

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18803

研究課題名（和文）高速・高解像度撮影を目指したベクトルピクセルイメージング技術の開拓

研究課題名（英文）Vector pixel imaging for high-speed and high-resolution imaging

研究代表者

下馬場 朋祿（Tomoyoshi, Shimobaba）

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：20360563

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、パターン投影を必要としないワンショットで撮影可能なベクトルセンサイメージングを開発した。この研究では、1次元の計測データと正解画像をマッピングするニューラルネットワークを開発した。この光学系は撮像物体、物体光を拡散する拡散板、ラインセンサから構成される。この1次元拡散計測データから物体の振幅を推論できることを示した。最終年度には、ニューラルネットワークの構成を変更し、物体の複素振幅計測（振幅と位相の同時計測）ができることを示した。いずれもワンショットで対象物体の情報を復元できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はベクトルピクセルイメージングを開発した。撮像素子には受光素子が並べられたラインセンサを使用する。CCDやCMOSカメラは高解像度撮影を得意とするが、幅広い波長帯や低光量環境下での撮影は苦手とする。シングルピクセルイメージングはその逆の特性となる。提案手法（ベクトルピクセルイメージング）は、大画素数の撮影かつ高速撮影が可能であり、ラインセンサの特性から、幅広い波長帯や低光量環境下での撮影も可能となる。この提案手法は複数回のパターン投影を必要とする。提案手法は、従来のイメージングデバイス（CCDやCMOSカメラ）とシングルピクセルイメージングの両方の利点を有する。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed a vector sensing imaging system that can capture images in a single shot without the need for pattern projection. In this research, a neural network was developed to map one-dimensional measurement data to a correct image. The optical system consists of an imaging object, a diffuser that diffuses the object light, and a line sensor. It was shown that the amplitude of the object can be inferred from the 1D diffuse measurement data. In the final year, we changed the configuration of the neural network and showed that complex amplitude measurement (simultaneous measurement of amplitude and phase) of an object is possible. In both cases, the object information could be recovered in a single shot.

研究分野：計測、3次元計測、顕微鏡、イメージング

キーワード：計測 位相回復 ラインセンサ 深層学習

1. 研究開始当初の背景

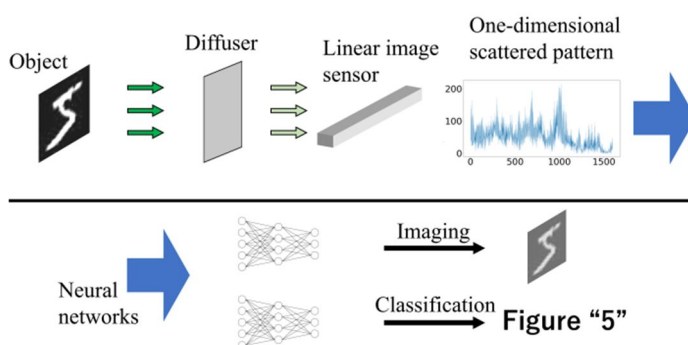
本研究ではアルゴリズムにより被写体を復元する Computational imaging(CI) において、2つのイメージング分野に着目した。1つ目がレンズ光学系を必要としないレンズレスイメージングである。これは得られた非結像画像に対して最適手法や深層学習などを用いて被写体を復元する手法である。この手法は撮影システムの小型化・簡素化、プライバシーの点などで優れている。2つ目は2次元イメージセンサを必要としないシングルピクセルイメージング(SPI: Single-Pixel Imaging)である。被写体へのパターン投影と単一受光素子への集光・測定を繰り返し、得られた光強度データから被写体画像を計算で復元する。これは受光素子を1つしか必要としないため安価で小型化可能である。また圧縮センシングと組み合わせることでデータストレージや伝送の負荷を低減でき、リモートセンシングやハイパースペクトルイメージングなどの分野で利点がある。

2. 研究の目的

本研究ではこれら2つの手法の利点を同時に得るべく1次元のイメージセンサであるラインセンサと拡散板を用いた新たな被写体識別、撮影および複素情報復元手法を提案する。ラインセンサで得られる1次元光強度から、被写体画像・複素情報および識別ラベルへの変換は深層学習で実現した。本手法はレンズによる結像光学系を必要としないため、レンズレスイメージングと同様に撮影システムの小型化・簡素化が可能であり、プライバシーを守れる利点がある。また1次元のセンサであるラインセンサを用いるため、SPIと同様に一般的な2次元のイメージセンサよりも撮影データの取り回し負荷が低減されるうえに、安価かつ高速な撮影が期待できる。加えて撮影時は一度の計測で済むため、複数回の計測が必要なSPIよりシステムの簡素化が期待できる。本論文では本手法による識別、イメージングおよび位相復元を、一般的な画像データセットであるMNISTおよびFashion-MNISTを用いたシミュレーションおよび光学実験で検証した。また各タスクにおけるニューラルネットワークとして、畳み込みベースのCNN(Convolutional Neural Network)やUNet、近年注目されるViT(Vision Transformer)を利用したモデルを複数提案し、その精度と特徴をまとめた。光学実験で撮影した1次元散乱パターンの識別精度は最大で85.7%を記録した。また被写体のイメージングおよび複素情報に関しても、その概形を復元することに成功した。

3. 研究の方法

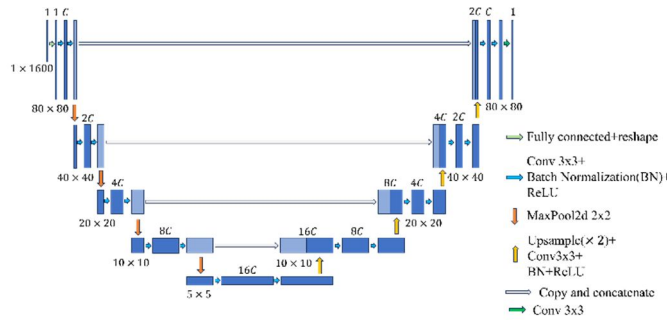
提案手法を用いた物体識別の概要を下図に示す。ただし、ここでは識別の結果の詳細は述べない。



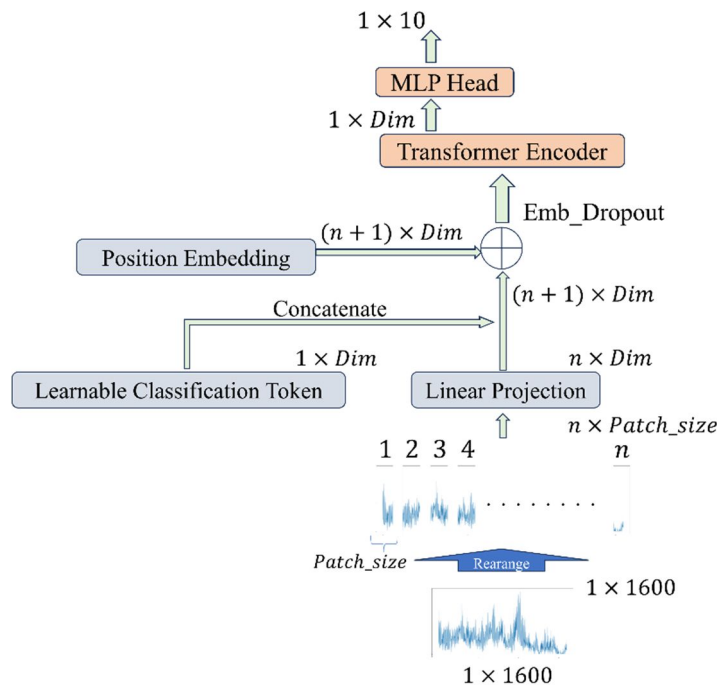
以降は提案手法による複素振幅復元(位相回復)について述べる。対象となる物体光の振幅および位相を光学系で取得した1次元散乱パターンから深層学習により復元する。物体光の位相復元にはGS(Gerchberg-Saxton)アルゴリズムが用いられることがある。これは観測した光強度からの逆回折計算と(伝搬元物体の推測)、物体の事前情報からの回折計算(観測結果の推測)をそれぞれの拘束条件下で繰り返す手法であり、これを用いた顕微鏡が提案されている。ほかに複数の伝搬距離での撮影結果から回折計算を繰り返すことで位相を得る手法も存在し(multi-height phase recovery algorithm)、これを用いた顕微鏡が提案されている。これらのイテレーションを要する手法とは異なり、深層学習を用いた手法が提案されている。観測された光強度に逆回折計算を施したものをニューラルネットワークの入力として、multi-height phase algorithmで得られる結果を出力すべき画像として学習する手法である。学習後はイテレーションが不要かつ一度の撮影で済むため高速である。本研究の位相復元でも深層学習により位相復元を実現している。入力1次元散乱パターンとして、被写体の振幅情報と位相情報が出力され

るよう学習する。

本研究で使用したニューラルネットワークのアーキテクチャに関して述べる。本研究のタスクは、1次元光強度の識別と1次元光強度から2次元画像(1もしくは2チャンネル)への変換であり、どちらも教師あり学習である。ニューラルネットワークのアーキテクチャは ResNet や UNet に代表される畳み込みモデルだけでなく、Transformer ベースのモデルや MLP ベースのモデルなど発展を遂げてきた。その中でも、識別タスクには1次元の畳み込みと ViT ベースの識別モデルを、イメージングの1次元から2次元への変換タスクには転置畳み込みモデル、エンコーダとデコーダを持った UNet ベースおよび ViT ベースのモデルを実装した。ここではイメージングに関するモデルを示す。



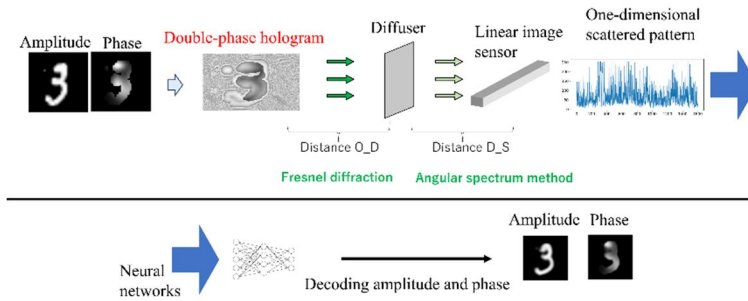
UNet ベースイメージングモデル



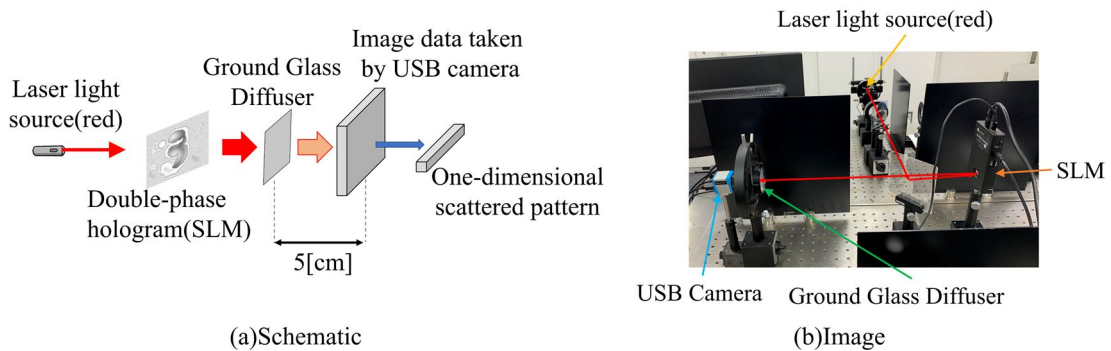
ViT ベースイメージングモデル

4. 研究成果

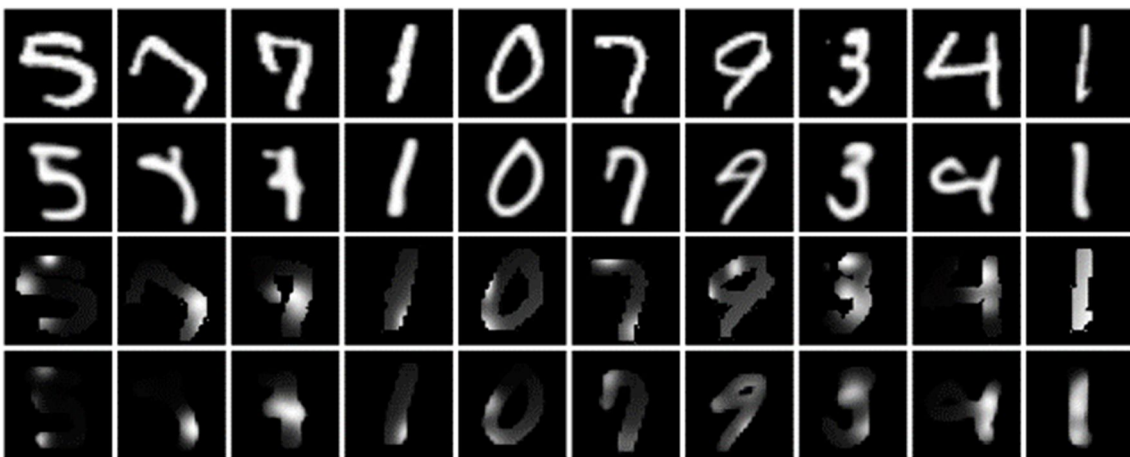
位相復元検証の概要を下図に示す。光学実験では位相型 SLM を用いるので、位相情報のみで被写体の振幅および位相を制御する必要がある。そこで2重位相ホログラム(Double-phase hologram)を用いる。また振幅情報には MNIST と Fashion-MNIST を、位相情報にはガウス分布の計算式から合成した画像を用いた。シミュレーションによる検証時には伝搬計算は拡散板までをフレネル回折、センサまでを角スペクトル法で実装した。学習後、振幅と位相それぞれの PSNR および SSIM で評価した。

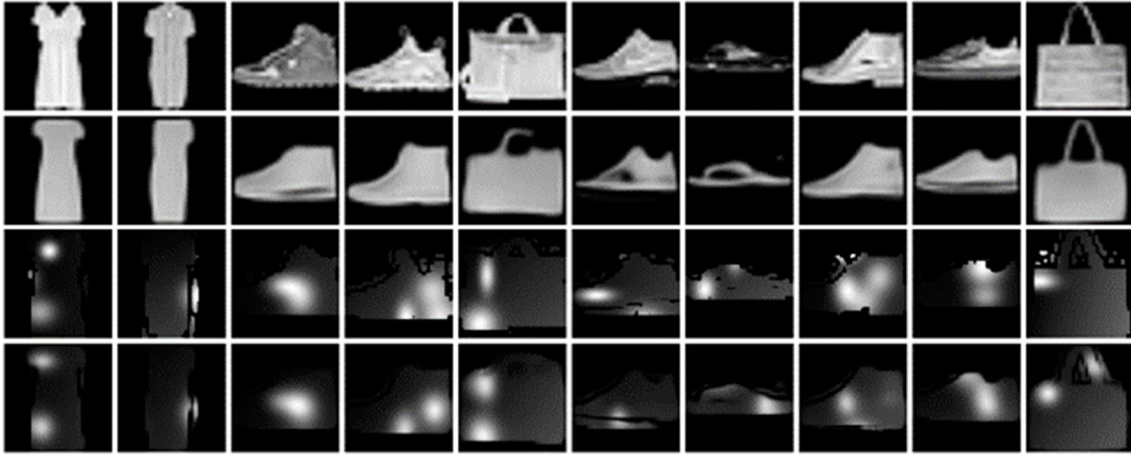


位相復元用の光学系を下図に示す．撮影対象の位相分布はガウス分布の計算式から合成した画像，振幅は MNIST および Fashion-MNIST の画像である．この 2 重位相ホログラムを SLM に表示，USB カメラで 1 次元散乱パターン撮影した．SLM と拡散板間が 40[cm]，拡散板とセンサ間が 5[cm] となった．拡散板に関してはシミュレーションの結果から微小レンズアレイよりもランダム位相の方が高い復元精度が得られると考え，よりランダム位相に近いすりガラス拡散板 (Thorlabs の DG20-1500-MD - Ø2" , SM2-Mounted N-BK7 Ground Glass Diffuser, 1500 Grit) を使用した．70000 枚の 2 重位相ホログラムから 1 次元散乱パターンを撮影後，これを入力とし，複素情報が出力されるよう位相復元モデルに学習させた．



下図は MNIST , FashionMNIST を対象物体にした場合の，複素振幅の復元結果である．各画像は上の行から振幅の教師画像，モデル出力，位相の教師画像，モデル出力である．このように実験で得られた 1 次元散乱パターンから，元の複素情報の概形を復元することに成功した．





識別およびイメージングに関して、画像データセットを位相物体として、物体とセンサとの間に微小レンズアレイを設けたシンプルな光学系で撮影した1次元散乱パターンから最大でMNISTを85.7%、Fashion-MNISTを73.1%識別した。また同じパターンから被写体の概形の復元に成功した。MNISTではPSNRとSSIMがそれぞれ最大で18.80[dB]、0.8435を、Fashion-MNISTでは15.96[dB]、0.6899を示した (Table.5.2)。位相復元に関して、拡散板としてすりガラスを用いた光学系で撮影した1次元散乱パターンから複素情報の概形を復元したMNISTでは位相におけるPSNRとSSIMの最大値はそれぞれ19.18[dB]、0.7040を、Fashion-MNISTではそれぞれ19.84[dB]、0.7434を示した (Table.5.3)。このように提案手法を想定した光学実験で撮影した1次元散乱パターンから、被写体の識別およびイメージング、位相復元に成功した。

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 0件 / うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Koki Kawamoto, Harutaka Shiomi, Tomoyoshi Ito, Takashi Kakue, Tomoyoshi Shimobaba | 4. 巻 162 |
| 2. 論文標題 Vector sensor imaging | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering | 6. 最初と最後の頁 107439 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2022.107439 | 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 Ikuo Hoshi, Masaki Takehana, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue, Tomoyoshi Ito | 4. 巻 61 |
| 2. 論文標題 Single-pixel imaging for edge images using deep neural networks | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Applied Optics | 6. 最初と最後の頁 7793-7797 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.468100 | 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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 川本航旗, 下馬場朋禄, 塩見日隆, 角江崇, 伊藤智義 |
| 2. 発表標題 リニアイメージセンサと深層学習を用いた物体識別とイメージング |
| 3. 学会等名 3次元画像コンファレンス2022 |
| 4. 発表年 2022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 |
|---------|---------|
|---------|---------|