

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18H03256
研究課題名(和文)透明スクリーンカメラによる新しいユーザインタフェース

研究課題名(英文) Novel user interface using transparent screen camera

研究代表者
山口 雅浩 (Yamaguchi, Masahiro)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：10220279
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、透明板正面の被写体を撮影する透明平板スクリーンカメラを開発し、これをディスプレイの前面に置く新たな方式のユーザインタフェースを提案した。これは、体積型ホログラム光学素子を用いたホログラフィック導波路デバイスを用いた手法であり、異なる全反射回数の像が重なり合って多重像を形成することから、画像再構成処理を適用することでブレの無い画像を取得する。またホログラムの回折光以外の不要光成分を除去するための分光画像処理手法の提案も行った。以上の提案方式に基づき実験を行うことで、透明スクリーンカメラの原理実証・基礎特性の明確化を図り、新規なユーザインタフェースへの応用可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、ICT・AI・リモートワーク・スマートホーム等、多様な人々がデジタル機器を扱う状況が生じており、誰でも快適に使えるユーザインタフェースの高度化は社会的要請の高い分野である。本成果は、携帯端末による視線の一致する遠隔コミュニケーションや、非接触でスクリーン近接のジェスチャー入力への応用等、社会的意義は大きい。また近年応用が拡大している導波路型ホログラム光学素子に関して、ブラッグ回折素子と画像再構成技術を組み合わせた計算イメージング分野への展開、さらにそのユーザインタフェース分野における価値創造等は、異なる学術的基礎の融合により可能となる新たな分野として、学術的な意義も高いと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a transparent flat screen camera that captures the subject in front of a transparent screen, and proposed a new method of user interface using this camera in combination with a display. This method uses a holographic waveguide device with a volumetric holographic optical element. In this method, the images generated by different total reflection times are superimposed to form multiple images, and thus the image reconstruction process is applied to obtain blur-free images. We also proposed a spectral image processing method to remove unwanted components other than the component diffracted by the hologram. By conducting experiments based on the above proposed method, we have demonstrated the principle and clarified the basic characteristics of the transparent screen camera, and clarified its applicability to a novel user interface.

研究分野：光工学、画像工学

キーワード：ホログラム光学素子 画像入力 ユーザインタフェース ディスプレイ

1. 研究開始当初の背景

ユーザインタフェースの高度化は重要な課題である。中でも視覚情報を取得するカメラは基本的なセンサーであり、携帯端末には複数のカメラが搭載されつつある。ところが端末上のユーザの正面にはディスプレイがあるため、カメラや各種センサーは端末の辺縁に配置されている。このため、非接触タッチインタフェースなどのためにカメラを使おうとしても、スクリーン近くの領域が撮影できない。またユーザがディスプレイを直視すると顔を正面から撮影できないため違和感が生じるなどの問題がある。これに対し、各画素に画像センサーを埋め込んだ液晶ディスプレイや、ハーフミラーで正面撮像を可能とするディスプレイなどの提案があるが、いずれも汎用性に限界があった。

2. 研究の目的

本研究では、透明なガラスまたはプラスチック板を用いた「透明平板スクリーンカメラ」を開発し、これをディスプレイの前面に置くことで新たな方式のユーザインタフェースを構築することを目的とする。透明スクリーンカメラでは、透明板の一方の面に体積型ホログラム光学素子 (vHOE: Volume Holographic Optical Element) が貼付されており、透明板が導波路の役割をして下方に配置されたイメージセンサで画像を取得する。このようなデバイスはホログラフィック導波路デバイス (HWD: Holographic Waveguide Device) とも呼ばれ、その原理はエッジリット・ホログラムや装着型 AR ディスプレイに用いられているものと同様であるが、直視型ディスプレイの全面を覆うタイプは前例が無い。本研究では HWD を用いて撮影された画像に対して再構成技術を適用して画像を取得する透明スクリーンカメラの実現可能性を実験的に明らかにすることを旨とする。

3. 研究の方法

三角プリズムを用いた光学系によりフォトポリマーを露光することで HWD を作成し、透明平板スクリーンカメラの光学系を開発する。またブラッグ条件を考慮した光線追跡の計算機シミュレーションにより撮影画像の特性を明らかにする。また、透明平板スクリーンカメラにおいて、vHOE の回折光とは別にガラス表面による反射光や透過光などが不要成分として混入するため、この不要光成分を除去する方法を提案し、実験的にその有効性を検討する。さらに、vHOE を用いた透明平板スクリーンカメラの撮像システムを実際に構築し、撮影画像に対して画像再構成を適用することで、提案システムの機能に関して実験的検証を行う。

4. 研究成果

4.1 HWD を用いた透明平板スクリーンカメラの開発

・HWD の作成

HWD に用いる vHOE は図 1 に示す光学系を用いて作成する。ホログラム用の感光材料としては Covestro 社製 Bayfol HX200 フォトポリマーを用いた。ガラス板の内部反射における臨界角を超えた角度で参照光を入射するため、感光材料をプリズムに貼り付けて露光している。体積型ホログラムであるため、ブラッグ回折による波長選択性・角度選択性を有する。初期実験では 20mm×30mm の vHOE を作成したが、vHOE の大きさで撮影画角が制約されるため、2つの三角プリズムを用いた図 1 の光学系により、大型 (約 50mm×50mm) の vHOE の露光を可能とした。

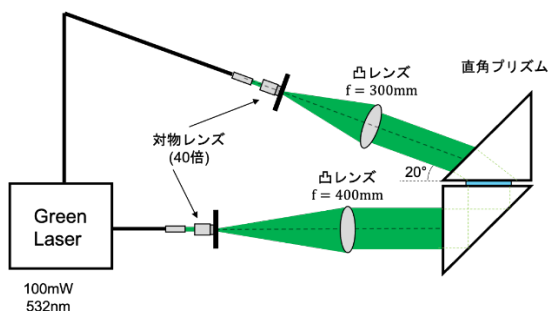


図1 vHOE 露光光学系

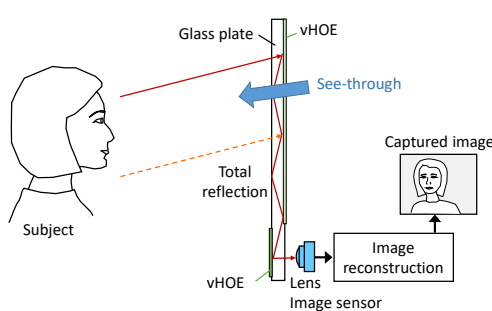


図2 vHOE 2枚を用いた透明スクリーンカメラの構成

・透明平板スクリーンカメラ光学系の構築

はじめに、最も基本的な構成として、一種類の反射型グレーティングによる vHOE を用い、単一のイメージセンサで撮影する方式を実装した。これによって透明スクリーンの前方にある物体をエッジ部に設置したカメラで撮影できることを確認した。

試作した HWD に対して入射する被写体からの光について光線追跡を行い、イメージセンサの配置とエッジ部で撮像される像の関係をモデル化した。配置によってはホログラム光学素子内で複数回反射する光が混在するため、鏡像や多重像が発生する。画像再構成アルゴリズムを適用してこれらの影響を取り除く手法を共役勾配法により実装し、計算機シミュレーションにより

その原理確認を行った。

HWDを用いたARディスプレイなどにおいては、2枚のvHOEを組み合わせた方式も用いられる。本研究では、次の段階として、図2に示すように2枚のvHOEを用いたHWDを用いた光学系を構築した。この光学系では、vHOEでの回折が2回となることによる光の損失の問題はあるものの、ホログラムにより生じる波長分散をキャンセルできることと、像の歪みが少ないことの点で優れている。図3(a)に示す光学系で実験を行ったところ、十分に画像撮影が可能であることを確認できたため、以降は2枚のvHOEを持った構成で実験を行った。

なお、この構成の撮像系に関して先行技術特許が見られたが、以降に述べる多重像の問題が無視されているため被写体が無限遠方に限定されていることが明らかとなった。本研究で提案した手法は、画像再構成処理を用いることで任意の距離の被写体に対して画像を取得することが可能である。

2枚のvHOEを用いた光学系に関しても光線追跡シミュレーションを行い、物体上の一点から発した異なる波長の光が異なる全反射回数で撮像されること、物体上の位置により異なる色で撮影されることが明らかになった。後者は、物体の垂直方向の位置によってブラッグ条件を満たす波長が異なるため、撮影画像の上方・下方で異なる色の画像が撮影されるというものである。この性質を利用すれば、単色のレーザーで記録したvHOEを用いてフルカラーの画像記録を行える可能性がある。

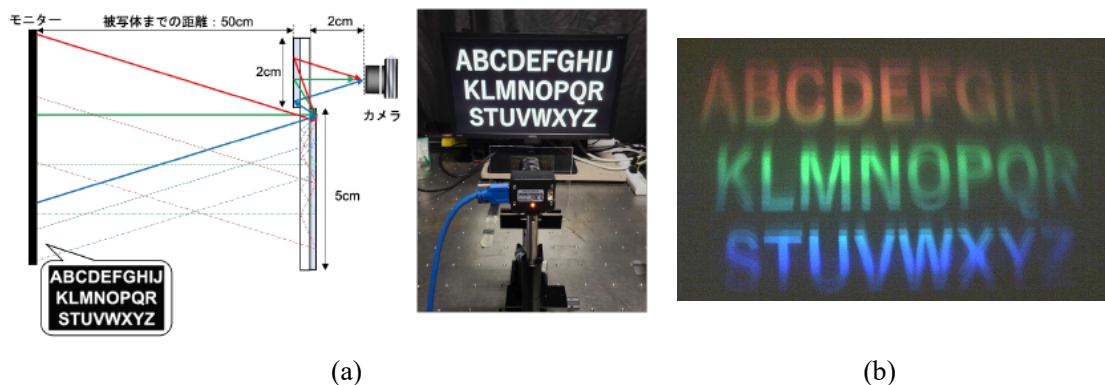


図3 (a)撮影実験の光学系の配置と写真、(b)撮影された画像の例

・携帯端末ディスプレイへの応用検討

提案システムの一つの有力な応用先はスマートフォンやタブレットなどの携帯端末のディスプレイである。ここでは、本透明スクリーンカメラとディスプレイを組み合わせたときに、ディスプレイからの光が悪影響を及ぼさないか実験的に検討した。具体的には、vHOEで回折してガラス板内を全反射して伝搬した光を、もう一枚のvHOEで回折させてスマートフォンに搭載されたカメラで撮影する。図4(a)に示すようにスマートフォンの前面にHWDを配置し、vHOEによる回折像を撮影した結果を図4(b)に示す。ディスプレイに表示した画像からの影響は確認できず、スマートフォンや携帯端末のスクリーン表面に配置するアプロケーションの実現可能性を確認できた。



図4 (a) スマートフォン内蔵カメラによる撮影実験の様子。(b)撮影画像。ディスプレイによる影響を受けずに画像の撮影ができています。

・多重像の発生

図2の光学系で大きな視野範囲を撮影するためには大きなHWDが必要である。HWDが大きい場合、図2の実践と点線で示すように被写体の異なる点からHWDに入射する光が同一の光路を通過してイメージセンサに到達することになる。これにより、撮影画像には多重像が発生する。この多重像の影響により、図3(b)の撮影画像において、垂直方向にぶれたように見えている。多重像の画像処理による補正手法については4.3節に述べる。

4. 2 透明平板スクリーンカメラにおける不要光成分除去手法

提案手法において、カメラで取得される像には、HOE で回折された対象物からの光の他に、環境光やガラス境界面での直接反射光、ディスプレイからの光などが混入しノイズとなるため、分光的画像処理を用いてこのノイズを除去する方法を提案した。体積型ホログラムは波長選択性により狭帯域の波長範囲の光のみが回折するが、環境光などは全波長帯域にわたる光であるため不要光の輝度は高く大きな問題となる。図 5 (a) に vHOE を用いた撮影系、(b) に (a) の光学系で撮影された不要光成分の混入例を示している。被写体であるマネキンの頭部は薄く緑色で撮影されているが、不要光成分である色票やドライフラワーが強く被っている。なお今回は HWD の開発と並行して実験を進めるため、導波路型ではないタイプの vHOE を用いて実験を行っている。本研究で提案する手法 (図 5 (c)) では、マルチスペクトル撮影によりホログラムの回折光が含まれる波長帯域と含まれない波長帯域の画像を取得し、これらに分光画像処理手法を適用することで、不要光成分を除去する。この不要光成分の除去は逆問題として定式化できるが、不良設定問題となるため、不要光のスペクトルが一般的な物体からの反射光であるため波長方向に相関があることを利用して正則化を行っている。

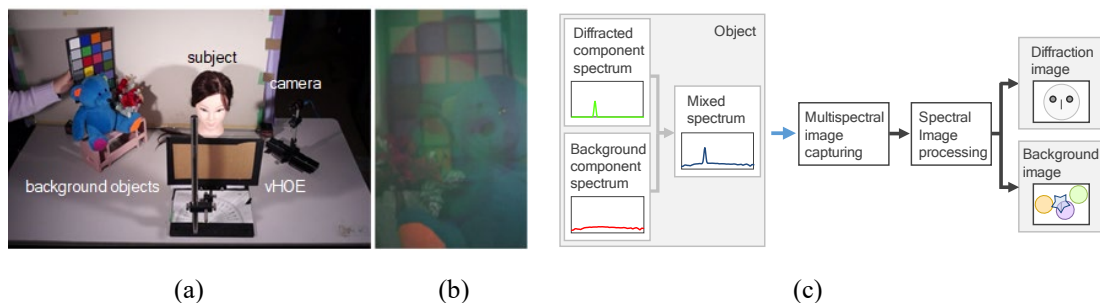


図 5 (a)vHOE を用いた撮影系、(b)不要光成分の混入例、(c)不要光成分除去手法の流れ

提案手法について、16 バンドマルチスペクトルカメラ (IMEC モザイクフィルタによる XIMEA 社製 MQ022HG-IM-SM4X4-VIS) を用いた実験システムを構築し、実装した。提案手法はウィナー推定に基づく簡易な計算で分離を行えるため、一般的な PC 上でリアルタイム動画画像処理を行うことができる。図 6 に処理結果を示す。vHOE による回折像は 16 バンド中 13 バンド目に最も強く含まれるが、(b) に示すように不要光成分であるカラーチャートが強く重なっている。16 バンドに対して提案手法を適用した結果、(c) に示すように不要光成分を概ね取り除くことができた。なお、13 バンド目とそれに隣接する波長帯域 (14 バンド目) の 2 バンドでも、多少ノイズは増加するものの、(d) のように不要光成分の除去に成功している。



図 6 不要光成分除去の処理結果。(a)不要光成分が混入したカラー画像、(b)vHOE 回折像が強く含まれる 13 バンド目の画像、(c)16 バンド撮影からの処理結果、(d)2 バンド撮影からの処理結果、(e)16 バンド撮影でモザイクフィルタを考慮した手法による推定結果。

図 6 (c) の不要光成分除去結果をよく観察すると、カラーチャートのエッジ部分が十分に除去されずに直線状のアートifactsとして残っている。その原因を考察した結果、16 バンドのモザイクフィルタの影響が強いと考えられたため、モザイクフィルタの空間的配置を考慮した 3 次元ウィナー推定手法を適用した。図 6 (e) はその結果を示している。(c) においてエッジ部分に見られたアートifactsがほとんど除去できていることがわかる。

4. 3 導波路型ホログラム光学素子を用いた撮像システムにおける画像再構成の実験的検証

画像再構成手法の適用に関しては、はじめに、当初の実験に用いていた 1 枚の vHOE による光学系で光線追跡を行った結果に基づいて画像生成を行い、画像再構成のシミュレーションを行った。1 枚の vHOE による光学系では撮影画像の歪みが大きい、多重像の除去及び歪の補正が可能であることを確認した。

次に、2 枚の vHOE を用いた方式に関して検討を行った。図 2 または 3 の光学系の場合、撮影画像の歪みは 1 枚の vHOE を用いた場合と比較して大幅に低減されるが、光線追跡シミュレーションの結果、完全にはシフトインバリエントとならない。そこでここでは一般的な線形逆問題として扱い、共役勾配法により再構成処理を行った。シミュレーション結果の一例を図 7 に示す。

(b)の撮影画像では、垂直方向に複数の画像が重畳して劣化しているが、(c)においては良好に再構成が行えていることがわかる。

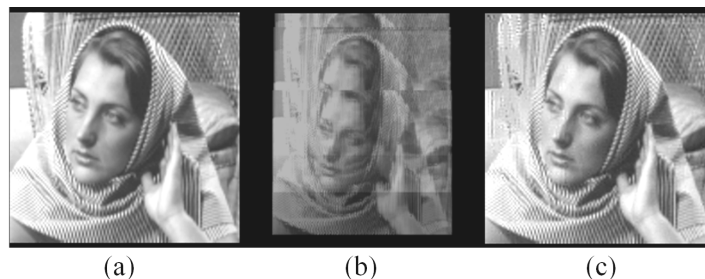


図7 画像再構成シミュレーション結果。(a)原画像、(b)撮影画像、(c)再構成結果

さらに、実験的に提案手法の画像再構成を検証するために、4.1に述べた大型のHWDを用いて、500mm離れた物体の約500×300mmの範囲を撮影可能な光学系(図3)を構築した。そして、この光学系で実験的に撮影した画像に対して再構成処理を適用した。まず、物体の位置に置いた液晶ディスプレイにアダマール基底を順次表示し、本撮像システムで画像を取得することで、画像劣化のシステムモデルを取得した。そして撮影対象物体を想定した画像を同じ液晶ディスプレイに表示し、得られた撮影画像に対して共役勾配法による再構成処理を適用した。今回は64×64画素、4096枚のアダマール基底を用いたため、再構成画像の解像度は64×64画素である。

図8は画像撮影時の実験システムの様子を示している。カメラで直接被写体を撮影しているように見えるが、カメラのレンズ正面に配置されたvHOEには遮光板が張り付けてあり、直接透過光はカメラには入射しないようになっている。



図8 撮影実験の様子

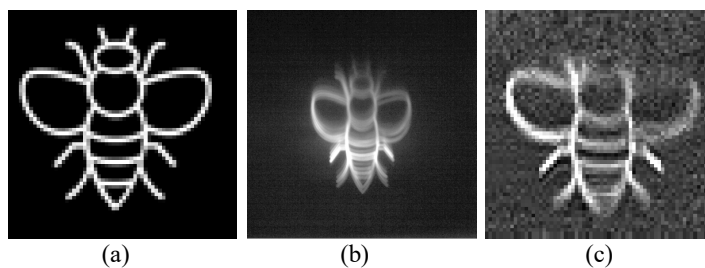


図9 (a)原画像、(b)撮影画像、(c)再構成結果

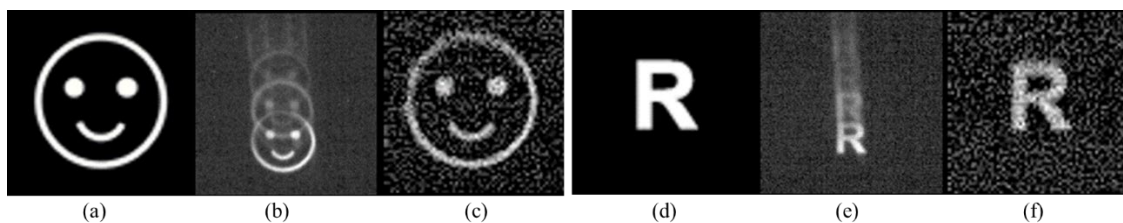


図10 小さな画像における結果の例。(a)(d)原画像、(b)(e)撮影画像、(c)(f)再構成結果。

図9に、提案手法による再構成結果を示す。(b)では垂直方向の多重像によりふれた画像となっているが、(c)ではある程度ブレが解消されている。これにより、概ね人間の頭部程度のサイズの画像を取得できることが確認された。ただし多重像の除去効果がわかりにくいのは、図9の画像の解像度が64×64画素と低いことが原因である。図10は、図8のディスプレイの画面の一部(約17mm×17mm)のみを用いて同様にアダマール基底を使ってシステム行列を求め、再構成を行った結果である。図9の一部を拡大したような特性になっており、多重像がより明瞭に観察できる。再構成結果では、ほぼ多重像を除去することができている。このことから、今後、画像再構成の大規模化を行うことで、高解像度で多重像を除去された画像を取得できる見込みを得ることができた。高解像度の画像再構成を行うには、大規模なシステム行列を取得する必要があるが、光線追跡と実光学系のキャリブレーションを行うことでこれを可能とする方法の検討を進める予定である。また、今回は一般的なレンズを通して画像を撮影しているが、レンズアレイなど薄型の素子を用いて高機能なデバイスの実現に関しても検討を進めている。

以上より、透明スクリーンカメラの原理実証・基礎特性の明確化を行い、さらに不要成分の除去手法も確立したことから、本研究の目的は達成できたといえる。研究の過程で示された特性から、本技術を用いた新しい撮像光学系への拡張可能性も明らかになり、今後の研究の発展が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Matsui Fumino, Watanabe Fumiaki, Nakamura Tomoya, Yamaguchi Masahiro | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Unmixing of the background components in an off-axis holographic-mirror-based imaging system using spectral image processing | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 39998 ~ 39998 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.412019 | 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 Javidi Bahram, Carnicer Artur, Arai Jun, Fujii Toshiaki, Hua Hong, Liao Hongen, Martinez-Corral Manuel, Pla Filiberto, Stern Adrian, Waller Laura, Wang Qiong-Hua, Wetzstein Gordon, Yamaguchi Masahiro, Yamamoto Hirotsugu | 4. 巻 28 |
| 2. 論文標題 Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 32266 ~ 32266 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.402193 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 今野 光基, 山口 雅浩 |
| 2. 発表標題 ホログラムミラー型撮像システムにおけるマルチスペクトル画像を用いた不要反射成分の除去 - カラー画像への適用 - |
| 3. 学会等名 第48回画像電子学会年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masahiro Yamaguchi |
| 2. 発表標題 Novel Spatial Visual Interfaces Employing Volume Holographic Optical Elements |
| 3. 学会等名 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications, Imaging and Applied Optics Congress, OSA (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masahiro Yamaguchi, Noriyuki Tagami, Xiao Chen, Hiroki Konno, Tomoya Nakamura |
| 2. 発表標題 Computational see-through screen camera using a holographic waveguide device |
| 3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Imaging and Applied Optics Congress, OSA (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 中村友哉, 今野光基, 五十嵐俊亮, 山口雅浩 |
| 2. 発表標題 ホログラム光学素子を用いた透明スクリーンカメラ |
| 3. 学会等名 3次元画像コンファレンス |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 松井文乃, 山口雅浩, 中村友哉, 渡辺史顕 |
| 2. 発表標題 ホログラムミラー型撮像システムにおけるマルチスペクトル画像を用いた背景成分除去 |
| 3. 学会等名 映像情報メディア学会年次大会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ivan Alexis Sanchez Salazar Chavarria, 中村 友哉, 山口 雅浩 |
| 2. 発表標題 Development of interactive real-time color-aided capabilities for 3D touch-detection in a holographic light field |
| 3. 学会等名 映像情報メディア学会年次大会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松井文乃, 中村 友哉, 渡辺 史顕, 山口雅浩 |
| 2. 発表標題 ホログラムミラー型撮像システムにおける分光画像処理を用いた重畳背景像の除去 |
| 3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masahiro Yamaguchi, Shunsuke Igarashi, Ivan Alexis Sanchez Salazar Chavarria, Kentaro Kakinuma, Tomoya Nakamura |
| 2. 発表標題 Holography enables ultrahigh-reality light-field display and 3D-touch user interface |
| 3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 今野 光基, 五十嵐俊亮, 中村友哉, 山口雅浩 |
| 2. 発表標題 ホログラフィック導波路と画像再構成処理を利用した正面撮像ディスプレイ |
| 3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 2018, OPJ 講演予稿集, pp. 439-440 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Konno, Shunsuke Igarashi, Tomoya Nakamura, Masahiro Yamaguchi |
| 2. 発表標題 Waveguide-HOE-based Camera that Captures a Frontal Image for Flat-panel Display |
| 3. 学会等名 IDW '18, Proceedings of the International Display Workshops, Vol. 25, pp. 1127-1130, Dec. 2018. (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masahiro Yamaguchi, Shunsuke Igarashi, Tomoya Nakamura, Kyoji Matsushima. |
| 2. 発表標題 Creating Enriched Visual Experience with Holography, |
| 3. 学会等名 IDW '18, Proceedings of The International Display Workshops, Vol. 25, pp. 811-814, Dec. 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村友哉, 今野光基, 五十嵐俊亮, 山口雅浩 |
| 2. 発表標題 HOEと画像再構成に基づく透明スクリーンカメラとその応用 |
| 3. 学会等名 ホログラフィックディスプレイ研究会2019年第1回研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|-------|--------------------------------|------------------------------|------------|
| 研究協力者 | 中村 友哉 (NAKAMURA TOMOYA) | 東京工業大学・工学院・助教 (12608) | 2020年7月末まで |

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 |
|---------|---------|