

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390098

研究課題名(和文) 全周囲観察可能な光線場再生型空中浮遊3次元像形成

研究課題名(英文) Aerial three-dimensional image formation viewable from surrounding area based on light field reconstruction

研究代表者

宮崎 大介 (MIYAZAKI, Daisuke)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60264800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：インテグラルイメージング方式による3次元像表示と半球凹面鏡による空中像表示、回転ミラーの全周囲走査の組み合わせによる、全周囲から観察可能な空中3次元像形成技術の研究を行った。表示像には、光学系の収差による像の歪みや、光放射方向の不適切さによる像の欠けなどの問題があった。そこで、光学系中にスクリーンを配置して投影像を撮影し、光学シミュレーションと比較して、像形成の特性を解析した。また、凹面鏡の形状を計測し、光学シミュレーションに測定結果を適用することで、精度の高い光学系の設計を行った。試作システムにより全周囲から観察可能な3次元空中像の形成を行い、提案手法の有効性を確認することができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is the development of a display technique for three-dimensional image formation viewable from a surrounding area based on auto-stereoscopic display by integral imaging, imaging in the air with a concave mirror, and 360-degree scanning with a rotating mirror. There are problems in formed images, such as image distortion caused by optical aberration, and image deficiency caused by inappropriate light direction propagating from each point of the image. We analyzed the property of image formation by measuring projected images on a screen placed at several positions in the optical system, and comparing the results with that of optical simulation. In addition, we measured the shape of the concave mirror in order to apply the data to optical simulation for precise optical design. We formed three-dimensional aerial image that can be viewed from a surrounding area, and confirmed the validity of the proposed method.

研究分野：情報光学

キーワード：3次元ディスプレイ 空中表示 インテグラルイメージ 全周囲観察 凹面鏡 裸眼立体ディスプレイ

### 1. 研究開始当初の背景

情報処理や通信技術の発展に伴い、増大する情報量を効果的に利用するためには、情報機器と人との間のインターフェイス技術をさらに進展させる必要がある。特に視覚的な情報インターフェイス技術の開発は重要である。視覚的情報インターフェイスの一つとして、3次元構造を直感的に理解できる立体表示技術が近年注目されており、実用的な3次元ディスプレイの実現が期待されている。偏光フィルタや液晶光スイッチによる特殊な眼鏡を用いた立体テレビや立体映画はすでに実用化され普及している。近年は、そのような特殊な装着物を必要としない裸眼立体ディスプレイ技術の開発が活発になっている。パララクスバリアやレンチキュラシートを用いた裸眼立体ディスプレイは比較的容易に実現できるが、画像の観察角度や観察位置に制限があり、それらの拡張が技術課題となっている。

観察角度を大幅に拡張し、表示像を周囲360度からの観察を可能とした立体ディスプレイ手法が研究されている。全周囲からの観察を可能とすることにより、観察者が回り込むことで表示物体の側面や背後も見ることができ、3次元物体としての存在感を増すことができる。また、複数の人数で表示像の周りを囲んで観察しながら協調作業をするなど、これまでにない映像インターフェイスを実現できる可能性がある。全周囲から観察可能な立体ディスプレイとして、発光ダイオードアレイを回転させて全周囲から観察可能な3次元像の表示を行う円筒型ディスプレイの手法が提案されている。また、高フレームレートのプロジェクタから投影された映像を回転するミラーに投影し、観察領域を全周に拡張する手法が提案されている。さらに、立体ディスプレイの表示面を水平に設置し、周囲から観察するテーブルトップ型の立体表示装置が開発されている。

また、何も無い空間に像を形成する空中像表示技術が注目されている。空中像を系背することにより、表示装置の存在感がなくなることで表示像の実在感を高めることができる。また、モーションセンサなどにより人の手の動きを検出して画像と連動させることにより、空中像に対して手によるインタラクティブな操作を可能にする映像情報インターフェイスシステムの実現へ発展する可能性がある。これまで、全周から観察可能なテーブルトップ型3次元空中ディスプレイ技術に関する提案がいくつかなされているが、ほとんどは垂直方向の移動に伴う視差を与えない方式であった。

### 2. 研究の目的

インテグラルイメージングと回転ミラーによる360度走査、さらに凹面鏡による空中結像を組み合わせて、全周囲からの観察が可能な浮遊3次元像の形成手法を提案し、関連技術の開発を行った。表示3次元像の現実感を

増すために、垂直と水平両方向ともに視差を持つフルパララクス立体視を同時に実現する。提案手法に基づいた立体ディスプレイシステムを試作し、システムの特性を計測し、実際に像の表示を行って提案手法の有効性の検証を行った。

本システムによる表示像には、光学系の配置誤差や収差に起因する欠けや歪みなどの問題があり、これらを解決するためには光学系の適正な設計が必要である。本研究では、光学結像特性の検証のために、光学系中の光伝搬の状態を計測した。光学シミュレーションと実験光学系を比較することで、光学系における収差やその他の課題を検討した。また、半球凹面鏡の実際の形状を計測するシステムを構築し、半球凹面鏡の形状誤差を解析した。光学シミュレーションにおいて、半球凹面鏡の測定結果を適用することにより、最適な設計を行った。

### 3. 研究の方法

#### (1) 提案手法の原理

図1に提案する立体ディスプレイシステムの概略図を示す。光学系はインテグラルイメージング光学系、リレー光学系、全周囲走査光学系の各部分により構成される。

インテグラルイメージング方式は、水平と垂直の両方向に視差を有するフルパララクス3次元画像を表示する技術である。典型的なインテグラルイメージング光学系は、2次元ディスプレイとレンズアレイにより構成される。レンズアレイの各要素レンズに対応する要素画像において、発光する画素の位置によってレンズから射出される光線の角度が変化する。これを利用して、観察方向に従って観察できる画像を変化させることができ、上下左右方向に視差を持った立体画像表示を行える。

リレー光学系は、レンズによる結像光学系であり、インテグラルイメージング光学系で形成された立体画像を全周囲走査光学系に導く。また、リレー光学系のレンズ配置を適正に設計することにより、空中像の各点からの光の放射方向を制御することができる。

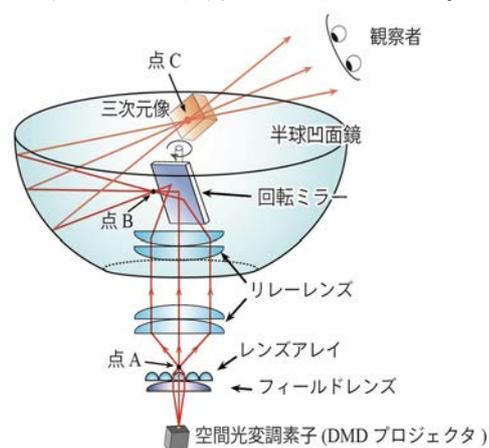


図1 全周囲観察可能な空中3次元ディスプレイシステム

全周囲走査光学系は凹面鏡と回転ミラースキャナにより構成されており、スクリーン等の存在しない空中に、周囲 360 度からの観察が可能な実像を形成することができる。回転ミラーは凹面鏡の中心付近に配置されている。リレー光学系を介して送られた画像は、ミラースキャナと凹面鏡で反射され、中心付近に再度結像する。ミラーを回転させて凹面鏡上の光の反射位置を変化させると、実像の形成位置は凹面鏡の中心付近のままであるが、画像と光線の向きを変化させることができる。ミラーを高速に回転させながら、全周の様々な方向から見える立体画像を角度に合わせて切り替えて表示すると、立体画像を全周囲から観察できるようになる。

## (2) 試作ディスプレイ装置の構成

試作したディスプレイシステムは、空間光変調素子、フィールドレンズ、レンズアレイ、リレー光学系、回転ミラー、半球凹面鏡により構成される。実験光学系の外観を図 2 に示す。

高速な切り替えが可能な空間光変調素子としてデジタルマイクロミラーデバイスを備えたプロジェクタ (LOGIC PD 社、DLP Light Commander) を用いた。このプロジェクタは 1024×768 画素の 2 値画像を、最高 5000Hz のフレームレートで切り替えて表示できる。

投影画像をフィールドレンズに通過させて主光線を光軸に対して平行とし、さらにレンズアレイに通過させることでインテグラルイメージングの原理により点 A 付近に 3 次元像を形成した。レンズアレイの要素レンズの直径は 1 mm、焦点距離は 3mm であり、多くの要素レンズが六方格子構造で配列されている。

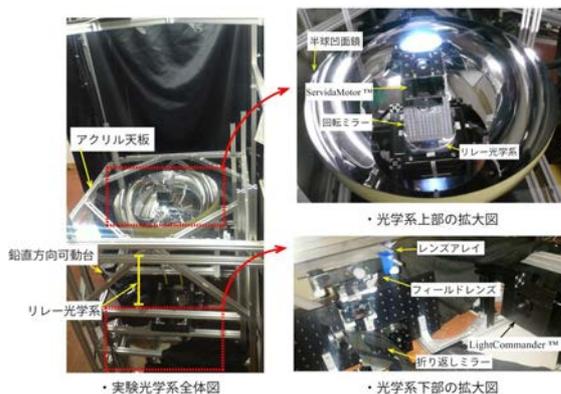


図 2 実験光学系

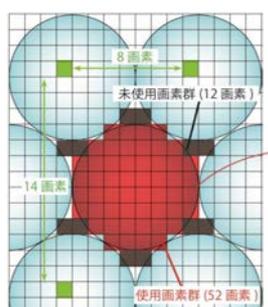


図 3 レンズアレイと画素の関係

図 3 に示すように、レンズアレイの各要素レンズの直径が 8 画素になるように配置した。1 つの要素レンズ内には、52 画素が含まれる。各要素レンズから出射される光線の水平方向の角度ピッチは 2.4°となる。また、形成画像の視野角は 16.8°となる。

リレー光学系は、直径 152mm、焦点距離 248.5mm の平凸レンズを 4 枚用いて構成されている。空中像の各点からの光の広がり角は、光学系の開口数で制限されているため、像の全体を欠けることなく観察可能にするためには、像からの光の放射方向が観察位置に集まるよう光学系を設計する必要がある。ここでは、3 次元空中像の各光点からの主光線が平行となるようにリレー光学系を設計した。リレー光学系において、2 枚のレンズを 1 組とした合成の焦点距離を  $f_1$  とした時の光学系を図 4 に示す。凹面鏡の焦点距離を  $f_2$  とし、距離  $d$  を図のように設定し、光軸に平行入射したとき、凹面鏡の結像位置での主光線の向きが像面に対して垂直にするために、近軸光線追跡に基づいて  $d$  は以下の式で与えられる値に設定した。

$$d = \{f_1 h_2 (f_1 + f_2) - f_1 f_2 h_1\} / f_2 h_1$$

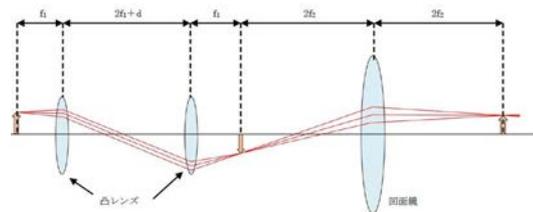


図 4 光学系の近軸光学的設計

回転ミラーの駆動装置としてブラシレス DC モータを用いた。半球凹面鏡は、曲率半径 300mm であり、アルミニウムを蒸着したアクリル製である。半球凹面鏡の底面から高さ 60mm の位置で水平に切断して開口を設け、リレー光学系からの光を入射した。

画像の切り替え枚数を 200 枚とした。空間光変調素子から画像切り替えタイミングで出力される方形波をモータ駆動の信号として利用することにより、空間光変調素子の画像切り替えと回転ミラーの位置を同期した。

視差画像の作成のために、3 次元コンピュータグラフィックスソフトを用いて、3 次元物体モデルに対して垂直方向に 2.4°、水平方向に 0.6°刻みで視点を変化させて 4200 枚の視差画像を取得した。インテグラルイメージング光学系ではレンズアレイの一つの要素レンズに、52 画素が割り当てられているので、255×109 画素を持つ 52 枚の視差画像を用い、それらの画像の画素を再配置することで画素数 1024×768 の合成画像を作成した。ミラーの回転位置に応じて同様の処理を行いそれぞれ

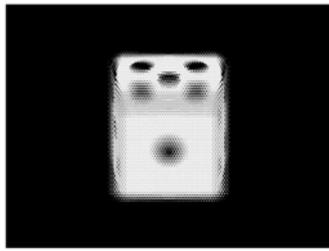


図5 インテグラルイメージング用合成画像の例

の角度に対応する画像を200枚作成した。ミラーで反射した画像は、ミラーの回転とともに、ミラーの回転を中心として打ち消すために画像を回転させた。図5にインテグラルイメージングの合成画像の例を示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) 3次元空中像表示の予備実験

回転ミラーは静止させたまま空中像を形成し、左右に視点移動して表示像をカメラで撮影した結果を図6に示す。この状態での水平の視域角は、光学系の開口数に基づいて約 $16^\circ$ となった。

実験光学系において、光点の状態を計測する実験を行った。図7に示すように、半球凹面鏡の上にスクリーンとカメラを配置し、像を形成する光がスクリーンに投影された点像を撮影した。ある一つの要素レンズに含まれる52画素全てを光らせて、凹面鏡での結像位置付近のスクリーン上の投影像を計測した結果を図8に示す。この結果、図8(a)の高さ50mmにメリディオナル像面が位置し、(c)の高



図6 ミラー停止状態での空中像

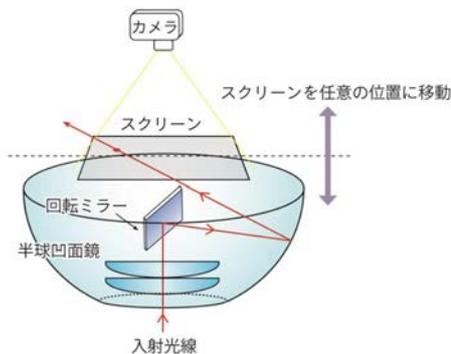


図7 結像特性の測定のためのスクリーンの配置

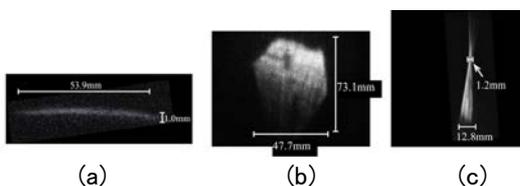


図8 スクリーン上の光点の測定結果。(a)  $h = -50$  mm、(b)  $h = 6$  mm、(c)  $h = 106$  mm

さ106mmにサジタル像面が位置していることがわかった。

リレー光学系から出射し、回転ミラーに入射する前の像を撮影した結果、各光点の形は非点収差による一方向へ広がるような傾向が認められなかった。ただし、最も外側に位置する点像は、中心付近の点像と状態が異なっており、像面湾曲がわずかに発生していた。これらより凹面鏡により非点収差が発生していることが確認できた。

##### (2) 光学シミュレーションによる収差と光放射方向の解析

非点収差とは、軸外から光源からの光が1点に集束せずに、直交する2面に含まれる光線のそれぞれの焦点位置がずれる収差である。光軸と主光線を含む面をメリディオナル面と呼び、主光線を含みかつメリディオナル面に垂直な面をサジタル面と呼ぶ。これらの面内の光束が最も集束している位置をそれぞれメリディオナル像面、及びサジタル像面と呼ぶ。本研究の実験光学系では、凹面鏡の円周方向がサジタル方向であり、それに垂直な円弧となる方向がメリディオナル方向である。

光学設計ソフトウェア (Prolinx社、ZEMAX) により、作製した光学系のシミュレーションを行い、非点収差の解析を行なった。レンズアレイにより形成された3次元像の位置に点光源を置き、凹面鏡による像が形成されている位置に到達するまでの光線を追跡した。光学系中の各面における光線の到達位置の分布を図9に示す。面の高さ $h$ は、凹面鏡の縁の位置を基準とした。図9(b)、(d)に示すように、 $h = 47.6$  mmの位置でメリディオナル像面、 $h = 96.6$  mmの位置にサジタル像面がそれぞれ形成されることが確認できた。リレー光学系を通過後の結像位置では、このような焦点位置のズレは確認されなかったため、非点収差は凹面鏡で生じているとみられる。

光学シミュレーション結果は、図8の実験結果と比べて、メリディオナル像面の位置が大きく異なった。このメリディオナル像面の位置ずれは、球面凹面鏡の収差では説明できないため、使用している凹面鏡が球面ではないことが考えられる。

##### (3) 凹面鏡の形状計測と計測結果を考慮したシミュレーション

スライダとノギスを用いて、凹面鏡の形状を計測した。その結果、凹面鏡のサジタル方

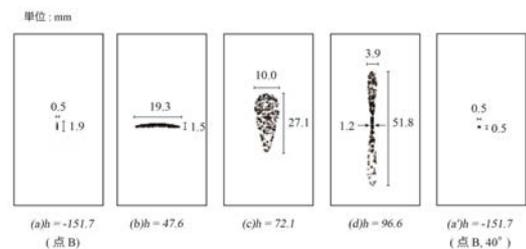


図9 光線追跡による点像のシミュレーション結果

向(円周方向)の曲率半径は 300.0 mm であったが、メリディオナル方向の曲率半径は、300 mm よりも 20%減少した 239.4mm であった。

測定した凹面鏡の形状データに基づいて、光学系のモデルを作成し、光学シミュレーションを行った。光学系のパラメータを変更しながら光学シミュレーションを行い、像の各点からの主光線の方向ができるだけ一致するように、リレー光学系の設計を行い、 $d = 132$  mm に設定した。光学シミュレーション結果を図 10 に示す。観察位置の付近では各光線が交差しており、像は欠けることなく観察可能出ることが分かった。

(4) 凹面鏡の形状計測と計測結果を考慮した光学系による空中像形成結果

この設計を実験光学系へ適用して 3次元空中像を形成した。回転ミラーを静止した状態で形成した空中像の例を図 11 に示す。約  $11^\circ$  の水平観察角度内において、像全体が欠けることなく観察することができた。図 5.4 では、縦方向に縮小するような歪みが発生している。像の歪みを改善するには、歪みの発生を計測し、それを補正するように投影画像をあらかじめ変形しておく手法が考えられる。

200 枚の合成画像を用い、回転ミラーを回転させて 3次元空中像の全周囲表示を行った結果を、図 12 に示す。回転ミラーの回転周波数は 18Hz とした。この結果、視点変化に伴い 3次元空中像の画像の向きが変化しており、それぞれの像において両眼視差および運動視差に基づく立体感が得られていることが確認で

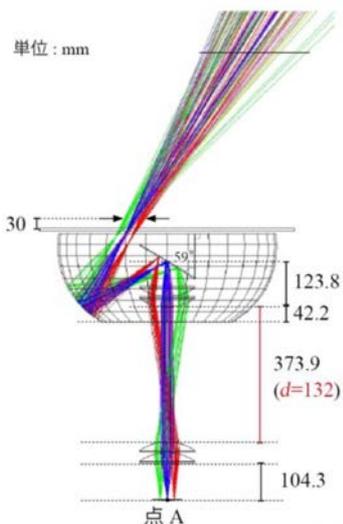


図 10 凹面鏡の形状計測結果を考慮した光線追跡シミュレーション結果



図 11 凹面鏡の形状計測結果を考慮した設計した光学系による空中像。ミラーは固定。異なる方向から観察した。

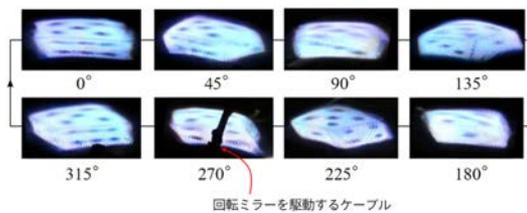


図 12 空中像の全周からの観察結果

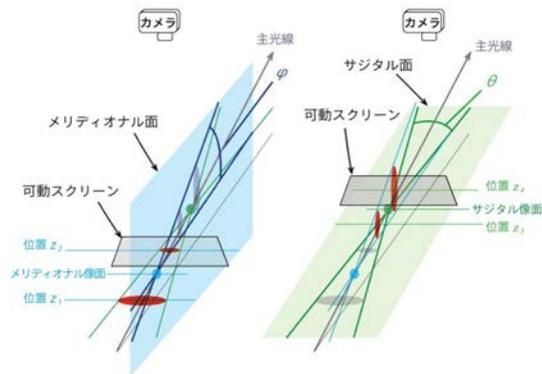


図 13 非点収差を伴う場合の光放射方向計測方法

きた。

ミラーの回転周波数が目の残像しきい値よりも低いため、表示像の点滅が知覚された。ミラーの回転周波数を高くすると、振動が激しくなったため、装置の剛性を高める必要がある。

像の歪みを打ち消すために、図 7 に示したようにスクリーンの位置を変えながら点像を取得することで、像の形成位置付近での光線の位置と伝搬角度を計測した。しかし、結像位置から離れるにつれて点像のボケが大きくなり、さらに非点収差が発生しているため、光線の位置と角度を特定することは困難であった。そのため、十分な測定精度が得られず、補正による像の改善効果は少なかった。非点収差が発生している状況で測定を行うためには、図 13 に示すように、サジタル像面付近とメリディオナル像面付近でそれぞれ 2箇所ずつ、計 4 箇所のサンプリングを行う手法が考えられる。それによりメリディオナル方向とサジタル方向それぞれの伝搬方向を算出し、それらを合成して像を形成する光線の特性を測定できる可能性がある。

空中に形成した 3次元像において非点収差が伴う場合に、人間の輻輳と焦点調節に与える影響を調査するがある。非点収差が立体視に与える影響が大きい場合は、非点収差を補正する手法を検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 16 件)

- ① 宮崎 大介, "体積走査を用いた空中浮遊 3次元画像形成" 映情学技報, vol. 40, no. 20, 3DIT2016-18, pp. 1-5, (2016)、大阪市立大学 (大阪府大阪市)

- ② D. Miyazaki, “Three-dimensional display based on retroreflective imaging,” The 6th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics., Inv20-p1(2016), 札幌コンベンションセンター (北海道札幌市)
- ③ D. Miyazaki, R. Tamaki, T. Mukai, “Aerial Volumetric Image Display Based on Retroreflective Imaging and Optical Scanning with a Slanted Rotating Mirror,” 23rd International Display Workshops (2016)、福岡国際会議場 (福岡県福岡市)
- ④ D. Miyazaki, Y. Maeda and S. Maekawa, “Floating Three-Dimensional Image Display Using Micro-Mirror Array Imaging Element,” Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2015, Proc. SPIE, Vol. 9495, 949508 (2015), Baltimore (USA)
- ⑤ D. Miyazaki, “Air Floating Volumetric Image Formation,” Energy, Materials, and Nanotechnology (EMN) Meeting on 3D Research 2015, B09 (2015), Bangkok (Thailand).
- ⑥ D. Miyazaki, “Floating Volumetric Display Using Retroreflective Optical Elements,” International Optical Seminar, OS-2015, (2015), St. Petersburg (Russia)
- ⑦ D. Miyazaki, Y. Maeda, S. Onoda, Y. Tokubo, S. Murakami, R. Tamaki, T. Mukai, “Aerial Three-Dimensional Display Based on Retro-Reflective Optical Imaging,” 22nd International Display Workshops IDW '15, FMC5-2 (2015) 大津プリンスホテル (滋賀県大津市) .
- ⑧ Y. Maeda, D. Miyazaki, T. Mukai, S. Maekawa, “Floating volumetric display using an imaging element that consists of a 90° prism sheet and a linear Fresnel lens,” Stereoscopic Displays and Applications XXV, Proc. SPIE, Vol. 9011, 90111N (2014), San Francisco (USA).
- ⑨ 宮崎 剛、宮崎大介、向井孝彰、“全周囲観察型空中結像インテグラルイメージング,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-PG1-5 (2014)、青山学院大学 (神奈川県相模原市)
- ⑩ 宮崎大介、“空中像による走査に基づいた 3次元ディスプレイ,” 超臨場感立体技術に関する調査 WG セミナー4「新しい 3D 表示技術の息吹」(2014)、テレコム先端技術研究支援センター (東京都) .
- ⑪ D. Miyazaki, G. Miyazaki, Y. Maeda, and T. Mukai, “Floated integral imaging display viewable from surrounding area,” Imaging and Applied Optics 2014, OSA Technical Digest, DW2B.5 (2014), Seattle (USA) .
- ⑫ D. Miyazaki, “Three-dimensional image formation based on scanning with a floating real image,” Optical Design and Testing VI, Proc. SPIE 9272, 927208 (2014), 北京 (中華人民共和国) .
- ⑬ 村上進、宮崎大介、向井孝彰、“全周囲観察型空中結像インテグラルイメージングのキャリブレーション” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 6aE8 (2014)、筑波大学 (東京都) .
- ⑭ 村上進、宮崎大介、向井孝彰、“全周囲観察型空中結像インテグラルイメージングのキャリブレーション,” 第 15 回情報フォトニクス研究グループ研究会, P-28, pp.67 (2014)、あうる京北 (京都府京都市) .
- ⑮ D. Miyazaki, “Floating multi-view image formation with micro-mirror array imaging element,” The 3rd Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2013), 2-3 (2013), 大田 (大韓民国) .
- ⑯ 宮崎大介、“空中像形成に基づく体積表示方式” 第 1 回情報フォトニクスシンポジウム (2013)、東京工業大学 (東京都) .

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮崎 大介 (MIYAZAKI, Daisuke)  
 大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：60264800

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

向井 孝彰 (MUKAI, Takaaki)  
 前田 有希 (MAEDA, Yuki)  
 村上 進 (MURAKAMI, Susumu)  
 宮崎 剛 (MIYAZAKI, Go)