

令和 2 年 5 月 5 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18858

研究課題名（和文）非干渉光ホログラフィックナノオーダー精度高速度3次元動画像計測法の創成

研究課題名（英文）High-speed and three-dimensional measurement of object with nanometer-order precision based on holography using incoherent light

研究代表者

粟辻 安浩（Awatsuji, Yasuhiro）

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：80293984

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非干渉光を用いて照明された高速に動く物体や、非干渉光を発する高速に動く物体に対して、ナノメートルオーダーで3次元動画像計測する技術の実現を目指して、ホログラフィーを応用した技術とその技術に基づくシステムを創成した。本技術を実現するシステムとして、記録光学系ならびに記録したホログラムから物体の3次元像を再生するアルゴリズムを考案した。記録光学系では、共通光路を用いて物体からの光を1台の撮像素子でホログラフィック記録する。また、考案した像再生アルゴリズムに基づくソフトウェアを作成した。次に、本技術を実現するための光学系を設計・構築した。実証実験により構築したシステムの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのホログラフィーでは、記録には主に可干渉性の高い光が必要であった。本研究成果では、非可干渉性の光を用いてもホログラフィーが実現できることを示した。また、非可干渉性光の3次元分布を1ショットで記録できることを示した。この技術は、高速に動く物体から発する非可干渉性の光の3次元動画像計測を可能にする技術であり学術的意義が大きい。また、これまでは自然光で照明された高速で動く物体や光を発する物体の3次元動画像計測が可能となる。例えば、自然光や一般の光で照明された環境下で、高精度部品の高速度高精度3次元検査や生命科学において生体試料から発せられる蛍光の3次元計測が可能になり社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：For single-shot recording of nanometre-order precision and three-dimensional (3D) image of moving object illuminated with incoherent light or the moving object emitting incoherent light, a technique of digital holography and its system were studied. An optical system for implementation of the technique was designed. The system has a common path interferometer and records the hologram of the object with a single image sensor. The algorithm for reconstructing the image of object from the digital hologram recorded by the optical system was considered, and the computer software implementing the algorithm was developed. An experimental system of the technique was constructed by use of a continuous wave laser and a polarization imaging camera. To verify the 3D imaging capability of the technique, digital refocusing for an LED was demonstrated by the system. Thus, the technique was experimentally validated.

研究分野：光応用計測

キーワード：計測工学 超精密計測 画像計測 応用光学・量子光工学 3次元画像 ホログラフィー 位相計測

1. 研究開始当初の背景

近年, CCD カメラ, デジタルカメラの急速な発達に伴い, 種々の最先端科学や工学, 農学, 工業検査など様々な分野で画像計測が重要な役割を担っている. これらの分野では, さらなる解明, 高度化・高効率化のために, より高次元の情報獲得の要求が高まっている. 特に, 2次元情報だけでなく高さや奥行きなど 3次元情報の計測のニーズが高まっている. 現在多用されている 3次元計測技術では, 接触探針や光ビームの走査, あるいはカメラレンズの焦点位置を変えて複数枚の画像撮影が必要である. そのため 3次元動画像計測が非常に困難であり, 特に高速に動く物体の高精度 3次元計測は不可能であった. この様な状況の下, 3次元表示技術であるホログラフィーにおいてホログラムをイメージセンサで記録し, コンピューターで物体の像を再生するデジタルホログラフィーが, 3次元動画像計測が可能な技術として近年精力的に研究されている. この技術では, 記録したホログラムから物体の複素振幅分布や, 任意の奥行き位置に焦点を合わせた画像がコンピューター処理で得られるために, 焦点合わせに機械的走査が不要である. この特長により物体の位相計測や 3次元計測が可能な技術としてデジタルホログラフィーは, 粒子流体計測や生体計測などへの応用が近年盛んに研究されている.

特に, 並列位相シフトデジタルホログラフィーは, 動的物体に対して正確で高精度な再生像が得られるために, 近年, 高速ガス噴流の 3次元屈折率分布の取得や, 微生物の動画像計測など研究が進められている. しかし, これまでの並列位相シフトデジタルホログラフィーでは, ホログラムの記録光源に高い可干渉性の光(コヒーレントな光)を放つレーザーが必要であるという問題があった. そのために, 自然光照明された物体や自発光する物体などの非干渉光では, この技術は適用できなかった.

2. 研究の目的

本研究では, 自然光で照明された物体, あるいは自発光する物体などの光非干渉光を用いて, 高速に動く物体に対するナノメートルオーダーでの 3次元動画像計測が可能な技術を目指す. そのために, 3次元画像表示技術であるホログラフィーを応用した計測法の創成とその実証システムを設計し構築する. また, 構築したシステムにより, 提案技術ならびにそのシステムの 3次元画像計測能力を実証する.

3. 研究の方法

インコヒーレント光に対しても有効な並列位相シフトデジタルホログラフィーを可能とする技術として並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーを提案する. この技術は, シアリング干渉法に基づいており, 計測光波が同一光路を通るためシステムが簡易かつ堅牢である.

並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーの原理を図1に示す. この図はシアリング干渉法にラディアルシアリングを適用した場合について示している. まず, 物体からのインコヒーレントな光波をフーリエ変換する. フーリエ変換された物体光波を2分し, 一方の光波は倍率  $s$  で拡大する. 他方の光波は  $1/s$  に縮小する. 拡大, 縮小した2つの光波を再び結合する. 結合の際に, 結合する光波の位相を相対的に各  $2 \times 2$  画素ごとに  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  rad のシフトをさせて記録する. 記録したホログラムから, 位相シフト量の同じ画素を抽出・補間し, 複数枚のホログラムを生成する. この記録と処理方法により, 位相をシフトさせて記録した複数枚のホログラムをシングルショットで記録できる. この複数枚のホログラムに対し位相シフト法を適用し, 複素空間コヒーレンス関数の振幅と位相を得る. この複素空間コヒーレンス関数から物体光の複素振幅を計算し, 得られた複素振幅から物体面から任意の面で 3次元情報を取得できる.

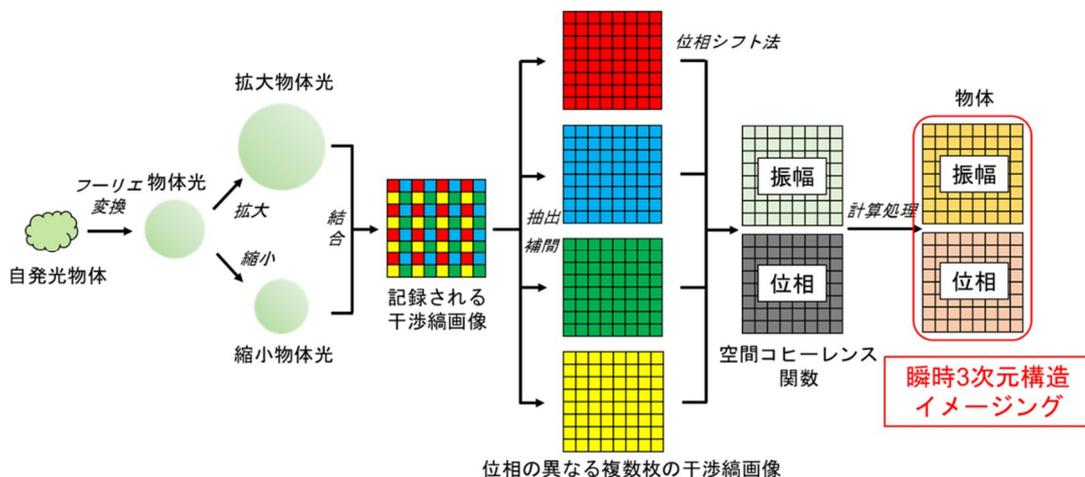


図1 並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーの原理.

並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーの実現光学系の一例を図 2 に示す．まず，物体面のインコヒーレントな光波を焦点距離  $f$  のレンズによってフーリエ変換する．フーリエ面の光波を Sagnac 干渉計で構成された並列位相シフトラディアルシアリング干渉計に入射させる．並列位相シフトラディアルシアリング干渉計に入射した光は，偏光ビームスプリッターによって垂直偏光と水平偏光に分けられ，それぞれ互いに逆回りに凸レンズ 1, 2 を通る．このとき，異なる焦点距離  $f_1, f_2$  のレンズを用いることで倍率  $s = f_1/f_2 (< 1)$  で一方の光波は拡大される．また同時に，他方の光波は縮小される．拡大，縮小された 2 つの光波を偏光ビームスプリッターで再び結合する．結合された光は，複屈折素子を通り互いに逆回りの円偏光となる．互いに逆回りの円偏光となった拡大光，縮小光を偏光イメージングカメラに入射させる．偏光イメージングカメラは，撮像素子の前に 1 画素毎に透過軸方向が異なる偏光子アレイが配置されたものである．4 方向検出式偏光イメージングカメラの場合，図 2 に示すように 0 度，45 度，90 度，135 度の偏光子透過軸を持つ画素が交互に配置されている．この配置により 4 つの位相シフト量の異なるホログラムが 1 枚の画像にシングルショットで記録される．このホログラムから物体光の複素空間コヒーレンス関数を求めて，物体光の複素振幅分布を得る．

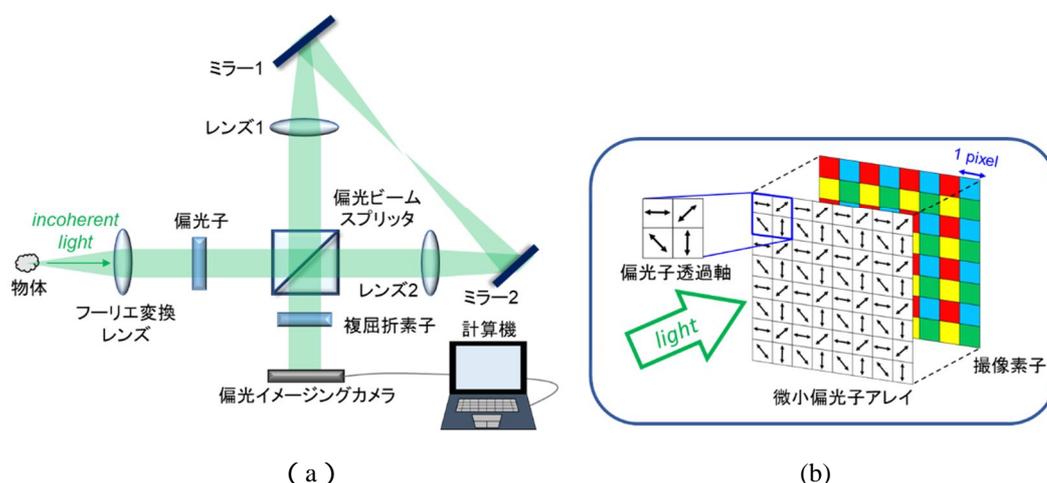


図 2 並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーの実現光学系の一例．(a)光学系の全体図，(b)偏光イメージングカメラの撮像素子の構造．

#### 4. 研究成果

提案法の実証するために，並列位相シフトラディアルシアリングデジタルホログラフィーシステムを設計し，構築した．構築したシステムの光学系を図 3 に示す．構築したシステムでは，光源として発光ダイオード(LED，中心波長 517 nm)を，ホログラムの記録には偏光イメージングカメラを用いた．また，レンズ 1 として焦点距離  $f_1$  が 200 mm，レンズ 2 として焦点距離  $f_2$  が 220 mm の凸レンズを用いた．このとき，倍率  $s$  は 0.91 倍となる．

構築した実験システムで LED1 個を点灯して記録したホログラムから像を再生した実験結果を図 4 に示す．各図の  $z$  の値は，0 mm のときに LED に合焦させた際の再生距離を表し， $z$  の値に応じて再生距離変えた際に再生された像を示している． $z$  を 0 mm から正負の両方向に変化させると，それぞれ像がぼけることがわかる．これらの結果から，構築したシステムを用いて記録した 1 枚のホログラムからリフォーカスを実現できていることがわかる．このように，構築したシステムで，3 次元イメージングに成功したことがわかり，提案技術ならびにそのシステムの有効性を示せた．

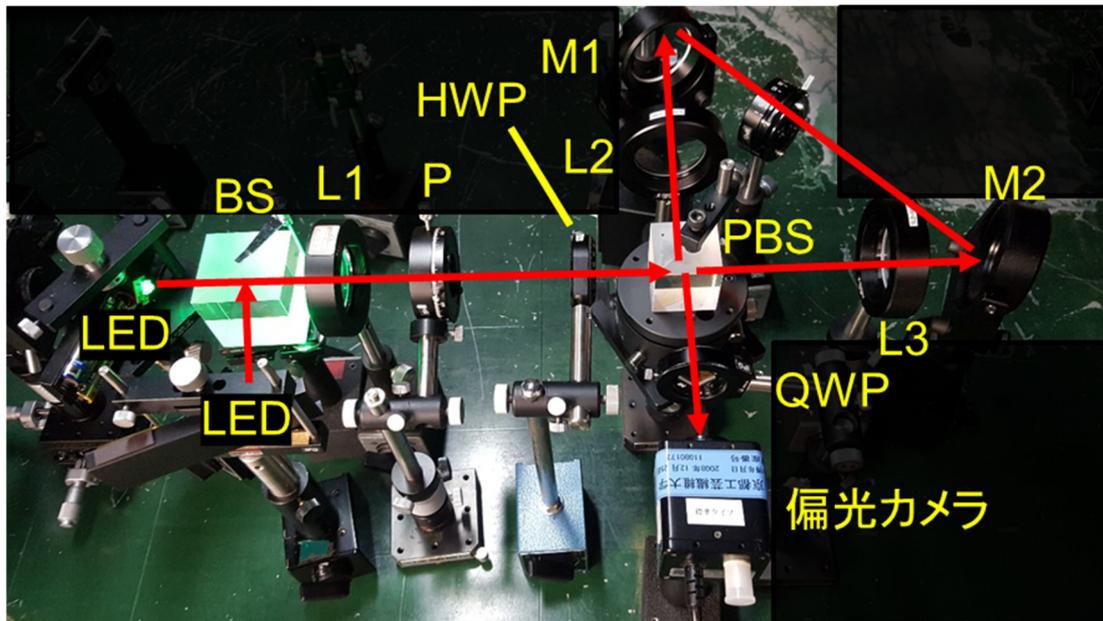


図3 構築した並列位相シフトシアリングデジタルホログラフィーシステムの写真．BS，ビームスプリッター；L，凸レンズ；LED，発光ダイオード；M，ミラー；P，偏光板；PBS，偏光ビームスプリッター；QWP 1/4 波長板．

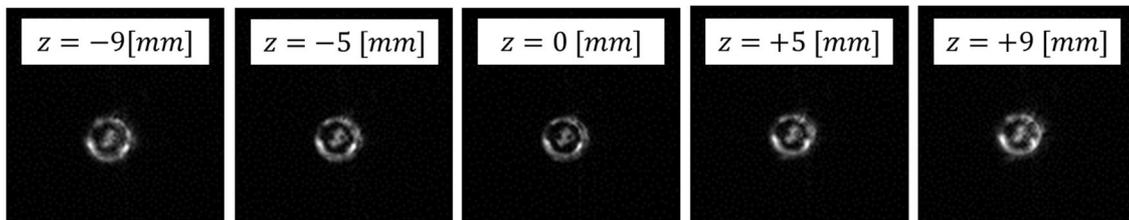


図4 実験結果． $z$  の値は、0 mm のときに LED に合焦させた際の再生距離を表し、 $z$  の値に応じて再生距離変えた際に再生された像を示している．

並列位相シフトデジタルホログラフィーに基づいて、インコヒーレント光に対して、動く物体に対して 3 次元形状動画記録を提案し、その有効性を実証した．本技術は簡易なシステムで特殊な素子を必要とせず、シングルショットで自己発光体やインコヒーレント光で照明された物体の 3 次元像を瞬時に取得可能である．そのために、用いる撮像素子の記録速度と等しい速度の 3 次元画像記録が可能である．高速度カメラを用いると、高速の物体の 3 次元動画記録・計測が可能となる．また、干渉計において、干渉させる 2 光波が共通光路を通過するために、本技術に基づくシステムは、振動などの外乱に強く、ロバスト性が高く安定して高精度で動作可能である．生細胞の蛍光 3 次元動画イメージング等への強力なツールとしての応用が期待できる．

#### < 引用文献 >

J. W. Goodman and R.W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," Appl. Phys. Lett. **11**, 77-79 (1967).

Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," Appl. Phys. Lett. **85**, pp.1069-1071 (2004).

G. Sagnac, "Georges Sagnac's rotating interferometer," C. R. Acad. Sci. **95**, 708 (1913).

I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," Opt. Lett. **22**, 1268-1270 (1997).

D. N. Naik, G. Pedrini, and W. Osten, "Recording of incoherent-object hologram as complex spatial coherence function using Sagnac radial shearing interferometer and a Pockels cell," Opt. Express **21**, 3990-3995 (2013)

T. Kakue, Y. Moritani, K. Ito, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Image quality improvement of parallel four-step phase-shifting digital holography by using the algorithm of parallel two-step phase-shifting digital holography," Opt. Express **18**, 9555-9560 (2010).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Arai, T. Hirakawa, T. Fukuda, S. Mochida, Y. Awatsuji, K. Nishio, O. Matoba	4. 巻 11140
2. 論文標題 Single-shot recording of both front and rear surfaces of object by digital holography using a polarization-imaging camera	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1114001-229-231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Shimizu, Y. Takase, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. K. Rajput, O. Matoba	4. 巻 11140
2. 論文標題 Imaging of sound by a digital holographic microscope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1114001-229-231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 粟辻安浩, 福田喬人, 夏 鵬, 角江 崇, 的場 修	4. 巻 64
2. 論文標題 高速透明物体の3次元動画画像計測技術	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ケミカルエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 173-179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 夏 鵬, 粟辻安浩, 的場 修	4. 巻 47
2. 論文標題 強度輸送方程式による位相イメージングとそのシングルショット記録	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 258-261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 粟辻安浩, 福田喬人, 西尾謙三, 夏 鵬, 角江 崇, 的場 修	4. 巻 24
2. 論文標題 高速透明気体の3次元動画画像計測技術	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Y. Awatsuji, T. Fukuda, K. Shimizu, T. Hirakawa, K. Nishio, P. Xia, O. Matoba
2. 発表標題 Vertical microscope based on parallel phase-shifting digital holography
3. 学会等名 17th Workshop on Information Optics (WI02018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Awatsuji, T. Fukuda, P. Xia, K. Nishio, O. Matoba
2. 発表標題 3D trajectory of micro object in liquid by parallel phase-shifting digital holographic microscope
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Arao, T. Hirakawa, T. Fukuda, S. Mochida, Y. Awatsuji, K. Nishio, O. Matoba
2. 発表標題 Single-shot recording of both front and rear surfaces of an object using digital holography by introducing two object waves to a single camera
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Shimizu, Y. Takase, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. K. Rajput, O. Matoba
2. 発表標題 Imaging of sound emitted from a speaker by a digital holographic microscope
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Arai, T. Hirakawa, T. Fukuda, S. Mochida, Y. Awatsuji, K. Nishio, O. Matoba
2. 発表標題 Single-shot recording of both front and rear surfaces of object by digital holography using a polarization-imaging camera
3. 学会等名 The 5th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimizu, Y. Takase, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. K. Rajput, O. Matoba
2. 発表標題 Imaging of sound by a digital holographic microscope
3. 学会等名 The 5th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒尾耕平, 平川達也, 福田喬人, 持田尚吾, 粟辻安浩, 西尾謙三, 的場 修
2. 発表標題 1台のカメラを用いたデジタルホログラフィによる物体の表裏のシングルショット記録
3. 学会等名 第43回光学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水一希, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, S. K. Rajput, 的場 修
2. 発表標題 デジタルホログラフィック顕微鏡による音場のイメージング
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 粟辻安浩
2. 発表標題 高速動画デジタルホログラフィー
3. 学会等名 神戸大学 イメージング数理研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 粟辻安浩, 清水一希, 福田喬人, 西尾謙三, 夏 鵬, 的場 修
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡とその応用
3. 学会等名 (一社)日本光学会 2018年度 第4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 2018年

1. 発表者名 粟辻安浩, 角江 崇, 夏 鵬, 的場 修
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィーを用いた高速透明気体の3次元動画イメージング
3. 学会等名 (一社)レーザー学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植村映哉, 粟辻安浩
2. 発表標題 三角型の光学系により構成光学素子数を少なくした並列位相シフトデジタルホログラフィシステム
3. 学会等名 (一社)日本光学会 情報フォトニクス研究グループ 第17回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬裕基, 粟辻安浩
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィによるスピーカが発する音の可視化
3. 学会等名 (一社)日本光学会 情報フォトニクス研究グループ 第17回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Awatsuji, K. Shimizu, Y. Takase, T. Fukuda, T. Inoue, K. Nishio, P. Xia, S. K. Rajput, and O. Matoba
2. 発表標題 High-speed imaging of dynamic and transparent object by parallel phase-shifting digital holographic microscope
3. 学会等名 18th Workshop on Information Optics (WIO2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Inamoto, Y. Takase, K. Arao, T. Inoue, K. Shimizu, K. Nishio, O. Matoba, T. Kubota, and Y. Awatsuji
2. 発表標題 Three-dimensional tracking of moving Volvox by parallel phase-shifting digital holographic microscope
3. 学会等名 The 6th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Takase, K. Shimizu, S. Mochida, T. Inoue, K. Nishio, S. K. Rajput, O. Matoba, T. Kubota, and Y. Awatsuji
2. 発表標題 Phase imaging of radiated sound field by parallel phase-shifting digital holography
3. 学会等名 The 6th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 粟辻安浩
2. 発表標題 高速度ならびに超高速度3次元動画ホログラフィー
3. 学会等名 核融合科学研究所 令和元年度 一般共同研究 画像計測研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬裕基, 清水一希, 持田尚吾, 井上智好, 西尾謙三, 粟辻安浩, Sudheesh K. Rajput, 的場 修
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィによる音場イメージング
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬裕基, 植村映哉, 荒尾耕平, 清水一希, 井上智好, 西尾謙三, 夏 鵬, 的場 修, 粟辻安浩
2. 発表標題 接触沸騰の高速ホログラフィック動画イメージング
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水一希, 高瀬裕基, 井上智好, 夏 鵬, 西尾謙三, Sudheesh K. Rajput, 的場 修, 粟辻安浩
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡による音の記録と再生
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植村映哉, 高瀬裕基, 荒尾耕平, 清水一希, 井上智好, 西尾謙三, 的場 修, 粟辻安浩
2. 発表標題 ゴム風船破裂時の空気流れの高速ホログラフィック動画イメージング
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒尾耕平, 井上智好, 西尾謙三, 角江 崇, 夏 鵬, 的場 修, 粟辻安浩
2. 発表標題 角度多重方式を用いたデジタルホログラフィーによる物体の表裏のシングルショット記録
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲本純也, 粟辻安浩
2. 発表標題 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡を用いた ボルボックスの三次元記録
3. 学会等名 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第18回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀内 尚, 粟辻安浩
2. 発表標題 デジタルホログラフィーを用いた空間光変調器の位相変調パターンの計測および検証
3. 学会等名 日本光学会 情報フォトニクス研究グループ 第18回関西学生研究論文講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

粟辻安浩のホームページ <a href="http://www.cis.kit.ac.jp/~awatsuji/index-j.html">http://www.cis.kit.ac.jp/~awatsuji/index-j.html</a>
--

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