

ハンドトラッキングにより測定した軸長比を用いた楕円体空中像の3次元形状推定

山田 凌大†, 陶山 史朗†, 山本 裕紹†

本研究は、凸型航空画像の3次元形状を推定するシステムが、ハンドトラッキングデバイスであるLeap Motion Controller 2を用いて実装できることを実証した。Airial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)に基づく3次元航空画像の形成において、画像投影時に完全に球形のスクリーンを仮定した場合、実際のスクリーンが楕円形であれば、歪みやインタラクション精度の劣化が発生する。交換やエイジングによってスクリーンの形状が変化する場合、必ず形状を再測定する必要がある。本研究では、観察者は空中画像上の5つの位置を指し示す: Leap Motionによって撮影された中心、上、下、左、右端であり、主軸の長さは3次元形状として簡単かつコスト効率よく推定される。航空画像の主軸の推定長さは、写真測定から得られた実際のスクリーンの長さとはほぼ一致した。

キーワード: 空中ディスプレイ, AIRR, ハンドトラッキング, インタラクション

1. まえがき

近年、3Dデータを視覚的に提示する技術がますます普及しており、そのようなデータを用いてインタラクティブな操作を実装するための広範な努力が伴っている。代表的な例としては、特殊なメガネなしで3D画像を観察できる自動立体視3Dディスプレイ技術や、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を通じて没入感の高い3Dコンテンツ体験を提供するバーチャルリアリティ(VR)などがある。しかし、3Dディスプレイ技術は、投影深度が制限されているため、インタラクション範囲や位置などの物理的制約によって制限される。同様に、VRは事前にHMDを装着する必要があるため、実空間で同時に多くの人にコンテンツを提示することは困難である。

航空ディスプレイ技術は、空中で画像を形成し、画面なしで複数の人が同時に見ることができると、デジタル標識やエレベーターボタンのような非接触インターフェースなどのユースケースに有効である。様々な空中ディスプレイ技術の中で、Airial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)¹やDihedral Corner Reflector Arrays (DCRA)²などの多くの手法が提案されている。

特にAIRRは、光源(ディスプレイなど)、再帰反射素子、ビームスプリッターを含む比較的簡単なセットアップを使用して、航空画像を形成することができる。シースルーディスプレイ³や水面外乱の影響を受けない水中ディスプレイ⁴などの新しいアプリケーションを可能にした。画質向上への取り組みも進行中である⁵。センサーを統合することで、AIRRはユーザーとのインタラクションを促進することができる。ディスプレイされた画像⁶をユーザーの手が通過できるインタラクション技術や、大型の航空画像⁷とのインタラクションが実証されている。さらに、AIRRは3Dオブジェクトを光源として3D航空画像を形成することができます⁸。AIRRで3次元航空画像を形成するための光源として、3Dディスプレイと凹型スクリーンの両方が考えられる。光源として凹型スクリーンを使用することで、いくつかの利点が得られる。スクリーンの形状や寸法は、所望の画像の曲率やサイズに容易に調整することができ、システムは市販のプロジェクターやスクリーンから低コストで構築することができる。先行研究では、凹型スクリーンと赤外線センサーを組み合わせることで、インタラクティブな3Dディスプレイを実現している⁹。その他の開発としては、グレア¹⁰を引き起こさない仮想化粧品や、光学錯視に基づく視覚効果¹¹があり、さらなる進歩の可能性を示唆している。しかし、凹型スクリーンを使用して航空画像を形成する場合、現実的な問題が生じる。

Received June 21, 2025; Revised September 14, 2025; Accepted October 26, 2025

† 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。

Estimation of the 3D Shape of an Ellipsoidal Aerial Image by Use of Axis Length Ratios Measured by Hand Tracking

Ryota Yamada[†], Shiro Suyama[†] and Hirotsugu Yamamoto[†]

Abstract This study demonstrates that the system for estimating the 3D shape of a convex aerial image can be implemented by use of a hand-tracking device, the Leap Motion Controller 2. In the formation of 3D aerial images based on Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR), when assuming a perfectly spherical screen during image projection, distortions and degradation of interaction accuracy are caused if the actual screen is elliptical. Whenever the screen shape changes due to replacement or aging, the shape must be remeasured. In this study, the observer points to five positions on the aerial image: the center, the top, the bottom, the left, and the right edge, which are captured by the Leap Motion, and the principal axis lengths are easily and cost-effectively estimated as 3D shape. The estimated lengths of the principal axis of the aerial image closely matched those of the actual screen obtained from photographic measurements.

Keywords: aerial display, AIRR, hand tracking, interaction.

1. Introduction

In recent years, technologies for visually presenting 3D data have become increasingly widespread, accompanied by extensive efforts to implement interactive operations with such data. Representative examples include autostereoscopic 3D display technologies that enable observation of 3D images without special glasses, and virtual reality (VR), which provides highly immersive 3D content experiences through head-mounted displays (HMDs). However, 3D display technologies are limited by physical constraints such as interaction range and location due to their restricted depth of projection. Similarly, VR requires users to wear HMDs in advance, making it challenging to present content to many people simultaneously in real space.

Aerial display technology forms images in mid-air that can be viewed by multiple people simultaneously without a screen, making it effective for use cases such as digital signage and non-contact interfaces like elevator buttons. Among various aerial display technologies, many methods such as Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)¹⁾ and Dihedral Corner Reflector Arrays (DCRA)²⁾ have been proposed. AIRR, in particular, can form aerial images using a relatively simple setup involving a light

source (e.g., a display), a retro-reflective element, and a beam splitter. It has enabled novel applications such as see-through displays³⁾ and underwater displays unaffected by water surface disturbances⁴⁾. Efforts to improve image quality are also underway⁵⁾. By integrating sensors, AIRR can facilitate interaction with users. Reports have demonstrated interaction techniques in which users' hands can pass through the displayed image⁶⁾, as well as interaction with large aerial images⁷⁾. Furthermore, AIRR can form 3D aerial images by using 3D objects as light sources⁸⁾. As light sources for forming three-dimensional aerial images with AIRR, both 3D displays and concave screens are conceivable. By use of a concave screen as the light source offers several advantages. The screen's shape and dimensions can be readily tailored to the desired image curvature and size, and the system can be built from off-the-shelf projectors and screens at low cost. Prior studies have realized interactive 3D displays by combining concave screens with infrared sensors⁹⁾. Other developments include virtual cosmetics that do not cause glare¹⁰⁾ and visual effects based on optical illusions¹¹⁾, suggesting potential for further advancements. However, when forming aerial images using concave screens, practical issues arise: while computer graphics assume perfect spherical surfaces, the actual screens are often ellipsoidal or distorted, resulting in mismatches between visual content and sensor data that cause tracking errors and image distortion. If the approximate 3D shape of the

Received June 21, 2025; Revised September 14, 2025; Accepted October 26, 2025

[†] Utsunomiya University
(Utsunomiya, Japan)

コンピュータグラフィックスは完全な球面を想定しているが、実際のスクリーンは楕円形や歪んだ状態になることが多く、その結果、視覚コンテンツとセンサーデータの間にミスマッチが生じ、トラッキングエラーや画像の歪みが生じる。スクリーンのおおよその3D形状を迅速かつ容易に測定できれば、これらの問題を軽減し、インタラクションの快適性を向上させ、よりマッチングの良い画像生成を可能にすることができる。投影輪郭からスクリーンの3D形状を推定することは、スクリーンと表示画像とのミスマッチを解決するのに役立つ。これまでの研究では、光学トラッカー¹²を用いて航空画像の3D収差を測定してきたが、これらのシステムは高価であり、配置が制限されている。本研究の目的は、コンパクトで低コストの光学ハンドトラッキングデバイスであるLeap Motion Controller 2が、凹面スクリーンの粗い3D形状を推定するために使用できることを実証することである。具体的には、観察者は中指を使って航空画像の5つの位置(中央、左、右、上、下)を指し示すように指示され、これらの点の3次元座標が測定される。これらの座標から、凹面スクリーンの軸長(X軸、Y軸、高さ)を3次元形状として推定する。この方法により、トラッキング精度の向上と、経験的測定に基づくスクリーン3D形状モデルの構築が可能となる。提案手法は、事前に測定された凹面の曲率や形状による画像の歪みを補正する方法と比較して、空中画像そのものを利用することで、迅速なその場での自己校正を可能にするという利点がある。具体的には、スクリーンを交換してもすぐに再校正が可能であり、温度や経年変化による形状の変化を現場で補正することが容易になる。

2 航空画像の原理と軸の命名法

2.1 2Dディスプレイを用いたAIRRの原理

2Dディスプレイを用いたAIRRの原理を図1に示す。AIRRは光源、ビームスプリッター、レトロリフレクターで構成されている。

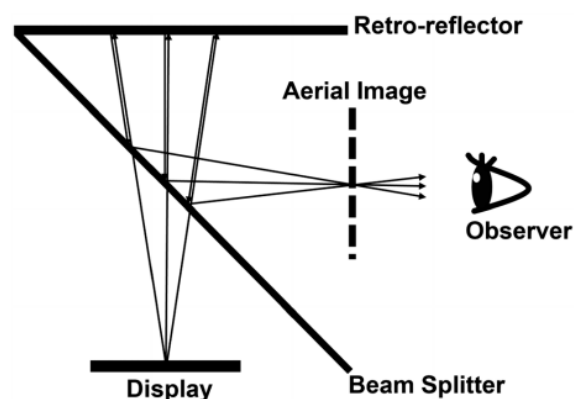


図1 2Dディスプレイを用いたAIRRの原理

ディスプレイなどの光源からの光は、ビームスプリッターによって透過光と反射光に分割される。透過光が再帰反射器に入射すると、入射方向に反射される。この光がビームスプリッターによって再び反射されると、光路対称性を利用して光源に対して平面对称な位置に空中像を形成する。

2.2 凹型スクリーンを用いたAIRRの原理

立体的な航空画像を形成する方法を図2に示す。凹面スクリーンを光源として、凸面航空画像を生成することができる。プロジェクターによって画像がスクリーンに投影され、AIRRシステムはビームスプリッターに対して凹面スクリーンに平面对称な3D空中画像を形成する。この構成では、スクリーンと航空画像の間の奥行き関係が逆になる。また、Leap Motion Controller 2を空中画像に干渉しないように下に配置する。この構成により、観察者の右手指の位置をリアルタイムに取得することができる。

デバイスの

2.3 航空画像における軸の命名法

航空画像を説明するために使用される軸の定義を図3に示す。航空画像は楕円体として近似される。水平軸はオブザーバに平行な軸、垂直軸はオブザーバに平行な軸と定義される。

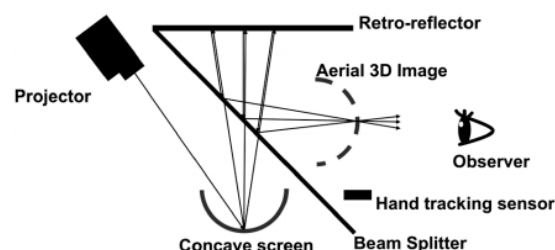


図2 凹型スクリーンを用いたAIRRの原理

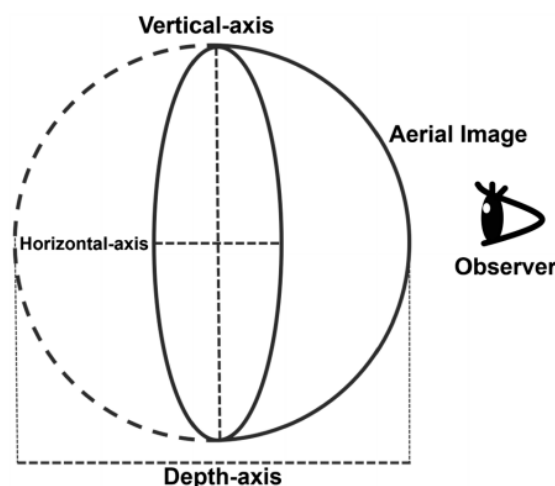


図3 航空画像における軸の命名法

[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。

screen could be quickly and easily measured, these issues could be mitigated, improving interaction comfort and enabling better-matched image generation. Estimating the screen 3D shape from the projection outline could also help resolve mismatches between the screen and the displayed image. Previous studies have measured 3D aberrations of aerial images using optical trackers¹²), but these systems are expensive and limited in placement. This study aims to demonstrate that a compact and low-cost optical hand-tracking device, the Leap Motion Controller 2, can be used to estimate the rough 3D shape of a concave screen. Specifically, observers are instructed to point to five positions (center, left, right, top, and bottom) of the aerial image using their middle finger, and the 3D coordinates of these points are measured. From these coordinates, the axis lengths (X-axis, Y-axis, and height) of the concave screen are estimated as 3D shape. This method enables improvements in tracking accuracy and the construction of a screen 3D shape model based on empirical measurements. Compared with methods that correct for image distortion from pre-measured concave screen curvature or shape, the proposed method has the advantage of enabling rapid in situ self calibration by use of the aerial image itself. Specifically, it allows immediate recalibration even when the screen is replaced and facilitates on site compensation for shape variations caused by temperature and aging.

2. Principle of the Aerial Image and Nomenclature of axis

2.1 Principle of AIRR by use of 2D display

The principle of AIRR by use of 2D display is shown in Fig. 1. The AIRR consists of a light source, a beam splitter, and a retro-reflector. The light from the light source such as a display is split into transmitted light

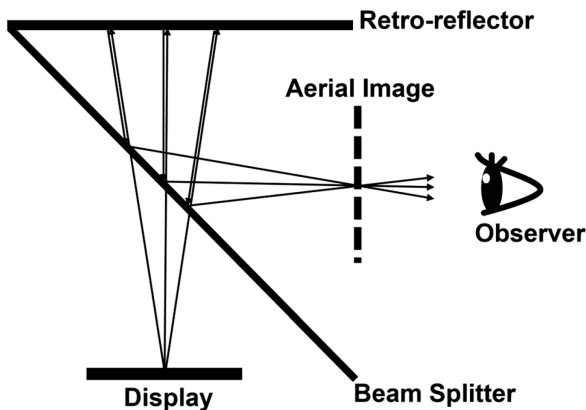


Fig. 1 Principle of AIRR by use of 2D display.

and reflected light by the beam splitter. When the transmitted light hits the retro-reflector, it is reflected in the direction of incidence. When this light is reflected again by the beam splitter, it forms an aerial image at a position that is plane-symmetrical with respect to the light source by use of optical path symmetry.

2.2 Principle of AIRR by use of concave screen

The method for forming a stereoscopic aerial image is shown in Fig. 2. A convex aerial image can be generated by use of a concave screen as the light source. An image is projected onto the screen by a projector, and the AIRR system forms a 3D aerial image that is plane-symmetrical to the concave screen with respect to the beam splitter. In this configuration, the depth relationship between the screen and the aerial image is reversed. In addition, a Leap Motion Controller 2 is placed beneath the aerial image so as not to interfere with it. This configuration enables real-time acquisition of the position of the observer's right-hand fingers by use of the device.

2.3 Nomenclature of axis in the aerial image

The definition of the axis used to describe the aerial image is shown in Fig. 3. The aerial image is approximated as an ellipsoid. The horizontal axis is defined as the axis parallel to the observer, the vertical

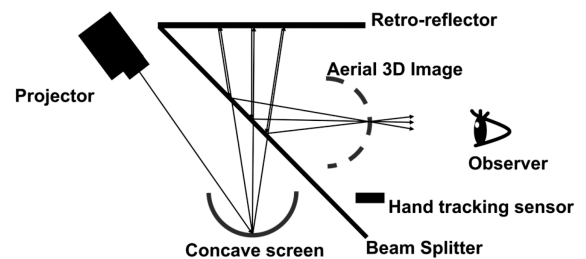


Fig. 2 Principle of AIRR by use of concave screen.

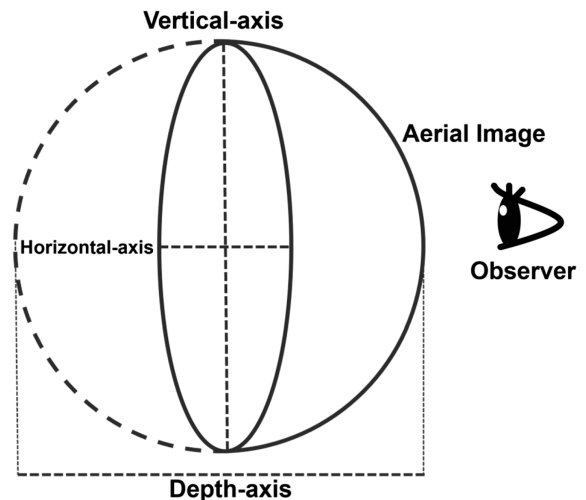


Fig. 3 Nomenclature of axis in the aerial image.

軸をオブザーバに垂直な軸とし、奥行き軸を画方向の軸とする。

3 凸型航空写真の形成と軸長比の測定

3.1 凸型航空画像の形成

本実験で測定に使用した航空画像は、凹面スクリーンにグリッドパターンを投影して形成したものである。投影されたグリッド画像を図4に示す。投影はプロジェクター(CASIO: CX-F1-NB)を用いて行った。これまでの研究では、スクリーンの曲率を補正するために、投影画像に歪み補正を適用していた。しかし、本研究では、テクスチャが凹面に均等に分布していることを目的としているため、そのような補正は適用していない。

その結果、凸型航空写真が図5に示された。この画像は赤丸で囲まれた領域で観察され、凸型航空構造物の形成に成功したことが確認された。

3.2 軸方向長さ比の測定

本研究では、光学式ハンドトラッキングカメラを用いて、自由形状の航空

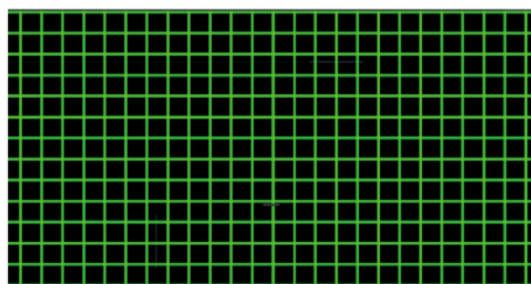


図4 投影されたグリッド画像

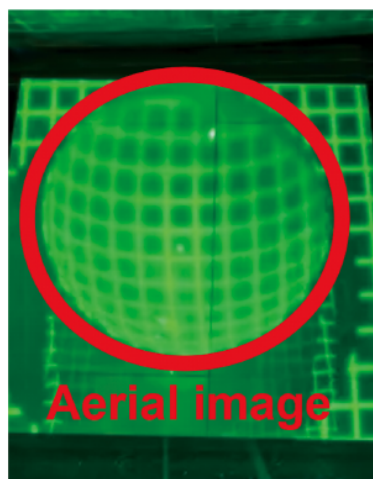


図5 形成された航空写真

画像を形成するための凹型スクリーンのおおよその3次元形状を推定するシステムを開発した。実験にはLeap Motion Controller 2を採用し、Unity環境内で空間計算と可視化を行った。

投影器により、アクリル凹面スクリーンにグリッドパターンを投影した。航空画像の5つの目標点(中央、左、右、上、下)を図6に示す。観察者は、右手を伸ばした状態で、それぞれの位置を指差すように指示された。手の開いた姿勢を維持することは、ジェスチャーを標準化し、トラッキングの不安定性によるエラーを抑制することを意図した。各ポイントについて、1,000フレームのデータが記録され、その結果、指先の位置を表す1,000の3次元ベクトルが得られた。これらのデータの平均値は、手の震えやトラッキングの不正確さによるノイズの影響を軽減するために計算された。航空画像に使用される座標軸の定義を図7に示す。X-

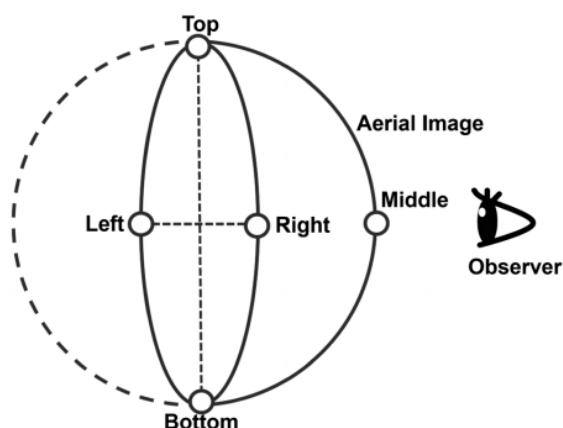


図6 航空画像の5つのターゲットポイント

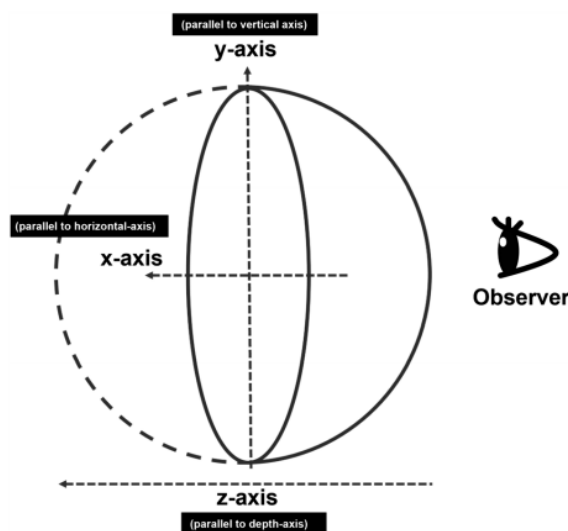


図7 座標軸の定義。

[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。

axis as the one perpendicular to the observer, and the depth axis as the axis in the direction of view.

3. Formation of a Convex Aerial Image and Measurement of Axial Length Ratio

3.1 Formation of a Convex Aerial Image

The aerial image used for measurement in this experiment was formed by projecting a grid pattern onto a concave screen. The projected grid image is shown in Fig. 4. The projection was performed by use of a projector (CASIO: CX-F1-NB). In previous studies, distortion correction was applied to the projected image to compensate for the curvature of the screen. However, in this study, no such correction was applied, since the objective was to ensure that the texture was evenly distributed across the concave surface.

The resulting convex aerial image is shown in Fig. 5. The image could be observed in the region enclosed by the red circle, confirming the successful formation of the convex aerial structure.

3.2 Measurement of Axial Length Ratio

In this study, a system was developed to estimate the approximate 3D shape of a concave screen used for

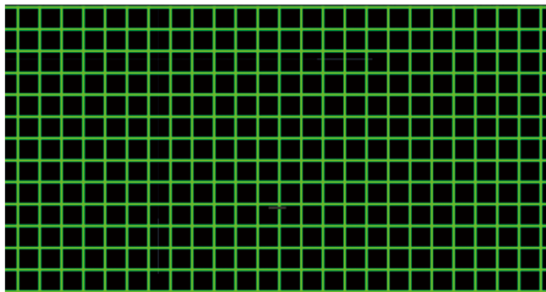


Fig. 4 Projected grid image.

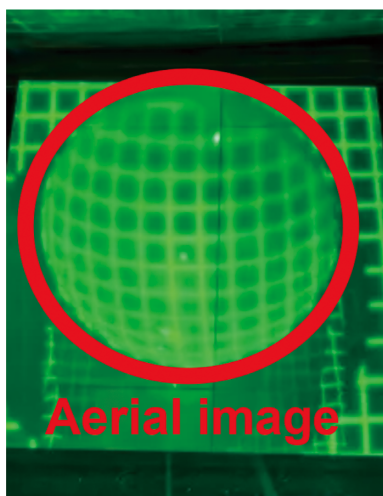


Fig. 5 Formed aerial image.

forming freeform aerial images by use of an optical hand-tracking camera. The Leap Motion Controller 2 was employed for the experiment, and spatial computations and visualizations were conducted within the Unity environment.

A grid pattern was projected onto an acrylic concave screen by means of a projector. The five target points (center, left, right, top, and bottom) of the aerial image are shown in Fig. 6. The observer was instructed to point to each of these positions with an extended right hand, using the middle finger. Maintaining an open hand posture was intended to standardize the gesture and suppress errors caused by tracking instability. For each point, 1,000 frames of data were recorded, resulting in 1,000 three-dimensional vectors representing fingertip positions. The mean of these data was calculated to reduce the influence of noise caused by hand tremor and tracking inaccuracies. The definition of the coordinate axis used for the aerial image is shown in Fig. 7. The X-,

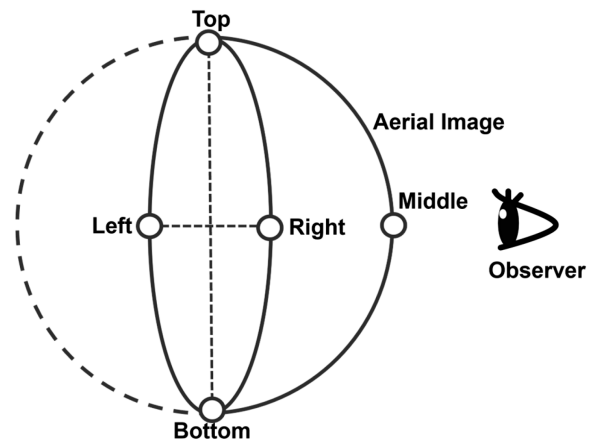


Fig. 6 The five target points of the aerial image.

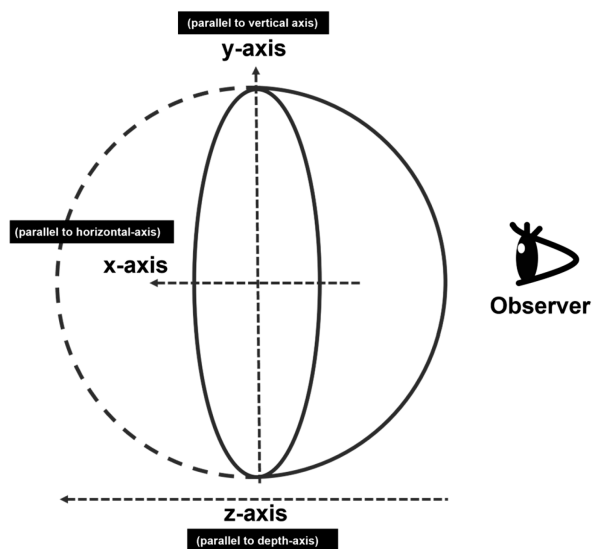


Fig. 7 The definition of the coordinate axis.

Y軸、Z軸はそれぞれ航空画像の水平軸、垂直軸、奥行き軸に平行であると定義される。目的は凹面スクリーンと同様の3次元形状を推定することであったため、本研究ではUnity座標から実世界座標への変換は行わなかった。

まず、各点における平均座標を求めるための計算式を式(1)に示す。5つのターゲットポイントそれぞれについて、3次元座標データの1,000フレームの平均を計算した。

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

次に、5点の座標の違いから、Unity座標系における各軸の長さを計算した。横軸の計算式は式(2)に、縦軸の計算式は式(3)に示す。横軸の長さは、右点と左点の平均 x 座標の差として定義した。縦軸については、上下の点の平均y座標の差として長さを定義した。

$$L_x = \bar{X}_{\text{Right}} - \bar{X}_{\text{Left}} \quad (2)$$

$$L_y = \bar{Y}_{\text{Top}} - \bar{Y}_{\text{Bottom}} \quad (3)$$

深度軸の計算は式(4)で示される。深度軸の長さは、中心点のz座標と、左、右、上の点の平均z座標との差として定義された。

$$L_z = \bar{Z}_{\text{Mid}} - \left(\frac{\bar{Z}_{\text{Left}} + \bar{Z}_{\text{Right}} + \bar{Z}_{\text{Bottom}} + \bar{Z}_{\text{Mid}}}{4} \right) \quad (4)$$

4 推定された3D形状と実際の3D形状の比較

5回の測定試行から得られた航空画像の推定3D形状と、実験に使用した凹面スクリーンの写真から得られた実際の航空画像の形状を図8に示す。横軸は航空画像の水平軸と深度軸の長さの比を表し、縦軸は垂直軸と深度軸の長さの比を表す。5回の試行から得られた各推定結果は、標準誤差を示すエラーバーとともに円としてプロットされている。推定された比率の精度を評価するために、

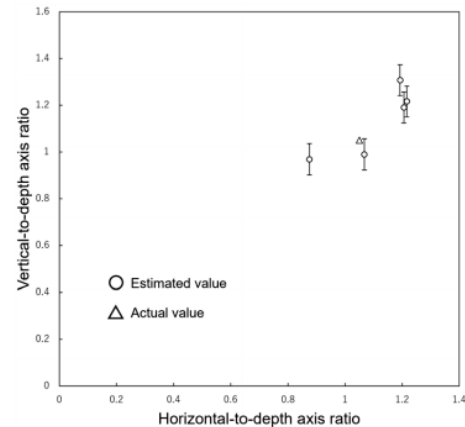


図8 航空画像の推定3次元形状と実際の航空画像の形状。

凹面スクリーンの実際の軸比率も写真から測定し、三角形としてプロットした。

5回の試行における推定軸長比の平均は約1.00:1.10:1.12(深さ:水平:垂直)である。写真から測定された実際の軸比は1.00 : 1.05 : 1.05 (深さ: 水平: 垂直)であり、ハンドトラッキングによって得られた軸比は、1.00 : 1.05 (深さ: 水平: 垂直)とほぼ一致していることがわかる。

実際のスクリーン

5. 考察

本研究で採用したLeap Motion Controller 2を用いた手動トラッキングに基づく3次元形状推定法は、凹面スクリーンの幾何学的特性の大まかな近似を提供するのに有効であることが証明された。特に、1点あたり1,000個の3次元位置ベクトルを取得することで、手の震えなどのノイズを低減し、安定した3次元形状推定に貢献した。

しかし、この方法で測定された軸比は、写真測定から得られた軸比と正確に一致しなかったことから、より高い精度が要求される場合には、このアプローチは適さない可能性があることが示された。エラーの原因として考えられるのは、観察者が航空写真の正確な位置を認識する能力である。画像の正確な焦点位置を視覚的に識別する能力は個人差があるため、観察者が認識した位置と実際の撮影位置との間に不一致があった可能性がある。

また、ノイズが完全に除去されていない可能性もある。1,000フレームの平均化は手の震えによる変動を抑制するのに役立ったが、手の追跡における誤認識による異常値の存在により、

Y-, and Z-axis are defined to be parallel to the horizontal, vertical, and depth axis of the aerial image, respectively. Since the objective was to estimate a 3D shape similar to that of the concave screen, no conversion from Unity coordinates to real-world coordinates was performed in this study.

First, the calculation formula for obtaining the average coordinates at each point is shown in Equation (1). For each of the five target points, the mean of 1,000 frames of three-dimensional coordinate data was calculated.

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

Next, based on the differences in the coordinates of the five points, the lengths of each axis in the Unity coordinate system were computed. The formula for calculating the horizontal axis is shown in Equation (2), and the formula for the vertical axis is shown in Equation (3). For the horizontal axis, the length was defined as the difference between the average x-coordinates of the right and left points. For the vertical axis, the length was defined as the difference between the average y-coordinates of the top and bottom points.

$$L_x = \bar{X}_{\text{Right}} - \bar{X}_{\text{Left}} \quad (2)$$

$$L_y = \bar{Y}_{\text{Top}} - \bar{Y}_{\text{Bottom}} \quad (3)$$

The calculation for the depth axis is presented in Equation (4). The length of the depth axis was defined as the difference between the z-coordinate of the central point and the average z-coordinate of the left, right, and top points.

$$L_z = \bar{Z}_{\text{Mid}} - \left(\frac{\bar{Z}_{\text{Left}} + \bar{Z}_{\text{Right}} + \bar{Z}_{\text{Bottom}} + \bar{Z}_{\text{Mid}}}{4} \right) \quad (4)$$

4. Comparison Between the Estimated and Actual 3D Shapes

The estimated 3D shapes of the aerial image obtained from five measurement trials and the actual aerial image shape derived from a photograph of the concave screen used in the experiment is shown in Fig. 8. The horizontal axis represents the ratio of the horizontal to depth axis lengths of the aerial image, while the vertical axis represents the ratio of the vertical to depth axis lengths. Each estimated result from the five trials is plotted as a circle with error bars indicating the standard error. To evaluate the accuracy of the

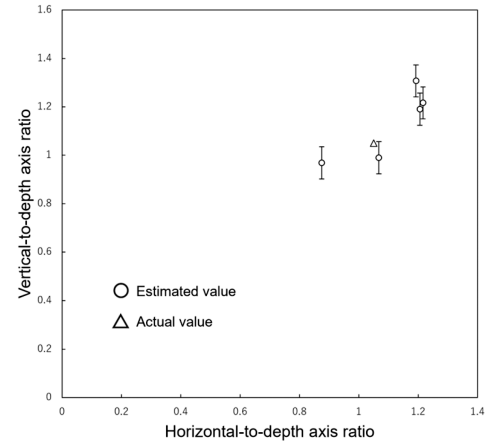


Fig. 8 The estimated 3D shapes of the aerial image and the actual aerial image shape.

estimated ratios, the actual axis ratios of the concave screen were also measured from a photograph and plotted as a triangle.

The average of the estimated axis length ratios across the five trials is approximately 1.00 : 1.10 : 1.12 (depth : horizontal : vertical). The actual axis ratios measured from the photograph are 1.00 : 1.05 : 1.05 (depth : horizontal : vertical), indicating that the axis ratios obtained through hand-tracking closely matched those of the actual screen.

5. Discussion

The 3D shape estimation method based on manual tracking using the Leap Motion Controller 2, as adopted in this study, proved effective in providing a rough approximation of the geometric characteristics of the concave screen. In particular, the acquisition of 1,000 three-dimensional position vectors per point contributed to stable 3D shape estimation by reducing noise such as hand tremor.

However, the axis ratios measured by this method did not exactly match those obtained from photographic measurements, indicating that the approach may not be suitable when higher accuracy is required. One possible source of error is the observer's ability to perceive the precise location of the aerial image. Because the ability to visually identify the exact focal point of the image varies among individuals, there may have been discrepancies between the positions recognized by the observer and the actual imaging locations.

In addition, it is possible that noise is not completely eliminated. Although averaging over 1,000 frames helped to suppress fluctuations due to hand tremor, the presence of outliers caused by misrecognition in hand

推定データが実際の値から乖離した可能性がある。より正確なノイズ抑制が望まれる場合は、単純な平均化ではなく、機械学習のような代替方法を検討する必要があるかもしれない。

6 むすび

本研究では、Leap Motion Controller 2を用いて、航空画像中の5つの特定の位置で3次元座標を取得することにより、凹型スクリーンの近似的な3次元形状を捉えることができる。このアプローチは、固定された測定装置を必要とせず、投影されたコンテンツに航空画像の全体的な形状を柔軟かつ単純に反映できる可能性を示唆している。

3次元形状としての航空画像の推定軸比は約1.00 : 1.10 : 1.12 (深さ:水平:垂直)であり、写真測定から得られた実際のスクリーンの軸比1.00 : 1.05 : 1.05とほぼ一致した。これは、提案手法が航空画像の形状を大まかに推定するのに有効であることを示している。

しかし、推定値と実測値の間には不一致が見られる。これらの誤差は、観察者の航空画像を知覚する能力の個人差と、追跡データに残留するノイズから生じると考えられている。フレーム平均化により若干のノイズが軽減される一方で、より高精度なアプリケーションでは、より高度なノイズ低減技術が必要になる可能性がある。

今後の課題としては、例えば、フィルタリングや機械学習技術を導入したり、複数のオブザーバや画面構成でシステムを検証したりすることで、トラッキング手法を改善することである。非対称スクリーン形状への拡張と、提案手法を用いたインタラクション技術への検討も計画されている。これらの開発により、インタラクティブな空中ディスプレイの使いやすさがさらに向上することが期待される。

References

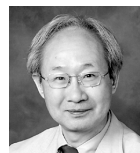
- 1) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", Opt. Express, Vol. 22, Issue 22, pp.26919-26924 (2014)
- 2) Y. Maeda: "Floating image display based on a dihedral corner reflector array", Proc. IDW, pp.822-825 (2015)
- 3) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto: "Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer," Proc.IMID2018, p.636 (2018)
- 4) R. Ichikawa, T. Watanabe, H. Takatsuka, S. Suyama, H. Yamamoto: "Embedding Optical Components in Water to Make Aquatic Images Are Unaffected by Water Surface Undulations", IEICE Transactions on Electronics, E108-c (2), pp.71-77 (2025)
- 5) K. Takiyama, T. Iwane, S. Suyama, K. Masaoka, H. Yamamoto: "High-resolution aerial imaging without aberration using a lens to reduce diffraction and ray shift by a retro-reflector", Proc. IDW'24,

Vol. 31, pp.356-359 (2024)

- 6) H. Yamamoto, Matsui, M. Sakti Alvissalim, M. Takahashi, Y. Tomiyama, S. Suyama and M. Ishikawa: "Floating display screen formed by AIRR (Aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space", Proc. 2014 International Conference on 3D Imaging (IC3D), Paper40, pp.1-5 (2014)
- 7) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama, H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space construction", J. Robot. Mechatronic, Vol. 34, pp.1175-1183 (2022)
- 8) N. Kurokawa, S. Ito, H. Yamamoto: "Aerial 3D display by use of a 3D-shaped screen with aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", Proc. SPIE 10355, 103351K-6 (2017)
- 9) R. Yamada, T. Watanabe, M. Adachi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Curved Aerial 3D Image by Projecting 3DCG Image Onto a Concave Screen and Interaction Between Planar Operations by Use of a 2D Sensor and 3D Space", Proc.IDW'24, Vol.31, pp.1633-1636 (2024)
- 10) M. Adachi, S. Suyama and H. Yamamoto: "Glasses-Free AR Cosmetics by Use of Aerial Display Without Glare to the User", Proc. IDW '24, pp.952-955 (2024)
- 11) T. Watanabe, H. Hiroki, S. Suyama, H. Yamamoto: "Hollow Face Illusion Evoked Even by Binocular Vision of Aerial 3D Image", Proc. IDW'23, Vol.30, pp.1319-1322 (2023)
- 12) M. Adachi, S. Suyama and H. Yamamoto: "Astigmatism and Circle of Least Confusion due to Distortion of Beam Splitter in Large Aerial Display", Proc. IDW '23, pp.834-837 (2022)



Ryota Yamada received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2025. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests include formation and interactive manipulation of aerial images with freeform surfaces.



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.

tracking may have led the estimated data to deviate from the actual values. If more accurate noise suppression is desired, alternative methods such as machine learning, rather than simple averaging, may need to be considered.

6. Conclusion

In this study, the approximate 3D shape of a concave screen can be captured by acquiring three-dimensional coordinates at five specific positions in the aerial image using the Leap Motion Controller 2. This approach suggests the possibility of flexibly and simply reflecting the overall shape of an aerial image in the projected content without the need for fixed measurement devices.

The estimated axis ratios of the aerial image as 3D shape are approximately 1.00 : 1.10 : 1.12 (depth : horizontal : vertical), which closely matched the actual screen's axis ratios of 1.00 : 1.05 : 1.05 obtained from photographic measurements. This indicates that the proposed method is effective in roughly estimating the shape of an aerial image.

However, discrepancies are observed between the estimated and actual values. These errors are considered to arise from individual differences in the observer's ability to perceive the aerial image and from residual noise in the tracking data. While frame averaging mitigated some noise, higher-accuracy applications may require more advanced noise reduction techniques.

Future work includes improving the tracking method for example, by introducing filtering or machine learning techniques and validating the system with multiple observers and screen configurations. Extensions to asymmetrical screen shapes and investigations into interaction techniques using the proposed method are also planned. These developments are expected to further enhance the usability of interactive aerial displays.

References

- 1) H. Yamamoto, Y. Tomiyama, S. Suyama: "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", *Opt. Express*, Vol. 22, Issue 22, pp.26919-26924 (2014)
- 2) Y. Maeda: "Floating image display based on a dihedral corner reflector array", *Proc. IDW*, pp.822-825 (2015)
- 3) R. Kakinuma, M. Yasugi, S. Ito, K. Fujii, H. Yamamoto: "Interpersonal 3D Screen with AIRR that Shares Your Gesture and Your Screen with an Opposite Viewer," *Proc. IMID2018*, p.636 (2018)
- 4) R. Ichikawa, T. Watanabe, H. Takatsuka, S. Suyama, H. Yamamoto: "Embedding Optical Components in Water to Make Aquatic Images Are Unaffected by Water Surface Undulations", *IEICE Transactions on Electronics*, E108-c (2), pp.71-77 (2025)
- 5) K. Takiyama, T. Iwane, S. Suyama, K. Masaoka, H. Yamamoto: "High-resolution aerial imaging without aberration using a lens to reduce diffraction and ray shift by a retro-reflector", *Proc. IDW'24*,

Vol. 31, pp.356-359 (2024)

- 6) H. Yamamoto, Matsui, M. Sakti Alvissalim, M. Takahashi, Y. Tomiyama, S. Suyama and M. Ishikawa: "Floating display screen formed by AIRR (Aerial imaging by retro-reflection) for interaction in 3D space", *Proc. 2014 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*, Paper40, pp.1-5 (2014)
- 7) M. Yasugi, M. Adachi, K. Inoue, N. Ninomiya, S. Suyama, H. Yamamoto: "Development of Aerial Interface by Integrating Omnidirectional Aerial Display, Motion Tracking and Virtual Reality Space construction", *J. Robot. Mechatronic*, Vol. 34, pp.1175-1183 (2022)
- 8) N. Kurokawa, S. Ito, H. Yamamoto: "Aerial 3D display by use of a 3D-shaped screen with aerial imaging by retro-reflection (AIRR)", *Proc. SPIE 10355*, 103351K-6 (2017)
- 9) R. Yamada, T. Watanabe, M. Adachi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Curved Aerial 3D Image by Projecting 3DCG Image Onto a Concave Screen and Interaction Between Planar Operations by Use of a 2D Sensor and 3D Space", *Proc. IDW'24*, Vol.31, pp.1633-1636 (2024)
- 10) M. Adachi, S. Suyama and H. Yamamoto: "Glasses-Free AR Cosmetics by Use of Aerial Display Without Glare to the User", *Proc. IDW '24*, pp.952-955 (2024)
- 11) T. Watanabe, H. Hiroki, S. Suyama, H. Yamamoto: "Hollow Face Illusion Evoked Even by Binocular Vision of Aerial 3D Image", *Proc. IDW'23*, Vol.30, pp.1319-1322 (2023)
- 12) M. Adachi, S. Suyama and H. Yamamoto: "Astigmatism and Circle of Least Confusion due to Distortion of Beam Splitter in Large Aerial Display", *Proc. IDW '23*, pp.834-837 (2022)



Ryota Yamada received his B. E. degrees from Utsunomiya University, Japan in 2025. Currently, he is doing a Master's degree in Utsunomiya University. His research interests include formation and interactive manipulation of aerial images with freeform surfaces.



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.



Hirotosugu 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.