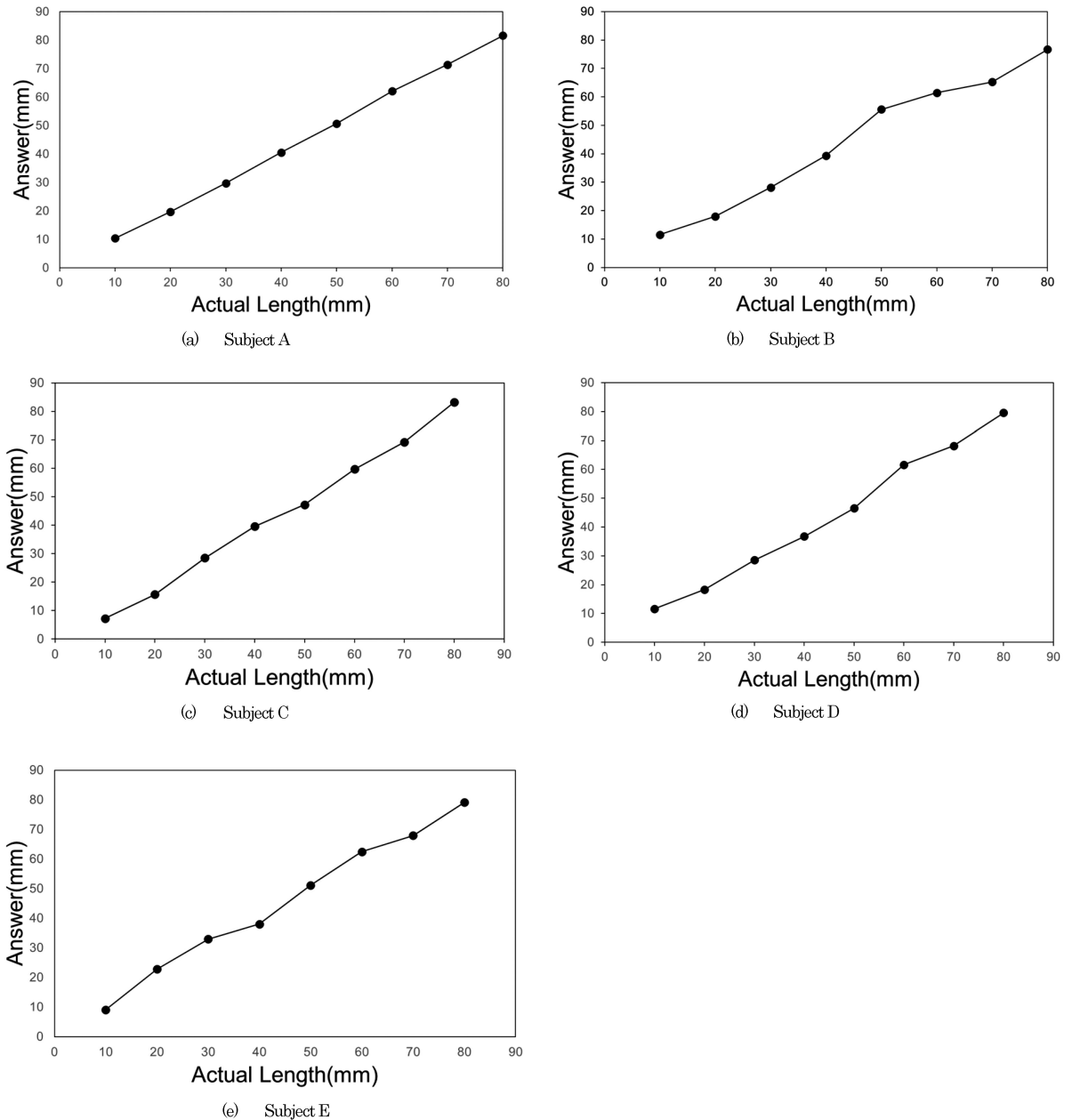


Fig. 21 The training results on perceived depth.

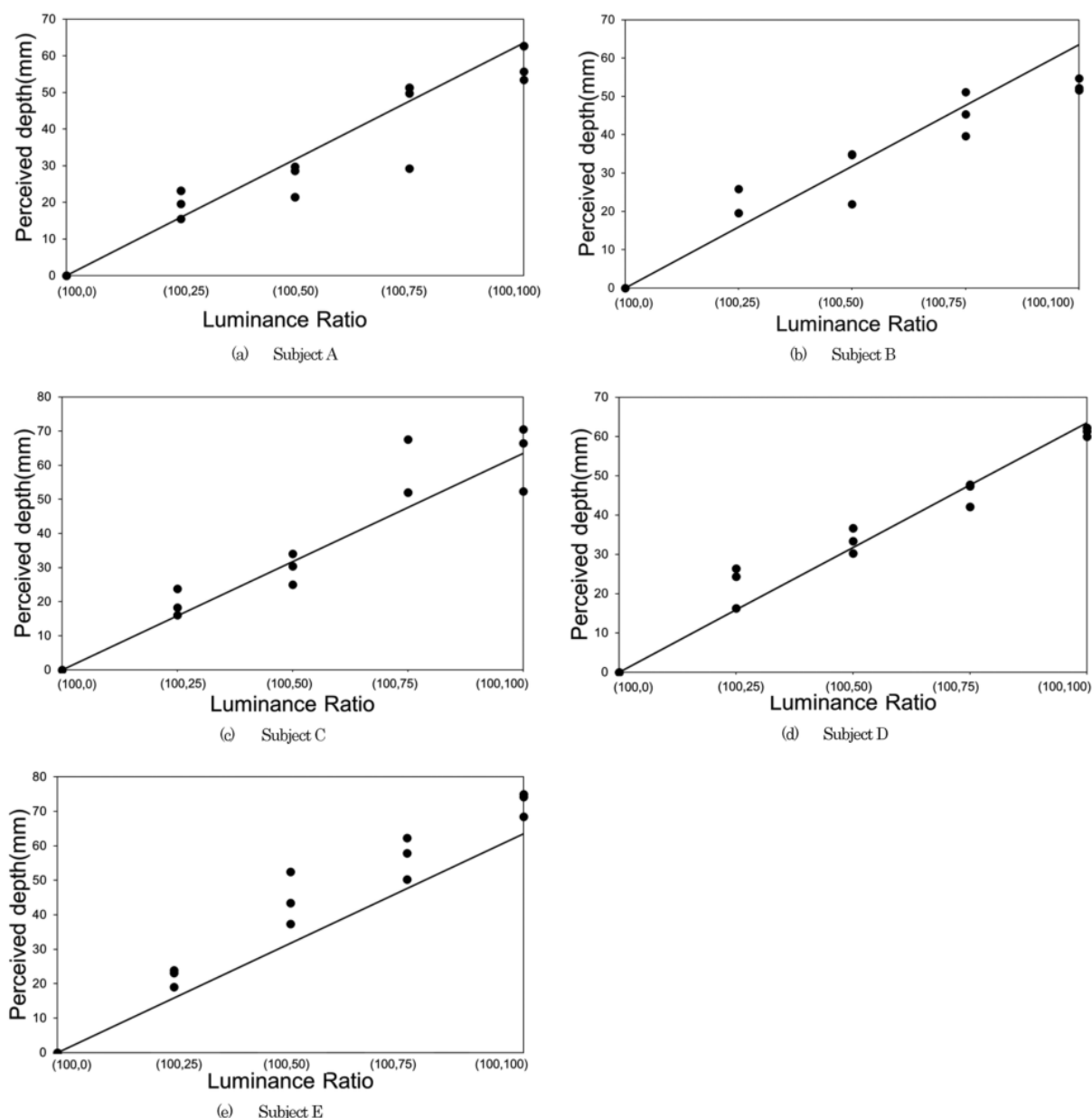


図22 各被験者から得られた知覚深度

実験結果から、知覚される奥行きは、各被験者の理論値から多少ずれているものの、すべての被験者において、前後の表示の輝度比に対して直線的に変化していることがわかった。

実験結果から、すべての被験者が知覚される奥行きについて同様の傾向を持つことがわかった。

5. 議論

空中シースルーDFDディスプレイの被験者実験では、すべての被験者が輝度比に対応する奥行きを知覚することができた。知覚される奥行きについては、従来のDFDディスプレイと同じ傾向が得られる。

実験では、いくつかの測定値が理論値と異なっていた。この理由の一つは、Arc 3Dディスプレイによる浮動小数点画像の位置が、被写体のわずかな動きやずれによって歪められ、知覚される画像の位置が変化するためである。将来的には、縦方向と横方向に分けて画像位置を調整することで、被験者が誤って認識するDFD画像の奥行きを低減できる可能性がある。

6. むすび

本論文では、光学式シースルーAIRRによる空中画像とアーク3Dディスプレイによる浮動小数点画像を融合することで、知覚される奥行きの範囲を自由に変化させることができる空中シースルーDFDディスプレイを構築し、

[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。

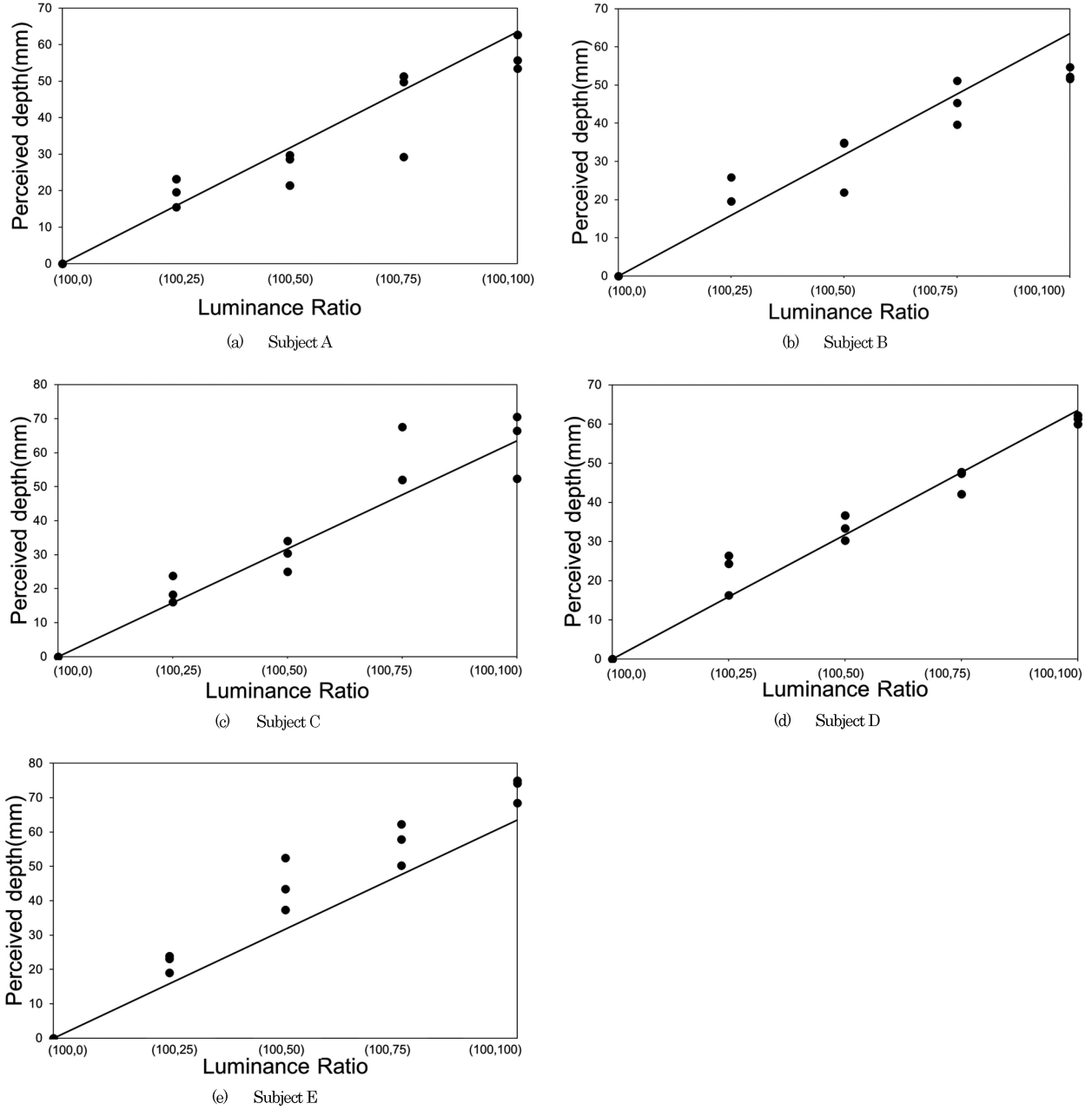


Fig. 22 The perceived depth obtained from each subject.

The experimental results show that the perceived depth varied linearly with the luminance ratio of the front and rear displays for all subjects, although the perceived depths have some deviation from the theoretical value for each subject.

The experimental results show that all subjects had similar tendencies for perceived depth.

5. Discussion

In a subject experiments on the aerial see-through DFD display, all subjects were able to perceive the depth corresponding to the luminance ratio. The same tendency for perceived depth as that of the conventional DFD display is obtained. In the experiments, some

measured values differed from the theoretical values. One reason for this is that the position of the floating edge image by the Arc 3D display is distorted by slight movements or deviations of the subject, and the perceived position of the image changes. In the future, it may be possible to reduce subjects' erroneous perceived depth of the DFD image by separately adjusting the image position in the vertical and horizontal directions.

6. Conclusion

In this paper, we constructed an aerial see-through DFD display that can freely change the range of perceived depth by fusing the aerial image by optical see-through AIRR and the floating edge image by Arc 3D

知覚される奥行きに関する心理物理学の実験を行った。提案する光学系では、アーク3D基板はほぼ無色透明であるため、前面から見たときにDFD画像だけでなく背景も観察することができる。実験結果より、知覚される奥行きは、前後の表示の輝度比に比例して直線的に変化することがわかり、その有効性が確認された。

References

- 1) S. Suyama, H. Takada, K. Uehira, S. Sakai and S. Ohtsuka, "A Novel Direct-Vision 3D Display using Luminance-Modulated Two 2-D Images Displayed at Different Depths", SID' 00 Digest of Technical Papers, 54.1, pp.1208-1211 (2000)
- 2) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai, "Apparent 3D Image Perceived from Two Luminance-modulated 2-D Images Display at Different Depths," Vision Research, Vol. 44, No. 8, pp.785-793 (June . 2004)
- 3) Y. Ishigure, A. Suyama, H. Takada, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao and T. Fujikado, "Evaluation of Visual Fatigue Relative in the Viewing of a Depth-fused 3D Display and 2-D Display", Proceedings of IDW'04, VHFp-3, pp.1627-1630 (2004)
- 4) S. Suyama, Y. Ishigure, H. Takada, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao and T. Fujikado, "Evaluation of Visual Fatigue in Viewing a Depth-fused 3D Display in Comparison with a 2-D Display", NTT Technical Review, Vol. 3, No. 12, pp.82-89 (2005)
- 5) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," Opt. Express, Vol. 22, pp.26919-26924 (Oct. 2014)
- 6) T. Omoto, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "3D Aerial Display Combining Optical See-Through Aerial Imaging by Retro-Reflection with Depth-Fused 3D Display," Proc IDW22, FMCp4-5, pp.379-382 (Dec. 2022)
- 7) W.J. Beaty, "Drawing Holograms by Hand," Proc. SPIE, Vol. 5005, pp.156-167 (Sep. 2003)
- 8) K. Yoshioka, S. Nishiyama, H. Mizushima and S. Suyama: "Perceived depth and wide vertical viewing zone in Arc DFD display," The Institute of Image Information and Television Engineers (Oct. 2015)
- 9) H. Oishi, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "Analysis of floating distance of Arc 3D display with respect to inclination angle of plane," Opt. Rev., Vol. 30, pp.637-646 (Nov. 2023)
- 10) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto, "Aerial Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer," IMID2018 DIGEST, p. 636 (Aug. 2018)
- 11) T. Soumiya, H. Kuribayashi, H. Yamamoto, S. Suyama, "Edge-based DFD (Depth-fused 3-D) display," The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 37, No. 24, pp.21-24 (April. 2013)

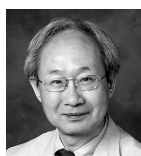
- 12) S. Suyama, H. Sonobe, T. Soumiya, A. Tsunakawa, H. Yamamoto and H. Kuribayashi, "Edge-based Depth-Fused 3D Display", OSA Digital Holography and 3D Imaging Technical Digest, DM2A.3 (2013)
- 13) T. Omoto, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "Construction of 3D Image and Visibility Improvement of 2D Image Outside 3D Viewing Zone by Edge-Based Depth-Fused 3D Display Using Aerial Image and Rear Display," ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.12, pp.36-43 (Jan, 2024)



Kyoya Hino received his B. E. degrees from Akita University, Japan in 2023. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests study of Augmented Reality (AR) Display without Glasses Using Aerial Imaging by Retroreflective Reflection (AIRR).



Kensuke Tamano received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2024. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests 3D image formation and depth perception into water.



Shiro Suyama received the M.E. degrees from Kyushu University in 1981. Since joining NTT Electrical Communication Laboratories in 1981, he has been engaged in research and development on transistor and liquid-crystal devices. He received the Ph.D. degree from Kyushu University in 1990. He was a Professor at Tokushima University from April 2007 to March 2021 and is currently a Project Professor at Utsunomiya University from April 2021. He is engaged in research on 3D display systems: e.g. DFD (Depth-fused 3-D) display, Arc 3D display, Aerial display, Enhancing image reconstruction in Brain, Three-dimensional perceptions and Liquid-crystal devices.



Hirotugu Yamamoto received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan. After graduation, he joined the Department of Optical Science and Technology at University of Tokushima, Japan. From April 2014, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University, where he is currently a professor at School of Engineering, Utsunomiya University. He has been a project leader for international standardization of aerial display at IEC/TC110 since Oct. 2018, has been the head of the delegates in IEC/TC110 Japan National Mirror Committee, and received IEC1906 Award for his outstanding contribution. In April 2021, he has become a distinguished professor at Utsunomiya University.

display and conducted psychophysical experiments on perceived depth. In the proposed optical system, the arc 3D substrate is nearly colorless and transparent, enabling the observer to observe the background as well as the DFD image when the image is viewed from the front. Experimental results show that the perceived depth changes linearly with the luminance ratio of the front and rear displays, confirming the effectiveness.

References

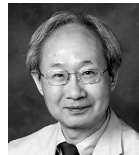
- 1) S. Suyama, H. Takada, K. Uehira, S. Sakai and S. Ohtsuka, "A Novel Direct-Vision 3D Display using Luminance-Modulated Two 2-D Images Displayed at Different Depths", SID' 00 Digest of Technical Papers, 54.1, pp.1208-1211 (2000)
- 2) S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira and S. Sakai, "Apparent 3D Image Perceived from Two Luminance-modulated 2-D Images Display at Different Depths," Vision Research, Vol. 44, No. 8, pp.785-793 (June . 2004)
- 3) Y. Ishigure, A. Suyama, H. Takada, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao and T. Fujikado, "Evaluation of Visual Fatigue Relative in the Viewing of a Depth-fused 3D Display and 2-D Display", Proceedings of IDW'04, VHFp-3, pp.1627-1630 (2004)
- 4) S. Suyama, Y. Ishigure, H. Takada, K. Nakazawa, J. Hosohata, Y. Takao and T. Fujikado, "Evaluation of Visual Fatigue in Viewing a Depth-fused 3D Display in Comparison with a 2-D Display", NTT Technical Review, Vol. 3, No. 12, pp.82-89 (2005)
- 5) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," Opt. Express, Vol. 22, pp.26919-26924 (Oct. 2014)
- 6) T. Omoto, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "3D Aerial Display Combining Optical See-Through Aerial Imaging by Retro-Reflection with Depth-Fused 3D Display," Proc IDW22, FMCp4-5, pp.379-382 (Dec. 2022)
- 7) W.J. Beaty, "Drawing Holograms by Hand," Proc. SPIE, Vol. 5005, pp.156-167 (Sep. 2003)
- 8) K. Yoshioka, S. Nishiyama, H. Mizushima and S. Suyama: "Perceived depth and wide vertical viewing zone in Arc DFD display," The Institute of Image Information and Television Engineers (Oct. 2015)
- 9) H. Oishi, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "Analysis of floating distance of Arc 3D display with respect to inclination angle of plane," Opt. Rev., Vol. 30, pp.637-646 (Nov. 2023)
- 10) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto, "Aerial Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer," IMID2018 DIGEST, p. 636 (Aug. 2018)
- 11) T. Soumiya, H. Kuribayashi, H. Yamamoto, S. Suyama, "Edge-based DFD (Depth-fused 3-D) display," The Institute of Image Information and Television Engineers, Vol. 37, No. 24, pp.21-24 (April. 2013)
- 12) S. Suyama, H. Sonobe, T. Soumiya, A. Tsunakawa, H. Yamamoto and H. Kuribayashi, "Edge-based Depth-Fused 3D Display", OSA Digital Holography and 3D Imaging Technical Digest, DM2A.3 (2013)
- 13) T. Omoto, K. Fujii, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto, "Construction of 3D Image and Visibility Improvement of 2D Image Outside 3D Viewing Zone by Edge-Based Depth-Fused 3D Display without Glasses Using Aerial Imaging," ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.12, pp.36-43 (Jan, 2024)



Kyoya Hino received his B. E. degrees from Akita University, Japan in 2023. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests study of Augmented Reality (AR) Display without Glasses Using Aerial Imaging by Retroreflective Reflection (AIRR).



Kensuke Tamano received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2024. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests 3D image formation and depth perception into water.



Shiro Suyama received the M.E. degrees from Kyushu University in 1981. Since joining NTT Electrical Communication Laboratories in 1981, he has been engaged in research and development on transistor and liquid-crystal devices. He received the Ph.D. degree from Kyushu University in 1990. He was a Professor at Tokushima University from April 2007 to March 2021 and is currently a Project Professor at Utsunomiya University from April 2021. He is engaged in research on 3D display systems: e.g. DFD (Depth-fused 3-D) display, Arc 3D display, Aerial display, Enhancing image reconstruction in Brain, Three-dimensional perceptions and Liquid-crystal devices.



Hirotugu Yamamoto received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan. After graduation, he joined the Department of Optical Science and Technology at University of Tokushima, Japan. From April 2014, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya University, where he is currently a professor at School of Engineering, Utsunomiya University. He has been a project leader for international standardization of aerial display at IEC/TC110 since Oct. 2018, has been the head of the delegates in IEC/TC110 Japan National Mirror Committee, and received IEC1906 Award for his outstanding contribution. In April 2021, he has become a distinguished professor at Utsunomiya University.