

フレネルレンズを用いたAIRRによって大きく飛び出して形成された空中サインへの空中ガイド導入による浮遊感の向上

坂根真矢, 高塚大樹, 陶山史朗, 山本裕紹

概要交通情報ディスプレイを利用した大規模な空中ディスプレイの実現を目指す。主な課題の1つは、航空画像の浮動感覚を強化することである。奥行き知覚は、人間の固有の視覚的制限により、距離が長くなるにつれて減少する。そのため、遠距離で空撮映像が浮き上がるようにするには工夫が必要であった。我々は、遠距離での空中画像における浮遊感覚に対する観察者の知覚を強化するために、空中ガイドの使用を提案する。エアリアルガイドは、航空画像平面上の航空標識を囲むフレームである。本稿の目的は、エアリアルガイドの有効性を確認することである。エアリアルガイドの存在が観察者の浮遊感覚をどのように変化させるかをプロトタイプを用いて検討する。さらに、ペア比較の方法を通じて、カラーの変化が航空画像の浮動効果に与える影響を検証する。

キーワード：再帰反射, 空中ディスプレイ, フレネルレンズ, 交通インフラ

1. Introduction

我々は、空中ディスプレイを利用した屋外環境向けに設計された大規模なデジタルサイネージシステムに関する研究を行った。我々はトラフィック情報表示を特定のアプリケーションとして考えている。交通情報ディスプレイは、道路情報を提供するために道路に設置される可変ディスプレイ装置である。道路標識として、交通事故の防止に役立つ¹⁾。これらの交通情報表示にはいくつかの問題がある。その一つが、事故が発生する危険性である。すべての道路構造に言えることだが、老朽化による事故の転倒の危険性がある²⁾。事故防止のために交通インフラが変化している³⁾。道路管理者は、運転者の安全上の理由から、電気機器のオーバーヘッドを重く置きたくない。車道の上に構造物を置かずに、ドライバーに表示が見えるようにする方法が課題である。そこで、空中ディスプレイを用いた新しい交通情報表示方法を提案する。空中ディスプレイは、光源からの光を集光し、空中で実像を形成する光学技術を採用している。この技術は最近、デジタルサイネージやエンターテインメントの分野で大きな関心を集めている⁴⁾。

交通情報に航空ディスプレイを利用する主な利点は、ドライバーには航空投影のみが見えるように、機器を車道から離すことができることである。この配置により、移動車両とディスプレイの物理的な接触がなくなる。さらに、ディスプレイをドライバーの視線内に直接配置することで、従来のディスプレイと比較して視認性を高めることができる。

航空画像技術にはいくつかの方法がある⁵⁾⁶⁾。交通標識の空中画像光学系として最も有望なものの一つに、再帰反射による空中画像(AIRR)⁷⁾がある。AIRRを選択した理由は、大規模なアプリケーションにおける優位性である。また、AIRR光学系への様々な応用が報告されている。以下はその例である。偏光AIRR(pAIRR)は航空画像の明るさを向上させる⁸⁾。AIRR光学系と2つのアクリル球の組み合わせも提案されている⁹⁾。航空ディスプレイ、ユーザー追跡システム、バーチャルリアリティ (VR)空間を組み合わせた空中インターフェースシステムが報告されている¹⁰⁾。AIRR技術は水中ディスプレイとしても利用できる可能性がある¹¹⁾。したがって、AIRRは交通情報表示に適していると考えられる。道路インフラ用大型空中ディスプレイのプロトタイプを開発した¹²⁾。さらに、フレネルレンズを使用することで、より遠距離の航空画像とより薄いデバイス¹³⁾が可能になる。

Received June 21, 2024; Revised September 25, 2024; Accepted October 27, 2024

† Utsunomiya University

(Utsunomiya, Japan)

†† Seiwa Electric Mfg. Co., Ltd.

(Joyo, Japan)

次の課題は、航空画像の浮動感覚を向上させることである。10m以上離れたところに浮かぶ航空写真を見た人の中には、航空写真は画像形成の位置にあるのではなく、ビームスプリッターに付着しているように見えると感じる人もいた。

【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。

Enhancement of Floating Sensation by Introducing Aerial Guide to Aerial Signage Formed with AIRR Using Fresnel Lens

Shinya Sakane^{†, ††}, Hiroki Takatsuka[†], Shiro Suyama[†] and Hirotugu Yamamoto[†]

Abstract Our goal is to realize a large-scale aerial display for the use of traffic information display. One of the primary challenges is to enhance the floating sensation of the aerial image. Depth perception diminishes with increasing distance due to inherent human visual limitations. Therefore, ingenuity was needed to make the aerial image appear to float over long distances. We propose the use of an aerial guide to enhance the observer's perception of the floating sensation in the aerial image at extended distance. The aerial guide is a frame that surrounds the aerial sign on the aerial image plane. The purpose of this paper is to confirm the effectiveness of aerial guide. We investigate how the presence of the aerial guide alters the observer's floating sensation using our prototype. Additionally, we examine the impact of varying colors on the floating effect of the aerial images through the method of pair comparison.

Keywords: Retro-reflection, Aerial display, Fresnel lens, Transport infrastructure.

1. Introduction

We have conducted a study on large-scale digital signage systems designed for outdoor environments utilizing aerial displays. We are considering traffic information display as a specific application. Traffic information displays are variable display devices installed on roads to provide road information. As road signs, they help prevent traffic accidents¹⁾. There are several issues with these traffic information displays. One of them is the danger of falling accidents. As is true of all road structures, there is a danger of falling accidents due to aging²⁾. Traffic infrastructure has been changing to prevent accidents³⁾. Road managers does not want to place heavy electrical equipment overhead for driver safety reasons. The challenge is how to make the display visible to drivers without placing structures over the roadway. Thus, we propose a new method of traffic information display using aerial display. Aerial displays employ optical technology to focus light from a source to form a real image in mid-air. This technology has recently garnered significant interest in digital signage and entertainment sectors⁴⁾. The primary advantage of

utilizing aerial displays for traffic information is that the equipment can be positioned away from the roadway, with only the aerial projection visible to drivers. This arrangement eliminates physical contact between moving vehicles and the display. Additionally, the display can be placed directly within the driver's line of sight, thus enhancing visibility compared to conventional displays.

There are several methods of aerial imaging technology^{5) 6)}. One of the most promising aerial imaging optical systems for traffic signs is aerial imaging by retro-reflection (AIRR)⁷⁾. The reason for choosing AIRR is its advantage in large-scale applications. In addition, various types of applications for AIRR optics have been reported. The following are some examples. Polarized AIRR (p-AIRR) improves the brightness of aerial images⁸⁾. A combination of AIRR optics and two acrylic spheres has also been proposed⁹⁾. An aerial interface system combining aerial displays, user tracking systems and virtual reality (VR) spaces has been reported¹⁰⁾. AIRR technology also has the potential to be used as an aquatic display¹¹⁾. Therefore, we consider AIRR to be suitable for traffic information display. We have developed a prototype of a large aerial display for road infrastructure¹²⁾. Furthermore, the use of a Fresnel lens enables longer-distance aerial images and a thinner device¹³⁾.

The next challenge is to enhance the floating sensation of aerial images. Some people who viewed the aerial images floating at a long distance over 10 m, felt that the

Received June 21, 2024; Revised September 25, 2024; Accepted October 27, 2024

[†] Utsunomiya University
(Utsunomiya, Japan)

^{††} Seiwa Electric Mfg. Co., Ltd.
(Joyo, Japan)

航空画像が浮かんでいないように見える原因は、現在のところ不明である。我々の仮説は、観測距離の問題、あるいは再帰反射器の接続部に黒線があるのではないかと推測する。画像に対する標識の位置の認識が正しくないため、誤った情報を与える可能性がある。したがって、画像形成位置で認識できるようにする必要があると考える。奥行き知覚を向上させるための方法がいくつか報告されている。ある研究では、画像の周りにフレームを置くことで、奥行き知覚が向上することが示唆された¹⁴⁾。しかし、道路で使用するために、空中映像の近くに物体を配置したくない。そこで、空中ディスプレイで形成した空中ガイドでも同じ効果が得られるのではないかと考えた。エアリアルガイドとは、航空画像の周りに表示される航空画像からなるフレームである。我々は、空中ガイドに注目することで、観察者に浮遊感覚を与えることができると考えている。

本稿の目的は、エアリアルガイドの有効性を確認することである。エアリアルガイドを持つことで、観察者の浮遊感覚がどのように変化するかをプロトタイプを用いて検証する。本研究の予備的な結果は、I DW '23¹⁵⁾ で発表された。本論文では、一対比較の方法を用いて、奥行き知覚の違いについて検討した。

2. 原則

2.1 三次元性の手がかり

人間は、いくつかの要因の組み合わせにより、物体を三次元的に認識する。これらの因子は生理的カテゴリーと心理的カテゴリーに分けられる。生理的要因とは、眼球に入射する光情報から直接得られる手がかりであり、収容、収束、両眼視差、運動視差などが含まれる。心理的要因とは、脳内の高度な情報処理によって解釈される手がかりであり、物体の大きさ、遠近法、オクルージョンや重なり、陰影、質感勾配など様々な要素が含まれる。図1は、奥行き知覚の手がかりと視聴距離¹⁶⁾の関係を示している。両眼視差による奥行き知覚は、約10mまでの距離で重要である。10m以上の距離では、両眼視差よりも運動視差の方が効果的になる。収容と収束からの手がかりは、1m未満の距離で奥行き知覚に有効である。

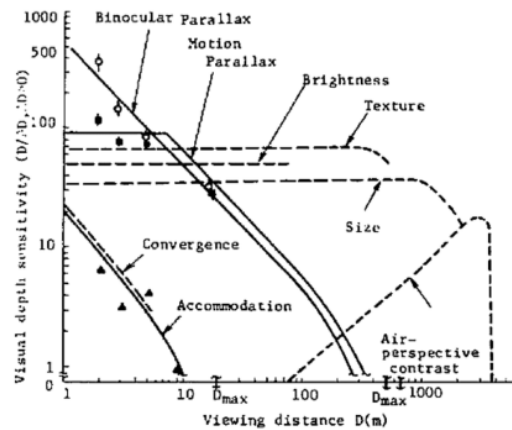


図1 視距離の関数としての視覚的奥行き知覚のための様々な手がかりの奥行き知覚度。(この図は文献[16]から引用した。[16]から引用し、NASAの許可を得て使用した。)

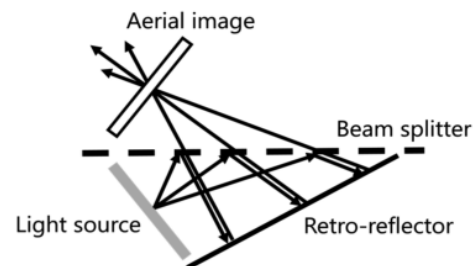


Fig. 2 Principle of AIRR.

2.2 AIRR

AIRRの原理を図2に示す。従来のAIRRは、光源、レトロ反射器、ビームスプリッターから構成される。ビームスプリッターで反射された光は、レトロレフレクターで入射方向に沿って反射される。レトロ反射された光は、ビームスプリッターに対して光源に対して平面对称な位置で収束する。

2.3 フレネルレンズを用いた試作の原理

フレネルレンズを用いたプロトタイプの原理を説明する。このシステムは、光源の仮想画像を空中ディスプレイの光源として使用する光学セットアップである。光源は、図3に示すように、フレネルレンズの焦点距離内に配置される。

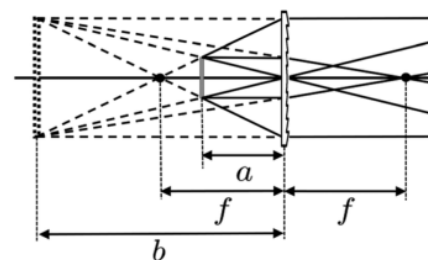


図3 フレネルレンズによる仮想画像形成。

aerial images did not appear to be at the image formation position but rather seemed attached to the beam splitter. The cause of the aerial image not appearing to float is not currently known. Our hypothesis is that it could be an observation distance issue or a black line at the connection of the retro-reflector. There is a possibility of giving misinformation due to incorrect recognition of the position of the sign in relation to the image. Therefore, we consider it necessary to be able to recognize it at the image formation position. Several methods for improving depth perception have been reported. One study suggested that placing a frame around the image enhances depth perception¹⁴. However, we do not want to place objects near the aerial image for use on the road. Thus, we wondered if we could achieve the same effect with an aerial guide formed by an aerial display. An aerial guide is a frame made of aerial images displayed around an aerial image. We believe that by drawing attention to the aerial guide, we can give the observer a floating sensation.

The purpose of this paper is to confirm the effectiveness of aerial guide. We will examine how having an aerial guide changes the observer's floating sensation using our prototype. Preliminary results from this study were presented at IDW '23¹⁵. In this paper, we studied differences in depth perception using method of a paired comparison.

2. Principle

2.1 Cues for three-dimensionality

Humans perceive objects as three-dimensional due to a combination of several factors. These factors can be divided into physiological and psychological categories. Physiological factors are cues obtained directly from the light information incident on the eye and include accommodation, convergence, binocular parallax, and motion parallax. Psychological factors are cues interpreted through sophisticated information processing in the brain and include various elements such as object size, perspective, occlusion or overlap, shading, and texture gradients. Figure 1 shows the relationship between depth perception cues and viewing distance¹⁶. Depth perception by binocular parallax is important at distances up to about 10 m. Motion parallax becomes more effective than binocular parallax at distances longer than 10 m. Cues from accommodation and convergence are effective for depth perception at distances of less than 1 m.

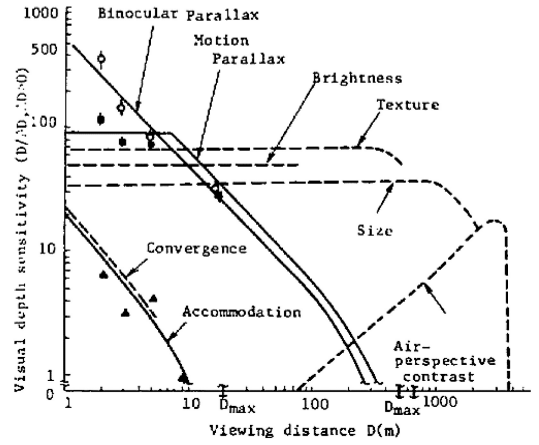


Fig. 1 Depth sensitivities of various cues for visual depth perception as a function of viewing distance. (This figure is taken from ref. [16] and used with permission of NASA.).

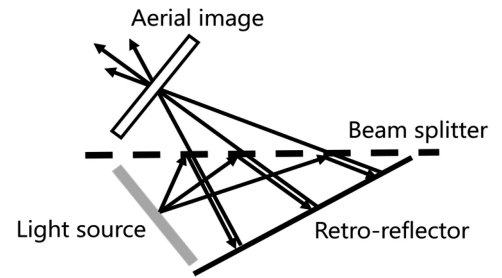


Fig. 2 Principle of AIRR.

2.2 AIRR

The principle of AIRR is shown in Fig. 2. Conventional AIRR consists of a light source, a retro-reflector, and a beam splitter. The light reflected by the beam splitter is reflected back along the incident direction by the retro-reflector. The retro-reflected light converges at the position that is plane-symmetrical to the light source with respect to the beam splitter.

2.3 Principle of prototype using Fresnel lens

We explain the principle of our prototype which uses a Fresnel lens. This system is an optical setup that uses the virtual image of a light source as the source for aerial display. The light source is positioned within the focal length of the Fresnel lens, as shown in Fig. 3. The light emitted from the source is refracted by the Fresnel lens

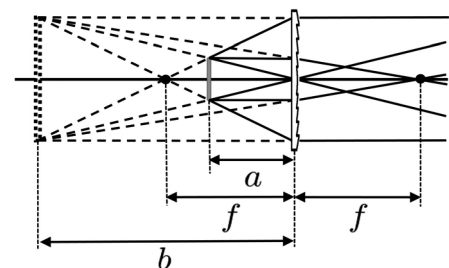


Fig. 3 Virtual image formation with a Fresnel lens.

光源から放出された光はフレネルレンズによって屈折され、拡大された仮想像を形成する。物体の位置と画像の位置はレンズメーカーの方程式を満たす：

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

ここで、 a は光源からフレネルレンズまでの距離、 b は仮想画像からフレネルレンズまでの距離、 f はフレネルレンズの焦点距離である。仮想画像の大きさは、以下の式で求められる。

$$\beta = \frac{b}{a}, \quad (2)$$

ここで、 β は横方向の倍率と呼ばれる。横方向の倍率は、光軸に垂直な平面で測定された物体の長さに対する画像の長さの比である。

次に、図4に示すフレネルレンズを用いたプロトタイプの実験原理を説明する。仮想画像からの光線はビームスプリッターによって反射される。ビームスプリッターで反射された光は、レトロリフレクターで入射方向に沿って反射される。ビームスプリッターを透過した光は、光源の拡大された空中像を形成するように収束する。その結果、ビームスプリッターから航空画像までの距離がリターから光源までの距離よりも長くなり、AIRR光学系が薄くなる。距離 d_1 はフレネルレンズからビームスプリッターまでの距離。航空画像AIの位置は $b + d_1$ で形成される。

この光学系を用いたプロトタイプを開発した。光源には、図9(a)に示すように、漢字で「ストップ」を表示するLEDパネルを使用した。文字サイズは120mm×120mmである。

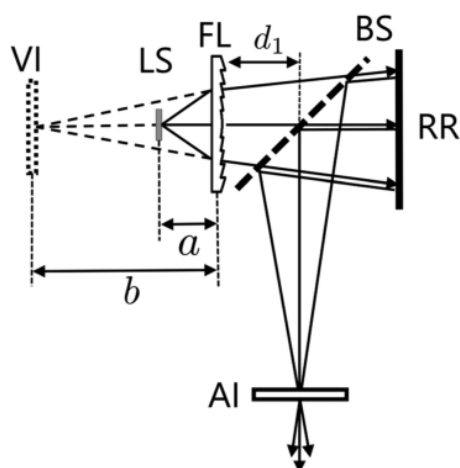


図4 試作した空中LEDの符号の構成。LS:光源、VI:仮想画像、FL:フレネルレンズ、BS:ビームスプリッター、RR:レトロフレクター、AI:空中画像。

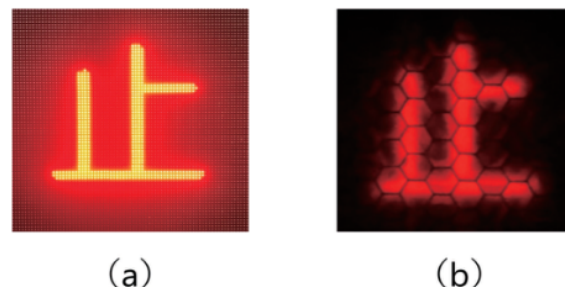


図5 プロトタイプで形成された航空写真。(a)は光源LEDパネル。(b)はプロトタイプで形成された航空画像AIである。

LEDの両側の平均半値角は120度である。ビームスプリッターは1800mm×900mmのテンパーガラス板で作製した。光源からフレネルレンズまでの距離 a は800mmであった。仮想画像からフレネルレンズまでの距離 b は2400mmであった。フレネルレンズからビームスプリッターまでの距離 d_1 は1.3mであった。レトロ反射鏡は、六角形に形成された透明なポリマーでできている。このプロトタイプ反射鏡は、レトロ反射鏡のコーナーキューブの大きさに起因する波動回折を低減するために設計された。このサンプル製品は、従来の製品よりも再帰反射鏡のコーナーキューブが大きい。これらの再帰反射板を約1000mm×1300mmの大きさになるように接続した。空中画像を見ると、再帰反射板同士のつながりが黒い線になっている。図5は、その時点で形成された光源と航空写真の写真である。航空画像の位置はビームスプリッターから3.7mであった。

2.4 航空ガイド

これまでの研究で、物体の近くにフレームを置くと、奥行き知覚に影響を与えることが明らかになっている¹⁴⁾。空撮画像で形成されたフレームでも同じ効果が得られるかどうかを検討する。エアリアルガイドとは、航空画像の周りに表示される航空画像で構成されるフレームである。航空ガイドの目的は、観察者の注意を引きつけることである。エアリアルガイドは、図6に示すように、同じ光源で作ることも、異なる光源で作ることもできる。異なる光源で作られた場合、ガイドの画像形成位置を変更することができる。空中ガイドでは、回転、拡大、まばたきなどの動きも例として取り入れることができる。

3. 実験と結果

3.1 航空ガイドの効果

プロトタイプを用いて、複数の観察者に対して視認性テストを実施した。浮いているように見えるかどうかを回答してもらった。

【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。

lens to form an enlarged virtual image. The position of the object and the image position satisfy the lens maker's equation:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

where a is the distance from the light source to the Fresnel lens, b is the distance from the virtual image to the Fresnel lens, and f is the focal length of the Fresnel lens. The size of the virtual image is obtained by the following equation:

$$\beta = \frac{b}{a}, \quad (2)$$

where β is called the lateral magnification. Lateral magnification is the ratio of image length to object length measured in planes that are perpendicular to the optical axis.

Next, we explain the principle of our prototype using a Fresnel lens as shown in Fig. 4. Light rays from the virtual image are reflected by the beam splitter. The light reflected by the beam splitter is then reflected back along the incident direction by the retro-reflector. The light transmitted through the beam splitter converges to form an enlarged aerial image of the light source. As a result, the distance from the beam splitter to the aerial image is longer than the distance from the light source, and the AIRR optics become thinner. Distance d_1 is the distance from the Fresnel lens to the beam splitter. The position of the aerial image AI is formed by $b + d_1$.

We have developed a prototype using this optical system. For the light source, we used an LED panel that displays "stop" in kanji, as shown Fig. 9 (a). The character size was 120 mm × 120 mm. The LEDs have

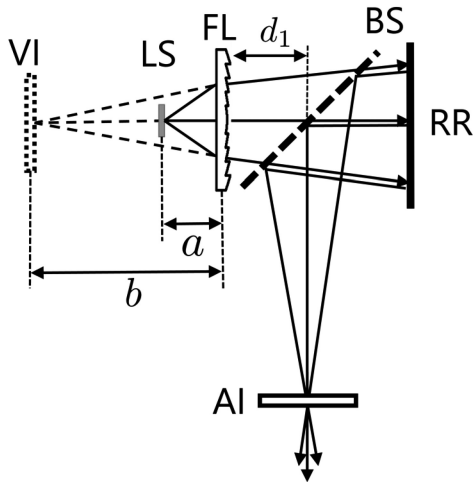


Fig. 4 Configuration of our prototype aerial LED signs. LS: Light source, VI: Virtual image, FL: Fresnel lens, BS: Beam splitter, RR: Retro-reflector, AI: Aerial image.

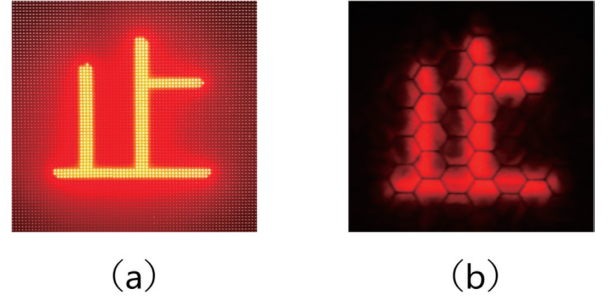


Fig. 5 Aerial image formed by the prototype. (a) is light source LED panel. (b) is an aerial image AI formed by prototype.

an average half value angle of 120 degrees for both sides. The beam splitters were made of 1800 mm × 900 mm tempered glass plates. The distance a from the light source to the Fresnel lens was 800 mm. The distance b from the virtual image to the Fresnel lens was 2400 mm. The distance d_1 from the Fresnel lens to the beam splitter was 1.3 m. The retro-reflector was made of a transparent polymer formed into hexagonal shapes. This prototype reflector was designed to reduce wave diffraction, which occurs due to the size of the corner-cubes in the retro-reflector. This sample product has a larger corner-cube in the retro-reflector than conventional products. A number of these retro-reflectors were connected to form a size of about 1000 mm × 1300 mm. The connection between retro-reflectors is the black line when looking at the aerial image. Figure 5 is a photograph of the light source and the aerial image formed at that time. Position of aerial image was 3.7 m from the beam splitter.

2.4 Aerial guide

Previous studies have revealed that placing a frame near an object can affect depth perception¹⁴⁾. We consider whether the same effect could be achieved with a frame formed by an aerial image. An aerial guide is a frame that is made up of aerial images that are displayed around an aerial image. The aim of aerial guide is to draw the observer's attention to it. The aerial guide can be made with the same light source, as shown in Fig. 6 or by using different light source. When made with a different light source, the guide's image formation position can be changed. Aerial guide can also incorporate movements such as rotation, magnification, and blinking as examples.

3. Experiments and Results

3.1 Effects of aerial guide

We conducted visibility tests on several observers by use of our prototype. We asked them to indicate whether they appeared to be floating. The observer is asked to

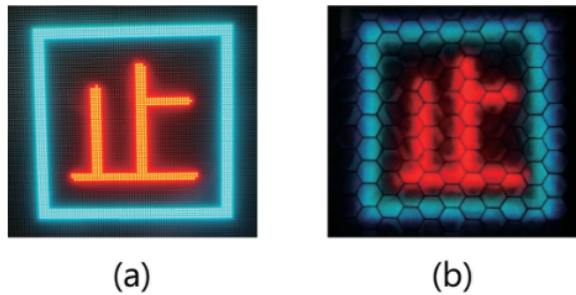


図6 エアリアルガイドの構成図航空画像の周りのシアンフレームが航空ガイドである。(a)は光源LEDパネル。(b)はプロトタイプで形成された航空画像AIである。

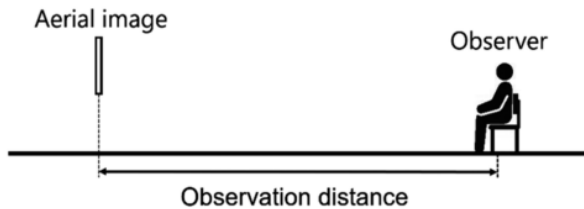


図7 視認性テストの構成

観察者は、航空写真の "stop" という単語が、ビームスプリッターに対する相対的な位置に基づいて浮いているように見えるかどうかを判断するように求められる。つまり、観察者は、航空写真がビームスプリッターに対して目の前に見えるかどうかを判断するように求められた。オブザーバーの数は9名であった。実験場所を図7に示す。観察距離は10m、15m、20mである。距離が短くなるにつれて、単語が大きくなり、ガイドが見えにくくなる。観察者に表示される3種類の航空写真: 通常、停止、回転。Normalは、図5(b)に示すように、ガイドを表示しない航空写真である。図6に示すように、同じ光源で空中ガイドを形成した。ストップはガイドのみを表示し、ローテーションはガイドを回転させる。ガイドを2秒ごとに1周ずつ回転させた。実験は、屋内照明あり(平均照明: 1640 lx)と屋内照明なしの2つの照明条件下で行われ、各観察者は3回繰り返した。

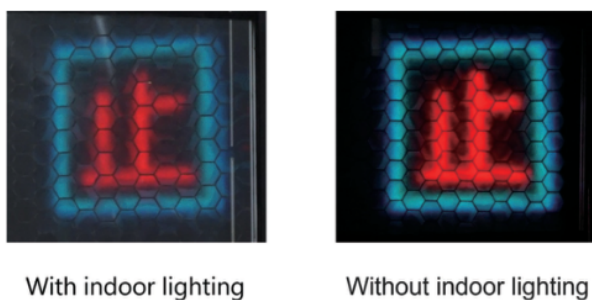


Fig. 8 Visibility of aerial image. The left figure shows results with indoor lighting, and the right figure shows result without indoor lighting.

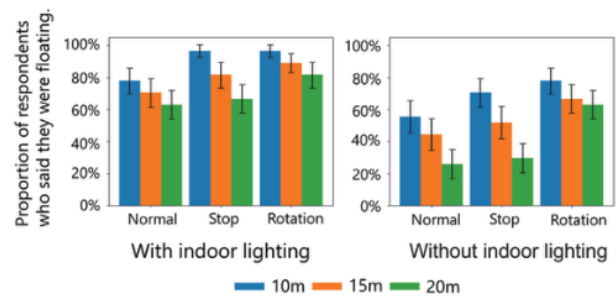


図9 視認性テストの結果左のグラフは屋内照明を使用した結果、右のグラフは屋内照明を使用しない結果である。

図8は、照明条件を変えた場合の航空写真である。ビームスプリッターは暗室でも光源からの光で照らされていた。

実験結果を図9に示す。縦軸は、フローティングしていると答えた回答者の割合である。エラーバーは標準誤差を示す。各因子の主効果を評価し、因子間の潜在的な相互作用を調べるために、3因子混合ANOVAを実施した。分析した要因は、3種類のガイド(通常、停止、回転)、3種類の距離(10m、15m、20m)、2種類の明るさ(室内照明の有無)である。3因子混合ANOVAの結果、有意な主効果は、ガイド因子($F(2, 144) = 4.64, p = 0.011, \eta^2 = 0.06$)、距離因子($F(2, 144) = 4.86, p = 0.008, \eta^2 = 0.07$)、明るさ因子($F(1, 144) = 17.46, p < 0.001, \eta^2 = 0.12$)で観察された。しかし、ガイドと距離因子($F(4, 144) = 0.32, p = 0.866, \eta^2 < 0.01$)、ガイドと明るさ因子($F(2, 144) = 0.29, p = 0.752, \eta^2 < 0.01$)、距離と要因、明るさ要因($F(2, 144) = 0.12, p = 0.890, \eta^2 < 0.01$)、二元交互作用効果($F(4, 144) = 0.04, p = 0.997, \eta^2 < 0.01$)。その後、ポストホックテストにより、ガイドではNormalとRotationの間に($p = 0.012$)、距離では "10 m" と "20 m" の間に($p = 0.009$)、室内照明の有無にかかわらず($p < 0.001$)有意差があることが示された。これらの結果は、ガイドの回転が観察者の浮遊感覚に影響を与えることを示唆している。浮遊感覚も距離が近いほど増強される。また、全体的な結果は、屋内照明の方が優れていた。

3.2 色による奥行き知覚の違い

エアリアルガイドの効果について、いくつかの仮説を提案する。一つの仮説は、色によって効果にばらつきがあるのではないかとということである。その結果、一対比較法を用いて航空写真の奥行き知覚を評価した。

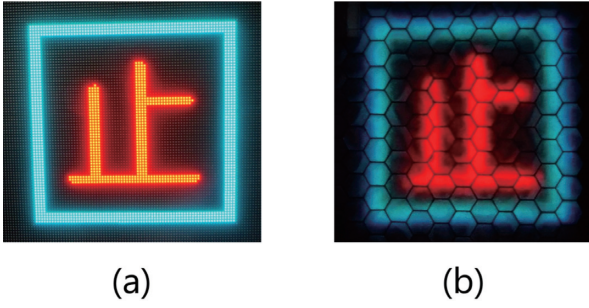


Fig. 6 Diagram of the aerial guide. The cyan frame around the aerial image is the aerial guide. (a) is light source LED panel. (b) is an aerial image AI formed by prototype.

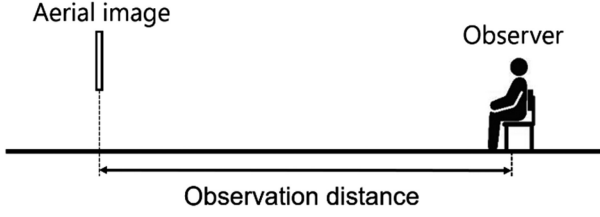


Fig. 7 Configuration of the visibility test.

determine whether the word "stop" in the aerial image appears to float based on its position relative to the beam splitter. In other words, the observer was asked to determine if the aerial image appears to be in front of them relative to the beam splitter. The number of observers was nine. The location of the experiment is shown in Fig. 7. Observation distances were 10 m, 15 m, and 20 m. As the distance decreases, the word gets larger, and the guides become harder to see. Three types of aerial images displayed to the observer: Normal, Stop, and Rotation. Normal is an aerial image that displays no guides, as shown in Fig. 5 (b). The aerial guide was formed with the same light source, as shown in Fig. 6. Stop is only displaying the guide; Rotation rotates the guide. The guide was rotated at a speed of one lap every two seconds. The experiment was conducted under two lighting conditions: with indoor lighting (Average illumination: 1640 lx) and without indoor lighting, with each observer repeating three times. Figure 8 shows

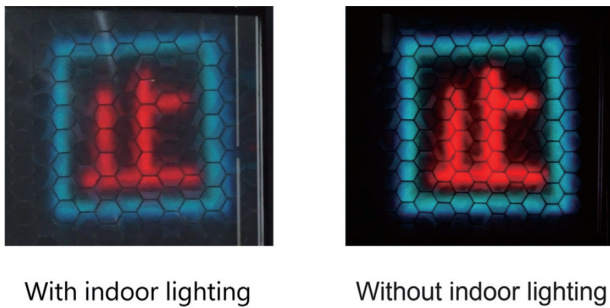


Fig. 8 Visibility of aerial image. The left figure shows results with indoor lighting, and the right figure shows result without indoor lighting.

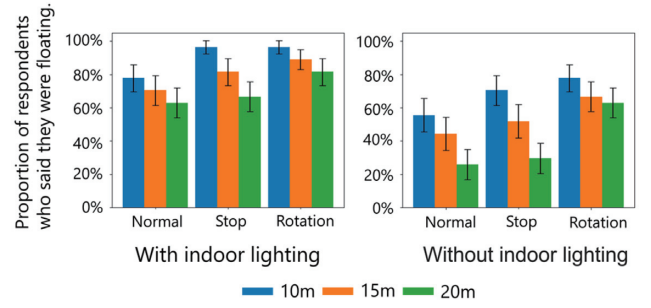


Fig. 9 Results of visibility test. The left graph shows results with indoor lighting, and the right graph shows result without indoor lighting.

photographs of aerial images under different lighting conditions. The beam splitter was illuminated by the light from the light source even in the darkroom.

The experimental results are presented in Fig. 9. The vertical axis represents the percentage of respondents who said they were floating. Error bars indicate the standard errors. A three-factor mixed ANOVA was conducted to assess the main effects of each factor and to examine potential interactions between them. The factors analyzed include three types of guides (Normal, Stop, Rotation), three types of distances (10 m, 15 m, 20 m), and two types of brightness (with or without indoor lighting). The results of the three-factor mixed ANOVA, Significant main effects were observed in the guide factor ($F(2, 144) = 4.64, p = 0.011, \eta^2 = 0.06$), the distance factor ($F(2, 144) = 4.86, p = 0.008, \eta^2 = 0.07$), and the brightness factor ($F(1, 144) = 17.46, p < 0.001, \eta^2 = 0.12$). However, no significant effects were found in the simple interactions between guide and distance factors ($F(4, 144) = 0.32, p = 0.866, \eta^2 < 0.01$), guide and brightness factors ($F(2, 144) = 0.29, p = 0.752, \eta^2 < 0.01$), distance and factors and brightness factors ($F(2, 144) = 0.12, p = 0.890, \eta^2 < 0.01$), and two-way interaction effect ($F(4, 144) = 0.04, p = 0.997, \eta^2 < 0.01$). Subsequently, post-hoc tests showed that there were significant differences between Normal and Rotation in guide ($p = 0.012$) and between "10 m" and "20 m" in distance ($p = 0.009$), with and without indoor lighting ($p < 0.001$). These results suggest that the rotation of the guide affects the observer's floating sensation. The floating sensation also enhanced with closer distance. In addition, the overall result was better with indoor lighting.

3.2 Differences in depth perception by color

We propose several hypotheses regarding the effects of aerial guide. One hypothesis is that there may be variations in effectiveness based on color. Consequently, we assessed depth perception of aerial images employing the paired comparison method. The paired comparison

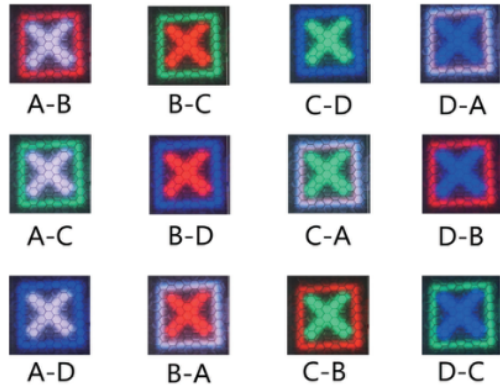


図10 実験に使用した表示画像

ペア比較法では、ペアを形成して複数のサンプルタイプ(3つ以上)を評価し、2つのサンプルのうちどちらがより強い、より望ましいかを判断するために比較判定を行う。一対比較の方法はScheffeの方法¹⁷⁾¹⁸⁾に基づく。

実験方法について説明する。クロスマークとガイドの航空写真を示す。図10に示すように、各オブジェクト(A:白、B:赤、C:緑、D:青)の色を重ねないように対にする。すべての組み合わせは、異なる順序で、ランダムに示されている。テストディスプレイは10秒間表示され、その後グレイディスプレイは5秒間表示される。観察者は、十字マークに基づいてガイドの深さを判断するよう求められる。奥行き知覚のスコアは、背中(-2)、小さな背中(-1)、同じ(0)、小さな前面(+1)、前面(+2)に見られる。観測距離は10mであった。実験は、部屋の条件のために実験室が完全に暗くならないため、部屋の照明を点灯して行った。実験開始時と終了時の照度を測定したところ、誤差の5%以内であることが確認された。

表1は、4色の航空画像にScheffeの方法を適用した場合の評価結果である。9人の観察者の結果から、各スコアの合計頻度と各ペアの合計スコアを算出した。各ペアの平均評点と、各刺激の表示順序による差の平均値 $\hat{\pi}_{ij}$ を求め、心理尺度値 $\alpha \sim_i$ を以下の式(3)のように算出し、各刺激の効果を測定した。

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{N} \sum_j \hat{\pi}_{ij}, \quad (3)$$

where $\hat{\pi}_{ii} = 0$, $\hat{\pi}_{ji} = -\hat{\pi}_{ij}$, N is the total number of factors ($N = 4$). 結果を表2にまとめた。

The psychological scale values $\hat{\alpha}_i$ were plotted on a

表1 空撮画像の色に対するScheffeの手法の評価結果。

Pair of colors	Grade of depth perception					Mean grade	$\hat{\pi}_{ij} = \frac{\hat{u}_{ij} - \hat{u}_{ji}}{2}$
(i - j)	-2	-1	0	+1	+2	$\hat{u}_{ij}$	$\hat{\pi}_{ij}$
A - B	0	1	4	4	0	0.333	0.278
B - A	0	3	5	1	0	-0.222	
A - C	0	2	3	4	0	0.222	0.111
C - A	0	3	3	3	0	0.000	
A - D	1	7	0	1	0	-0.889	-0.667
D - A	0	1	3	5	0	0.444	
B - C	0	1	6	2	0	0.111	-0.111
C - B	0	0	6	3	0	0.333	
B - D	2	5	0	2	0	-0.778	-0.889
D - B	0	0	1	7	1	1.000	
C - D	2	5	0	2	0	-0.778	-0.889
D - C	0	0	1	7	1	1.000	
Total frequency	5	28	32	41	2		

表2 心理的尺度の計算結果について、その算出方法について

i	A	B	C	D
$\hat{\alpha}_i$	-0.069	-0.319	-0.222	0.611

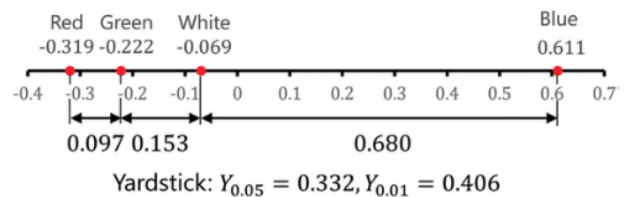


Fig. 11 Scale value of depth perception by color.

数列を図11に示す。 $Y_{0.05}$ と $Y_{0.01}$ は、それぞれ有意水準を0.05と0.01に設定したときのヤードスティックである。図11の各色の値のずれを見ると、青と他の色とのずれは $Y_{0.01}$ より大きい。その他のギャップの組は $Y_{0.05}$ より小さく、有意差はなかった。

3.3 動きによる奥行き知覚の違い次に、動きを加えたときの色の有意な違いを調べる。ガイドを動かすことで、観察者はコンテンツとガイドの重なり焦点を当て、浮遊感を高めると考えた。3.2節と同様の試験方法を実施した。観察者にクロスマークと回転ガイドを見せた。図10に示すように、重なりのない各オブジェクトの色をペアにする。図12は、回転中の見え方を示している。ガイドが移動すると、オブジェクトが重なり合う。表3は、4色の航空画像にScheffeの方法を適用した場合の評価結果である。心理尺度値 $\alpha \sim_i$ は、各刺激の効果を測定するために、以下の式(3)のように計算した。結果を表4にまとめる。

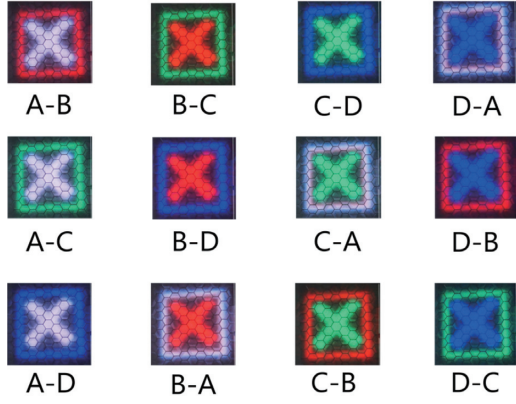


Fig. 10 Displayed images used for experiments.

method involves evaluating multiple sample types (three or more) by forming pairs and making comparative judgments to determine which of the two samples is stronger or more desirable. The method of paired comparison is based on Scheffe's method^{(17) (18)}.

We explain the experimental method. We show the aerial images of the cross mark and the guide. Pair the colors of each object (A: white, B: red, C: green, D: blue) without overlap, as shown in Figure 10. All combinations are presented in different order and at random. The test display is presented for 10 seconds, after which a gray display is presented for 5 seconds. The observer is asked to judge the depth of the guide based on the cross mark. Scores of the depth perception are seen in the back (-2), seen in the little back (-1), seen in the same (0), seen in the little front (+1), seen in the front (+2). Observation distances were 10 m. The experiment was conducted with room lighting on because the laboratory could not be completely darkened for reasons of room conditions. We measured the illuminance at the beginning and the end of the experiment and confirmed that it was within 5 % of the errors.

Table 1 shows the evaluation results of Scheffe's method applied for the four colors of aerial image. From the results of nine observers, the total frequency for each score and the total score for each pair were calculated. The mean grade of each pair and $\hat{\pi}_{ij}$, the average of difference in terms of the order in which each stimulus was displayed, were obtained, and a psychological scale value $\hat{\alpha}_i$ was calculated as following Equation (3) to measure the effect of each stimulus.

$$\hat{\alpha}_i = \frac{1}{N} \sum_j^N \hat{\pi}_{ij}, \quad (3)$$

where $\hat{\pi}_{ii} = 0$, $\hat{\pi}_{ji} = -\hat{\pi}_{ij}$, N is the total number of factors ($N = 4$). The results are summarized in Table 2.

The psychological scale values $\hat{\alpha}_i$ were plotted on a

Table 1 Evaluation results of Scheffe's method to color of aerial image.

Pair of colors	Grade of depth perception					Mean grade	$\hat{\pi}_{ij} = \frac{\hat{u}_{ij} - \hat{u}_{ji}}{2}$
(i - j)	-2	-1	0	+1	+2	Total score	$\hat{\pi}_{ij}$
A - B	0	1	4	4	0	3	0.333
B - A	0	3	5	1	0	-2	-0.222
A - C	0	2	3	4	0	2	0.222
C - A	0	3	3	3	0	0	0.000
A - D	1	7	0	1	0	-8	-0.889
D - A	0	1	3	5	0	4	0.444
B - C	0	1	6	2	0	1	0.111
C - B	0	0	6	3	0	3	0.333
B - D	2	5	0	2	0	-7	-0.778
D - B	0	0	1	7	1	9	1.000
C - D	2	5	0	2	0	-7	-0.778
D - C	0	0	1	7	1	9	1.000
Total frequency	5	28	32	41	2		

Table 2 The results of the calculation of the psychological scale.

i	A	B	C	D
$\hat{\alpha}_i$	-0.069	-0.319	-0.222	0.611

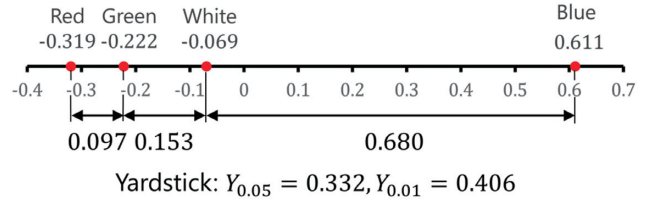


Fig. 11 Scale value of depth perception by color.

number line, as shown in Fig. 11. $Y_{0.05}$ and $Y_{0.01}$ were yardsticks when the significance level was set to 0.05 and 0.01 respectively. Looking at the gaps between the values of each color in Fig. 11, the gap between blue and the other colors was bigger than $Y_{0.01}$. Other pairs of gaps were smaller than $Y_{0.05}$ and not significantly different.

3.3 Differences in depth perception by motion

Next, we study significant differences in color when we add motion. We thought that by moving the guide, the observer would focus on the overlap between the content and the guide, enhancing the floating sensation. We performed the same method of testing as in Section 3.2. We showed the observer the cross mark and the rotating guide. Pair the colors of each object without overlap, as shown in Fig. 10. Figure 12 shows how it looks during rotation. Objects overlap each other as the guide moves. Table 3 shows the evaluation results of Scheffe's method applied for the four colors of aerial image. A psychological scale value $\hat{\alpha}_i$ was calculated as following Equation (3) to measure the effect of each stimulus. The results are summarized in Table 4.

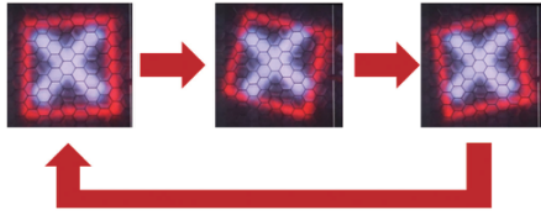


図12 ガイド回転時のバリエーション

表3 空撮画像の色に対するScheffeの手法の評価結果。

Pair of colors	Grade of depth perception						Mean grade	$\hat{\pi}_{ij} = \frac{\hat{u}_{ij} - \hat{u}_{ji}}{2}$
(i - j)	-2	-1	0	+1	+2	Total score	$\hat{u}_{ij}$	$\hat{\pi}_{ij}$
A - B	0	7	2	0	0	-7	0.778	0.111
B - A	0	9	0	0	0	-9	-1.000	
A - C	1	5	3	0	0	-7	-0.778	0.167
C - A	1	8	0	0	0	-10	-1.111	
A - D	3	4	1	1	0	-9	-1.000	-0.167
D - A	0	6	3	0	0	-6	-0.667	
B - C	0	9	0	0	0	-9	-1.000	-0.056
C - B	0	8	1	0	0	-8	-0.889	
B - D	3	4	0	2	0	-8	-0.889	-0.111
D - B	0	6	3	0	0	-6	0.667	
C - D	3	5	0	1	0	-10	-1.111	-0.222
D - C	0	6	3	0	0	-6	0.667	
Total frequency	11	77	16	4	0			

表4 心理的尺度の計算結果について、その算出方法について

i	A	B	C	D
$\hat{\alpha}_i$	0.028	-0.069	-0.083	0.125

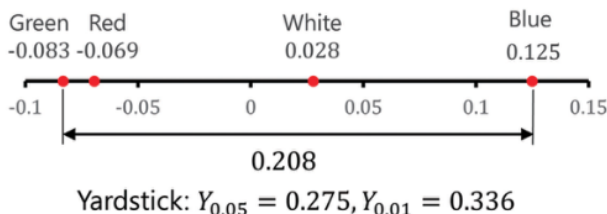


図13 運動の場合における色による奥行き知覚のスケール値。

図13の各色の値間のギャップを見る。すべてのギャップの組は $Y_{0.05}$ より小さく、有意差はなかった。なお、Scheffeの方法はII型統計誤差¹⁹⁾の増加につながる可能性があるため、基準以下の刺激間に差がないという結論は導き出さない方が良い。この結果から、ガイドに動きを加えることで、色の有意差がなくなる可能性が高いことがわかる。

3.4 ステレオカメラによる色収差測定

空中画像形成の位置に対する色の影響を検討した。本実験ではステレオカメラ(Qoo Cam EGO)を使用した。

表 5 ステレオカメラの仕様

Focal length	5mm
Image sensor size	6.4mm × 4.8mm
Image size (Single image)	4000pixel × 3000pixel
Distance between lenses	65mm

ステレオカメラとは、別々のイメージセンサーを備えた2つのレンズを使い、同じシーンの画像を異なる角度から撮影するカメラの一種である。測定に使用した実験用光学系を図4に示す。航空写真から約1mの位置にステレオカメラを配置した。表 5 にステレオカメラの仕様の概要を示す。表示された画像は各色の線である。次に、ステレオカメラを用いた距離計測の原理を説明する。ステレオ画像から両眼視差を算出する。両眼視差は以下の式で表されます：

$$D = \frac{Sx}{W}, \quad (4)$$

ここで、 W は水平画像サイズ、 S は水平画像センサーサイズ、 x はステレオ画像における航空画像のシフトである。ステレオカメラの仕様では、 $W = 4000$ ピクセル、 $S = 6.4\text{mm}$ となる。視聴位置 Z からの見かけの画像距離は、以下の式で表される：

$$Z = \frac{BF}{D}, \quad (5)$$

ここで、 B はレンズ間距離、 F は焦点距離、 D は両眼視差である。ステレオカメラの仕様では、 $B = 65\text{ mm}$ 、 $F = 5\text{ mm}$ 。

図14はステレオカメラで撮影した写真である。これらの左右の画像から航空画像 x のずれを求め、式(4)と式(5)を用いて画像形成位置 Z を計算する。測定結果を表6にまとめた。赤から青への色の変化は、画像形成位置で約16 mmのずれであることがわかった。

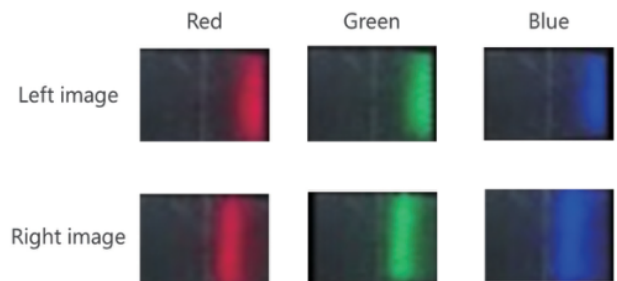


図14 ステレオカメラで撮影した各色の写真。

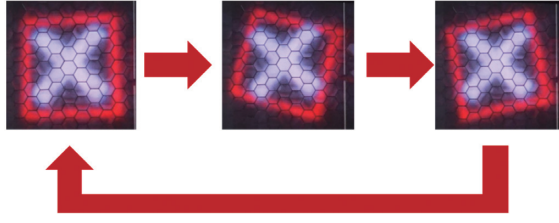


Fig. 12 The variation during guide rotation.

Table 3 Evaluation results of Scheffe's method to color of aerial image.

Pair of colors	Grade of depth perception						Mean grade	$\hat{\pi}_{ij} = \frac{\hat{u}_{ij} - \hat{u}_{ji}}{2}$
(i - j)	-2	-1	0	+1	+2	Total score	$\hat{u}_{ij}$	$\hat{\pi}_{ij}$
A - B	0	7	2	0	0	-7	0.778	0.111
B - A	0	9	0	0	0	-9	-1.000	
A - C	1	5	3	0	0	-7	-0.778	0.167
C - A	1	8	0	0	0	-10	-1.111	
A - D	3	4	1	1	0	-9	-1.000	-0.167
D - A	0	6	3	0	0	-6	-0.667	
B - C	0	9	0	0	0	-9	-1.000	-0.056
C - B	0	8	1	0	0	-8	-0.889	
B - D	3	4	0	2	0	-8	-0.889	-0.111
D - B	0	6	3	0	0	-6	0.667	
C - D	3	5	0	1	0	-10	-1.111	-0.222
D - C	0	6	3	0	0	-6	0.667	
Total frequency	11	77	16	4	0			

Table 4 The results of the calculation of the psychological scale.

i	A	B	C	D
$\hat{\alpha}_i$	0.028	-0.069	-0.083	0.125

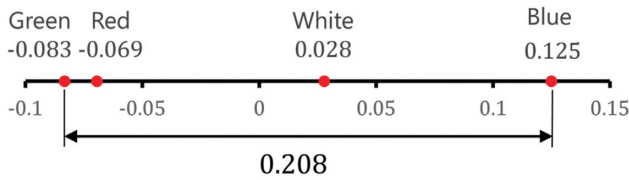
Yardstick: $Y_{0.05} = 0.275, Y_{0.01} = 0.336$

Fig. 13 Scale value of depth perception by color in the case of motion.

Looking at the gaps between the values of each color in Fig. 13. All pairs of gaps were smaller than $Y_{0.05}$ and not significantly different. Note that we should not derive the conclusion of no difference between the stimuli below the yardstick because Scheffe's method may lead to an increase in type-II statistical errors¹⁹⁾. The results indicate that adding movement to the guide will likely eliminate significant differences in color.

3.4 Chromatic aberration measurement with a stereo camera

We examined the effect of color on the position of the aerial image formation. We used a stereo camera (Qoo Cam EGO) for this experiment. A stereo camera is a

Table 5 Stereo camera specification.

Focal length	5mm
Image sensor size	6.4mm × 4.8mm
Image size (Single image)	4000pixel × 3000 pixel
Distance between lenses	65mm

type of camera that uses two lenses with separate image sensors to capture images of the same scene from different angles. The experimental optical system used for the measurements is shown in Fig. 4. Stereo camera positioned about 1 m from the aerial image. Table 5 shows a summary of the stereo camera specifications. The displayed image is a line of each color. Next, we explain the principle of distance measurement using a stereo camera. Binocular parallax is calculated from the stereo images. Binocular parallax is expressed by the following equation:

$$D = \frac{Sx}{W}, \quad (4)$$

where W is horizontal image size, S is horizontal image sensor size, and x is shift of the aerial image in the stereo images. Stereo camera specifications give $W = 4000$ pixel, $S = 6.4$ mm. Apparent image distance from viewing position Z is expressed by the following equation:

$$Z = \frac{BF}{D}, \quad (5)$$

where B is distance between lenses, F is focal length, and D is binocular parallax. Stereo camera specifications give $B = 65$ mm, $F = 5$ mm.

Figure 14 is a photograph taken by a stereo camera. We determine the shift of the aerial image x from these left and right images and calculate the image formation position Z using Equations (4) and (5). The measurement results are summarized in Table 6. The color change from red to blue was found to be a shift of about 16 mm in the image formation position.

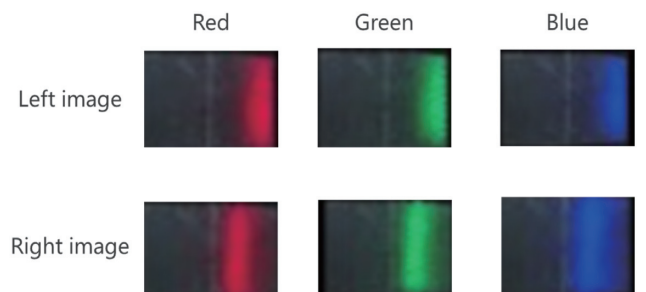


Fig. 14 Photographs taken by stereo camera in each color.

表 6 ステレオカメラの測定結果

Color	Red	Green	Blue
x (pixel)	199	197	196
Z (mm)	1020.7	1031.1	1036.4

4. Discussion

実験から観察されたことについて説明する。まず、観測距離と浮動小数点数について見てみましょう。3.1 節の実験結果から、10m と 20m での結果に大きな差があることがわかる。つまり、距離が長くなるにつれて、「浮遊しているように見える」と答えた回答者の割合が減少していることがわかる。距離が長くなるにつれて浮遊しているように見える回答者の割合が減少するのは、両眼視差の影響が減少しているためと考えられる。また、この実験では、両眼視差が距離の変化に最も影響されると考える。図1より、両眼視差は10m程度までの距離で最も強いことがわかる。距離が長くなると、運動視差などの他の要因も強くなる傾向がある。したがって、距離が離れると、浮遊しているように見える人の数が減ると仮定する。実際の使用を検討する場合、約100mからの浮き感覚が重要である。両眼視差以外の要因も重要であると考えられる。長距離浮遊については後述する。また、屋内照明の有無によっても有意な差が見られた。明るい状態での浮遊感覚の向上は、ビームスプリッタと航空画像の違いをより容易に認識できるためと考えられる。また、これは、デバイスまでの距離の理解が容易になるなど、情報量が増加するためであると考えられる。

次に、エアリアルガイドの効果について考察する。3.1節の結果、NormalとStopの間に有意な差は見られなかった。つまり、ガイドだけでは浮遊感覚に影響を与えないと考えることができる。しかし、3.2節の実験結果では、クロスマークとガイドの深さに違いがあることがわかる。この実験では有意差は認められなかったが、浮遊感覚を増強するために、ガイドのサイズ、形状、位置を調整することができると考えている。特に色の違いは、ガイドからの違いを認識しやすくするための重要な要素である。

個人差はあるが、3.2節の実験結果では、ガイドを動かさない場合、他の色よりも青が深く見えることが示された。3.4節で述べた実験では、赤と青の画像形成位置の差は約16mmであった。このことから、色による画像形成位置の違いはあまりないことがわかる。しかし、ガイドからの距離の差は16mm以上と感じられる。奥行きの違いは色の違いによって引き起こされるという仮説が1つある。心理学的観点からは、色による進歩や退行が報告されている²⁰⁾。これは、赤が正面、青が背面に見える現象である。また、光学的な観点からも、色収差による網膜像のずれが報告されている²¹⁾。また、航空写真の輝度により、青色は他の色よりも深く見えるという仮説もある。2.1節より、明るさは奥行き知覚に影響を与える要因である。これまでの研究で、明るさが画像サイズと距離の知覚に影響することが示されている²²⁾。各色の航空画像の実際の輝度は、白:51.9 cd/m² 赤:22.3 cd/m²、緑:28.4 cd/m²、青:3.7 cd/m²であった: 3.7 cd/m²であった。したがって、他の色に比べて青色の明るさが低いことが、有意差の理由であると考えられる。また、白は輝度が高いが、有意差は小さい。これは、白色光がRGB LEDの混合物であるためと考えられる。色収差などの問題があるため、赤や緑に比べて有意差は少ないと考えられる。

次に、エアリアルガイドの動きについて説明する。3.1節の実験結果から、ガイドの回転は観察者の浮遊感覚に大きな影響を与えることがわかる。3.3節の実験結果から、動きを加えることで、有意な色差がなくなることがわかる。しかし、ほとんどの人が、十字マークがガイドよりも前方を向いていることに気づいた。これはオブジェクトの重なり効果だと思う。実験では、ガイドの回転中にテキストとマークが重なる場合、優先的にマークを付けた。これらの絵画的な手がかりは、奥行き知覚において重要な要素である。また、ガイドの回転がフレーム効果¹⁴⁾を高めたり、バクシオン²³⁾のような動きの錯覚を引き起こした可能性もある。回転ガイドの効果については、今後検討する予定である。

100m 程度までの長距離での浮遊感覚について説明する。

【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。

Table 6 The measurement results of the stereo camera.

Color	Red	Green	Blue
x (pixel)	199	197	196
Z (mm)	1020.7	1031.1	1036.4

4. Discussion

We discuss what we have observed from the experimental. First, we will look at the observation distance and the floating. The experimental result in Section 3.1 shows that there is a significant difference between the results at 10 m and 20 m. In other words, the percentage of respondents who said that they "seemed to be floating" decreased as the distance increased. We consider that the decrease in the percentage of respondents who see floating as the distance increases is due to a decrease in the effect of binocular parallax. We also consider binocular parallax to be the most affected by the change in distance in this experiment. Figure 1 shows that binocular parallax is strongest at distance up to about 10 m. At greater distances, other factors such as motion parallax tend to be stronger. Therefore, we assume that at greater distances, the number of people who appear to be floating is reduced. When considering actual use, the floating sensation from about 100 m is important. We consider that factors other than binocular parallax are also important. We will discuss long floating distance later. Significant differences also existed between with and without indoor lighting. The improvement in the floating sensation in bright conditions may be due to an easier perception of the difference between the beamsplitter and the aerial image. We also believe that this is due to an increase in the amount of information, such as an easier understanding of the distance to the device.

Next, we consider the effect of aerial guide. As a result of Section 3.1, no significant difference was found between Normal and Stop. So, it can be assumed that the guide by itself has no effect on the floating sensation. However, the experimental results in Section 3.2 show differences in the depth of the cross marks and guides. Although no significant difference was observed in this experiment, we believe that the size, shape and location of the guides could be adjusted to enhance the floating sensation. Especially the color difference is a significant factor in making it easier to recognize the difference

from the guide. Although there are individual differences, the experiment result in Section 3.2 showed that blue is seen deeper than other colors when the guide is not moved. In the experiment described in Section 3.4, the difference in image formation position between red and blue was about 16 mm. This suggests that there is not much difference in image formation position due to color. However, the difference in distance from the guide is felt to be more than 16 mm. We have one hypothesis that the difference in depth is caused by the difference in color. From a psychological perspective, advancement and regression by color have been reported²⁰⁾. This is a phenomenon in which red appears to be in the front and blue appears to be in the back. Also from an optical perspective, retinal image misalignment due to chromatic aberration has been reported²¹⁾. We have another hypothesis that blue appears deeper than other colors due to the luminance of the aerial image. From Section 2.1, brightness is a factor that affects depth perception. Previous study shows that brightness affects the perception of image size and distance²²⁾. The actual luminance of the aerial image of each color was measured to be white: 51.9 cd/m² red: 22.3 cd/m², green: 28.4 cd/m², and blue: 3.7 cd/m². Thus, we think that the low brightness of blue compared to other colors may be the reason for the significant difference. Also, white has a high luminance, yet the significant difference is small. We think this is because white light is a mixture of RGB LEDs. We would consider less significant differences than red and green due to issues such as chromatic aberration.

Next, we discuss the movement of aerial guides. The experimental results in Section 3.1 show that the rotation of the guide has a significant effect on the observer's floating sensation. The results of the experiments in Section 3.3 show that the addition of motion eliminates the significant color difference. However, most people found that the cross mark were looking more forward than the guide. We think this is an effect of overlapping objects. In the experiment, text and marks were given priority when they overlapped during guide rotation. These pictorial cues are an important factor in depth perception. It is also possible that the rotation of the guide may have increased the frame effect¹⁴⁾ or caused the illusion of motion such asvection²³⁾. The effects of rotating guides will be investigated in the future.

We will discuss the floating sensations at long distance of up to about 100 m. In this experiment,

この実験では、観測は最大20mでしかできなかった。実際の道路状況では、航空写真が約100mまで浮いているのを見ることができる。また、ターゲット画像形成位置が10m以上であると考え、図1より、100m地点では両眼視差よりも明るさなどの心理的要因の方が大きな影響を与えることがわかる。画像の大きさ、ガイドの動き方、航空画像の位置など、遠距離でも画像形成位置で画像を認識できるような最適な条件を見つける必要がある。この実験では、観察者は静止したまま航空画像を見た。道路上で使用する場合、移動するドライバーが実験の対象となる。これまでの研究で、観察者の動きや画像の大きさを変えることで、画像の奥行き知覚が向上することが示されている²⁴⁾。車の動きによって、観察者は運動視差を発生させる。その結果、実際のシステム使用時に運動視差の影響がより顕著になると予想される。これにより、航空画像の浮き沈みを強調することができる。今後、最も最適な表示方法を検討したい。

5. Conclusion

我々は、空撮ガイドで空撮画像を見る観察者が経験する浮遊感覚を向上させることに成功した。実験の結果、エアリアルガイドに動きを加えることが効果的であることがわかった。今後、フローティング効果のさらなる強化を検討する予定である。

本研究の一部は、日本学術振興会科研費番号20H05702の助成を受けた。

References

- 1) A. Pembuaian, S. Priyanto, L.B. Suparna: "The effect of road infrastructure on traffic accidents", *Atlan. Press. Adv. Eng. Res.* Vol. 186, 147-153 (2019)
- 2) Y. Fujino, D.M. Siringoringo: "Recent research and development programs for infrastructures maintenance, renovation and management in Japan", *Struct. Infrastruct. Eng.* Vol. 16, No. 1, 3-25 (2020)
- 3) C. Deac and L. Tarnu: "Considerations on the role of modernizing the road infrastructure in the prevention of road accidents," *MATEC Web of Conferences*, Vol. 290, 06004 (2019)
- 4) B. Javidi, A. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martinez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi and H. Yamamoto: "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing and display," *Opt. Express*, Vol. 28, No. 22, 32266-32293 (2020)
- 5) D. Miyazaki, Y. Maeda, S. Maekawa: "Floating three-dimensional image display using micro-mirror array imaging element," *Proc. of SPIE* 9495, 949508 (2015)
- 6) ASKA3D, <https://aska3d.com/en/index.html> (Accessed 20 June 2024)
- 7) H. Yamamoto, Y. Tomiyama and S. Suyama: "Floating aerial LED

- signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Opt. Express*, Vol. 22, 26919-26924 (2014)
- 8) M. Nakajima, K. Onuki, I. Amimori and H. Yamamoto: "Polarization State Analysis for Polarized Aerial Imaging by Retro-Reflection (PAIRR)," *Proc. IDW*, Vol. 22, 429-432 (2015)
- 9) K. Fujii, M. Yasugi, S. Maekawa and H. Yamamoto: "Reduction of retro-reflector and expansion of the viewpoint of an aerial image by the use of AIRR with transparent spheres," *OSA Continuum*, Vol. 4, 1207-1214 (2021)
- 10) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama and H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space Construction," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.34, No.5, 1175-1183 (2022)
- 11) D. Kudo, M. Yasugi, N. Ninomiya, S. Suyama and H. Yamamoto: "Reduction of converging distance change in an aquatic display formed with aerial imaging by retro-reflection in conjugated optical structure," *Opt. Express*, Vol. 31, 10965-10977 (2023)
- 12) S. Sakane, D. Kudo, N. Mukojima, Y. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Formation of multiple aerial LED signs in multiple lanes formed with AIRR by use of two beam splitters," *Opt. Rev.*, Vol. 30, 84-92 (2023)
- 13) S. Sakane, S. Suyama, H. Yamamoto: "Reducing thickness of long-distance aerial display system in AIRR using Fresnel lens," *Opt. Rev.*, Vol. 30, 657-663 (2023)
- 14) K. Shimono, A. Higashiyama, K. Kihara and Y. Matsuda: "A frame at a different depth than a photograph enhances the apparent depth in the photograph," *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 83, 3216-3226 (2021)
- 15) S. Sakane, S. Suyama, H. Yamamoto: "Aerial Guide Improves Sense of Floating of Aerial Image Formed with AIRR and Fresnel Lens," *Proc. IDW*, Vol. 30, 805-808 (2023)
- 16) S. Nagata, "How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures," *Spatial Displays and Spatial Instruments*, Vol. NASA-CP-10032 (1989)
- 17) S. Nagasawa, "IMPROVEMENT OF THE SCHEFFÉ'S METHOD FOR PAIRED COMPARISONS," *KANSEI Engineering International*, Vol. 3, 47-56 (2002)
- 18) H. Haga, H. Sasaki, K. Fujii, S. Onose, H. Yamamoto and K. Shigemura: "Effects of Directions of Lateral Motion on Perceived Strength in Fingertip," *ITE Trans. On MTA*, Vol. 11, 67-74 (2023)
- 19) H. Yamamoto, H. Nishimura, K. Uchida, K. Ono, Y. Hayasaki and S. Suyama: "Depth perception for moving images shown on a large LED display with an aperture grille," *Journal of the SID*, Vol. 17, No. 12, 1031-1036 (2009)
- 20) T. Oyama, T. Yamamura: "The effect of hue and brightness on the depth perception in normal and color-blind subjects," *Psychologia*, Vol. 3, 191-194 (1960)
- 21) A. Kitaoka, I. Kuriki and H. Ashida: "The Center-of-gravity Model of Chromostereopsis," *Ritsumeikan Journal of Human Sciences*, Vol. 11, 59-64 (2006)
- 22) A. Chapiro, T. Kunkel, R. Atkins and S. Daly: "Influence of Screen Size and Field of View on Perceived Brightness," *ACM Transaction on Applied Perception*, Vol. 15, No. 3, 1-13 (2018)
- 23) S. Palmisano, R.S. Allison, M.M. Schira and R.J. Barry: "Future challenge for vection research: definitions, functional significance, measure and neural bases," *Frontiers in Psychology*, Vol. 6 (2015)
- 24) K. Uehira, Y. Hanamura and M. Suzuki: "3-D Display Using Artificially Generated Motion Parallax and Psychological Factors of Image Size for Extended-Depth Perception," *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.41, 1227-1229 (2010)

observations could only be made at up to 20 m. For actual road conditions, the aerial image will need to be seen floating up to about 100 m. We also consider that the target image formation position is 10 m or more. Figure 1 shows that psychological factors such as brightness have a greater effect than binocular parallax at 100 m. We need to find the best conditions, such as the size of the image, the way the guide moves and the position of the aerial image, so that the image can be recognized at the image formation position even at long distances. In this experiment, observers viewed an aerial image while stationary. When used on the road, a moving driver is the subject of the experiment. Previous studies have shown that changing the observer's movement and the size of the image can improve the depth perception of the image²⁴. The movement of the car forces the observer to develop motion parallax. Consequently, the effect of motion parallax is expected to be more pronounced during actual system use. Thereby enhancing the floating sensation of the aerial image. We would like to consider the most optimal display method in the future.

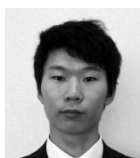
5. Conclusion

We have successfully enhanced the floating sensation experienced by the observer viewing the aerial image with an aerial guide. Experimental results showed that adding movement to the aerial guide was effective. We will consider further enhancement of the floating effect in the future.

A part of this research was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 20H05702.

References

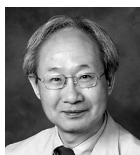
- 1) A. Pembuain, S. Priyanto, L.B. Suparma: "The effect of road infrastructure on traffic accidents", *Atlan. Press. Adv. Eng. Res.* Vol. 186, 147-153 (2019)
- 2) Y. Fujino, D.M. Siringoringo: "Recent research and development programs for infrastructures maintenance, renovation and management in Japan", *Struct. Infrastruct. Eng.* Vol. 16, No. 1, 3-25 (2020)
- 3) C. Deac and L. Tarnu: "Considerations on the role of modernizing the road infrastructure in the prevention of road accidents," *MATEC Web of Conferences*, Vol. 290, 06004 (2019)
- 4) B. Javidi, A. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi and H. Yamamoto: "Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing and display," *Opt. Express*, Vol. 28, No. 22, 32266-32293 (2020)
- 5) D. Miyazaki, Y. Maeda, S. Maekawa: "Floating three-dimensional image display using micro-mirror array imaging element," *Proc. of SPIE 9495*, 949508 (2015)
- 6) ASKA3D, <https://aska3d.com/en/index.html> (Accessed 20 June 2024)
- 7) H. Yamamoto, Y. Tomiyama and S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Opt. Express*, Vol. 22, 26919-26924 (2014)
- 8) M. Nakajima, K. Onuki, I. Amimori and H. Yamamoto: "Polarization State Analysis for Polarized Aerial Imaging by Retro-Reflection (PAIRR)," *Proc. IDW*, Vol. 22, 429-432 (2015)
- 9) K. Fujii, M. Yasugi, S. Maekawa and H. Yamamoto: "Reduction of retro-reflector and expansion of the viewpoint of an aerial image by the use of AIRR with transparent spheres," *OSA Continuum*, Vol. 4, 1207-1214 (2021)
- 10) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama and H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space Construction," *J. Robot. Mechatron.*, Vol.34, No.5, 1175-1183 (2022)
- 11) D. Kudo, M. Yasugi, N. Ninomiya, S. Suyama and H. Yamamoto: "Reduction of converging distance change in an aquatic display formed with aerial imaging by retro-reflection in conjugated optical structure," *Opt. Express*, Vol. 31, 10965-10977 (2023)
- 12) S. Sakane, D. Kudo, N. Mukojima, Y. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Formation of multiple aerial LED signs in multiple lanes formed with AIRR by use of two beam splitters," *Opt. Rev.*, Vol. 30, 84-92 (2023)
- 13) S. Sakane, S. Suyama, H. Yamamoto: "Reducing thickness of long-distance aerial display system in AIRR using Fresnel lens," *Opt. Rev.*, Vol. 30, 657-663 (2023)
- 14) K. Shimono, A. Higashiyama, K. Kihara and Y. Matsuda: "A frame at a different depth than a photograph enhances the apparent depth in the photograph," *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 83, 3216-3226 (2021)
- 15) S. Sakane, S. Suyama, H. Yamamoto: "Aerial Guide Improves Sense of Floating of Aerial Image Formed with AIRR and Fresnel Lens," *Proc. IDW*, Vol. 30, 805-808 (2023)
- 16) S. Nagata, "How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures," *Spatial Displays and Spatial Instruments*, Vol. NASA-CP-10032 (1989)
- 17) S. Nagasawa, "IMPROVEMENT OF THE SCHEFFÉ'S METHOD FOR PAIRED COMPARISONS," *KANSEI Engineering International*, Vol. 3, 47-56 (2002)
- 18) H. Haga, H. Sasaki, K. Fujii, S. Onose, H. Yamamoto and K. Shigemura: "Effects of Directions of Lateral Motion on Perceived Strength in Fingertip," *ITE Trans. On MTA*, Vol. 11, 67-74 (2023)
- 19) H. Yamamoto, H. Nishimura, K. Uchida, K. Ono, Y. Hayasaki and S. Suyama: "Depth perception for moving images shown on a large LED display with an aperture grille", *Journal of the SID*, Vol. 17, No. 12, 1031-1036 (2009)
- 20) T. Oyama, T. Yamamura: "The effect of hue and brightness on the depth perception in normal and color-blind subjects," *Psychologia*, Vol. 3, 191-194 (1960)
- 21) A. Kitaoka, I. Kuriki and H. Ashida: "The Center-of-gravity Model of Chromostereopsis," *Ritsumeikan Journal of Human Sciences*, Vol. 11, 59-64 (2006)
- 22) A. Chapiro, T. Kunkel, R. Atkins and S. Daly: "Influence of Screen Size and Field of View on Perceived Brightness," *ACM Transaction on Applied Perception*, Vol. 15, No. 3, 1-13 (2018)
- 23) S. Palmisano, R.S. Allison, M.M. Schira and R.J. Barry: "Future challenge for vection research: definitions, functional significance, measure and neural bases," *Frontiers in Psychology*, Vol. 6 (2015)
- 24) K. Uehira, Y. Hanamura and M. Suzuki: "3-D Display Using Artificially Generated Motion Parallax and Psychological Factors of Image Size for Extended-Depth Perception," *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.41, 1227-1229 (2010)



Shinya Sakane received his B.S. and M.S. degrees from Kindai University, Japan, in 2016 and 2018, respectively. In 2018, he joined Seiwa Electric Mfg. Co., Ltd., Japan, and was assigned to Research and Development Department. In 2019, he has been developing aerial imaging technologies for transportation infrastructure. He is also a Ph.D. candidate at Utsunomiya University, Japan, in 2020.



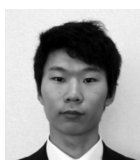
Hiroki Takatsuka received his B. E. and M. E. degrees from Utsunomiya University, Japan. Currently, he is a Ph.D. candidate at Utsunomiya University, Japan. His research interests include deep-learning assisted single-pixel-imaging and ultra-wide field-of-view display using aerial image. He was a recipient of Student Presentation Award at DHIP '22, Student Paper Award at IP2022 and Best Student Paper Award at IDW '23.



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.



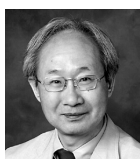
Hirotsugu Yamamoto received the B.E., M.E., and Ph.D. degrees from the University of Tokyo, Tokyo, Japan. After graduation, he joined the Department of Optical Science and Technology at University of Tokushima, Japan. From April 2014, he joined the Center of Optical Research and Education (CORE) at Utsunomiya 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.



Shinya Sakane received his B.S. and M.S. degrees from Kindai University, Japan, in 2016 and 2018, respectively. In 2018, he joined Seiwa Electric Mfg. Co., Ltd., Japan, and was assigned to Research and Development Department. In 2019, he has been developing aerial imaging technologies for transportation infrastructure. He is also a Ph.D. candidate at Utsunomiya University, Japan, in 2020.



Hiroki Takatsuka received his B. E. and M. E. degrees from Utsunomiya University, Japan. Currently, he is a Ph.D. candidate at Utsunomiya University, Japan. His research interests include deep-learning assisted single-pixel-imaging and ultra-wide field-of-view display using aerial image. He was a recipient of Student Presentation Award at DHIP '22, Student Paper Award at IP2022 and Best Student Paper Award at IDW '23.



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.



Hirotsugu 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.