

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K20293

研究課題名（和文）最適化に基づくホログラム画像処理フレームワークの構築

研究課題名（英文）Optimization-based hologram image processing framework

研究代表者

遠藤 優（Endo, Yutaka）

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：50803293

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）：ホログラフィと画像処理を組み合わせた計測技術であるデジタルホログラフィでは、光学系に応じて画像処理システムを設計する必要があり、高性能な画像処理システムの開発に要するコストが増大している。本研究では、デジタルホログラフィにおける画像処理を最適化問題として統一的に扱うことで、スケーラブルかつ高性能なホログラム画像処理フレームワークの構築に取り組んだ。近接分離に基づく反復最適化アルゴリズムを用いたホログラム画像処理フレームワークを開発し、インラインホログラフィや単一画素ホログラフィックイメージングに適用し、その有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタルホログラフィは対象の3次元情報をレンズレスで取得できる技術であり、広視野・高分解能・高速な3次元観察を実現できる技術として幅広い分野で活用されている。特に、コントラストの低い透明試料を染色せずに観察できるため、生命科学や医療分野での活用が期待されている。本研究で開発したフレームワークは、デジタルホログラフィに基づく計測システム全般で広く活用でき、その画像処理システム開発の容易化・高性能化に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Digital holography is an imaging technique using holographic image recording and computational image reconstruction. In digital holography, the development cost of a high-performance image processing system is increasing because the image processing system must be customized to a specific optical system. In this study, we developed a scalable and high-performance image processing framework for digital holography. In the framework, image reconstruction is cast as an optimization problem and solved by proximal splitting algorithms. We applied the framework to inline digital holography and single-pixel digital holography to verify its effectiveness.

研究分野：情報光学

キーワード：ホログラフィ 画像処理 画像再構成 最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、ホログラフィと画像処理を組み合わせた計測技術 (DH) が注目を集め、その活用が進んでいる。ホログラフィは干渉縞 (ホログラム) を記録することで、3次元像を記録・再生する技術である。従来は写真乾板を用いてホログラムを記録し、光学的に像を再生していたが、DHではイメージセンサを用いてホログラム画像を記録し、画像処理により像を再生する。画像処理の活用により高速・高精度な像再生が可能となり、また光学設計の自由度が向上し、多様なデザインの DH システムが開発されている。近年は生命科学・医療分野への DH の応用が期待されており、断層撮影による非染色・非侵襲・3次元ライブセルイメージングの実現や、合成開口による広視野・高分解能・レンズレス顕微鏡など、画像処理と光学系を協調設計した DH システムが多数開発され、活用の場が増えている。

一方で、DH システムにおける画像処理が複雑化・多様化し、その開発に要するコストの増大が問題となっている。高性能な DH システムを開発するには、光学系に応じた画像処理設計、並列計算を活用した効率的実装、パフォーマンスチューニングを反復的に行う必要がある。画像処理が複雑化・多様化したことで、この開発サイクルは非常に高コストかつ高い専門性が要求されるようになり、DH システム開発におけるボトルネックとなっている。しかし、DH システムにおける高性能な画像処理の開発を容易にする理論及び実装は確立されていない。これを実現できれば DH の応用全体に大きな波及効果が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、DH システムにおける画像処理を最適化問題として統一的に扱うことで、スケーラブルかつ高性能なホログラム画像処理フレームワークを開発することである。図 1 に最適化に基づくホログラム画像処理の概略を示す。DH システムにおける画像再構成は光学系の計測モデルを用いた逆問題として表され、この逆問題を計測対象の先験情報を用いた最適化 (最大事後確率推定) により解く。多段のタスクからなる複雑な画像処理の代わりに単一の最適化問題を用いることで画像処理を統一的に扱うことができ、計測モデルの変更のみで多様な DH システムに対して容易に拡張ができる。このような最適化に基づくホログラム画像処理フレームワークを開発し、その有用性を実証する。

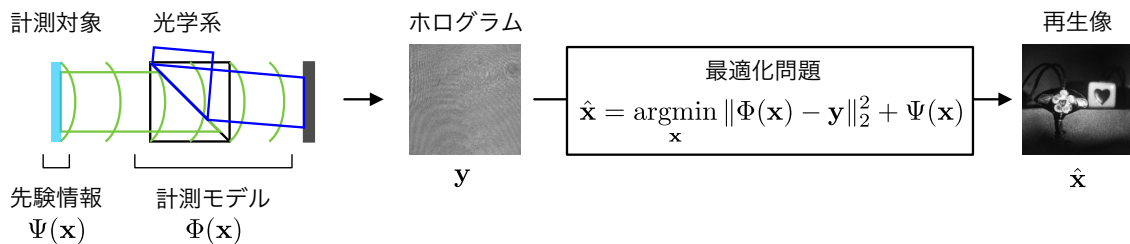


図 1: 最適化に基づくホログラム画像処理。

3. 研究の方法

最適化に基づくホログラム画像処理フレームワークの実現のために、計測モデルの構築に必要な基本的演算の実装と、最適化アルゴリズムの開発を行った。多くの DH システムの計測モデルは、フレネル回折、位相シフト、空間フィルタリングなどの基本的な演算の組み合わせでモデリングできる。これらの基本的な演算をフレームワーク上に実装し、ビルディングブロックとして使用することで、様々な DH システムで活用可能なフレームワークを実現する。最適化アルゴリズムとして近接分離に基づく反復最適化アルゴリズムを実装する。この最適化アルゴリズムは大規模な問題を効率的に扱える手法であり、先験情報はそれに対応した近接写像という形で活用される。今回具体的に実装したアルゴリズムは、近接勾配法、交互方向乗数法 (ADMM), half-quadratic splitting である。

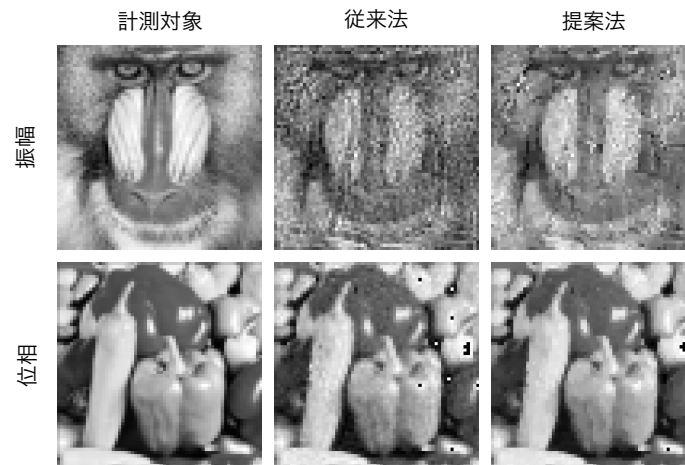
開発するフレームワークで高精度な画像再構成を実現するには、精緻な先験情報の構築が必要となる。そこで、機械学習によってデータセットから先験情報の学習を行った。近接写像をニューラルネットワークで構成し、データセットを用いてパラメータを学習することで、高精度な画像再構成を可能とする先験情報を構築した。

4. 研究成果

開発したフレームワークの有効性を検証するため、単一画素ホログラフィックイメージング (SPDH) における画像再構成をフレームワーク上で実装し、その性能を検証した。SPDH とは単一受光素子を用いてホログラム画像を取得する手法であり、一般的なイメージセンサを用いるのが困難な波長帯や微弱光計測への応用が期待されている。図 2 にシミュレーションによる SPDH の再生像を示す。最適化に基づかない再構成手法 (従来法) では再生像の振幅・位相分布

に大きなノイズが重畳しているのに対し、開発したフレームワークを用いた最適化（提案法）ではノイズの少ない再生像が得られた。ピーク信号対雑音比（PSNR）により画質を評価したところ、従来法の PSNR が振幅 16.1dB, 位相 23.3dB に対して、提案法では振幅 19.8dB, 位相 25.8dB となった。以上より、フレームワークを使って従来よりも精度の良い再生像が得られる画像処理システムを構築できることを実証した。

図 2: 単一面素ホログラフィックイメージングにおける再生像。



同様に、インライン DH における画像再構成をフレームワーク上で実装し、その性能を検証した。インライン DH では、再生像に直接光や共役光などのアーティファクトが重畳してしまうため、画像処理による不要成分の除去が重要である。ここでは、機械学習で構築した先験情報を用いて再構成処理を行った。図 3 にシミュレーションによるインライン DH の再生像を示す。従来の逆伝搬計算による再生像ではアーティファクトが重畳しているのに対し、フレームワークを用いた提案法ではそれらを除去できている。また近年その精度の高さから注目されている深層学習（U-Net）を用いた再生像と比べても、同程度の精度で再構成ができています。PSNR と構造的類似性指数（SSIM）により画質を評価したところ、逆伝搬による従来法では PSNR 9.57 dB, SSIM 0.78, 深層学習に基づく手法では PSNR 33.9dB, SSIM 0.98 であったのに対し、提案手法では PSNR 38.1 dB, SSIM 0.99 となった。以上より、本フレームワークを用いることで、最新の手法以上の精度を達成することができた。

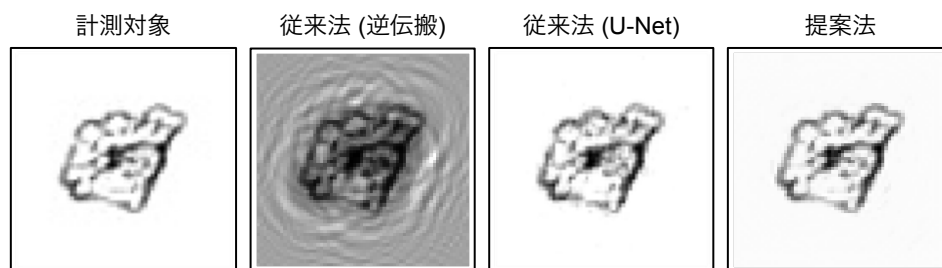


図 3: インラインデジタルホログラフィにおける再生像。

開発したフレームワークを実際の DH システムにおいて評価するために、複数波長 SPDH システムの開発にも取り組んだ。これまでの SPDH では単一波長のみでの計測が行われていたが、今回初めて、SPDH による複数波長の振幅・位相の同時取得を可能とするシステムを開発した。図 4 に開発した SPDH システムによる再生像を示す。イメージセンサで取得したデータ（位相シフト DH）からの再生像と比べて、振幅・位相分布ともに良い一致が見られた。今後はこのシステムを使って、開発したフレームワークを実験的に評価していく予定である。

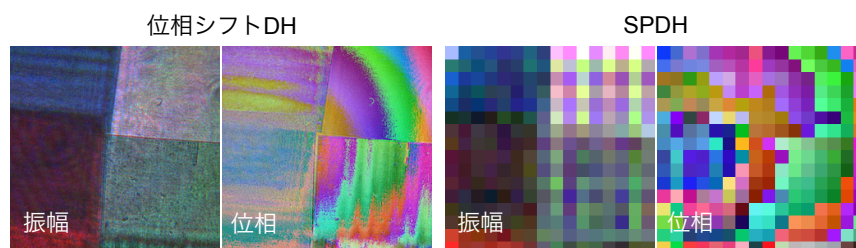


図 4: 位相シフト DH と SPDH による複数波長再生像

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Endo Yutaka, Tahara Tatsuki, Okamoto Ryo	4. 巻 58
2. 論文標題 Color single-pixel digital holography with a phase-encoded reference wave	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 G149-G154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.58.00G149	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 Tahara Tatsuki, Endo Yutaka	4. 巻 58
2. 論文標題 Multiwavelength-selective phase-shifting digital holography without mechanical scanning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 G218-G224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.58.00G218	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7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 遠藤 優, 田原 樹, 岡本 亮
2. 発表標題 RGB 照明を用いたカラーシングルピクセルデジタルホログラフィ
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 田原 樹, 遠藤 優
2. 発表標題 機械走査部の無い波長選択位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡システム
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 遠藤 優, 田原 樹, 岡本 亮
2. 発表標題 波長依存位相変調を用いた複数波長シングルピクセルデジタルホログラフィ
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤 優, 田原 樹, 岡本 亮
2. 発表標題 ホログラフィにおけるシングルピクセルイメージングの活用
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田原 樹, 遠藤 優, 涌波 光喜, Boaz Jessie Jackin, 市橋 保之, 大井 隆太郎
2. 発表標題 波長選択抽出位相シフト法に基づく複数波長定量位相イメージング
3. 学会等名 令和元年第3回ホログラフィック・ディスプレイ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuki Tahara, Yutaka Endo, Koki Wakunami, Boaz Jessie Jackin, Yasuyuki Ichihashi, Ryutarō Oi
2. 発表標題 Multiwavelength holographic image sensing of various light
3. 学会等名 The 9th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 凱, 遠藤 優
2. 発表標題 単一画素カメラにおける空間変調パターンの物体認識に対する最適化
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020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
---------	---------