

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04223

研究課題名（和文）鑑賞者の視界に装置が入らない空中像表示のための環境反射型空中像手法の構築

研究課題名（英文）Method for design reflective mid-air image method for displaying it in which the device is not in the view of the audience.

研究代表者

小泉 直也 (Naoya, Koizumi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80742981

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、環境反射空中像の設計のために向けて、その設計手法を開発する。具体的には、環境反射型空中像を設計するにあたって、どういった反射光沢素材を使用すると、どのような明るさ・ボケ具合の空中像を表示することができるのか、その像はどの程度見やすいものなのかを設計できるようにする。反射面の光学特性を用いて、空中像のぼけの表現に関して3つ、輝度の計算に関して1つの手法に取り組み、検証した。その結果、ぼけ方を表す線広がり関数から異方性の無い広がり方を示すPSFに類する関数を得て環境反射型空中像のぼけを表現することや、反射面の特性の1つである光沢度から計算して輝度を推定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、環境反射型空中像の設計のためのツールを作るための輝度検討をする仮定で、環境反射型空中像の解像度や輝度の限界を確認し、どこまでできるかを示した点である。さらに社会的意義は、空中像システムの社会実装の課題の一つである設計のしにくさに関する問題に取り組み、特にボケの再現手法を具体的なソフトウェアとして完成させたことである。

研究成果の概要（英文）：We have developed a design method for the design of an environmentally reflective mid-air image method. Specifically, in designing environmentally reflective mid-air images, we can design what kind of reflective glossy material can be used to display mid-air images with what brightness and blurriness, and how easy the images are to see. Using the optical properties of the reflective surface, we worked on and verified three mid-air image methods with respect to the representation of blurring and one with respect to the calculation of luminance. As a result, we succeeded in obtaining a PSF-like relation that shows a non-anisotropic spread from the line spread function that expresses the blurring, and in expressing the blurring of an environmentally-reflective mid-air image, and in estimating the luminance by calculating the gloss, which is one of the characteristics of the reflective surface.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：空中像 反射特性

1. 研究開始当初の背景

VirtualReality(VR)や HumanComputerInteraction(HCI)の研究は、人にどのように情報を提供するかが最も重要な課題の一つであり、多様な表示技術が研究されている。特に視覚情報提示が重要である。視覚提示の設計には、主に個人が装着する方法での情報提示と、環境に組み込む情報提示の方法がある。環境に組み込む方式の一つである空中像は光源の光を反射・屈折し結像させたものであり、像に物理的実体がないため、環境と干渉することが無く、像が空間を動きまわることが可能であり、有力な情報提示技術の一つである。

すでに空中像を結像するための光学素子の研究は盛んに行われており、空中像光学素子や、複数素材の組み合わせによる AIRR などの空中像結像原理が提案されており、そこに使われている光学素子の工業的生産技術も進んでいる。一方でレンズ等に比較して、これらの光学素子の歴史は浅いため、現在はこれらの素子を活用した空中像提示手法・操作手法の研究が開始された状況にある。

2. 研究の目的

本研究では、環境反射空中像の設計のために向けて、その設計手法を開発する。具体的には、環境反射型空中像を設計するにあたって、どういった反射光沢素材を使用すると、どのような明るさ・ボケ具合の空中像を表示することができるのか、その像はどの程度見やすいものなのかを設計できるようにする。

3. 研究の方法

環境反射型空中像光学系の設計の際に、実際に光学系を組み立てることなく空中像の見え方を確認できる手法の実現を目的とし、反射面の光学特性を用いて、空中像のぼけの表現に関して3つ、輝度の計算に関して1つの手法に取り組み、検証した。

空中像を表示するための光学素子(MMAP)をモデリングし、材質のパラメータを調整することで、レイトレーシング法を用いて空中像のぼけを表現することを考えた。実際に表示された空中像と、この手法を用いて表現した空中像のぼけをコントラスト伝達関数(MTF)で比較した。

反射面に映った像がどれほど鮮明かを示す写像性と、画像間の差を表す二乗平均平方根誤差(RMSE)の関係を定式化することで、環境反射型空中像のぼけを表現することを考え、反射面の特性を測定して写像性を、反射面の反射像や環境反射型空中像を撮影してそれぞれ RMSE を求めた。環境反射型空中像の RMSE を目的変数、MMAP のみで表示した空中像の RMSE と写像性から求めた反射像の RMSE の和を独立変数として回帰分析した。

ぼけ方を表す線広がり関数(LSF)から異方性の無い広がり方を示す ELSF(Expanded-LSF)を得て、環境反射型空中像のぼけを表現することを考えた。MMAP における E-LSF と反射面における E-LSF を求めて組み合わせ、ぼけを表現した画像を生成した。視点移動に伴うぼけの変化を実物と比較評価した。

輝度について、反射面の特性の1つである光沢度から計算した。環境反射型空中像の輝度を目的変数、光沢度から求めた反射像の輝度を独立変数として回帰分析した。

4. 研究成果

レイトレーシング法によるぼけの再現

実際に撮影した MMAP 空中像と、CG でレンダリング(Blinner MMAP を用いて描画)した空中像の MTF を比較して評価した。MTF 曲線は、空間周波数が高くなるほど振動してしまう傾向があり、正しく値が取れない。ここでは、空中像から得られた各空間周波数における離散的な MTF 値のうち、空間周波数 2.5 lp/mm までの値を平均した値を評価値とした。以降 MTF 平均値と表す。

評価の結果、CG においてミラースリットの IOR を変えた場合、MTF 平均値は変化しなかった。また空中像に対する視点角度 が大きくなるほど MTF 平均値が小さくなる傾向にあった。さらに、MMAP を構成するガラスの roughness を変えた場合、roughness が大きくなるほど MTF 平均値が小さくなった。同様にガラスの IOR を変えた場合の MTF 平均値は、IOR が変化しても MTF 平均値は変化しなかった。また が大きくなるほど平均値が小さくなる傾向にあった。いずれの結果も、現実の空中像の MTF 平均値と比較して、その変化の变化量が一致しなかった。

したがって MMAP モデルの各パラメータを変更する手法では、今回調査した範囲において、空中像のぼけを表現できないとわかった。roughness を変更することでぼけは変化したが、実際の MTF 平均値の推移には沿わなかった。また、IOR を変更することでは、ぼけがほとんど変化しなかった。したがって、今回の実験では仮説は立証されなかった。実際の MMAP の歪みなどをモデリングできていないことが原因だと考えられる。MMAP は製造の都合上、ミラースリットどうしが完全な平行になることはない。これにより、理論上1つの点に集まる光が、実際にはわずかにずれることがあり、ぼけに繋がってしまい一致しなかったと考えている。

写像性によるぼけの再現

写像性と画像間の差を表す RMSE の関係を定式化することで、環境反射型空中像のぼけを表現する手法を検討した。RMSE は、画像間のグレースケール値の差の二乗平均の平方根を取って求められ、画像間の差が大きい場合、RMSE は大きい値を取る。同様に、環境反射型空中像のぼけは、光源画像と環境反射型空中像の画像のグレースケール値の差であり、RMSE で表せると考えた。環境反射型空中像光学系におけるぼけについて、MMAP でのぼけと反射面でのぼけにわけられる。そこで、環境反射型空中像 RMSE を、MMAP で表示した空中像の RMSE と、反射面に移した反射像の RMSE を反射面 RMSE として、その組み合わせで表現できると仮定した。このとき、反射像 RMSE について、反射面の写像性から求めることを考えた。反射面に映った像がどれほど鮮明かを示す写像性は、ぼけを示す RMSE の値の変化と関係があると考えられるためである。したがって MMAP 空中像 RMSE が既知だとしたとき、環境反射型空中像の RMSE は反射面の写像性から算出した反射像 RMSE を用いることとした。反射面の特性に対する環境反射型空中像の RMSE や、反射像 RMSE に対する環境反射型空中像の RMSE について回帰分析で求め、評価したが、明確な関係性を見出すことができなかった。

線広がり関数によるぼけの再現

ぼけ方を表す LSF(LineSpreadFunction)から、異方性のない広がり方を示す E-LSF(Expanded-LSF)を得て、環境反射型空中像のぼけを表現する手法を検討した。

まず、画像に PSF(PointSpreadFunction)を畳み込むことで、ぼけを表現できることから、環境反射型空中像のぼけを MMAP と反射面の PSF を用いて説明できると考えた。MMAP の PSF は、MMAP を透過する際のぼけの様子、反射面の PSF は、反射面で反射する際のぼけの様子を表している。そこで、光源画像に MMAP の PSF を畳み込むことで、MMAP によるぼけ画像を表現し、さらに反射面の PSF を畳み込むことで、表示される環境反射型空中像のぼけを表現できると考えた。

しかし、これを実行するためには、誤差が小さい PSF を得るために複数回撮影する必要があり手間が大きい。一方で、PSF に対して、LSF は容易に取得でき、方向が一意に定まるため扱いやすい。LSF は線光源の広がり方を撮影するか、もしくはエッジ画像に対する光学系の応答を表す関数であるエッジ広がり関数(ESF:EdgeSpreadFunction)を微分して得られる。さらに、エッジ画像では、1 回の撮影で複数の ESF が同時に取得できることから誤差が出にくい。そこで本研究では、環境反射型空中像のぼけを表現するために、PSF の代替手段として E-LSF を提案する。E-LSF は、LSF を直交させて掛け合わせることで定義される。それによって、E-LSF は点光源の異方性のない広がり方を表すことができる。E-LSF を生成するには、まず、得られた LSF を 1 次元配列として並べ、それを 2 次元配列に拡張する。次に、その 2 次元配列とそれを直交させた配列を掛け合わせ、最後に全体の合計が 1 になるよう正規化する。提案手法を図 1 にまとめる。

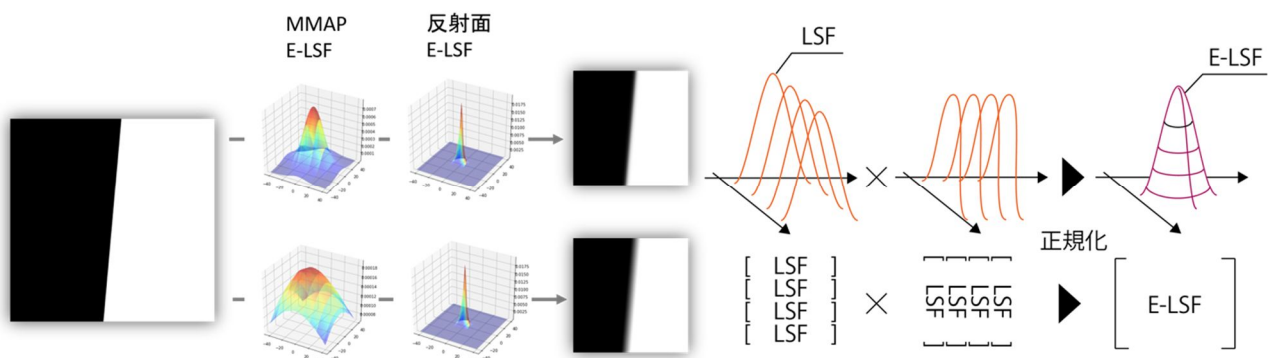


図 1 : MMAP 及び反射面の E-LSF の組み合わせによるボケの再現及び LSF から E-LSF の計算の模式

【実験】

LSF を用いて環境反射型空中像のぼけが表現できるか確認した。まず、幅広いぼけの表現を調査するため、0-100 の範囲をとる写像性が異なる 15 種の反射面を用意した。

MMAP で表示された空中像(MMAP 空中像)、各反射面における反射像、各反射面における環境反射型空中像を図 2 のようにそれぞれ撮影した。光源画像として ISO12233 解像度チャート(エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社)を用いた。MMAP には、36.6cm x 36.6cm の ASKA3D プレート(株式会社アスカネット)を用いた。カメラには ILCE-7M3(ソニー株式会社)を用い、F 値を 5.6 かつ ISO 感度を 50 に設定し、シャッタースピードは各撮影において白飛びをしない限界値に設定した。カメラは測定する対象から 1 m 離し、測定部分が大きく撮影できるよう、焦点距離 300 mm で撮影した。各仰角 θ の値について 40° から 50° の範囲で 5° 毎、各方位角 ϕ

の値について 0° から 15° の範囲で 2.5° 毎に撮影した。

その後、撮影した反射像と MMAP 空中像から得た LSF を用い、環境反射型空中像のぼけを表現した画像(ぼけ表現画像)を出力した。撮影した画像から $500\text{pixel} \times 500\text{pixel}$ で解像度チャートのエッジ部分を切り取り、エッジを中心に各行 99pixel をサンプリング範囲として LSF を得た。このとき、二値化し、画像エッジ特徴の検出アルゴリズムの 1 つである Canny エッジ検出器を用いてエッジを認識した。LSF から E-LSF を算出し、 5° 傾斜したエッジを正方形で切り取った画像に畳み込むことでぼけ表現画像を得た。

【結果】

実際に撮影した環境反射型空中像と、表現した環境反射型空中像の MTF を比較して評価した。MTF 曲線は、空間周波数が高くなるほど振動してしまう傾向があり、正しく値が取れない。そのため、環境反射型空中像から得られた各空間周波数における離散的な MTF 値のうち、空間周波数 1lp/mm までの MTF 値を平均した値を評価値とし、以降 MTF 平均値と表す。

各反射面について、実際に撮影した環境反射型空中像とぼけを表現した環境反射型空中像を比較したかを、MTF 平均値の平均絶対誤差率及び MTF 平均値の相関係数で比較した。平均絶対誤差率は、ある ele について、各 azi において撮影画像とぼけ表現画像のぼけがどれだけ近いかを示す。また、相関係数は、ある ele について、azi を変化させたとき、撮影画像と、ぼけ表現画像のぼけ具合が同じように変化することを示すものである。実際の環境反射型空中像と表現結果を比較した際に許容できる範囲を、主観調査から平均絶対誤差率 7.5% 以下、相関係数 0.9 以上とし、これを基準とした。また、視点角度が変化する際のぼけの量の変化の類似性を示す相関係数について、実験結果から全体的に 0.9 以上の高い値を取っていることを考慮して設定した。この基準を用いて、ぼけの表現 (CG による再現の良さ) について評価した。写像性が 56.8 以上のとき基準を満たし、ぼけが表現できたと判断した。

さらに本手法を拡張し、模様付き反射面におけるぼけの LSF 取得できるように改良し、壁紙サンプル(TPU014)を反射面とした環境反射型空中像の撮影画像と、ぼけ表現画像を図 3 に示す。

輝度の再現

反射面の特性の 1 つである光沢度から、環境反射型空中像の輝度を再現した。

【原理】

環境反射型空中像の輝度 L は、光源の輝度 L_I と MMAP での輝度減衰率(MMAP 輝度減衰率) L_d 、反射面の反射率 R の積として求められる。ここで、反射面の反射率理論値 R_t を求めるため、光の振る舞いを表すシュリックの近似式と、正反射する光の程度を示す光沢度を利用した。光沢度は、ある反射面における入射光と正反射光の比を光沢の指標として数値化したものであり、ガラスの反射率を基準として反射率の大きさを示すものである。これらの式を解いて、各反射面の入射角 60° で測定される光沢度(光沢度 60°)から反射率理論値 $f(n, \quad)$ を求めた。

【実験】

反射面の光沢度から環境反射型空中像の輝度を求めるため、この 2 つの関係を調査した。

まず表面反射アナライザーを用いて光沢度 60° を測定した。この値を反射率理論値の算出に使用した。光源・MMAP 空中像・各反射面における反射像・各反射面における環境反射型空中像

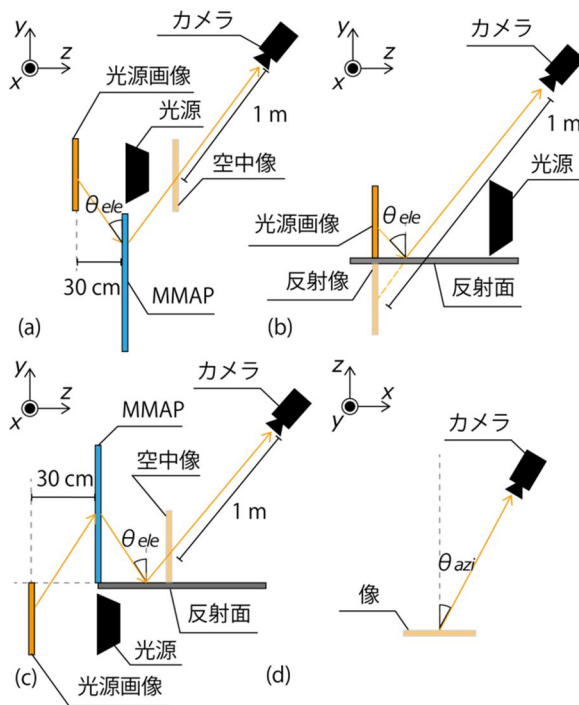


図 2 ; ぼけ表現実験 (a) MMAP で結像された空中像の撮影 (b) 各反射面における反射像の撮影 (c) 各反射面における環境反射型空中像の撮影 (d) 上面図

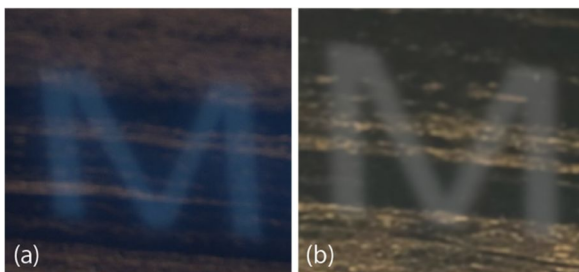


図 3 : azi= 10° における模様付き反射面を用いた場合の環境反射型空中像の表現 (a) 撮影画像 (b) ぼけ表現画像(CG で作ったもの)

の輝度を測定した。輝度計は測定する対象から 1 m 離し、各 ele の値について 25° - 65° の範囲で 5° 毎に測定した。

それらの値をもとに、反射面の光沢度に対する環境反射型空中像の輝度について回帰分析を行い、評価した。具体的には、輝度測定で得られた反射率測定値を独立変数とし、環境反射型空中像の輝度の実測値を目的変数として回帰分析を行った。また、光沢度から算出した反射率理論値を独立変数とし、環境反射型空中像の輝度の実測値を目的変数として回帰分析を行うことで、光沢度を用いた反射率理論値が環境反射型空中像の輝度を求めるために利用できるか確認した。

【結果】

輝度測定で得られた反射率測定値 R_m と環境反射型空中像の輝度の実測値との関係は、図 4 (a) で示されるように下式のように求められた。

$$L = LI \times Ld \times Rm \times$$

ただし、測定誤差による輝度の変化を考慮し、を補正係数と定義した。光源の輝度と MMAP 輝度減衰率は実験から求められた値を使用した。

光沢度から算出した反射率理論値 R_t と環境反射型空中像の輝度の実測値との関係は図 4(b) で示されるように下式のように求められた。MMAP と反射面以外の要因による輝度の変化と、光沢度から理論値を求める際のずれを考慮し、を補正係数と定義した。光源の輝度と MMAP 輝度減衰率は実験から求められた値を使用した。

$$L = LI \times Ld \times Rt \times$$

【最終ソフトウェア】

これらの結果を踏まえ、3DCG ソフトウェアの Blender を用いて、写像性 56.8 以上の反射面における環境反射型空中像を表現するシステムを実装した。ある反射面に表示される環境反射型空中像のぼけと輝度の大きさを画像として表現し、Blender 上に配置した。さらに、光学系の幾何的な関係から、環境反射型空中像の結像位置と視域を表現した。

具体的な手順としては、まず光源画像を元に、LSF を用いて環境反射型空中像のぼけ、光沢度を用いて輝度を計算する。次に、光源画像、MMAP 及び反射面の位置から空中像の結像位置を計算し、平面オブジェクトとして配置した。環境反射型空中像は、光源画像を MMAP に対して面対称移動させ、さらに反射面に対して面対称移動させた位置に結像する。このことから、表現された環境反射型空中像の平面オブジェクトを配置する座標を決定した。最後に、カメラと MMAP の位置関係から視域を表現した。環境反射型空中像の視域は、反射面による MMAP の虚像を底面とし、カメラの位置を頂点とする四角錐で表される。これを利用し、この四角錐内に入る空中像部分のみを残すことで視域を表現した。具体的には、空中像を底辺としカメラを頂点とする四角錐のオブジェクトを配置し、Blender のモディファイアのブーリアン機能を用いて、このオブジェクトと空中像の平面オブジェクトが重なる部分のみを残すことで、視域を表現した。

このシステムを実際に使用して環境反射型空中像光学系を設計した。反射面に、写像性が異なる平面素材を用いた。表面反射アナライザを用いてこれらの写像性を測定した結果、それぞれ写像性 100、82.7、57.6 で本手法を適用できる写像性の範囲 56.8-100 を満たしていた。光沢度 60° はそれぞれ 92.2、78.6、93.7 であった。

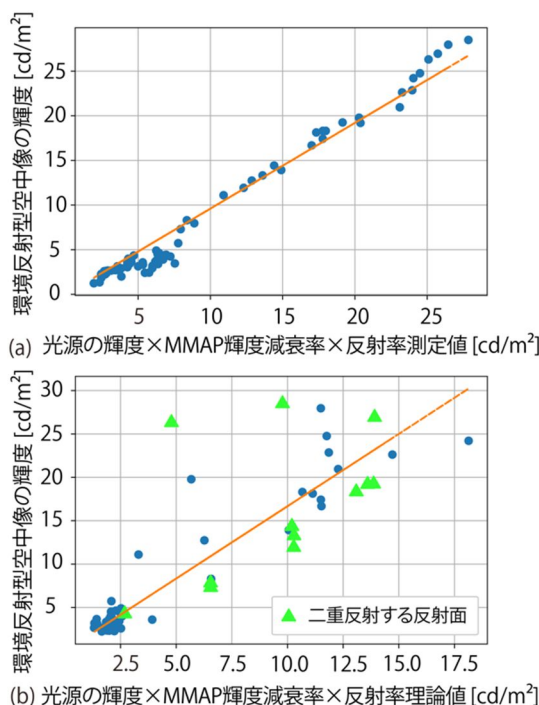


図 4 (a) ele=60°における反射率測定値と環境反射型空中像輝度の関係
(b) ele=60°における反射率理論値と環境反射型空中像輝度の関係

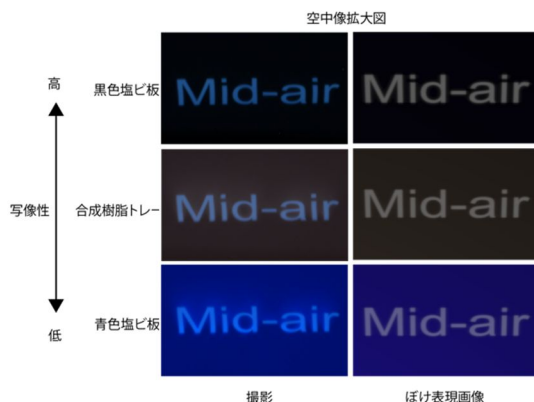


図 5 : 撮影像と CG 再現画像の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, Naoya Koizumi.	4. 巻 29
2. 論文標題 Simulation of mid-air images using combination of physically based rendering and image processing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-022-00729-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuchiya Kei, Koizumi Naoya	4. 巻 9
2. 論文標題 Aerial Imaging by Retro-Reflection for Mid-Air Image Display and Camera Viewpoint Transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 25110 ~ 25117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3057056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koizumi Naoya, Sano Ayaka	4. 巻 28
2. 論文標題 Optical system to display mid-air images on a glossy plane and remove ground images	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 26750 ~ 26750
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.400104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Osato Yui, Koizumi Naoya	4. 巻 91
2. 論文標題 Compact optical system displaying mid-air images movable in depth by rotating light source and mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Graphics	6. 最初と最後の頁 290 ~ 300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cag.2020.08.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koizumi Naoya, Yuzurihara Koki	4. 巻 10
2. 論文標題 High-Luminance Mid-Air Image Display for Outdoor Viewing by Focusing Sunlight	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 5834 ~ 5834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10175834	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Ayami Hoshi, Shunji Kiuchi, and Naoya Koizumi.
2. 発表標題 PicPop: A pop-up picture book comprising mid-air images
3. 学会等名 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉 直也
2. 発表標題 マイクロミラーアレイ素子を用いた環境反射型空中像
3. 学会等名 2021年 第2回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 星 彩水, 木内 舜司, 小泉 直也
2. 発表標題 PicPop: 空中像を用いた飛び出す絵本の提案
3. 学会等名 情報処理学会 インタラクション2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水田袖花, 土谷慧, 小泉直也.
2. 発表標題 Avatar Crossing : 空中像を用いた移動可能な実世界CGアバタシステム
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉直也
2. 発表標題 マイクロミラーアレイ素子を用いた空中像インタラクション
3. 学会等名 映像情報メディア学会 立体映像技術研究会 (3DIT) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 (監修)山本 裕紹, (著者)小泉 直也 他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 354
3. 書名 操作・検査のタッチレス化/非接触化のための 設計ポイントと最新動向	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------