

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04045

研究課題名（和文）深層エピグラフネットワークによる先験情報学習とレアイメージングデータ復元への応用

研究課題名（英文）Prior learning by deep epigraphical network and its application to rare imaging

研究代表者

京地 清介（Kyochi, Seisuke）

工学院大学・情報学部（情報工学部）・准教授

研究者番号：70634616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、画像復元（計測過程で生じた劣化（ノイズ等）を伴う画像から真の画像を推定するアルゴリズム）において、深層ニューラルネットワークの適用が困難な「ビッグデータが用意できないタイプの画像」（医療・産業用画像）のための手段として「深層エピグラフネットワーク」の技術を確立した。ビッグデータの学習が不要な画像復元手法として、先験情報に基づいて設計された正則化関数の最小化による推定が広く利用されている。本研究では対象画像データの複雑な先験情報をモデリングする深層合成正則化の設計方法とその最小化アルゴリズムを研究代表者の独自凸最適化技術「エピグラフ変形」によって解決し、実用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である「深層エピグラフネットワーク」は学習用ビッグデータが必要ないため、これまで深層ニューラルネットワークの適用の難しかった、医療分野や産業分野の画像データ（CT・PET・ハイパースペクトル画像等）への応用が期待できる。本技術により、ノイズや欠損、ボケ、ブレなどの劣化が生じやすい画像の品質向上が実現できるため、医用現場では診断の精度向上や患者の治療効果の向上が期待され、産業方面では、例えば製造業などにおける品質管理の自動化・精度向上にも寄与できる。学術的にもインパクトは大きく、計測工学や生命科学など様々な学術領域の発展に寄与すると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This project established a image recovery algorithm, which estimates true images from degraded images with noise and other artifacts produced during the measurement process, called "Deep Epigraphical Networks" that is more effective than deep neural networks when training dataset is not available (such as medical and industrial images). As an image restoration method that does not require big data for training, estimation through the minimization of regularization functions designed based on prior information is widely utilized. In this research, we demonstrated the practicality of our approach by solving the design method for deep composite regularization that models the complex prior information of target image data and its minimization algorithm using the principal investigator's unique convex optimization technique, "Epigraph Deformation."

研究分野：信号処理・機械学習

キーワード：画像復元 エピグラフ緩和 深層ニューラルネットワーク 凸最適化

1. 研究開始当初の背景

ハイパースペクトル画像 (HSI : Hyperspectral Image), 医用画像, ダイナミックビジョンセンサによる非同期信号等の高度イメージングデータが高度情報化社会 (IoT)・高度医療社会に向けてますます重要性を増している. しかし, 一般の RGB 画像と異なりこれらの高度な画像の計測ではノイズ, 欠損, ボケ, ブレ等の劣化が生じやすいため, 計測後の信号分析処理の前処理として信号処理技術による信号復元が不可欠となる. 近年, 深層ニューラルネットワーク (DNN : Deep Neural Network) の深層学習 (DL : Deep Learning) を用いた信号復元 (以下「DNN-DL 復元」と記す, 図 1(a)) が目覚ましい成果を挙げている[1]. しかし, 高精度の復元を実現するためには学習に大量の無劣化信号が必要となるため, 医用画像や HSI のように, センサデバイスの性能不足やデータ守秘義務の制約等の事情で大量の無劣化信号が得られない画像形式 (以下「レアイメージングデータ」と記す) への DNN-DL 復元の適用は現状困難である. レアイメージングデータに対する有効な手法として, 先験情報 (対象信号が持つ固有性質, 信号の滑らかさ等) を反映した数理モデル (正則化関数) を導入した最適化問題を求解することで復元を行うアプローチ (以下「最適化復元」と記す, 図 1(b)) が挙げられる[2]. 最適化復元では, 先験情報が正則化関数によって適切にモデリングされれば, 学習プロセスを介さずに所望画像を高精度に復元できる. さらに, 観測画像の劣化過程モデルを陽に導入して多種多様な画像復元問題へ柔軟に対応できる点も特筆すべき優位性である (DNN-DL 復元は, 劣化モデル毎に DNN を設計する必要あり).

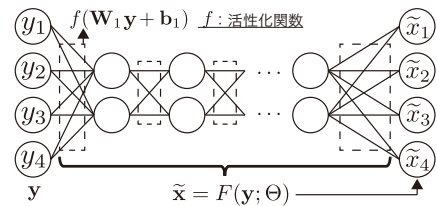
以上の背景から, 最適化復元に関しても盛んに検討されており, 豊富な学習データが使用できる状況下の DNN-DL 復元に匹敵する性能実現が期待されているが, 性能改善は頭打ちを迎えつつある. その理由は, 近年の最適化問題の求解アルゴリズムの標準手法である近接分離最適化 (ADMM 等) にて「正則化関数の近接写像が反復を必要としない閉形式で計算できること」が要求されるためである[2]. 従って, ℓ1 ノルム (ベクトル要素の絶対値総和, スパース性の評価に使用)・核ノルム (特異値の総和, 低ランク性の評価に使用) 等, 自明な正則化関数の利用に限られている.

2. 研究の目的

- 研究目的 1 : 先験情報獲得のための深層正則化関数を用いたモデリング方法の確立  
DNN では各層でデータと重み係数の乗算, バイアス係数の加算, 活性化関数, の簡易な演算を組み合わせることで非線形性を伴う複雑なモデルを表現している. この成功事例を踏まえ, 本研究では近接写像が計算可能な既知の正則化関数 (ノルム) の重み付き線形結合とその深層合成関数によって複雑なモデルを柔軟に表現する.
- 研究目的 2 : 学習済み深層正則化関数の最小化アルゴリズムの開発  
研究目的 1 の通り, 深層正則化関数を構成する個々のノルム関数は近接写像が容易に計算できるものを選ぶが, 関数全体の近接写像は計算できないため近接分離アルゴリズムを直接適用できない. そこで主問題に対して求解可能な別問題に変形する手法を検討する.
- 研究目的 3 : 正則化関数内部パラメータの学習方法の確立  
DNN の出力信号は内部パラメータの直接演算で陽に記述できるため, 各係数の勾配は容易に計算できる. 一方, 最適化問題求解で出力信号を得る本研究では, 最適化問題に内部パラメータが隠蔽されるため勾配計算は困難となる. そこで内部パラメータ学習のための近似的勾配計算法をエピソード集合制約を表す近接写像ネットワーク (DEN) を用いて構成する.

3. 研究の方法

本研究では構成するネットワークは研究代表者の独自技術「エピソード緩和」をコア技術とする



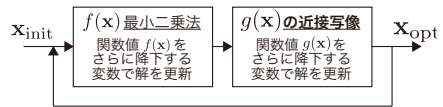
深層学習 (内部パラメータ学習)  

$$\Theta^* = \operatorname{argmin}_{\Theta} \sum_{n=1}^N \|x_n - F(y_n; \Theta)\|_2^2$$

(a) 従来 : DNN-DL 復元

$$x^* = \operatorname{argmin}_x \underbrace{\|\Phi x - y_{\text{obsv}}\|_2^2}_{\text{データ忠実度関数 } f(x)} + \underbrace{\mathcal{R}(x)}_{\text{正則化関数 } g(x)}$$

近接分離最適化 (近接写像を用いた反復アルゴリズム)



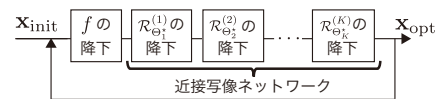
(b) 従来 : 最適化復元

$$x^* = \operatorname{argmin}_x \|\Phi x - y_{\text{obsv}}\|_2^2 (= f(x)) + \mathcal{R}_{\Theta_1}^{(1)}(\mathcal{R}_{\Theta_2}^{(2)}(\dots(\mathcal{R}_{\Theta_K}^{(K)}(x))\dots)) = F(y_{\text{obsv}}; \Theta_1, \dots, \Theta_K)$$

深層学習 (内部パラメータ学習)

$$\{\Theta_k^*\}_{k=1}^K = \operatorname{argmin}_{\{\Theta_k\}_{k=1}^K} \sum_{n=1}^N \|x_n - F(y_n; \{\Theta_k\}_{k=1}^K)\|_2^2$$

近接分離最適化 (近接写像を用いた反復アルゴリズム)



(c) DEN-DL 復元

図 1 画像復元アプローチ

図 1 画像復元アプローチ

ので「深層エピグラフネットワーク (DEN) -DL 復元」と表記する (図 1(c)). 本手法は最適化復元に由来する項目 2・3 の優位性を持ちながら, 性能に関しても先験情報学習による飛躍的進化が期待できる.

#### 4. 研究成果

[研究課題と成果 1] エピグラフ緩和による深層合成正則化関数の最小化アルゴリズム

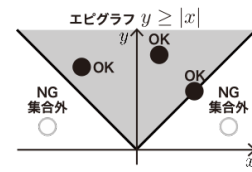
本研究課題では, 任意層で構成される合成正則化関数最小化のための最適化問題変形手法「エピグラフ緩和」(ER: Epigraphical Relaxation) を提案した. 画像などの高次元信号では, 空間方向・スペクトル方向の次元に豊富な特徴を有しているため, 高精度な画像復元のためには正則化関数によって忠実にモデリングを行うことが重要となる. 正則化関数の効果を最大限引き出すためには, 固有の信号構造を詳細に捉えることが可能な合成正則化関数を使用することが鍵となるが, 合成正則化関数の最小化の際に必要な不可欠となる近接写像がしばしば計算できない問題がある.

ER は, 図 2(b)の通りに, 合成正則化関数を外側関数と内部の不等式制約に分解するテクニックである. 不等式制約が表す図はエピグラフ図 2(a) と呼ばれる集合である. ER の適用により, 最終的に合成正則化関数の最小化に必要な計算は一番外側のノルムの近接写像と, 各エピグラフ集合への射影となるため, 幅広い合成正則化関数を使用できるようになった. さらに, 深層合成正則化関数を構成する各関数が狭義増加性 (入力ベクトルの 1 要素が増加すると関数が厳密に増加する性質) を満足する場合, 元の最適化問題と ER 適用後の最適化問題の大域的最適解が変わらないことも証明した.

本研究では ER フレームワークに基づく実用的な合成正則化関数を 2 つ構成した. 1 つ目は, 全変動量正則化関数 (2 層の合成関数) の拡張である輝度-色差構造テンソル全変量 (DSTV: Decorrelated Structure-tensor Total Variation) である. 画像の輝度-色差空間では局所領域の勾配ベクトル (水平・垂直方向差分データ) が同一方向を向く (低ランク) 性質があるため, 局所勾配行列に核ノルムを適用してモデリングを行った. 3 層の合成関数である DSTV それ自身の近接写像の計算は困難だが, ER によって最適化問題の求解が可能となった. 実際に欠損画素補間の画像復元問題に DSTV を適用したところ, 従来の正則化関数よりも高い性能を示した (図 3(a): 原画像, 図 3(b): 欠損画像, 図 3(c)-(e): 従来手法, 図 3(f)).

もう 1 つは, 同一構成成分抽出のための振幅スペクトル核ノルム (ASNN: Amplitude Spectrum Nuclear Norm) である. 観測信号列に共通して内在する構造普遍成分を観測信号列から抽出するアルゴリズムは顔認識を始めとする様々な応用で重要であることが知られている. 従来法であるロバスト主成分分析 (RPCA: Robust Principal Component Analysis) は構造普遍成分が低ランクであると仮定し, 核ノルムと  $l_1$  ノルムの和でモデリングされた最適化問題の最小化によって構造普遍成分を抽出している. RPCA の問題点として, 構造普遍成分に位置ずれが生じた場合に構造普遍成分が低ランク出なくなるため, 抽出精度が著しく低下することが挙げられる. 本研究では, 信号処理の基本性質である

「シフトの関係にある信号同士の振幅スペクトルは一致する」ことを踏まえ, 振幅スペクトルの核ノルム (2 層の合成関数) を新たな正則化関数として RPCA の核ノルムと取り替えて使用し (FRPCA), 位置ズレ時の構造普遍成分の抽出精度を大幅に改善することに成功した.

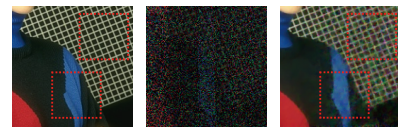


(a) エピグラフ

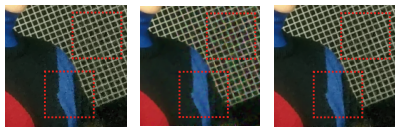
$$\begin{aligned} & \underset{x}{\operatorname{argmin}} f(x) + \mathcal{R}_{\Theta_1}^{(1)}(\mathcal{R}_{\Theta_2}^{(2)}(\mathcal{R}_{\Theta_3}^{(3)}(x))) \\ & \underset{x, z_2}{\operatorname{argmin}} f(x) + \mathcal{R}_{\Theta_1}^{(1)}(\mathcal{R}_{\Theta_2}^{(2)}(z_2)) \\ & \text{s.t. } \mathcal{R}_{\Theta_3}^{(3)}(x) \leq z_2 \\ & \underset{x, z_1, z_2}{\operatorname{argmin}} f(x) + \mathcal{R}_{\Theta_1}^{(1)}(z_1) \\ & \quad + \tilde{\mathcal{R}}_{\Theta_2}^{(2)}(x, z_2) + \tilde{\mathcal{R}}_{\Theta_3}^{(3)}(z_2, z_1) \end{aligned}$$

(b) エピグラフ緩和

図 2

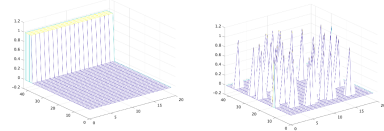


(a) 原画像 (b) 欠損 (c) 従来 1

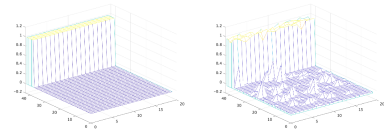


(d) 従来 2 (e) 従来 3 (f) 提案

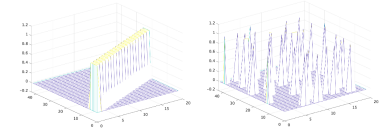
図 3 欠損画素補間修復



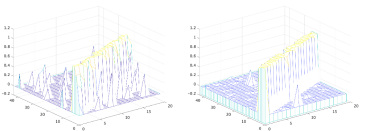
(a) 原信号 (シフト無) + ノイズ



(b) RPCA (c) FRPCA



(d) 原信号 (シフト無) + ノイズ



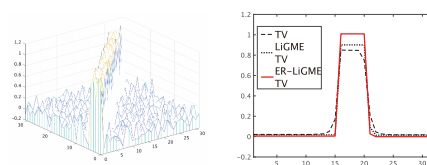
(e) RPCA (f) FRPCA

図 4 構造普遍成分抽出



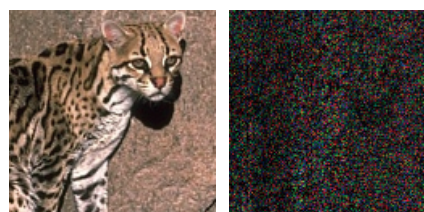
[研究課題と成果 2] エピグラフ緩和による深層合成非凸正則化関数の最小化アルゴリズム

研究成果[1]によって、任意層の深層合成正則化関数の各関数の近接写像またはエピグラフ集合への射影が計算できれば、エピグラフ緩和によって合成関数を分解し、最小解を求解できることとなったが以下に述べるような問題点がある。具体的には、スパースモデリングを  $\ell_1$ /核ノルムでモデル化する場合、過小見積(実際の信号の高振幅成分が過小に推定される)が生じることが知られている。この問題を回避するために、一般化ミニマックス凹関数(GMC: Generalized Minimax Concave)や一般化モロー強化関数(LiGME: Linearly-involved Generalized Moreau Enhancement)など、目的関数の凸性を維持できる非凸正則化関数が提案されている。これらは、 $\ell_1$  ノルム等の与えられた凸正則化関数(シード関数と呼ばれる)から、全体的な凸条件を満たすパラメータを持つ一般化 Moreau 包を減算した関数として定義される。従来の GME モデルは、拡張されるシード凸関数が近接可能であることを前提としているため、DSTV のような近接写像が計算できない多層正則化関数凸関数には LiGME フレームワークが適用できない。以上を踏まえて、非凸の多層混合ノルムのためのエピグラフ緩和 LiGME モデル(ER-LiGME: Epigraphically-relaxed LiGME)を開発した。ただし、ER を LiGME モデルに直接適用することができなかったため、観測信号に参照信号を付加して拡張する手法を新たに導入し(GOE: Guided Observation Extension), ER と LiGME をシームレスに統合することに成功した。ER-LiGME モデルは、従来の LiGME モデルの全体凸条件のための行列のパラメータ設定をも大幅に簡素化することに成功した。具体的な応用例として DSTV を ER-LiGME モデルで非凸化し、画像復元に適用した。その結果過小見積(エッジ平滑の回避)が確認され、ER-LiGME モデルの有効性が確認された(図 5(b), 図 6(f))。



(a)ノイズ信号 (b)結果

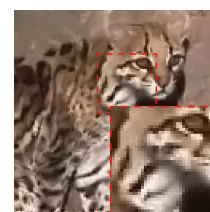
図 5 ノイズ除去



(a)原画像 (b)欠損



(c)従来 2 (d)従来 3



(f)提案

図 6 欠損画素補間修復

[研究課題と成果 3] エピグラフ緩和による Plug-and-Play 型深層ネットワーク (DEN) を用いた画像復元

[研究成果 1, 2]に記載の通り、エピグラフ緩和によって任意層の深層合成正則化関数を分解することで、近接写像が計算しやすい状況になるため、幅広い合成正則化関数を導入できるようになった。ここで、先行研究として提案されている画像復元 DNN (例: DnCNN [1]等)では「畳込み」「活性化関数」「ダウンサンプリング」などの簡易な計算をモジュールとして構成されているため、深層合成正則化関数とみなしてエピグラフ緩和によって分解し、近接写像を計算することで、直接既存深層ネットワークを最適化の枠組みに導入できる (DEN) ことを明らかにした。例えば DnCNN では「畳込み」「バッチ正規化」「活性化関数」などは凸関数として取り扱うことができ、それぞれの具体的な近接写像の計算は、部分空間射影や活性化関数のエピグラフへの射影として実現できる。従って大量の高品質データセットが存在しない場合にも、他のデータの類似タスクで DNN を学習し、エピグラフ緩和によって DEN を構成すれば良いことが明らかになった。

[参考文献]

1. K. Zhang, W. Zuo, Y. Chen, D. Meng and L. Zhang, "Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising," IEEE Trans. Image Process., vol. 26, no. 7, pp. 3142-3155, July 2017.
2. [2] M. V. Afonso, et. al. "Fast image recovery using variable splitting and constrained optimization," IEEE Trans. Image Process., vol. 19, no. 9, pp. 2345-2356, 2010.

## 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 Suzuki Taizo, Kyochi Seisuke, Tanaka Yuichi	4. 巻 29
2. 論文標題 Regularity-Constrained Fast Sine Transforms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Signal Processing Letters	6. 最初と最後の頁 1744 ~ 1748
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LSP.2022.3195673	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 Kyochi Seisuke, Suzuki Taizo, Tanaka Yuichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Directional Analytic Discrete Cosine Frames	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 20964 ~ 20977
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3151058	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Akari Katsuma, Seisuke Kyochi, Shunsuke Ono, and Ivan Selesnick
2. 発表標題 Epigraphically-relaxed linearly-involved generalized Moreau-enhanced model for layered mixed norm regularization
3. 学会等名 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoya Harashima, Ryunosuke Eguchi, and Seisuke Kyochi
2. 発表標題 Convolutional multidimensional amplitude spectrum nuclear norm for frequency-domain robust principal component analysis
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit and Conference (ASC) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaito Nitani and Seisuke Kyochi
2. 発表標題 A design of denser-graph-frequency graph Fourier frames for undirected graph signal analysis
3. 学会等名 ASPIRE 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原嶋龍也, 京地清介
2. 発表標題 畳み込み多次元振幅スペクトル核ノルムと周波数領域ロバスト主成分分析への応用
3. 学会等名 第38回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二谷海都, 京地清介
2. 発表標題 無向グラフ信号解析のための高グラフ周波数密度グラフフーリエフレームの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Akari Katsuma, Seisuke Kyochi, Shunsuke Ono, and Ivan Selesnick
2. 発表標題 Epigraphically-relaxed linearly-involved generalized Moreau-enhanced model for layered mixed norm regularization
3. 学会等名 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryoya Harashima, Ryunosuke Eguchi, and Seisuke Kyochi
2. 発表標題 Convolutional Multidimensional Amplitude Spectrum Nuclear Norm for Frequency-domain Robust Principal Component Analysis
3. 学会等名 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaito Nitani and Seisuke Kyochi
2. 発表標題 A design of denser-graph-frequency graph Fourier frames for undirected graph signal analysis
3. 学会等名 ASPIRE Workshop 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原嶋龍也, 京地清介
2. 発表標題 畳み込み多次元振幅スペクトル核ノルムと周波数領域ロバスト主成分分析への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会 第38回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 二谷海都, 京地清介
2. 発表標題 無向グラフ信号解析のための高グラフ周波数密度グラフフーリエフレームの設計
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会 (SPEASIP)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Manabu Sueyasu, Seisuke Kyochi, Gou Koutaki
2. 発表標題 Hadamard-Coded Supervised Discrete Hashing on Complex and Quaternion Domain
3. 学会等名 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口龍之介, 京地清介
2. 発表標題 多次元振幅スペクトル核ノルムに基づく周波数領域ロバスト主成分分析
3. 学会等名 第37回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 勝間朱里, 京地清介, 小野峻佑, Ivan Selesnick
2. 発表標題 LiGMEモデルを用いた多層非凸正則化によるグループスパース・低ランク凸最適化信号復元
3. 学会等名 電子情報通信学会信号処理研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 京地清介
2. 発表標題 グループスパース・低ランクモデリングの深化と高次元信号復元への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 京地 清介, 小野 峻佑, Ivan Selesnick
2. 発表標題 多層混合ノルム最小化のためのエピグラフ緩和
3. 学会等名 第36回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大坪立弥, 京地清介
2. 発表標題 ハイパーサブ射影を用いた二次曲面クラスタリングと色むら除去への応用
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 未安学, 京地清介, 小野峻佑
2. 発表標題 振幅スペクトル核ノルムを用いた周波数領域ロバスト主成分分析
3. 学会等名 電子情報通信学会画像工学研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://sites.google.com/site/s2kkyochi/publications-1?authuser=0">https://sites.google.com/site/s2kkyochi/publications-1?authuser=0</a>
---

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			
米国	New York University			
米国	New York University			