

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04377

研究課題名（和文）確率的非分解型テンソル復元とその画像・信号処理への応用

研究課題名（英文）Stochastic non-decomposition based tensor restoration and its application to image and signal processing

研究代表者

宮田 高道 (Takamichi, Miyata)

千葉工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：90431999

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）：カメラやセンサによって取得した多次元信号やインターネットのトラフィックデータには、欠損やノイズなどの劣化が含まれることがある。そのような劣化は、信号・データの有効活用、すなわちデータからの認識や知識獲得を妨げる大きな要因となっている。これに対して、低計算量で低ランクテンソル近似を実現する枠組みである非分解型テンソル復元アルゴリズムに確率的最適化の枠組みを適用することで、復元性能を犠牲にすることなく、テンソル復元アルゴリズムの計算量・メモリ使用量を大幅に改善する手法を提案した。これにより、画像復元やインターネットトラフィック復元において、既存手法の性能を上回る復元性能を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題によって得られた研究成果の学術的意義としては非分解型・確率的テンソル復元を実際の問題に応用した多数のアルゴリズムを提案したことや、その際に用いたテンソルノルムの非凸拡張間の関係を明確にしたことなどが挙げられる。また、このような学術的成果は今後、非分解型テンソル復元を自動運転などに用いられる画像認識AIのための前処理や、医療、天文学などの幅広い分野にも応用可能であることから、社会的意義も大きいといえる。

研究成果の概要（英文）：Multidimensional signals captured by cameras and sensors, as well as Internet traffic data, may contain degradations such as missing data and noise. Such degradation is a major factor preventing effective use of signals and data, i.e., recognition and knowledge acquisition from the data. To solve this problem, we proposed a method to significantly improve the computational complexity and memory usage of the tensor restoration algorithm without sacrificing the restoration performance by applying a stochastic optimization framework to the non-decomposition tensor restoration algorithm. This framework achieves low-rank tensor approximation with low computational complexity. As a result, the proposed method outperforms existing methods in image restoration and Internet traffic restoration.

研究分野：信号処理

キーワード：テンソル復元 画像処理 信号処理 確率的最適化 テンソル

## 1. 研究開始当初の背景

画像・映像信号やインターネットのトラフィックデータ、センサーアレイによって取得した信号などは、一般に高次元配列として記述される。近年、このような高次元配列のデータをテンソルとみなし、観測時に強いノイズが付加されたり、センサの故障などでデータの一部分が観測できなかったりするような劣悪な条件下においても、後段の信号処理によって本来観測したかったテンソルを復元する手法が数多く提案されている。

これらの手法は一般に、所望のテンソルが低ランク性とよばれる性質をもつという仮定に基づいており、観測したテンソルと近く、かつ低ランク性を満たすようなテンソルを、陽に「低ランクテンソルの和」として記述することによって得るものである。これらの手法（以下、分解型テンソル復元）は一般に計算量やメモリ使用量が大きく、また、解の安定性にも課題があることが多い。

これに対して近年、テンソルを陽に分解することなく、低ランクテンソル近似を実現する新しいフレームワーク（以下、非分解型テンソル復元）が数多く提案されている。分解型テンソル復元と比較すればその計算量は一般に小さいが、近年信号処理で扱うデータ量が膨大になるにつれ、これらの手法でも計算量の増加が問題となってきているのが現状である。一方で、凸最適化の分野においては近年、確率的最適化とよばれる一連の新しいアルゴリズムが提案されている。確率的最適化は、目的関数（信号復元であれば、その最小解が所望の信号と一致するように予め設定しておく）の最小化を行うアルゴリズムの一種であり、アルゴリズム内の反復において、対象の変数の一部のみを評価することで解の性質を変えることなく計算量を大きく削減することを目指すものである。

## 2. 研究の目的

本申請課題の目的は、劣悪な環境下で観測された高次元信号（テンソル）を非分解型テンソル復元によって復元する際の計算量を大幅に削減するため、確率的最適化を用いたアルゴリズムを提案することにある。確率的最適化は現在、深層学習に代表される機械学習において、一度にメモリに読み込んで処理できないような莫大な学習用データを用いた学習を行う際に幅広く利用されており、信号処理への応用は限定的な範囲にとどまっていた。従来の非分解型テンソル復元の既存アルゴリズムでは、アルゴリズムの反復ごとに推定テンソルに対するテンソル展開（テンソルを複数の行列へと展開する処理）を行い、得られたすべての行列に対して復元処理を行うことが一般的である。このとき、既存のアルゴリズムでは、展開されたモードごとに内部変数を持つ必要があるが、本課題で提案した多くのアルゴリズムでは各モードで復元したテンソルを平均化する操作により必要なメモリ量の削減を行っている。このような操作は、暗示的に前述の確率的最適化の一種を行っているともみなすことができる。

## 3. 研究の方法

本研究では、非分解型テンソル復元を用いた様々な応用について検討した。その過程において、計算量を削減するため、確率的最適化を用いたアルゴリズムを開発した。研究の全体は以下の3段階に分かれている。

- (1) 非分解型テンソル復元を用いた画像復元手法の提案
- (2) 非分解型テンソル復元を用いたインターネットトラフィック行列復元手法の提案
- (3) (1)(2)で得られた知見をもとにした種々の画像復元・認識アルゴリズムの提案

## 4. 研究成果

### (1) 非分解型テンソル復元を用いた画像復元手法の提案

本テーマでは、画像のぼけ除去などの一般の画像復元において、重み付きテンソル核ノルムを応用した手法を提案した。その成果に関する論文一本を IEEE ACCESS 誌に投稿し採録された（図 1 および図 2）。また、非学習型画像のノイズ除去手法として一般的な自己類似性を利用したノイズ除去手法に共通の問題である、ノイズとともに画像の質感を表すテクスチャが失われる問題を解決する手法を提案した。原画像と既存のノイズ除去手法の出力画像（ノイズ除去画像）の差分を残差テクスチャと定義し、Stein の補題といくつかの仮定を用いることで、残差テクスチャの統計的モデルのパラメータを推定する手法を提案した。これにより、画像ノイズ除去においてテクスチャの復元を行うことが可能となった。その成果を論文誌（MDIP SIGNALS）に投稿し、採録された。さらに、関係する研究成果として、テンソル核ノルム正則化を用いたテンソル復元において、Algorithm unrolling によるパラメータの最適化を行う研究、および異なる正則化方式との性能比較などを行い、得られた結果に関する複数の研究発表を国内の学会において行った。

画像復元においては、画像ノイズ除去の分野では、深層学習を用いて獲得された知覚品質評

価指標を損失関数として用いることで、出力画像の知覚品質を大幅に向上させる手法を提案し、その成果を国際会議である IEEE CCNC に投稿し採録された。テンソルロバスト主成分分析において、重み付きテンソル核ノルムを用いた際の復元性能に関する研究等を行い、それらの成果を国内会議で発表した。

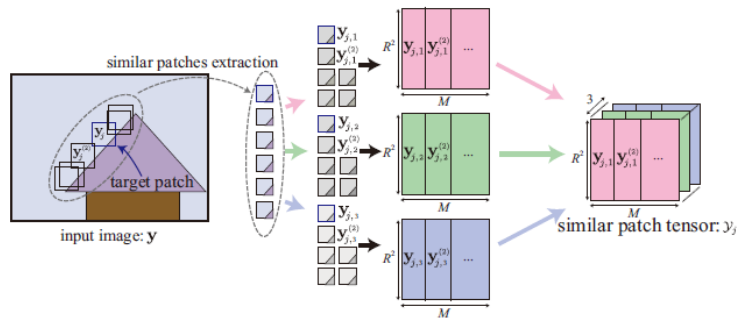


図 1 非分解型テンソル復元を用いた画像復元手法の概要

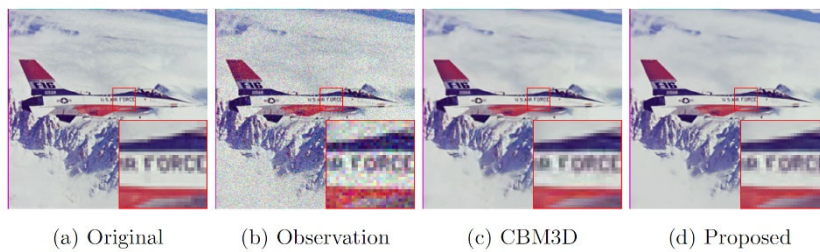


図 2 非分解型テンソル復元を用いた画像復元手法の結果 (Proposedが提案手法)

(2) 非分解型テンソル復元を用いたインターネットトラフィック行列復元手法の提案

インターネットトラフィックのデータ転送量を記録したトラフィック行列 (traffic matrix, 以下 TM) の欠損値を補完する問題に対して、TM を時間方向に分割して連結したテンソルに対して重み付きテンソル核ノルムを正則化に用いる手法を提案し、国際会議 IEEE CCNC に投稿し採録された (図 3 および図 4)。

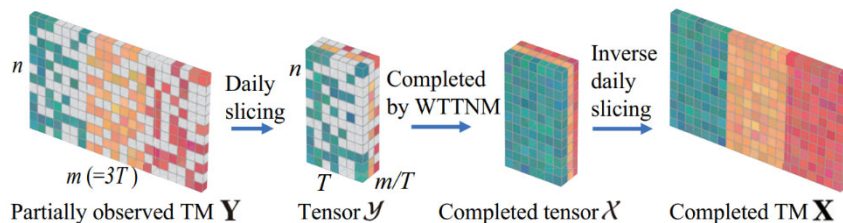


図 3 非分解型テンソル復元を用いたインターネットトラフィック行列復元手法の概要

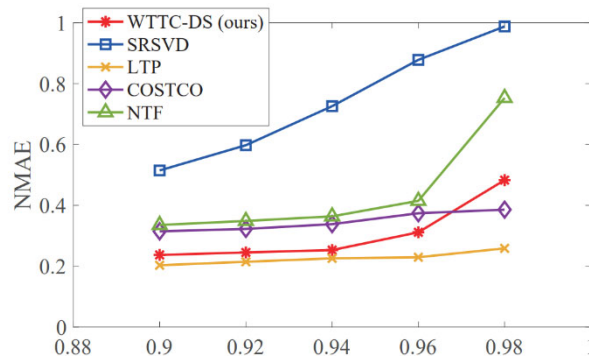


図 4 非分解型テンソル復元を用いたインターネットトラフィック行列復元手法の結果 (WTTG-DS (ours)が提案手法の結果.)

(3) (1) (2) で得られた知見をもとにした種々の画像復元・認識アルゴリズムの提案

これまでに提案された、非分解型テンソル復元のためのテンソルノルムの非凸拡張手法、すなわち重み付きテンソル核ノルムおよび重み付きテンソルシャッテン-p ノルムの間に非自明な相乗効果があることを実験的に明らかとする研究を行い、その成果は国際論文誌 (MDIP SIGNALS) に採録された。

データの分割を地中貫通レーダ画像からの自動解析に応用する成果について国際会議 Near Surface Geoscience Conference & Exhibition に投稿し採録された。

また、深層学習を用いた画像ノイズ除去の研究において、アーキテクチャの工夫により既存の最先端の手法と比較して少ない演算量で同等以上の復元性能を得ることに成功し、権威ある国際会議である ECCV (European Conference on Computer Vision) のワークショップ (Advances in Image Manipulation workshop) に採録された (図 5 および表 1)。もう一件は画像認識の精度を向上させるための画像ノイズ除去手法に関する検討であり、その成果は IEEE ICIP (International Conference on Image Processing) に採録された。

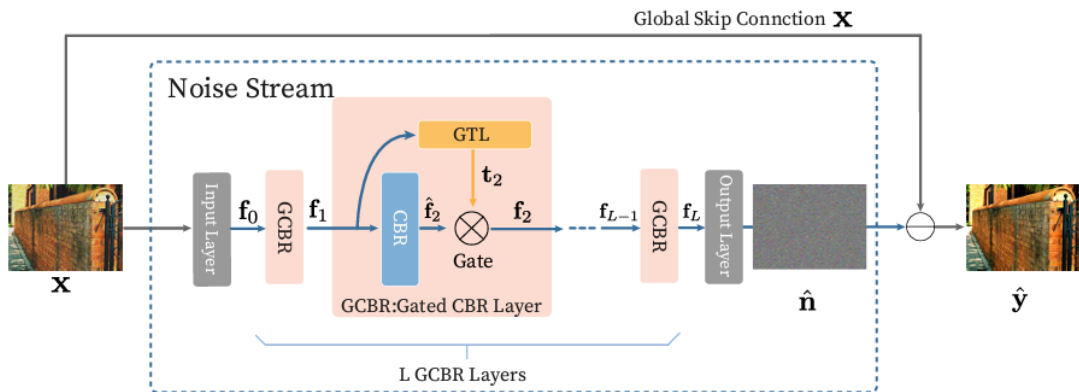


図 5 低演算量での画像ノイズ除去手法の概要

Method	Set12	BSD68	Urban100	Number of Parameters	Time [ms]
MemNet [34]	27.39	26.35	26.67	<b>685k</b>	169.1
RED [24]	27.35	26.34	26.46	4,100k	41.3
SGN [7]	27.53	26.43	26.96	3,577k	<b>7.5</b>
GTCNN-D1 (ours)	<b>27.56</b>	<b>26.46</b>	<b>26.97</b>	851k	12.4
RDN [50]	27.60	26.41	27.40	21,973k	716.8
RNAN [49]	27.67	26.47	<b>27.65</b>	8,957k	1,434.9
GTCNN-D3 (ours)	<b>27.76</b>	<b>26.55</b>	27.50	<b>2,552k</b>	<b>35.3</b>
MWCNN [22]	27.79	26.58	27.53	24,927k	78.2
GTCNN-D6 (ours)	<b>27.83</b>	<b>26.60</b>	<b>27.72</b>	<b>5,128k</b>	<b>72.7</b>

表 1 低演算量での画像ノイズ除去手法の結果. GTCNN-D{1, 3, 6} (ours) が提案手法

以上のように、本研究では査読付き論文誌 3 件、査読付き国際会議 4 件を含む 3 1 件の学会発表を行った。現在、これらの研究成果を元にした複数の論文誌及び国際会議を投稿準備中であり、多くの派生研究を生み出したことで本申請課題の目的は十分に達成されたといえる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Miyata Takamichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Training of Perceptual Image Denoising Network with Weighted Sum of IQA Methods	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC51644.2023.10059768	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 Miyata Takamichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Traffic Matrix Completion by Weighted Tensor Nuclear Norm Minimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CCNC51644.2023.10060087	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 Saito Yuta, Miyata Takamichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Recovering Texture with a Denoising-Process-Aware LMMSE Filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MDPI Signals	6. 最初と最後の頁 286 ~ 303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/signals2020019	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 Hosono Kaito, Ono Shunsuke, Miyata Takamichi	4. 巻 2
2. 論文標題 On the Synergy between Nonconvex Extensions of the Tensor Nuclear Norm for Tensor Recovery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MDPI Signals	6. 最初と最後の頁 108 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/signals2010010	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 Kaito Hosono, Shunsuke Ono, Takamichi Miyata	4. 巻 2
2. 論文標題 On the Synergy between Nonconvex Extensions of the Tensor Nuclear Norm for Tensor Recovery	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MDPI Signals	6. 最初と最後の頁 108 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/signals2010010	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 Imai Kaito, Miyata Takamichi	4. 巻 12537
2. 論文標題 Gated Texture CNN for Efficient and Configurable Image Denoising	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECCV 2020 Workshops, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 665 ~ 681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-67070-2_40	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 Mamiya Kei, Miyata Takamichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Few-Class Learning For Image-Classification-Aware Denoising	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	6. 最初と最後の頁 948 ~ 952
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICIP40778.2020.9190795	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 Hosono Kaito, Ono Shunsuke, Miyata Takamichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Weighted Tensor Nuclear Norm Minimization for Color Image Restoration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 88768 ~ 88776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2926507	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24件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 内田健一、宮田高道
2. 発表標題 非畳み込み型画像認識のための画像補完手法のための基礎検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム（PCSJ） / 映像メディア処理シンポジウム（IMPS）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡久地伸之介、宮田高道
2. 発表標題 リアル画像デノイズによる画像ステガノグラフィのための基礎検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム（PCSJ） / 映像メディア処理シンポジウム（IMPS）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金正博、宮田高道
2. 発表標題 TRPCAにおける重み付きテンソル核ノルムに関する一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム（PCSJ） / 映像メディア処理シンポジウム（IMPS）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平野宏明、宮田高道
2. 発表標題 二段階ネットワークによる画像の構造-テクスチャ-ノイズ分離に関する一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム（PCSJ） / 映像メディア処理シンポジウム（IMPS）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木侑斗、宮田高道
2. 発表標題 複数の知覚品質推定手法を損失関数としたJPEG画像復号の一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム (PCSJ) / 映像メディア処理シンポジウム (IMPS)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木優汰、宮田高道
2. 発表標題 SinGANの拡張による多様性のあるドメイン非依存画像インペインティングの一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム (PCSJ) / 映像メディア処理シンポジウム (IMPS)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金 正博, 宮田 高道
2. 発表標題 重み付きテンソル核ノルムのテンソル完全復元条件に関する検討
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細野 海人, 宮田 高道
2. 発表標題 Algorithm unrolling を用いた低ランクテンソル復元に関する検討
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 青木 優汰, 宮田 高道
2. 発表標題 SinGAN の拡張によるドメイン非依存画像インペインティングの一検討
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井 海人, 宮田 高道
2. 発表標題 Gated context CNN を用いたコンテキスト考慮型ノイズ除去に関する研究
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野 宏明, 宮田 高道
2. 発表標題 深層学習を用いた画像の構造-テクスチャ-ノイズ分離
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田 高道
2. 発表標題 画像の自然さをめぐって
3. 学会等名 PCSJ/IMPS (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西牧 大智, 宮田 高道
2. 発表標題 GPR を用いた地中埋設物解析支援のための画像変換手法の一検討
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井 海人, 宮田 高道
2. 発表標題 Gated Texture CNN による画像ノイズ除去
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根 壮一郎, 宮田 高道
2. 発表標題 知覚的品質の向上を目的とするノイズ除去に関する一検討
3. 学会等名 PCSJ/IMPS
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rei Ogura, Takamichi Miyata
2. 発表標題 Quasi-Measurement Pitch Change: A New Framework for Machine Learning on GPR
3. 学会等名 Near Surface Geoscience(Hague, Netherlands)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西牧 大智, 宮田 高道
2. 発表標題 GPR を用いた地中埋設物解析支援のための画像変換手法の一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井 海人, 宮田 高道
2. 発表標題 アテンション機構を用いたコンテキスト考慮型ノイズ除去に関する研究
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 雄太, 宮田 高道
2. 発表標題 ノイズ除去で失われたテクスチャの統計量の推定に関する一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 湯澤 亮太, 宮田 高道
2. 発表標題 ヒント画像を用いた画像補完の精度向上に関する一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山根 壮一郎, 宮田 高道
2. 発表標題 主観的品質の向上を目的とするノイズ除去に関する一検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 間宮 慶, 宮田 高道
2. 発表標題 未知クラスに頑健な画像認識考慮型ノイズ除去?法の?検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細野 海人, 小野 峻佑, 宮田 高道
2. 発表標題 重み付きテンソル核ノルムを用いたカラー画像復元に関する検討
3. 学会等名 画像符号化シンポジウム/映像メディア処理シンポジウム予稿集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野 峻佑, 宮田 高道
2. 発表標題 A monotone operator theoretic approach to the plug-and-play proximal gradient method with deep neural network denoiser
3. 学会等名 信号処理シンポジウム
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
---------	---------