

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15466

研究課題名（和文）圧縮センシングとデジタルホログラフィの融合による高感度・高分解能3次元計測の実現

研究課題名（英文）Fusion of Compressive Sensing and Digital Holography for High-Sensitivity, High-Resolution 3D Measurements

研究代表者

吉田 周平（YOSHIDA, Shuhei）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：10632606

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、信号のスパース性を利用したサンプリングの枠組みである圧縮センシングをデジタルホログラフィに適用し、高分解能の3次元計測を行う手法を確立した。具体的成果としては、圧縮センシングをデジタルホログラフィに適用し、1枚のホログラムから物体波を高解像度で再構成する手法を提案した。提案手法では、ホログラムの記録過程を線形変換として定式化し、圧縮センシングに基づく再構成手法により高分解能の物体波を得ることができる。また、3次元散乱密度分布による光散乱と散乱密度分布の再構成アルゴリズムを定式化し、その応用として、マイクロ流体工学のためのホログラフィック粒子追跡速度計測を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、デジタルホログラフィに圧縮センシングを応用することで、高分解能の3次元計測手法を確立した。デジタルホログラフィはイメージセンサで取得した干渉縞の画像から物体波を計測する技術である。また、スパース信号推定の手法である圧縮センシングは、少数の測定値から原信号の再構成が可能である。提案手法はデジタルホログラフィに基づいた手法であるため計測後の光学系調整やフォーカス調整が可能であり、自由度の高い運用が可能である。加えて圧縮センシングの方法論に由来する高効率計測が可能である。本研究の成果は、未知現象解明のための基盤技術の創造につながることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we applied compressed sensing, which is a sampling framework based on the sparseness of the signal, to holographic tomography to establish a method for high-resolution 3D measurements with a simple optical system.

We investigated the application of compressed sensing to digital holography to reconstruct object waves with high resolution from a single hologram. In the proposed method, the recording process of the hologram in off-axis optics is formulated as a linear transformation, and a compressive sensing-based object wave reconstruction method is introduced to reconstruct the high-resolution object waves.

We also formulated the holographic tomography as a process of scattering from the three-dimensional scattering density distribution and interference with the reference light. We proposed holographic particle tracking velocimetry for microfluidics as an application of holographic tomography.

研究分野：光工学

キーワード：デジタルホログラフィ デジタルホログラフィ 圧縮センシング 3次元計測

1. 研究開始当初の背景

物体の 3 次元情報を可視化する 3 次元イメージングは、工業計測や生命科学といった分野において、今やなくてはならない技術である。数ある 3 次元イメージング技術の中でも、特にデジタルホログラフィ(DH)は、ナノメートルオーダーで物体の 3 次元情報を測定できる優れた手法である。DH は干渉縞の数値解析により位相を含む物体波のデジタルデータを得られるため、計測後の光伝搬計算により光学系やフォーカスが調整可能な、きわめて自由度の高い計測技術である。

DH は物体の詳細な 3 次元情報を可視化できるが、他の計測方法と同様に標本化定理の制約を受ける。また、鮮明なホログラムを得るためには二光路の干渉計が必要であり、その複雑な光学系は応用上の制約となっている。光学系が比較的簡単なインラインホログラムを用いる手法では、不要光の重畳により空間分解能の高い計測が難しいといった問題が存在する。また、高精度な 3 次元計測には多数回の測定が必要となる。

本研究では、スパース信号推定の手法である圧縮センシング(CS)を DH に応用した高分解能の 3 次元イメージング手法の確立を目指す。CS は原信号がスパースであると仮定して、少ない測定データから原信号を復元する手法である。スパース信号とは要素のほとんどがゼロである信号で、音声や画像など多くの信号は適当な基底変換によりスパース表現が可能であることが知られている。ホログラムという 2 次元情報から物体の 3 次元情報を復元するという問題は、測定データより未知数の数が多い劣決定問題であるが、デジタルホログラフィによる測定過程を線形変換として定式化して CS を応用することで、高精度な 3 次元計測が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、DH に CS の方法論を応用することで、高感度・高分解能の 3 次元イメージング手法の確立することにある。物体の 3 次元情報を可視化、定量化する 3 次元計測技術は様々な分野で利用されており、医療や工学において今や不可欠な技術となっている。

提案手法では 1 枚の干渉縞画像から高解像度の物体波再構成が可能であり、また物体の 3 次元散乱密度分布といった 3 次元情報を再構成することも可能となる。本研究で提案する手法は、従来型の干渉計に変更を加えずに適用できるため、工業計測や生命科学といった諸分野への応用が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、DH の光学系と測定過程を原信号に対する線形変換としてモデル化するとともに、 L_1 ノルム最小化に基づいたイメージングアルゴリズムを実装した。実装したアルゴリズムは、フーリエ変換法に基づいて物体波を高解像度で復元するアルゴリズムおよび散乱波から 3 次元散乱密度分布を再構成するアルゴリズムである。実装したアルゴリズムはそれぞれ、解像度評価実験と粒子追跡速度計測法へ適用して評価した。

フーリエ変換法では干渉縞をフーリエ変換して周波数空間上で非回折波、物体波、共役波成分を分離し、周波数フィルタにより物体波成分を取り出す。取り出した物体波成分は周波数空間の原点に移動することで参照波の重畳による周波数シフトをキャンセルし、逆フーリエ変換することで物体波を得る(図 1)。フーリエ変換法では単一のホログラムから物体波を得られる一方、周波数フィルタ

により空間帯域幅積が狭くなるという問題がある。また、周波数空間上で各成分を分離するために、物体波と参照波の入射角をずらす必要がある。

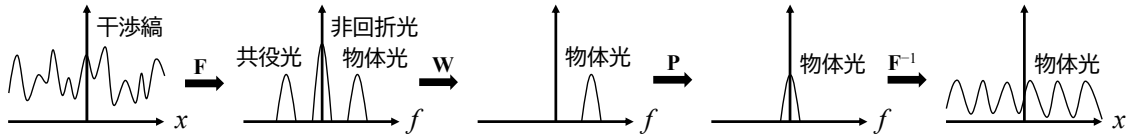


図 1. フーリエ変換法による物体光の抽出. 干涉縞をフーリエ変換して非回折光と物体光・共役光を分離する. 次に、周波数フィルタにより物体光を抽出、周波数をシフトして逆フーリエ変換を行う。

物体を透過した直後の物体波を x とし、物体から d だけ離れたセンサ面上での物体波を u とすると、角スペクトル法に基づいて u は $u = F^* H F x$ という線形変換で表せる。ここで F は 2 次元フーリエ変換行列、 H は自由空間の伝達関数を表す行列であり、 $*$ は随伴を表す。 u がセンサ面上で参照平面波 r と干渉するとき、そのホログラム f は、 $f = |u|^2 + |r|^2 + 2\text{Re}\{u \circ r\}$ と表せる。右辺第 1 項と第 2 項は不要な非回折波成分であるが、低周波領域に集中しているためハイパスフィルタで取り除くことができる。非回折波成分を除去したホログラム y は $y = 2\text{Re}\{u \circ r\}$ となる。 $u \circ r$ は参照平面波の重畳による物体波の周波数シフトを表し、フーリエ変換のシフト則を用いることで、 $u \circ r = (F^* P F)^{-1} u = F^* P^T F u$ と書き直せる。ここで P は干涉縞の物体波成分 $u \circ r$ を周波数空間の原点にシフトするための置換行列である。上記の関係式から、 y と x の関係として $y = A x \equiv 2\text{Re}\{F^* P^T H F x\}$ を得る。

散乱波から 3 次元散乱密度分布を再構成するアルゴリズムでは、インライン光学系を前提とした。光軸に垂直な平面内の 2 次元散乱密度分布を、光軸沿いに x_1, x_2, \dots, x_{N_z} と取ると、3 次元散乱密度分布は $x = [x_1, x_2, \dots, x_{N_z}]^T$ と表せる。各層からの散乱波がセンサ面上で足し合わされるとすると、センサ面上の物体波は $u = F^* H F_B x$ と表される。ここで F_B は対角成分に 2 次元フーリエ変換行列を持つブロック対角行列、 $H = [H_1, H_2, \dots, H_{N_z}]$ は各層からセンサ面までの伝達関数から成る行列である。センサ面上で u が参照波 r と干渉するとき、ホログラム f は前節と同様に $f = |u|^2 + |r|^2 + 2\text{Re}\{u \circ r\}$ と表せる。参照波として光軸に沿った平面波を使用する場合、 $r = 1$ なので $f = |u|^2 + 1 + 2\text{Re}\{u\}$ となる。非回折波成分をハイパスフィルタで除去することで、ホログラムと 3 次元散乱密度分布の関係を線形変換 $y = A x \equiv 2\text{Re}\{F^* H F_B x\}$ として表せる。3 次元散乱密度分布 x が空間的にスパースな場合、軟判定閾値関数による L_1 ノルム正則化によりスパース解を推定できる。

圧縮センシングに基づく物体波 x の再構成は、以下の最小化問題として定式化できる。

$$\min_x \{f(x) + g(x)\} \equiv \min_x \left\{ \frac{1}{2} \|A x - y\|_2^2 + \lambda R(x) \right\} \quad (1)$$

ここで $\|\cdot\|_2$ は L_2 ノルム、 $R(x)$ は正則化項、 λ は正則化パラメータを表す。ここでは、正則化項 $R(x)$ として total variation (TV) を採用した。TV 正則化を用いることで、エッジを保存したままノイズの除去ができ、これにより測定結果へのオーバーフィッティングを抑えることができる。最小化問題(1)の解法として fast iterative shrinkage-thresholding algorithm (FISTA) を用いた。また、TV 正則化の計算には fast gradient projection (FGP) 法による反復計算を用いた。

4. 研究成果

提案手法による解像度評価のためのマツハツエンダー干涉計を図 2 に示す。試料には解像度テストチャートを使用し、光源には中心波長 405 nm の外部共振器型半導体レーザーを用いた。波面のノイズや歪みを除去するために空間フィルタを通過したビームは、直径約 20 mm にコリメートして光路を分けた。ホログラムの撮影には画素サイズは 3.45 μm 、解像度 2448 \times 2048 の CMOS イメージセン

サを用いた。実験では、物体波成分と非回折波成分が周波数空間上で近接するよう、物体波と参照波の角度を小さく取った。

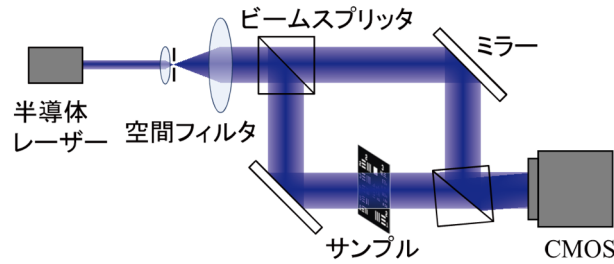


図 2. 解像度評価のためのマッハツェンダー干渉計

フーリエ変換法と提案手法による物体波振幅の再構成結果を図 3 に示す。再構成のパラメータは、FISTA の反復回数を 500 回、FGP の反復回数を 10 回、ステップ幅を 0.01、正則化パラメータを 40 とした。物体波と参照波の角度が小さいため、フーリエ変換法では周波数フィルタにより物体波の高周波成分の大部分が失われている。そのため、空間解像度が低い情報しか得られていない。一方、提案手法では高周波成分を失わずに共役ノイズを除去できていることが分かる。

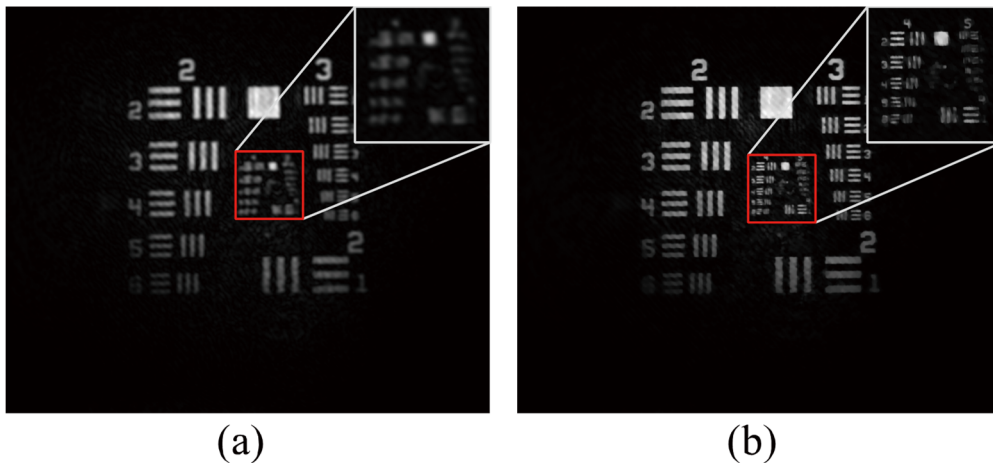


図 3. 物体波振幅の再構成結果 (a) フーリエ変換法 (b) 提案手法

粒子追跡速度計測法による提案手法の評価光学系を図 4 に示す。試料にはマイクロ流路チップを使用し、光源には波長 532 nm の固体レーザーを用いた。マイクロチャネルを透過した光は、拡大光学系で 5 倍拡大して高速カメラで撮影した。撮影条件は露光時間 10 μ s、フレームレート 800 fps、解像度 800 \times 600 とした。マイクロチャネルには幅 500 μ m、奥行き 100 μ m のリニアチャネルを使用し、粒子径 4.1 μ m のポリマー球をシリンジにより投入した。

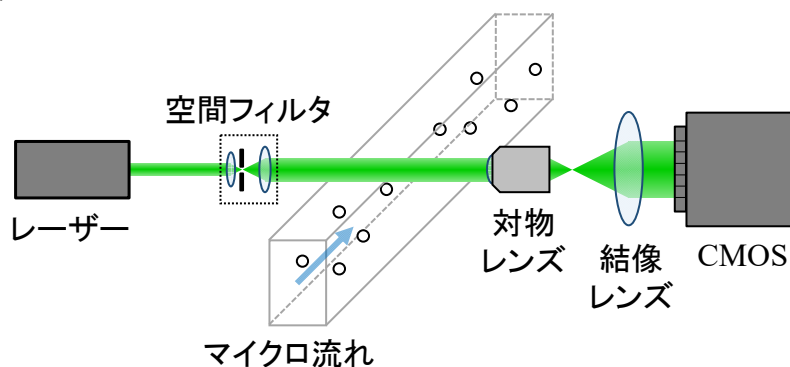


図 4. マイクロ流れ計測のためのインラインホログラフィック光学系

図 5 に撮影したホログラム画像と粒子像の再構成結果を示す。ここで z 軸は光軸、 y 軸は流れの方向にとった。提案手法による再校正では、粒子分布が空間的にスパースであると仮定し、FGP による TV 正則化によるノイズ除去に加えて、軟判定閾値関数による L_1 ノルム正則化を適用した。再構成のパラメータは、FISTA の反復回数を 100、FGP の反復回数を 10 回、ステップ幅を 0.01、TV 正則化パラメータを 200、 L_1 ノルム正則化パラメータを 150 とした。また、解析領域は $800 \times 600 \times 250$ とした。従来の逆伝搬法による再構成では不要な散乱波が重畳しているのに対し、提案手法では粒子像が鮮明に再構成されている。

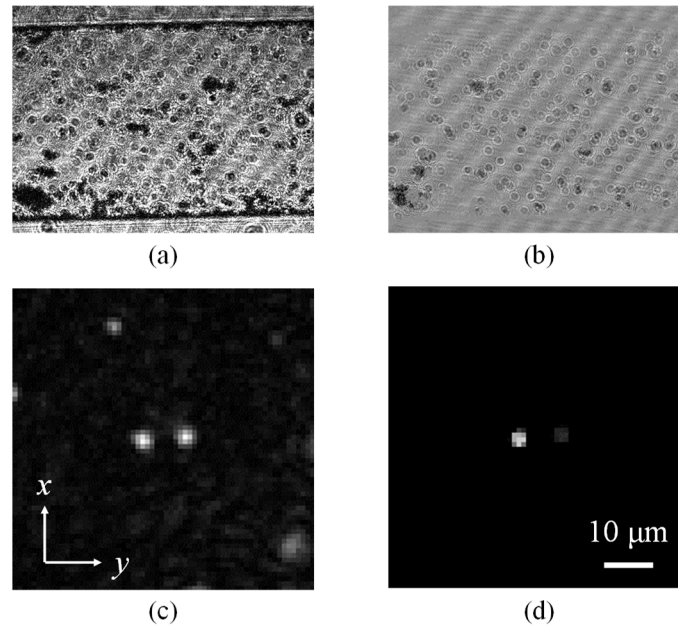


図 5. ホログラム画像と再構成した粒子像 (a) ホログラム画像 (b) 背景除去したホログラム (c) 逆伝搬法による再構成結果 (d) 提案手法による再構成結果

提案手法により再構成した粒子分布に対して、ラベリングアルゴリズムを適用して各粒子に番号付けを行った。各粒子の位置座標は輝度の重心とした上でトラッキングを行った。図 6 に 500 枚のホログラム画像から得られた速度分布を示す。流速は平均で 1.2 cm/s であった。

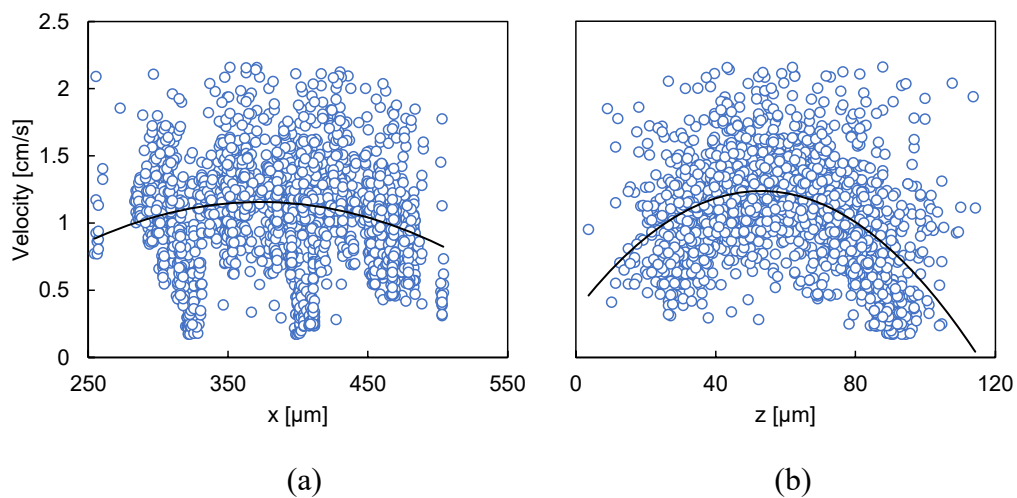


図 6. マイクロ流れの速度分布 (a) x 軸方向 (b) z 軸方向

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 2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 Shuhei Yoshida, Kan Itakura	4. 巻 27
2. 論文標題 Compressed holographic particle tracking velocimetry for microflow measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 441 - 446
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-020-00616-6	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 Shuhei Yoshida	4. 巻 22
2. 論文標題 Compressed off-axis digital holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 095703 - 095703
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2040-8986/aba940	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 Shuhei Yoshida	4. 巻 2020
2. 論文標題 Space-Bandwidth Product Extension with Compressed Sensing for Off-Axis Digital Holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020	6. 最初と最後の頁 81 - 82
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 Kan Itakura, Shuhei Yoshida	4. 巻 2020
2. 論文標題 Compressed Sensing Based Holographic Particle Velocimetry for Complex Microflow Measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020	6. 最初と最後の頁 61 - 62
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 Fukune Kaya, Shuhei Yoshida	4. 巻 2020
2. 論文標題 Complex Amplitude Reconstruction via Single-Pixel Imaging with Off-Axis Digital Holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020	6. 最初と最後の頁 17 - 18
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 Shuhei Yoshida, Kan Itakura, Fukune Kaya	4. 巻 2019
2. 論文標題 Digital holographic tomography based on compressed sensing for 3D-PIV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019	6. 最初と最後の頁 31-32
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 Kan Itakura, Shuhei Yoshida	4. 巻 2019
2. 論文標題 Particle field visualization by sparsity-constrained digital holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019	6. 最初と最後の頁 111-112
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 Fukune Kaya, Shuhei Yoshida	4. 巻 2019
2. 論文標題 Comparative study of imaging algorithms in single-pixel imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019	6. 最初と最後の頁 113-114
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9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Shuhei Yoshida
2. 発表標題 Space-Bandwidth Product Extension with Compressed Sensing for Off-Axis Digital Holography
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kan Itakura, Shuhei Yoshida
2. 発表標題 Compressed Sensing Based Holographic Particle Velocimetry for Complex Microflow Measurement
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fukune Kaya, Shuhei Yoshida
2. 発表標題 Complex Amplitude Reconstruction via Single-Pixel Imaging with Off-Axis Digital Holography
3. 学会等名 Technical Digest of International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田周平
2. 発表標題 デジタルホログラフィによる波面計測とその応用
3. 学会等名 電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 賀谷福音, 吉田周平
2. 発表標題 シングルピクセルイメージングにおける画像再構成アルゴリズムの比較検討
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 板倉賞, 吉田周平
2. 発表標題 スパース性制約付きデジタルホログラフィによる粒子場の可視化
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Yoshida, Kan Itakura, Fukune Kaya
2. 発表標題 Digital holographic tomography based on compressed sensing for 3D-PIV
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kan Itakura, Shuhei Yoshida
2. 発表標題 Particle field visualization by sparsity-constrained digital holography
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fukune Kaya, Shuhei Yoshida
2. 発表標題 Comparative study of imaging algorithms in single-pixel imaging
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
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

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