

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04971

研究課題名(和文) 相関影像法による3次元内部イメージング

研究課題名(英文) 3D imaging inside an object based on the correlation method

研究代表者

渡邊 恵理子 (Watanabe, Eriko)

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：20424765

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)：本研究は、生体を想定した物体内部の3次元イメージング法の構築を目指し、下記の3つの項目を実施した。はじめに、強く薄い散乱媒体背後の顕微3次元イメージングシステムを位相シフトデジタルホログラフィと結像光学系を融合して提案し、実現した。つぎに、共通光路デジタルホログラフィによる、厚みのある弱い位相揺らぎ層の抑制方法を提案し、上記の方法を融合することで強く薄い散乱層と弱く厚い揺らぎ層を持つ物体内部の3次元イメージングの基本指針を示した。さらに、高速光相関システムを用いた光相関計算機イメージングを提案・実証し、シミュレーションにより3次元イメージングの原理確認を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体内部を生きたまま、細胞レベルで可視化することは、医学や生物学などにおいて重要である。しかし、生体内部の計測における課題の一つに、複雑な散乱の影響がある。本研究では、相関法や位相シフトデジタルホログラフィを用い、新しい物体内部の3次元イメージング手法の開発を目指した。はじめに、位相シフトデジタルホログラフィを用い強く薄い散乱媒体背後の顕微3次元イメージングシステムを実現した。つぎに、強く薄い散乱層と弱く厚い揺らぎ層を持つ物体内部の3次元イメージングを提案しシミュレーションにより原理確認を行った。さらに、光相関計算機イメージングによる新たな3次元イメージングの可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop a method for 3D imaging inside an object, assuming a biological sample, and included the following developments. First, we proposed a microscopic 3D imaging system that was hidden behind a strong and thin scattering medium and realized it by integrating phase-shift digital holography and imaging optics. Then, we proposed a method of suppressing thick inhomogeneous phase medium using common optical path digital holography, and we demonstrated the basic guidelines of the method of 3D imaging inside an object with a strong and thin scattering layer and a weak and thick phase fluctuation layer. In addition, we proposed and demonstrated computational ghost imaging using a high-speed optical correlation system and confirmed the principle of three-dimensional imaging by numerical simulation.

研究分野：光工学

キーワード：ホログラフィ 相関ホログラフィ 位相シフトデジタルホログラフィ 平面導波路

1. 研究開始当初の背景

生物の体内を生きたままの観察し、体内の細胞レベルでの情報を取得することは、医学や生物学などの研究において重要であり、より深い場所を細部まで可視化できる方法が求められている。しかし、このような生体内部の計測における課題の一つに、多重散乱光の影響がある。これまで光学分野では多重散乱を回避するために様々な検討がなされてきたが、散乱体を活用してその背後を可視化するという手法も提案されてきている。例えば、散乱媒体の背後にある物体をイメージングする相関イメージングを利用し、すりガラスの背後に隠された物体のイメージングや、生体の皮膚の背後の物体のイメージングが実現できている[例えば A. Singh, M. Takeda et al., Sci. Rep. 7 (2017)]。しかし、現状の相関イメージングでは、散乱体が薄いこと、また被写体と散乱体の間に散乱層がないという仮定があるなど、複雑な散乱体である生体への適用は困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、複雑な散乱体である生体内部イメージングを目指し、厚みのある比較的弱い散乱層と薄く強い散乱層を持つ複雑な散乱体に対する 3 次元内部イメージング手法を研究開発することを目的とする。はじめに、(1) 薄く強い散乱媒体の背後にある物体のイメージング法として、位相シフトデジタルホログラフィによる散乱媒体背後顕微 3 次元イメージングシステムを提案し実現する。(2) 散乱媒体背後顕微 3 次元イメージングシステムを発展させ、厚みのある比較的弱い散乱層を抑制可能な、共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制方法を提案する。(3) さらに高速光相関システムを用いた光相関計算機イメージングによる 3 次元イメージングに向けた基礎検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 薄く強い散乱媒体背後顕微 3 次元イメージング[雑誌論文 Applied Optics, 58, G345.に記載]

原理と方法

物体が散乱媒体越しで不明瞭になる理由は、物体光 $u_o(x, y)$ が散乱媒体を通過する際にランダムな位相 $\phi_s(x_s, y_s)$ が与えられるためである。ここで図 1 に示すように、3 次元物体の情報を散乱媒体上にホログラムとして形成する。このホログラムを結像光学系によって取得し、ホログラムから物体をコンピュータ上で再構成することで散乱媒体越しに 3 次元物体の可視化が可能である。散乱媒体における干渉縞の強度 $I(x, y)$ を、 $u_o(x, y)$ および $u_R(x, y)$ に共通のランダム位相 $\phi_s(x, y)$ を導入した式(1)として示す。

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |u_o(x, y)\exp[i\phi_s(x, y)] \\
 &\quad + u_R(x, y)\exp[i\phi_s(x, y)]|^2 \\
 &= |u_o(x, y)|^2 + |u_R(x, y)|^2 + u_o(x, y)u_R^*(x, y) \\
 &\quad + u_R(x, y)u_o^*(x, y), \quad (1)
 \end{aligned}$$

式(1)からわかる通り、散乱媒体によるランダム位相は、ホログラフィック記録プロセスでキャンセルされる。そのためホログラムである干渉縞を取得し再構成することで散乱媒体背後の物体イメージングが実現できる。

散乱媒体背後顕微 3 次元イメージングの実験光学系を図 2 に示す。光源には波長 632.8 nm の He-Ne レーザを使用し、光源から出射した光は偏光ビームスプリッタによって物体光と参照光に分波する。物体光と参照光は拡散板上にホログラムを形成する。拡散板はシグマ光機のフロスト型拡散板 (DFSQ1-30C02) を使用した。拡散板は絞りによって直径 20 mm に調整されている。

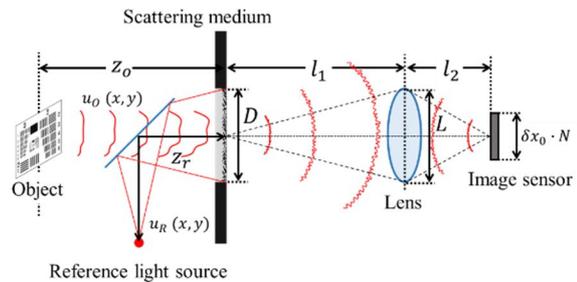


図 1 散乱媒体背後顕微 3 次元イメージング概念図

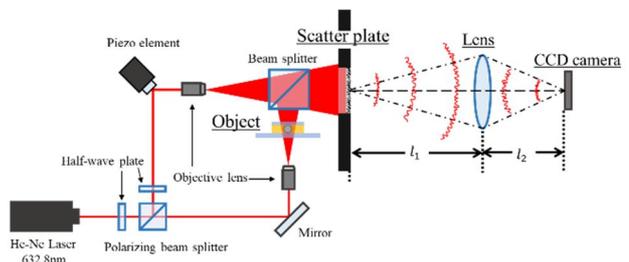


図 2 実験光学系

この拡散板上のホログラムをレンズでイメージセンサーに上に結像した。レンズは焦点距離 $f = 50 \text{ mm}$, $\#F=2.8$ の EL-NIKKOR である。イメージセンサーは BITRAN 製の CCD カメラ BS-42N (ピクセルピッチ $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 、ピクセル数 2048×2048) を使用した。レンズは $l_1 = 116 \text{ mm}$, $l_2 = 88 \text{ mm}$ になるように配置した。記録時に、参照光側に位相シフトとして導入されたピエゾ素子は相対位相差 $\pi/2$ を与えた。

(2)乱媒体背後顕微 3次元イメージングシステムを発展と共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制

(1)で示した手法を拡張してより物体内部をイメージングするために、共通光路デジタルホログラフィを組み合わせた位相揺らぎの抑制方法を提案した。生体内にある細胞や血管をイメージングする場合、物体光は厚い弱散乱層に含まれた様々な位相物体を通過するため伝搬面が歪み、良質な再生像を得ることはできない。そこで、生体は厚みのある比較的弱い散乱層である皮下組織と薄く強い散乱層である皮膚組織と仮定する。ここで、物体光と参照光が共通に近い光路を通るように、隣接した点光源とし、各光路が極めて近傍で伝搬するとき、位相揺らぎ $\exp(i\Delta\phi)$ はほぼ同一と扱え、位相ゆらぎがほぼ相殺されることを利用する。この共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制法の原理を検証するために3次元的な厚みを数層の散乱層でモデル化し、参照光と物体光が自由に伝搬するシミュレーションを構築した。

(3)高速光相関システムを用いた光相関計算機イメージング[雑誌論文 Japanese Journal of Applied Physics, 58, SKKA02.に記載]

Computational ghost imaging (CGI)や Single-pixel digital holography (SPDH)といった単一画素検出器を用いたイメージング手法は、新しいイメージング法として近年注目を集めている。この手法は、1枚の画像を取得するために空間光変調パターン投影による対象情報の符号化プロセスが一定回数必要である。我々の開発してきたコアキシャル型ホログラフィック光相関器は大量の複素振幅パターンを干渉縞パターンとしてホログラフィックディスクに保持しておくことが出来る。本研究では CGI と光相関を融合させた光相関計算機イメージングを提案・実証し、散乱媒体背後などの3次元イメージングへ向けた基本指針を示した。

光相関計算機イメージングは図3に示すように、記録・相関・再構成の3つのプロセスにより構成される。記録プロセスでは、既知の強度変調パターン $P_i(x, y)$ と、周りに参照光を付与した画像を空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)に表示し、ホログラフィックディスクに記録する。相関プロセスでは、対象画像 $T_{ob}(x, y)$ を SLM に表示し、情報が記録されているホログラフィックディスクに照射する。回折光として光電子増倍管(Photomultiplier tube: PMT)で取得される光相関信号 S_i は、式(2)に示すような強度変調パターン $P_i(x, y)$ と対象画像 $T_{ob}(x, y)$ の内積から得られる強度である。

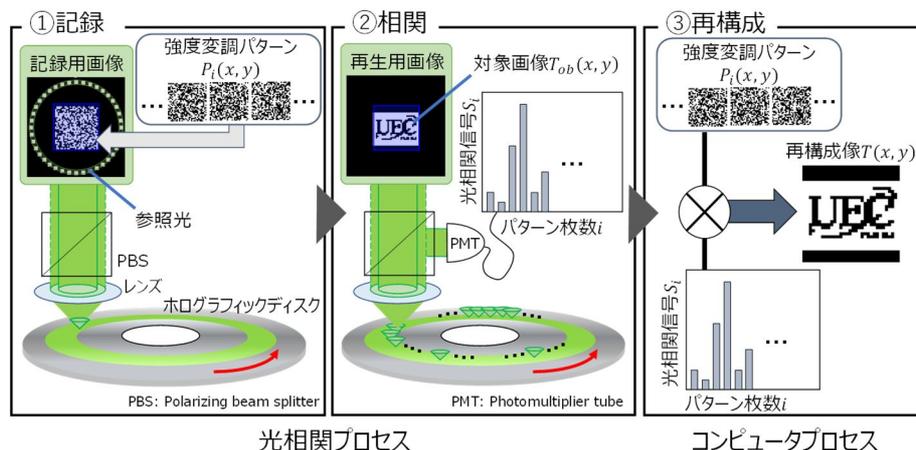


図3 光相関計算機イメージングの概要図

$$S_i = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N P_i(x, y) T_{ob}(x, y). \quad (2)$$

再構成プロセスでは取得した M 個の光相関信号 S_i と、その光相関信号に対応した M 枚のパター

ン P_i との式(3)に示す再構成演算で対象の強度像 $T(x, y)$ を取得する。

$$T(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (S_i - \langle S \rangle) P_i(x, y). \quad (3)$$

ここで $\langle \dots \rangle$ はアンサンブル平均を示す。

本研究では、強度イメージングを実証し、複素振幅イメージングに向けた基礎的な実験を実施した。さらにホログラムの記録プロセスに位相シフト法を適用することで、対象の複素情報回復が実現できることをシミュレーションにより示した。

4. 研究の成果

(1) 薄く強い散乱媒体背後顕微 3次元イメージング

散乱媒体に隠された3次元物体や位相物体に対して、高分解能で顕微イメージング可能な、オンライン位相シフトデジタルホログラフィによる顕微3次元イメージングシステムを提案し、実装した。拡散板背後に配置した解像力チャートをイメージングした結果、 $1.81\mu\text{m}$ の空間分解能を達成し、本手法の有効性を確認した。さらに、3次元イメージングとして、散乱媒体背後の異なる奥行方向位置にある物体に対し、それぞれの物体に焦点を合わせられることを確認した。また、拡散板背後にある透明位相物体に対し、高精度に定量位相イメージングが可能であることも実験により実証した。散乱媒体を生体組織であるラットの皮膚組織としたイメージング実験において、空間分解能 $2.00\mu\text{m}$ が得られることを確認した。本稿では得られた成果の一部を記載する。

散乱媒体背後顕微 3次元イメージング

散乱媒体背後に置かれるサンプルはビーズと格子幅 $150\mu\text{m}$ のグリッドを使用した。ビーズとグリッドはスライドガラス1枚で隔たられ、厚さは 1.27mm であった。図4(a)に示すように、ビーズの輪郭からグリッドまでの距離は 1.32mm である。ビーズ側を対物レンズ側に配置し、ビーズ面から拡散板までの距離は 71.1mm であった。それぞれの再構成像を図4(c), (d)に示す。散乱媒体の背後であっても、異なる伝搬距離でそれぞれの物体が再構成されていることが確認された。

散乱媒体として生体皮膚を使用散乱媒体背後顕微 3次元イメージング

散乱媒体として生体皮膚を使用したイメージングを示す。生体皮膚にはWistar Ratの皮膚を使用した。このラットの皮膚は拡散板に比べて強い散乱特性と透過率の低減を示した。この皮膚は皮膚上にある毛は剃られた状態で1辺 5cm の厚さ 0.5mm のスライドガラスに挟まれて固定されている。拡散板と同様に皮膚は直径 20mm のマスクで覆われている。皮膚の厚さは面内を数点測った平均値として $516\mu\text{m}$ であった。ラットの皮膚は $z_0=50\text{mm}$ の位置で設置されている。空間分解能の理論予測値は $1.93\mu\text{m}$ と算出された。図5(b)に物体にテストチャートの4、5グループを用いた再構成像を示す。幅 $2.00\mu\text{m}$ であるグループ4のライン5までは5本の線が確認できる。6ラインは空間分解能 $2.00\mu\text{m}$ 、 $1.80\mu\text{m}$ である。再構成像は拡散板に比べて若干のスペckルがある、分解能は低下しなかった。

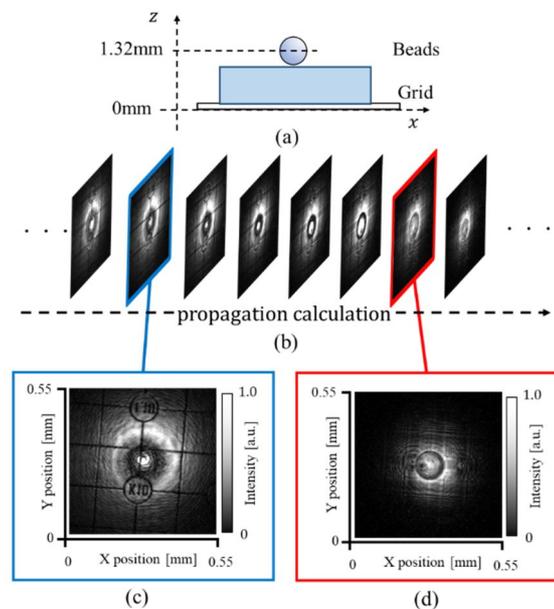


図4 散乱媒体背後3次元イメージング実験結果 (a)測定サンプル, (b)光波伝搬計算時の再構成像, (c)グリッドの強度像, (d)ビーズの強度像

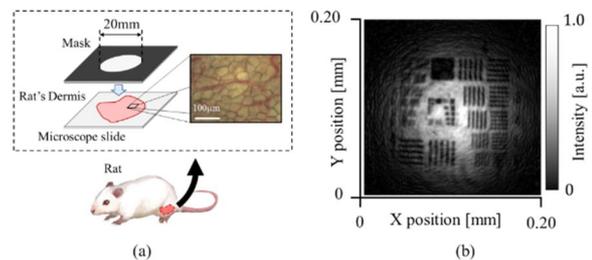


図5 生体皮膚を使用散乱媒体背後顕微 3次元イメージング

(2) 近赤外光の適用と厚みのある比較的弱い散乱層を抑制可能な、共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制方法

生体組織を考慮した近赤外光の適用

波長 632.8 nm の可視光と波長 780 nm の近赤外光を用いて生体組織背後に隠された 3 次元物体に対するイメージングを実施した。1 mm 程度のラットの生体組織透過率を測定してみると、632.8nm において 25% の透過率、780nm において 41% の透過率となり、近赤外光の方が生体組織を透過し、散乱の影響を受けにくいことを確認した。波長 780 nm の近赤外光を用いて 1 mm 程度の生体組織背後のイメージングを行ったところ、カットオフ周波数から算出される理論空間分解能 $1.95 \mu\text{m}$ に対して、実験により得られた空間分解能は $2.06 \mu\text{m}$ と理論分解能に近い値を得た。このように、生体組織に対してより透過する近赤外光を用いる方が散乱媒体背後の顕微イメージングに適していることを確認した。

共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制方法

厚みのある比較的弱い散乱層を抑制可能な、共通光路デジタルホログラフィによる揺らぎの抑制方法の検証をシミュレーションにより実施した。揺らぎが物体光側にかかると再生面が歪むのに対し、共通光路デジタルホログラフィでは揺らぎが抑制された再生像が得られることを確認した。さらに、デジタルホログラフィによる散乱媒体背後イメージングシステムの実装に向けた光導波路の基礎的な設計方針として、出射端の間隔と出射光の傾斜角、物体光と参照光の光路長差、テーパやスプリッタサイズ等パラメータの最適化方法を考察した。

(3) 光相関計算機イメージングの実証実験結果

光相関計算機イメージングの実証実験を、図 6 (a) に示す 128×128 pixel を 16 個のブロックに分割したランダムパターンを使用して行った。対象画像は図 6 (b) に示す。事前に乱数を用いて作成した 1 万枚のランダムパターンから、対象画像と高相関を示すもの 127 枚と低相関を示すもの 125 枚をコンピュータ上で抽出しておき、計 252 枚のランダムパターンをホログラフィックディスクに記録した。本実験で使用した光学系を図 7 に示す。ホログラフィックディスクの記録媒体にはフォトポリマーを使用し、記録間隔は $10.1 \mu\text{m}$ 、ディスクの回転速度は 300 rpm である。また記録媒体での干渉縞の光強度分布の偏りが記録密度の減少に繋がるため、ランダム位相マスクを使用し、記録する画像の位相分布を均一にした。

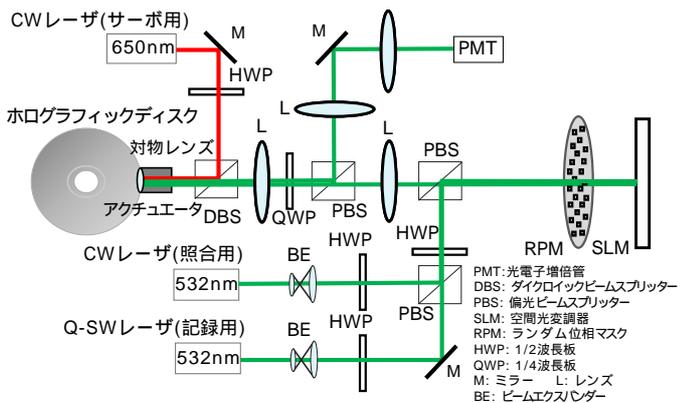


図 7 光相関計算機イメージングの原理確認光学系

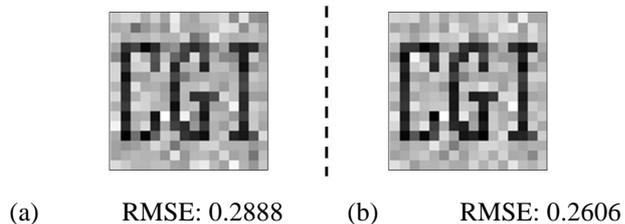


図 8 (a) 実験結果と (b) 数値計算による結果

図 8 (a) は実験により得られた再構成像であり、図 8 (b) はコンピュータ上で数値計算による再構成像である。これらを平均平方二乗誤差 (Root mean square error: RMSE) により評価すると、実験結果と数値計算による結果は傾向が一致し、振幅情報を可視化できることが分かった。

さらに、ホログラムの記録プロセスに位相シフト法を適用することで、対象の位相情報回復が実現できることをシミュレーションにより示し、光相関イメージングによる 3 次元イメージングの基本指針を示した。

さらに、ホログラムの記録プロセスに位相シフト法を適用することで、対象の位相情報回復が実現できることをシミュレーションにより示し、光相関イメージングによる 3 次元イメージングの基本指針を示した。

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 0件）

1. 著者名 Kodama Shutaro, Ohta Manami, Ikeda Kanami, Kano Yutaka, Miyamoto Yoko, Osten Wolfgang, Takeda Mitsuo, Watanabe Eriko	4. 巻 58
2. 論文標題 Three-dimensional microscopic imaging through scattering media based on in-line phase-shift digital holography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 G345 ~ G345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.58.00G345	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 該当する

1. 著者名 Inoue Ayano, Usami Ren, Saito Keisuke, Honda Yasunobu, Ikeda Kanami, Watanabe Eriko	4. 巻 58
2. 論文標題 Optical correlator-based computational ghost imaging towards high-speed computational ghost imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKA02 ~ SKKA02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab2f6b	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ayano Inoue, Taku Hoshizawa, Keisuke Saito, Yasunobu Honda and Eriko Watanabe
2. 発表標題 Coaxial single-pixel digital holography
3. 学会等名 DHIP2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shutaro Kodama, Kanami Ikeda, Yoko Miyamoto, Wolfgang Osten, Mitsuo Takeda and Eriko Watanabe
2. 発表標題 Microscopic 3D imaging through scattering media based on in-line phase-shift digital holography
3. 学会等名 Digital Holography and 3-D Imaging 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunobu Honda, Ren Usami, Ayano Inoue, Keisuke Saito and Eriko Watanabe Improvement of reconstructed image quality by optimization of binary random pattern in optical correlator-based computational ghost imaging
2. 発表標題 Improvement of reconstructed image quality by optimization of binary random pattern in optical correlator-based computational ghost imaging
3. 学会等名 Information Photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本多康伸、斎藤圭佑、猪上綾乃、渡邊恵理子
2. 発表標題 相関計算機ゴーストイメージングにおける多値画像の再構成
3. 学会等名 第13回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉周太郎、大田愛美、狩野豊、渡邊恵理子
2. 発表標題 位相シフトデジタルホログラフィによる生体皮膚背後の顕微イメージングの基礎評価
3. 学会等名 第20回情報フォトニクス研究グループ研究会 (IPG秋合宿)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本多康伸、斎藤圭佑、猪上綾乃、宇佐美廉、渡邊恵理子
2. 発表標題 相関計算機ゴーストイメージングにおける複素情報の回復法の提案
3. 学会等名 20回情報フォトニクス研究グループ研究会 (IPG秋合宿)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉周太朗、大田愛美、池田佳奈美、狩野豊、宮本洋子、武田光夫、渡邊恵理子
2. 発表標題 インライン位相シフトデジタルホログラフィによる生体組織背後の顕微イメージング
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田愛美、児玉周太朗、池田佳奈美、狩野豊、宮本洋子、武田光夫、渡邊恵理子
2. 発表標題 インライン位相シフトデジタルホログラフィを用いた生体組織背後の顕微イメージングにおける散乱媒体の影響評価
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 猪上 綾乃, 星沢 拓, 斎藤 圭佑, 本多 康伸, 渡邊 恵理子
2. 発表標題 単一画素検出器を用いた光相関イメージングにおける位相情報の回復
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田 愛美, 児玉周太朗、渡邊恵理子
2. 発表標題 インライン位相シフトデジタルホログラフィによる生体組織背後の顕微イメージングの基礎評価
3. 学会等名 第14回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ren Usami, Ayano Inoue, Keisuke Saito, Yasunobu Honda, Kanami Ikeda, and Eriko Watanabe
2. 発表標題 Reference Patterns for Optical Correlator-based Computational Ghost Imaging
3. 学会等名 23rd MICROOPTICS CONFERENCE 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ayano Inoue, Ren Usami, Keisuke Saito, Yasunobu Honda, Kanami Ikeda and Eriko Watanabe
2. 発表標題 Towards high-speed computational ghost imaging using holographic optical correlator
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shutaro Kodam, Kanami Ikeda, Yoko Miyamoto, Wolfgang Osten, Mitsuo Takeda and Eriko Watanabe
2. 発表標題 Microscopic 3D imaging through scattering media based on in-line phase-shift digital holography
3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉周太朗, 宇佐美廉、井元克駿、渡邊恵理子
2. 発表標題 位相シフトデジタルホログラフィによる拡散板背後の顕微3次元イメージング
3. 学会等名 第13回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 児玉周太朗、佐竹宏基、高和宏行、干場隆志、渡邊恵理子
2. 発表標題 細胞測定のための定量位相・偏光イメージング
3. 学会等名 第46回画像電子学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本多康伸、宇佐美廉、斎藤圭佑、猪上綾乃、池田佳奈美、渡邊恵理子
2. 発表標題 高速計算機ゴーストイメージングに向けた光相関器の実験評価
3. 学会等名 Optical & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本多康伸、宇佐美廉、斎藤圭佑、猪上綾乃、渡邊恵理子
2. 発表標題 光相関器による計算機ゴーストイメージングの基礎評価
3. 学会等名 第13回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 撮像装置およびその撮像方法	発明者 渡邊恵理子、斎藤圭佑、本多康伸、永田門	権利者 電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-027261	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------	---------