

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04976

研究課題名（和文）シングルピクセルイメージングによる微弱光計測

研究課題名（英文）Single pixel imaging with weak energy illumination

研究代表者

仁田 功一（Nitta, Kouichi）

神戸大学・システム情報学研究科・准教授

研究者番号：20379340

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：高精細イメージングを実現するシングルピクセルイメージングのための計測光学系を試作している。

試作した計測システムを用いて実験検証を行った結果、100万以上の画素を有する画像取得結果を提示し、その有効性を示している。

次に、高精細シングルピクセルイメージングの動作原理を活かした画像再構成について検討している。独自の深層学習モデルを考案しその検証を行なった。検証の結果、考案した深層学習画像生成法が、高画質化と計算負荷の観点から従来法と比較し、優位であることを確認できた。また、この画像生成法が、微弱光照射下においても有用であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シングルピクセルイメージングは、従来の画像計測に対して、さまざまな特徴を有している。一方で、出力できる画像の画素数は従来法と比較して極めて少ない。本研究では、計測方法を工夫することで画素数100万以上を有する計測結果を提示できる方法をしめすことに成功している。このことから、本研究の成果によりこれまで少ない画素数においても価値がある応用に限定されているシングルピクセルイメージングの用途の拡大に寄与するものと考えている。

研究成果の概要（英文）：An optical set up for the measurement in high definition type of single pixel imaging has been constructed. The proposed single pixel imaging system has been experimentally verified with the constructed setup. As results of experiments, it can be shown that the constructed set up can output an image with more than mega pixels.

Next, digital signal processing for image reconstruction suitable for the proposed single pixel imaging has been studied. A procedure based on deep learning with convolutional neural network model is originally developed. The developed procedure has been numerically estimated.

It has been found that the procedure is useful from the viewpoint of high image quality and low computational costs. Also, the proposed method is verified to be effective for high sensitive imaging in the condition of weak energy illumination.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：コンピュータショナルイメージング 画像回復 光イメージング 深層学習

1. 研究開始当初の背景

光計測とデジタル信号処理により画像計測を行うコンピュータショナルイメージングにより、各種の光イメージングの実用性や機能性が高まっている。また、さまざまな特徴を有するあらたな基本手法も開発されている。シングルピクセルイメージングは、圧縮センシング(CS; Compressive Sensing)を利用することを前提とした画像入力法として提案されて (M. Duarte, IEEE Signal Processing Magazine, 83, 2008)以来、画期的なコンピュータショナルイメージング技術として注目されている。イメージセンサーや2次元走査系を必要とせず、単一の受光素子を用いた計測とCSに基づく信号処理により画像情報を得ることができる。シングルピクセルイメージングは、イメージセンサーが高価あるいは、未成熟な短波長赤外線やテラヘルツ波長帯を用いたイメージングに優れる。また、大気の影響に画質が影響をうけないことも指摘されており、シングルピクセルイメージングがリモートセンシングや医用応用等の広い分野で期待されている。

この状況のもと、申請者はシングルピクセルイメージングにおいて高精細化に適する方法を提案し、その有用性を解析的に検証した。この提案は、空間光変調素子の変調速度や信号処理におけるデータ量により小画素にとどまっていた画像計測システムを、空間分割された領域ごとに計測、信号再構成することにより100万を超える画素数の計測が可能になる手法である。

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発している高精細化シングルピクセルイメージングが高いノイズ耐性を有することを実現することを示すとともに、その微弱光照射による低侵襲イメージング法としての有効性を明らかにすることを目的とする。

まず、提案システムに基づく高精細画像計測システムを試作し、100万画素以上のイメージングを実験的に実証する。この計測システムを開発するためには、主に光源のデバイス選定が重要になる。開発および試作した計測光学系を検証し、イメージングのデモンストレーションを行う。

提案している高精細化SPIでは、再構成画像の画素数が多い。したがって、マルチプレクシング計測における信号の多重度をより大きく活用するため微弱光計測に優位であると考えられる。また、トレードオフの関係になると考えられる計測対象のスパース性と、画像計測の対雑音性の関係について考察し、新規光イメージングとしての有用な知見を創出する。

3. 研究の方法

(1) 高精細イメージングのための計測系の試作

高精細シングルピクセルイメージングでは、計測とデジタル信号処理を1行毎に分割して実行する。 $N \times N$ 画素のイメージングを行うには、 N 次アダマール行列の各行成分から一次元分布を N 通り生成し、それぞれ縦方向に伸張させたパターン分布をあらかじめ用意する。図1に一次元アダマール変換を用いたSPIにおける計測系の概要を示す。まず、 N 個光源を並べたライン光源を上から順に点灯させ、シリンダカルレンズにより各行毎に変調分布を測定対象に照射する。さらに測定対象を透過した光をレンズにより集光し、その光強度を検出器により計測する。計測結果を行列計算により逆変換を施すことで画像を再構成できる。この手法の画像再構成のために必要な計測回数は N^2 回であり従来手法と変わらないが、パターンの枚数が N^2 枚から N 枚に削減される。また、画像再構成時の計算においても、従来手法では要素数が $N^2 \times N^2$ である行列の計算が必要であることに対して、 $N \times N$ の行列計算で再構成が可能となっており、従来手法と比べて高速化、高精細化が可能である。

当初計画では、図1に示すように、高速変調が可能なライン光源デバイスを採用する予定であった。申請期間初年度に適切な光源を調査したところ、マイクロLEDと呼ばれるデバイスが有望であることがわかった。マイクロLEDは光源の間隔が数10 μm と非常に高密度な集積が可能であり、シングルピクセルイメージングへの適用に適している。しかし、当時入手できる製品がすくなく、および実験に使用するための開発キットが予算内に収まらなかった。

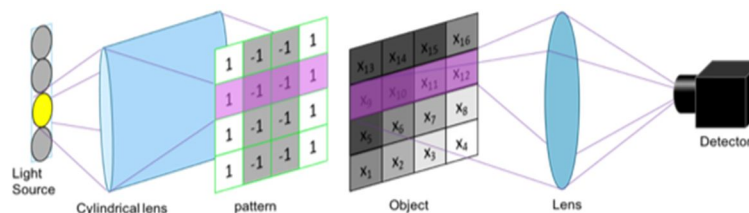


図1 高精細シングルピクセルイメージングの概念図

そこで、実験系の試作に導入するマイクロLEDの代替デバイスの検討を行なった。検討と調査

の結果、レーザー走査式のピコプロジェクターデバイスを採用した。このデバイスは、1280×720点を60fpsでパターン制御できる。この仕様は、このデバイスの1点あたりの発光制御は約50MHzで実行できることを示している。以上より、このデバイスを光源アレイとして用いる系を作製し、検証実験を行なった。

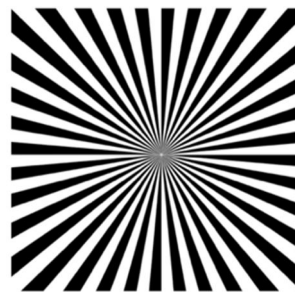


図3 実験検証に用いたテストチャート

(2) 信号処理の改良と微弱光計測の効果

計測データを用いた画像再構成では、圧縮センシングを基本手法とすることが当初計画であった。シングルピクセルイメージングにおける光計測系は、複数回(マルチプレクシング)の計測の効果により高い信号対雑音比を有する情報が得られる。一方で、圧縮センシングは、測定対象もしくは、測定データのスパース性を利用することで、少ない測定回数で鮮明な画像を提示できることを特徴とする。つまり、圧縮センシングの効果と信号対雑音比はトレードオフの関係にある。この関係性を詳細に考察することが研究開始時の予定であった。

近年の深層学習の進展がデジタル超解像や、画像認識画像システム、画像処理にも寄与していることは周知のとおりである。シングルピクセルイメージングにおいてもその例外ではなく、畳み込みニューラルネットワークの学習より画像再構成方法に関する先駆的な方法が報告されている。文献(C. F. Higham et al., R. Murray-Smith, M. J. Padgett & M. P. Edgar, "Deep learning for real-time single-pixel video," Scientific Reports, 8, 2369 (2018) .)では、画素数のわずか4%程度の測定データで良質な画像が再構成できることが提示された。この結果は、圧縮センシングよりも桁少ない測定回数でイメージングが可能であることを示唆するものであり、この報告以降、シングルピクセルイメージングへの深層学習の適用が急激にすすんでいる。

本申請研究においても、研究計画を変更し、深層学習を基本手法とする画像再構成アルゴリズムの構築を行い、検証を行なっている。アルゴリズムの構築においては、計測システムの特性を活かす方法として、次元分布毎に画像化する深層学習モデルを開発している。

4. 研究成果

(1) 高精細イメージングのための計測系の試作

図2に試作した計測系の写真を示す。図1と2とを比較すると、照射分布を生成するためのデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)が反射型の空間光変調素子であるために、実装に必要なレンズを数枚追加している。また、測定対象を通過した光信号を全て観測するために、光受光素子に積分球を用いている。

試作した計測光学系を用いた検証実験を行なった。高精細の効果を検証するために、図3に示す形状のテストチャートを測定対象とした。その結果を図4に示す。図4より、最大1024×1024画素を有する画像を提示することに成功している。画素数を増やせば増やすほどチャート中央部の高周波成分を再現できていることがわかる。本研究で達成した画素数は世界的にみても現状で最大であると考えている。

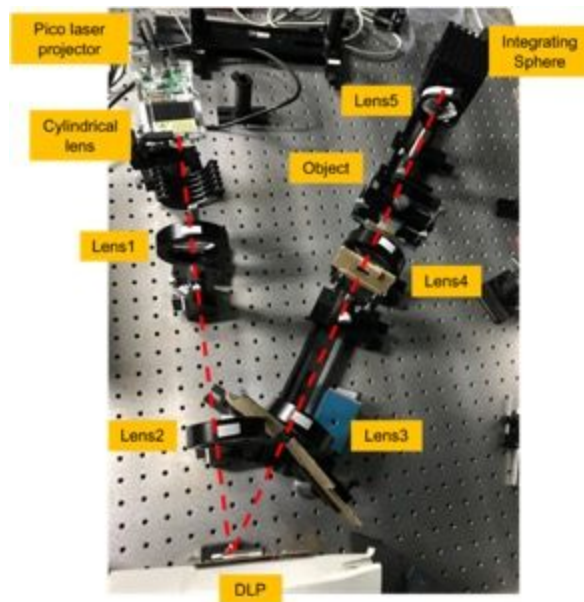


図2 試作した高精細シングルピクセルイメージングシステムの光計測系の写真

(2) 信号処理の改良と微弱光計測の効果の検証

深層学習を実装するためのネットワークモデルを検討した。シングルピクセルイメージングに深層学習を適用するための一般的なネットワーク構造としては自己符号化器が用いられることが多い。この場合、測定対象を2次元の画素構造で表現したものを自己符号化器の入力とする。計測系で得られるデータセットを中間層とし、出力を画像再構成の結果とする。入力と中間層、および中間層と出力に対して、それぞれ多層の畳み込みニューラルネットワークを構成し、既知のテストデータを用いた学習によりパラメータを推定する。

一方、本研究では、入出力を測定対象および出力画像の水平方向の次元成分として設定している。画素数が $N \times N$ である場合、従来ネットワークモデルでは、入出力のノード数がそれぞれ N^2 であるのに対して本研究で扱うネットワークモデルではそれぞれ N に削減される。多層の畳み込みニューラルネットワークモデルでは、ノード数が大きいほどネットワークの構造が複雑

になり、推定する重み係数の数も増える。したがって、本研究に用いるネットワークモデルは学習のための計算負荷が低いものであることが期待される

また、図1および2に示す計測系において、光の照射分布は、バーコード形状であり垂直方向に一定である。このことにより、全ての行の一次元分布を再構成する際に、共通のネットワークモデルを利用できる。

図5にシミュレーションによる検証結果を示す。図5(a)は元画像であり、画素数は 64×64 である。ネットワークの学習には、元画像とは異なる1000枚の画像を用いた。学習により導出されたパラメータを用いて計測データから画像を再構成した。なお、計測データ数は2048であり、画素数の50%である。図5(b)は一般的なシングルピクセルイメージングの深層学習モデルを用いた再構成結果、図5(c)は本研究で構築したモデルにより出力された画像である。図5(b)に示す画像は、画像全体が鮮明ではなく、被写体を認識しづらい。一方、図5(c)に示す画像は元画像に近い画像が再構成されていることがわかる。再構成画像の画質を定量的に評価するために、画像復元によく用いられているSSIM (The Structural Similarity Index Measure) を求めた。この指標は1に近いほど復元率が高いことを示すものである。図5(b)および(c)のSSIMはそれぞれ0.565、および0.924であった。この結果より、本研究で構築した深層学習法の優位性を定量的に示すことができた。

深層学習を用いたシングルピクセルイメージングでは、数万枚の画像が学習データセットとして用いられる場合が多い。本研究の検証で用いた学習データセットは、通常と比較してはるかに少ない。このことが図5(b)に示す画像の画質が低い要因であると考えられる。一方、図5(c)を得るためのモデルでは、画像を一次元分布毎に再構成する方法である。画像の水平方向成分がひとつの学習データに相当する。以上より、画素数 64×64 を有する1000枚の学習データから64000個の学習データが抽出されて学習に使用されている。このことが、本研究で構築したネットワークモデルがより適切なパラメータ導出が行えていることの原因である。

次に学習に要した時間について考察する。図5(b)に用いたネットワークモデルの学習時間は480秒であった。対して図5(c)を再構成するためのモデルの学習時間は60秒であった。このことから、学習時間の短縮にも本研究で構築したモデルの有用性を示せた。

最後に微弱光イメージングの効果について考察している。各回の測定データの測定値の階調を16bitから6bitまで量子化数を変更し、その再構成画像を比較した。階調数が少ないほど微弱照明下で撮影したことに相当する。その結果、7bit以上の階調では、16bitと遜色のない画像再構成が行えることを確認した。このことは、高感度の受光素子を用いた微弱光イメージングに本研究が有効であることを示唆している。

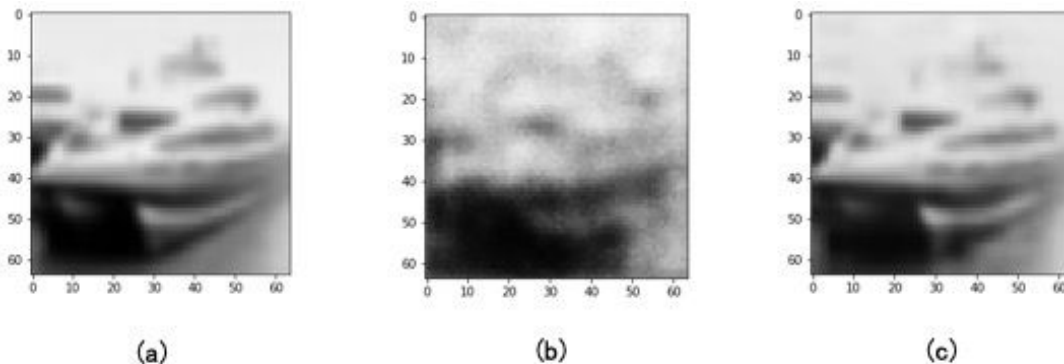


図5 深層学習モデルを用いた画像再構成のシミュレーションによる検証結果: (a) 元画像、(b) 従来法に基づくネットワークモデルを用いた再構成結果、(c) 本研究で構築したネットワークモデルを用いた再構成結果

信号処理の検証については、すべてシミュレーションにとどまっている。実験検証に至らなかった理由は、学習に十分な実験データセットがえられなかったからである。引き続き、実験検証を進める予定である。

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 1件）

1. 著者名 Kouichi Nitta, Yuki Yano, Chihiro Kitada and Osamu Matoba	4. 巻 9
2. 論文標題 Fast Computational Ghost Imaging with Laser Array Modulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 4807
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app9224807	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 辻林大揮, 仁田功一, 全香玉, 的場 修	4. 巻 47
2. 論文標題 光学処理による勾配降下法の実装	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 164-168
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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 4件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Atsushi Takigawa, Kouichi Nitta, Xiangyu Quan, and Osamu Matoba
2. 発表標題 Image reconstruction for single pixel imaging with row patterns illumination
3. 学会等名 Information Photonics (IP) in Optics & Photonics International Conference (OPIC) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kouichi Nitta
2. 発表標題 Study on optical signal processing for single pixel imaging
3. 学会等名 The 9th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田 和樹, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 シフトパターン変調によるシングルピクセルイメージング
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 岡 駿佑, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 デジタルマイクロミラーデバイスを用いたゴーストイメージングによる動画撮影の検討
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧川 厚志, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 高解像シングルピクセルイメージングシステムの試作
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仁田 功一, 瀧川 厚志, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 メガピクセルを実現するシングルピクセルイメージング
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 仁田 功一
2. 発表標題 シングルピクセルイメージングの基礎
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会(Optics & Photonics Japan 2019),
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仁田功一
2. 発表標題 光計測とデジタル計算の負荷を考慮したシングルピクセルイメージング
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第40回年次大会(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kouichi Nitta
2. 発表標題 High definition single pixel imaging
3. 学会等名 The 8th Japana-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 Kouichi Nitta, Kazuki Morimoto, ans Osamu Matoba
2. 発表標題 High definition single pixel imaging with a set of one dimensional Hadamard transform transform
3. 学会等名 SPIE Conference 10889: High-Speed Biomedical Imaging and Spectroscopy IV in Photonics West BIOS (the largest biophotonics, biomedical opticism and imaging conference) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仁田 功一
2. 発表標題 単一画素計測と信号処理による画像計測
3. 学会等名 第43回光学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧川 厚志, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 高精細シングルピクセルイメージングにおける信号回復
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-431B-3
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仁田功一, 辻林大揮, 全 香玉, 的場 修
2. 発表標題 光学フーリエ変換を用いた微分計算に関する研究
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 仁田功一,
2. 発表標題 スペckル散乱の統計特性を利用した計算ゴーストイメージング
3. 学会等名 一般社団法人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 仁田 功一
2. 発表標題 単一画素計測とデジタル画像再構成による高精細イメージング
3. 学会等名 フォトダイナミズム・シングルピクセルイメージング合同ワークショップ(「乱れ」にはじまるイメージング),
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