

令和元年6月25日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04970

研究課題名(和文) 高速位相シフト自己相関デジタルホログラフィによる実時間高精細イメージング

研究課題名(英文) Fast and high-resolution imaging method by fast phase-shifting self-interference digital holography

研究代表者

吉川 宣一 (Yoshikawa, Nobukazu)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00282335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：インコヒーレント光の自己干渉原理でつくられた干渉縞に対して、連続フリンジスキャンと一般化位相シフト法に基づいて実装された高速位相シフトを導入し、高速かつ高分解能のインコヒーレントデジタルホログラフィ計測システムを開発した。干渉縞の正規化を用いる正規化一般化位相シフト法を考案した。高速位相シフトを実行するための条件を明らかにし、分解能と処理速度の性能評価およびnmオーダーの微小物体の計測を行い提案法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法は光学的手法による高速高分解能イメージングを実現している。インコヒーレント光源の使用や位相シフトとカメラの同期が不要で高速処理が可能であるという特徴は簡単かつ安価なシステム構築を可能とし、DHシステムの実用化に大きく貢献する。正規化一般化位相シフト法は一般的なデジタルホログラフィや干渉計測に適用可能であり精密計測や変位計測へ応用することができる。提案システムは生きた細胞を対象とする生体イメージングや医療創薬材料の評価などに応用することができる。

研究成果の概要(英文)：A fast and high-resolution self-interference incoherent digital holography system was developed using a fast phase-shifting method with a continuous fringe scanning scheme. Randomly phase-shifted holograms created by the self-interference of wavefront diffracted from objects illuminated by the incoherent light source were analyzed by a generalized phase-shifting method. The normalized generalized phase-shifting method using hologram normalization was proposed. The conditions for high-speed phase-shifting are verified. The resolution power and the processing speed of the incoherent digital holography system were evaluated. The effectiveness of the proposed incoherent digital holography system was demonstrated by optical experiments for micro objects.

研究分野：応用光学

キーワード：インコヒーレントデジタルホログラフィ 位相シフト法 一般化位相シフト法 連続フリンジスキャン 正規化 光計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光計測技術と情報処理技術を組み合わせた新しい高分解能イメージング技術が開発されている。大量の画像データを使用した数値計算による像再構成処理により空間分解能を格段に向上させている。このような技術では光点走査に基づいた画像取得が必要であるため、1枚の画像を取得するために数秒から数分の時間を必要としており、静止した物体を対象にすることが多い。実際の応用では瞬間的に起こる現象や過渡的な形態変化の観察も重要であることから、高い空間分解能と高い時間分解能を併せ持つ実時間高精細イメージング技術が期待されている。

時間分解能向上のためにデバイスやソフトウェアの高速化が行われているが、光点走査方式や大量の画像情報を使用している限り根本的な問題は解決しない。一方、短時間で数千枚の画像記録が可能な超高速デジタルカメラが開発されており、従来のワイドフィールド顕微鏡と組み合わせることにより高時間分解能イメージングを実現することができる。しかし、この方式の空間分解能は回折限界により制限されてしまう。

インコヒーレント光の自己干渉原理を用いるデジタルホログラフィ (Incoherent digital Holography: IDH) が開発された [1]。この方式では、インコヒーレントな物体波の自己干渉によりつくられたホログラムをデジタル記録し、これを数値再生することにより物体光の複素振幅情報を得ている。原理的にコヒーレント DH (CDH) の 2 倍の周波数帯域を持っており、超解像イメージング技術として期待されている。IDH は物体光、0 次光、共役光が同時に再生される性質があり、不要成分は位相シフト法を用いて除去することができる。位相シフトホログラム記録は位相シフトの性能に大きく依存する。位相シフトとして移動ミラーや空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) が用いられている。一般にデジタルカメラに比べて位相シフトの動作は遅いため、時間分解能は位相シフトの動作速度に大きく依存する。

任意の位相シフト量に対応した統計的一般化位相シフト法 (統計手法) が提案されている [2, 3]。この手法では、連続フリンジスキャンで連続的にホログラム記録を行い、フレネル回折場のランダム位相の統計的性質に基づいて 3 枚のホログラムから位相シフト量を推定し、物体光を復元する。位相シフト量の精密制御は必要なく、カメラ-位相シフト間の同期問題も存在しないため、高速に位相シフト DH 計測を行うことができる。

2. 研究の目的

高速位相シフトを導入した IDH による実時間高精細イメージング技術を開発する。インコヒーレント光の自己干渉でつくられた干渉縞に対して、連続フリンジスキャンおよび一般化位相シフト法を適用することにより、高空間分解能と高時間分解能を併せ持つホログラフィ再生による高速高精細イメージングが可能になる。具体的な研究項目として、散乱物体の DH に対応した一般化位相シフト法の開発、高速 IDH システムの構築、高速位相シフト法の開発、分解能と処理速度の性能評価および nm オーダーの微小物体の計測を行う。

3. 研究の方法

(1) 散乱物体の DH に対応した一般化位相シフト法の開発

統計手法ではフレネル回折場のランダム位相の統計的性質を利用しており、この条件は位相ランダム条件と呼ばれている。CDH では高コントラストの干渉縞またはスペckルパターンが発生するため位相ランダム条件は十分に成立する。しかし、IDH では点物体からつくられる干渉縞の強度加算に相当するホログラムが得られるため干渉縞のコントラストは低く位相ランダム条件の成立は不明である。そこで IDH における位相ランダム条件を実験的に検証する。さらに新しい一般化位相シフト法として、干渉縞の正規化の概念を用いる正規化法を開発する。さらに正規化法を IDH へ応用し、適用条件を明らかにする。

(2) 連続フリンジスキャンと一般化位相シフト法を用いる高速位相シフト IDH の開発

IDH の実験システムとして、SLM を組み込んだインライン光学系を使用する Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) と球面鏡を用いたマイケルソン干渉計を使用する Self-interference digital holography (SIDH) がある。本研究では、両方式の実験システムを構築する。連続フリンジスキャンと一般化位相シフト法を用いる高速位相シフト IDH を開発する。連続フリンジスキャンにより連続的な位相シフトを発生させるため、それぞれのシステムに対して最適な位相シフトスケジュールを設定し、実験システムの最適化を行う。

(3) 空間及び時間分解能の性能評価と微小物体の計測

テストチャートやマイクロビーズを用いて IDH システムの性能評価を行う。高速位相シフト法と空間および時間分解能の関係を定量的に調べて提案手法の有効性を明らかにする。また、nm オーダーの微小物体として人工のナノ構造物質であるリボソームの計測を行う。

4. 研究成果

(1) 散乱物体の DH に対応した一般化位相シフト法の開発

インコヒーレント光源で照明された物体は多くの点光源で構成されているとみなすことができる。それぞれの点光源から発生した光は自分自身にのみ空間的にコヒーレントである。IDH はこの性質を利用して点光源から発生した球面波を 2 つに分割して干渉させることによりホログラムを生成する。FINCH システムの基本構成を図 1 に示す。二つの異なる焦点距離を持つレンズに相当する位相分布を書き込んだ SLM を用いて、入射光を二つの異なる曲率を持つ球面波

に分割し、干渉縞を生成する[1]．本研究では位相変調型の液晶 SLM を用いて、位相変調される P 偏光成分を一つの球面波、変調されない S 偏光成分をもう一つの球面波として利用する方式を用いる．

点光源がつくる干渉縞は球面波の干渉 $I = C [2 + Q(1/z_r)\exp(j\theta_k) + Q(-1/z_r)\exp(j\theta_k)]$ で表される[1]．ここで z_r は光学系のパラメータにより決定されるホログラムの再生距離、 θ_k は SLM によってつくられる位相シフト量、 C は定数である．物体上の多くの点光源からつくられるホログラムは各物点から寄与する自己干渉の累積に相当し物体範囲の積分として表される．FINCH で得られるホログラムを図 2 に示す．0 次成分の寄与が大きいため CDH のような高コントラストの干渉縞は得られない．

従来の FINCH では一定位相シフト量 $2/3$ の位相シフト法が用いられていた．本研究ではランダムな位相シフト量を用いる一般化位相シフト法（統計手法）を用いて物体光再生を行う．統計手法ではフレネル回折場のランダムな位相分布の空間的な統計的性質を用いて位相シフト量を推定して物体光を復元する．したがって FINCH で得られるホログラムに対して位相ランダム性が成立することが必要になる．理論的解析と実験により干渉成分には球面波に相当する位相項が含まれているため位相ランダム性が成り立つことがわかった．これにより統計手法を FINCH ホログラムに適用できることがわかった．図 3 に位相シフト量 $2/3$ のホログラムの組に対し、一定位相シフト法および統計手法を適用したときの強度再生像を示す．これらの相関値は 0.999 であり、統計手法でも同等の結果が得られることがわかった．

ランダムに選んだ位相シフト量 $(0, \alpha, \beta)$ の組み合わせの FINCH ホログラムに対して統計手法を適用したときの再生像の S/N 比を調べた． $1/2$ を超える位相シフト量を含む組み合わせにおいて明瞭な再生像が得られることがわかった．また $2/3$ の一定位相シフト量の場合に S/N 比は最大となった．CDH の場合では $1/2$ 未満の位相シフト量の組み合わせでも明瞭な再生像が得られることに対して、IDH では位相ランダム性を成立させるためには十分な振幅の干渉成分が必要であると考えられ、 $1/2$ 以上の位相シフト量が必要であることが明らかになった．

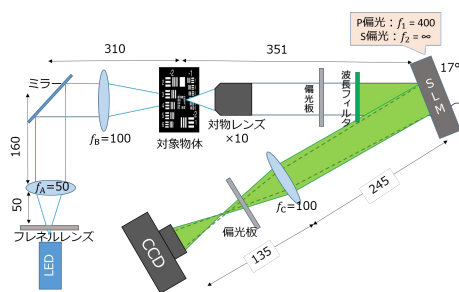


図 1 FINCH システム

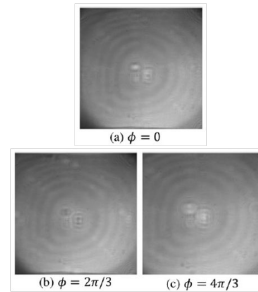


図 2 ホログラムパターン

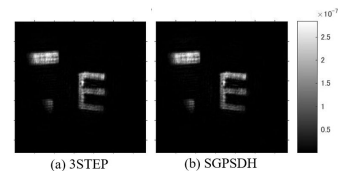


図 3 強度再生像 (a)一定位相シフト法、(b)統計手法

フレネル回折場の位相ランダム条件に基づいた正規化ホログラムを用いる一般化位相シフト法(正規化法)を新たに考案した．正規化法は干渉縞画像から直流成分を除去して得られる干渉成分をベクトルとみなして位相解析する方法である．干渉縞から直流成分を除去する方法として、ガウシアンハイパスフィルタ(GHPF)で直流成分を簡易的に除去する方法と位相シフトホログラムの相互差分を用いる方法がある．前者は 2 枚、後者は 3 枚の位相シフトホログラムを用いるのでそれぞれ 2step 法、3step 法と呼ぶことにする．

物体光の複素振幅は $O(x, y) \propto \{(I_a / \|I_a\|)^2 + (I_s / \|I_s\|)^2\}^{1/2} \exp[j \tan^{-1}(I_s / \|I_s\| / I_a / \|I_a\|)]$ で得ることができることを理論的に導出した．ここで I_a と I_s は正規化ホログラムの和成分と差成分である．正規化法は位相シフト量を推定する必要はなく、物体光を直接求めることができることを示した．

2step 法の再生像には全体にノイズが残った状態の再生像が得られた．散乱物体の直流成分は複雑な分布を持つため簡単な GHPF で分離することは難しく、干渉縞の正規化が不完全になったことが原因と考えられる．そこで複数枚のランダム位相シフトホログラムの平均処理で 0 次成分を推定する縞平均法を考案した．ランダムな位相シフトが $0 \sim 2\pi$ の一様分布とみなすことができるならば位相ランダム条件が成立し干渉成分を 0 に近似できるため 0 次成分のみを得ることができる．図 4 に 1951USAF テストチャートの FINCH ホログラムに対して GHPF 法と縞平均法を適用したときの推定 0 次成分および中央部の強度分布を示す．GHPF 法では干渉縞と 0 次成分の微細構造が同時に除去されて滑らかな強度分布になっている．縞平均法では 0 次成分の微細構造が保存されて高周波数成分を含んだ 0 次成分が得られている．この 0 次成分を用いれば 2step 正規化法により物体光の復元が可能になる．図 5 に縞平均法を用いたときの FINCH ホログラムの再生像とラインパターンの S/N 比を示す．20 枚以上を平均化処理に用いれば明瞭な再生像が得られることから IDH に対しても縞平均法が有効であることが示された．

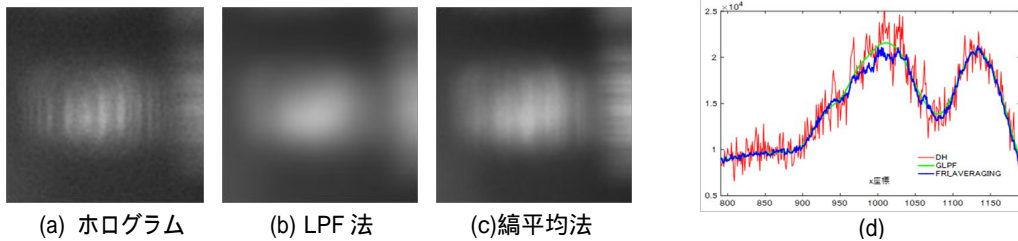


図 4 (a)ホログラム, (b)LPF 法と(c)縞平均法により推定されたる 0 次成分と(d)中央部の強度分布

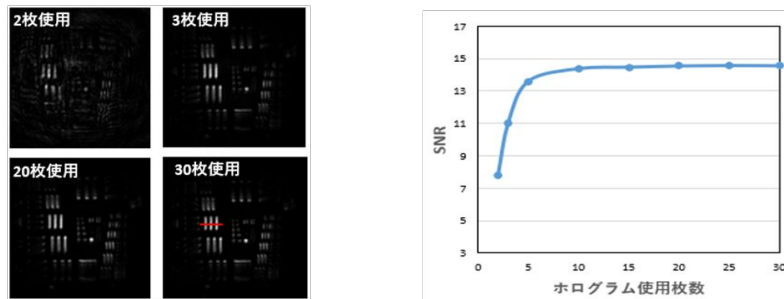


図 5 縞平均法を用いたときのホログラムの再生像と S/N 比

(2) 連続フリンジスキャンと一般化位相シフト法を用いる高速位相シフト IDH の開発

連続フリンジスキャンと一般化位相シフト法を FINCH に適用し、高速位相シフト IDH システムを構築した。実験は図 1 に示す FINCH システムで行った。位相シフトはレンズ位相成分に位相シフト値を加算した位相データを SLM に表示させることにより実現した。本研究では連続フリンジスキャンを行うために連続的にレンズ位相成分を表示させる必要がある。しかし、SLM は位相情報を表すグレースケール画像を DVI 経由で表示する方式となっており、画像表示切り替えの影響が存在する。そこで位相シフトスケジュールの最適化を行った。位相シフト量のステップ幅 $\phi = 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 2/3$ で位相シフトするレンズ位相分布を連続表示させることにより連続フリンジスキャンを行った。図 6 に連続的に記録されたホログラム中心部の輝度値の時間変化を示す。位相ステップ幅 $2/3$ の場合、位相分布の切り替えは約 32Hz で行われていた。液晶の持つアナログ的の性質があるため位相パターン切り替え時の影響はほとんどないことがわかった。しかし、正弦波状に変化するはずの輝度値に歪みが生じていた。これは SLM への画像転送及び表示の応答に遅延が生じているためと考えられる。大きな位相シフト量を持つホログラムを得るためには位相ステップ幅 $2/3$ 以下にする必要があることがわかった。

各ステップ幅で撮影したホログラムに対し、統計手法を用いて 50 フレームの連続再生を行なった。位相シフト量は歪みの影響で線形変化にならないが一般化位相シフト法を用いているため正確な物体光の抽出が可能である。位相シフト量の組み合わせの実験より、 $1/2$ 以上の位相シフト量が望ましいため、前後フレーム間の輝度値の差が 30 以下である場合は位相シフト量が小さいとみなし、このフレームをスキップするアルゴリズムを開発した。

図 7 に位相ステップ幅 $2/3$ で連続記録したホログラムからの強度再生像を示す。この IDH システムの分解能は $1 \mu\text{m}$ であった。再生像の S/N 比、最大 S/N 比の再生像を基準としたときの各フレーム再生像の相関値、スキップの発生率を調べた。位相ステップ幅 $2/3$ のときが最も評価値が良く、ノイズの少ない再生像を安定して得られることが明らかになった。

(3) 空間及び時間分解能の性能評価と微小物体の計測

高速位相シフト IDH の空間及び時間分解能の性能評価と nm オーダーの微小物体の計測を行った。図 8 に実験システムを示す。このシステムでは位相シフトは piezo 駆動移動ミラーでつくられる。微小物体を透過した光は 20~50 倍の無限遠補正対物レンズを用いて平行光になり干渉計の入射光となっている。物体光が微弱であるため高感度冷却 CCD カメラを用いてホログラム記録を行った。計測速度は 10fps であった。直径 $1 \mu\text{m}$ のポリスチレン球を用いて IDH の記録再生を行い明瞭な再生像を得た。これより IDH システムの分解能は

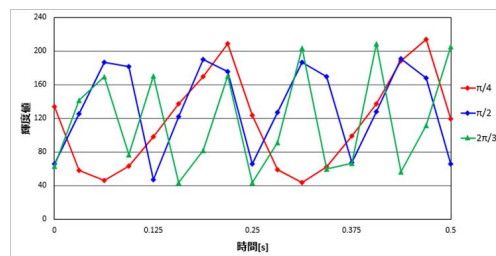


図 6 ホログラムの輝度値

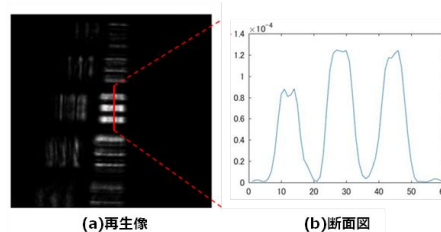


図 7 強度再生像および断面図

1 μm 以下であることが確認された。

微小物体の連続計測を行った。対象物体としてドラッグデリバリーシステム用途のリポソーム(Lipocapsulater FD-S PE)を用いた。リポソームとはリン脂質が形成する分子膜から構成される閉鎖小胞体のものであり、中空構造をもつ物質である。今回はリポ化時に用いた精製水がそのまま内包されている。再生像の時間変化を正規化相互相関値を用いて評価したものを図9に示す。ここで基準は全再生像の平均値を用いた。平均相関値は2step法: 0.74 ± 0.13 , 3step法: 0.64 ± 0.18 あった。微弱光記録時の設定によりホログラムの輝度変化が起こった。この振動は光強度を増やすことで補正可能である。図10にリポソームのホログラムと正規化法を用いて復元した物体光および再生像を示す。強度および位相再生像よりリポソームの像が確認できる。位相再生像より物体と周辺部の位相値は明確に異なっており、物体の屈折率や形状情報を求めることができる。使用したリポソームの大きさが約200nmであったこともあり現在のシステム構成では中空構造の観察は難しいが対物レンズの倍率を上げれば観察は可能と考えられる。2step法と3step法を比較すると2step法のほうがノイズが少なく高コントラストの像を再生していた。2step法では隣接フレーム間で信号処理を行うのに対して、3step法は1フレーム離れた干渉縞の信号処理も含まれるため、それらの干渉条件がわずかに変わることが影響していると考えられる。

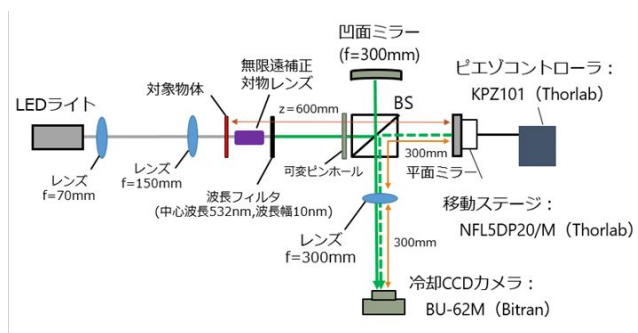


図8 SIDH 光学系

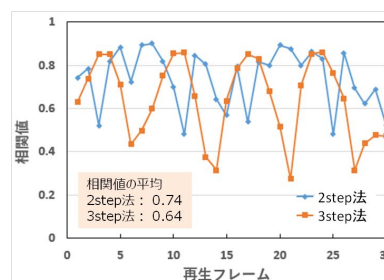


図9 再生像の正規化相互相関値

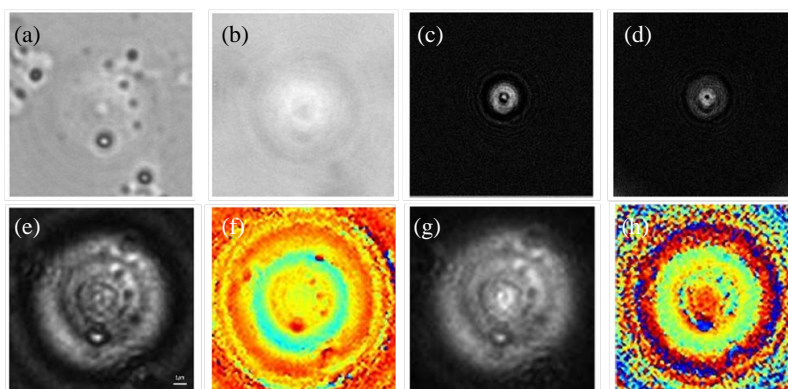


図10 (a)顕微鏡画像, (b)ホログラム, (c) 2step法と(d) 3step法で抽出したホログラム面の物体光, 2step法による(e)強度再生像と(f)位相再生像, 3step法による(g)強度再生像と(h)位相再生像。

< 引用文献 >

- [1] G. Brooker, N. Siegel, V. Wang, and J. Rosen, "Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy," *Opt. Express*, 19, 5047–5062 (2011).
- [2] N. Yoshikawa, "Phase determination method in statistical generalized phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.*, 52, 1947–1953 (2013).
- [3] N. Yoshikawa and K. Kajihara, "Statistical generalized phase-shifting digital holography with a continuous fringe-scanning scheme," *Opt. Lett.*, 40, 3149–3152 (2015).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

- (1) N. Yoshikawa, S. Namiki, and A. Uoya, "Object wave retrieval using normalized holograms in three-step generalized phase-shifting digital holography", *Applied Optics*, 査読有, 58, A161-A168 (2019). <https://doi.org/10.1364/AO.58.00A161>.
- (2) N. Yoshikawa, S. Namiki, and A. Uoya, "Generalized phase-shifting digital holography using normalized phase-shifted holograms", *Optics Communications*, 査読有, 430, 391-399 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.070>.
- (3) T. Shiratori, K. Kasai, and N. Yoshikawa, "Color-image reconstruction for two-wavelength digital holography using a generalized phaseshifting approach", *Applied Optics*, 査読有, 56, 6554-6563

〔学会発表〕(計 19 件)

- (1) N. Yoshikawa, “Generalized Phase-shifting Digital Holography using Normalized Phase-shifted Holograms”, The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics 2018 (招待講演) (2018).
- (2) 佐藤孝則, 吉川宣一, 正規化位相シフト法を用いた縞投影三次元計測, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2018 (2018).
- (3) M. Kobayashi and N. Yoshikawa, “Wavelength estimation using multi-wavelength generalized phase-shifting digital holography”, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (2018).
- (4) N. Yoshikawa, S. Namiki, A. Uoya, “Normalization method for generalized phase-shifting digital holography”, Imaging and Applied Optics Congress, Digital Holography & 3-D Imaging 2018 (2018).
- (5) 並木翔馬, 吉川宣一, 正規化干渉縞を用いたインコヒーレントデジタルホログラフィによる物体光抽出, 第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018).
- (6) 魚谷篤, 吉川宣一, 一般化位相シフト法を用いたフレネルインコヒーレント相関ホログラフィ, 第65回応用物理学会春季学術講演会 (2018).
- (7) 吉川宣一, 位相シフト法による多波長位相シフトデジタルホログラフィとその応用, レーザー学会学術講演会第38回年次大会 (招待講演) (2018).
- (8) N. Yoshikawa, S. Namiki and A. Uoya, “Object wave reconstruction by generalized phase-shifting digital holography using normalized interference fringe”, International Workshop on Holography and related technologies 2017 (2017).
- (9) T. Sato and N. Yoshikawa, “Three Dimensional Measurement by a Phase shifting Fringe Projection Profilometry with a Normalization Method”, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017 (2017).
- (10) Y. Someya, T. Mizumura and N. Yoshikawa, “Three dimensional shape retrieval using object contour estimated by Gabor-type digital holography”, The 24th Congress of the International Commission for Optics (2017).
- (11) K. Kasai and N. Yoshikawa, “Color distortion suppression in color digital holography”, Optics & Photonics International Congress 2017, Information Photonics 2017 (2017).
- (12) Y. Kawai and N. Yoshikawa, “Fast three-dimensional shape measurement system using a generalized phase shifting method with a continuous fringe-scanning scheme”, Optics & Photonics International Congress 2017, Information Photonics 2017 (2017).
- (13) 吉川宣一, 葛西敬介, 並木翔馬, 正規化干渉縞を用いた一般化位相シフトデジタルホログラフィによる物体光の復元, 第64回応用物理学会春季学術講演会 (2017).
- (14) 葛西敬介, 吉川宣一, 多波長位相シフトデジタルホログラフィのための波長分離法, 第64回応用物理学会春季学術講演会 (2017).
- (15) 並木翔馬, 吉川宣一, 連続フリンジスキャンを用いた多波長デジタルホログラフィシステムの開発, 日本光学会情報フォトンクス研究会 (2017).
- (16) N. Yoshikawa, S. Namiki, and K. Kasai, “Effect of a quasi-continuous fringe-scanning on generalized phase-shifting digital holography”, International Workshop on Holography and Related Technologies, 142-143 (2016).
- (17) T. Mizumura and N. Yoshikawa, “Omnidirectional 3D shape measurement using digital holographic shape from silhouette”, International Symposium on Optical Memory, Technical digest, 106-107 (2016).

〔その他〕

<http://www.ps.ics.saitama-u.ac.jp/index.html>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。