

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：15501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K11867
研究課題名（和文）知識・データ融合型枠組の開発およびハイパースペクトル画像の超解像度への応用

研究課題名（英文）Integrated Model-Driven and Data-Driven Framework for Hyper-Spectral Image Super-Resolution

研究代表者
韓 先花（Han, Xian-HUa）
山口大学・大学院創成科学研究科 准教授

研究者番号：60469195
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）：本研究ではRGB画像のもつ高空間分解能とHS画像のもつ詳細なスペクトル情報の両方を効率的に融合することで高解像度HS画像を生成することを目的とし、主に三つの研究方法を提案した。一つ目は、空間構造が大きく異なるHR-RGB・LR-HS画像を効率的に融合できる新たな教師あり深層学習モデルを構築した。二つ目はRGB画像とLR-HS画像のスペクトル・空間方向の劣化数値モデルに駆使した教師無しHR-HS画像復元深層モデルを開発した。三つ目はHR-HS画像を予測する深層生成ネットワークと劣化モデルのパラメータを同時に学習できるプライド深層学習法を確立し、汎用性の高いHR-HS画像復元モデルを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究では最先端な計測技術でも得ることができない超人の視覚情報である高解像度なハイパースペクトル画像の生成を目的とする。本プロジェクト提案法の確立により、シーンや素材の多様な情報が復元でき、様々な分野において観測データをより高精度に理解することが可能となる。これを特性解析等の応用へと発展させていくことで関連分野の科学的進展に貢献できる。また、解像度や構造の異なるデータを効率的に融合できる深層学習フレームワークを構築することにより、実世界で得られる多様なマルチモーダルデータの統一解析などにも適用可能となり、ビッグデータ解析に対しても大きな貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project aims at reconstructing the high-resolution hyperspectral (HR-HS) images by merging the observed high-resolution RGB (HR-RGB) image and the low-resolution hyperspectral (LR-HS) image. The project has focused on exploiting effective and high-generalized deep learning models to recover the HR-HS image, and mainly has three contributions: 1) A multi-scale and multi-level fusion network for effectively and hierarchically aggregating the extracted features from the LR-HS and HR-RGB images has been proposed; 2) a novel unsupervised HS image super-resolution framework has been developed via leveraging the model-driven knowledge of the mathematical relation between the observations and the target, and the powerful modeling capability of the deep neural networks; 3) a high-generalized blind unsupervised model has been proposed to simultaneously learn the underlying HR-HS image and the parameters of the degradation procedures in both spatial and spectral domains.

研究分野：知覚情報処理関連

キーワード：ハイパースペクトル画像超解像度 教師無し深層モデル データ融合

1. 研究開始当初の背景

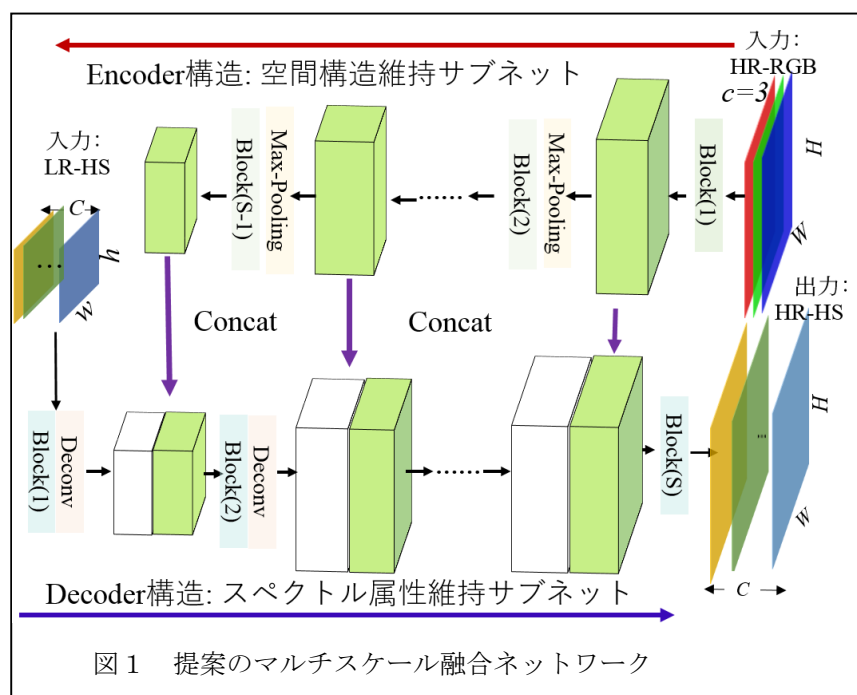
ハイパースペクトル(HS)画像は、HS センサーによって数百もの連続した狭帯域で取得された空間とスペクトル情報の両方を含む 3D データで構成されている。豊富なスペクトル情報を持つ HS 画像は、多くのコンピュータビジョン応用(画像認識や分類、医療画像解析、リモートセンシング)において、非常に有用である。しかし、HS 画像には、通常の RGB 画像と比べて、波長分解能は高いものの、空間分解能や SN 比が低いという欠点がある。高解像度の RGB (High Resolution-RGB: HR-RGB) 画像から波長分解能の高い画像、または低解像度 HS (Low Resolution-HS: LR-HS) 画像から空間分解能の高い画像を生成することが考えられるが、一般的な方法では、スペクトルの変形や空間構造のボケ等の問題が生じる。これらの問題を解決するために、HR-RGB 画像と LR-HS 画像の両方を用いて、高解像度 HS (High Resolution-HS: HR-HS) 画像を予測する方法が提案されている。この方法では、主に予測したい HR-HS 画像と観測された HR-RGB 画像間、及び HR-HS 画像と観測された LR-HS 画像間の物理的な関係(撮像過程に関する知識)を数理モデル(知識駆動モデル)で表現し、観測データの表現誤差を最小化することで HR-HS 画像を復元している。この最小化問題は不良設定問題であり、画像の「スパース性」や画像の空間的な「平滑性」といった事前知識を制約として用いることで、解空間を絞り込み、安定な HR-HS 画像の復元・生成を実現している。しかし、「スパース性」や「平滑性」が制約としていつも最適であるとは限らない。画像の内容・性質に応じて最適な制約はその都度変わると考えられる。また、復元性能の点においても改善の余地がある。一方、深層畳み込みネットワークを用いて RGB 画像から波長分解能の高い画像や LR-HS 画像から空間分解能の高い画像を生成するデータ駆動型のアプローチが提案されており、一定精度の成果が上げられている。しかし、これらの方法では HR-RGB 画像、または LR-HS 画像の単モダリティデータから HR-HS 画像を予測する深層ネットワークを構築しているに過ぎず、HR-HS 画像の生成に重要な、HR-RGB 画像のもつ高分解能な空間情報と LR-HS 画像のもつ高分解能なスペクトル情報を同時に利用することができない。また、各画像間の物理的な関係が陽に考慮されていない。さらに、ビッグデータの時代であっても、HS 画像は広く流通しておらず、深層ネットワークを学習するために十分な量の HR-HS 画像の収集は困難である等の問題がある。

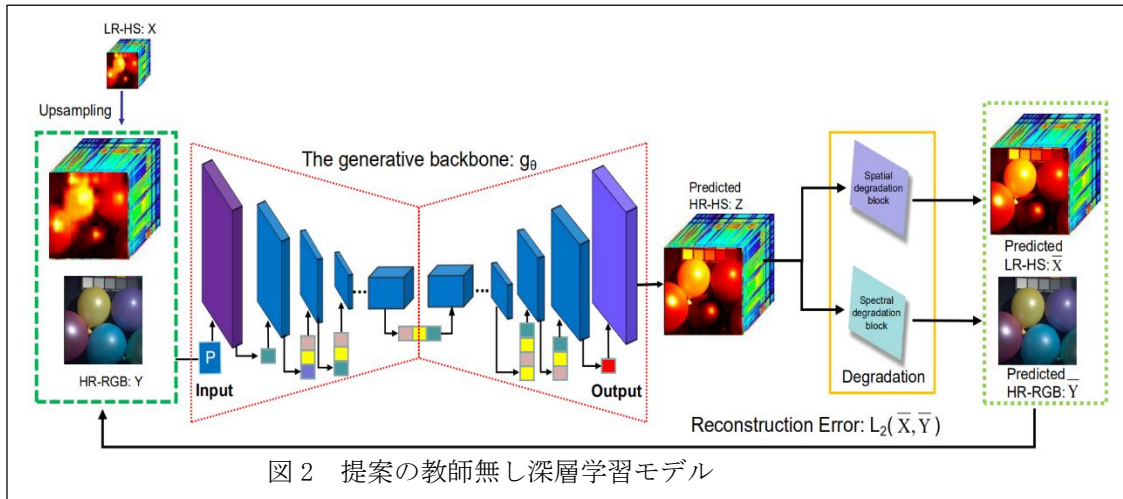
2. 研究の目的

本研究では RGB 画像のもつ高空間分解能と HS 画像のもつ詳細なスペクトル情報の両方を効率的に融合することで最先端の計測技術を搭載したハイパースペクトル(HS)カメラであっても得ることのできない高解像度 HS 画像を生成することを目的とする。具体的に、空間構造が大きく異なる HR-RGB 画像と LR-HS 画像を効率的に融合できる新たな深層学習ネットワークの構築を行った。また、数理モデルと機械学習技術を融合した新たな方法論を確立し、高精度な HR-HS 画像を復元する方法を提案した。

3. 研究の方法

本研究では、先行研究を発展させ、効率的な深層融合ネットワーク構造を開発したと共に、提案するネットワークの学習過程に対象シーンの潜在情報や知識駆動モデルを効果的に取込む、「教師無し深層学習枠組」を確立した。2種類のベンチマークハイパースペクトル画像データベースに適用し、HR-HS 画像復元の有効性を検証した。具体的に、主に以下の研究方法に基づく、研究を進め





てきた。

マルチスケール融合深層ネットワーク構造の開発：先行研究 (ICIP2018) では LR-HS 画像をアップサンプリングすることで RGB 画像と同じ空間分解能に拡大し、3 層の融合ネットワークを用いてバンド方向にも繋ぐことで、単モダリティデータのみ結果に比べ大幅な精度向上ができることを確認した。しかし、LR-HS 画像から補間法で画像を拡大するために、新たな情報が得られず、その後の計算量が大幅に増える。また、高倍率の拡大が必要な場合には、予測する情報が多く、一段階のネットワーク構造では高精度な HR-HS の生成が難しいといった問題があった。本研究では、入力 LR-HS 画像を事前に補間法で拡大する必要がなく、Deconvolution 層でアップサンプリング演算を自動的に学習し、スペクトル情報を維持できる Decoder サブネットを構築した。また、高倍率の拡大を実現するためにマルチスケールのネットワーク構造を設計し、段階的に空間分解能の向上を行う。さらに、入力 RGB 画像の高空間分解能を維持できる Encoder サブネットを構築し、学習した高空間分解能の特徴マップは HS 画像のスペクトルマップと融合させ、高精度の HR-HS 画像復元法を提案した。提案したマルチスケール融合ネットワークは図 1 に示す。

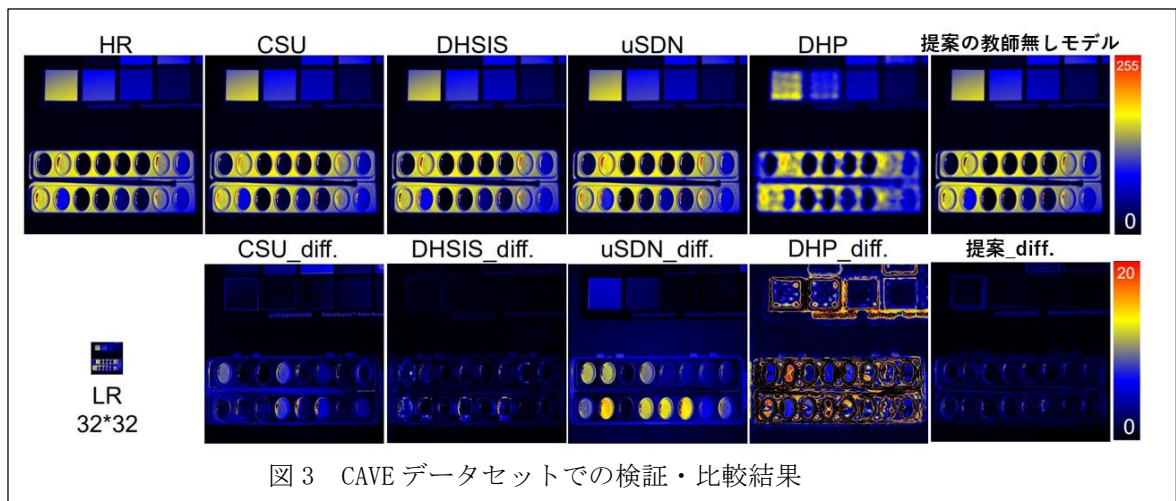
教師無し深層モデルの開発：同一シーンから観測された RGB 画像を y 、LR-HS 画像を x 、HR-HS 画像を z としたとき、これらの関係は観測モデル： $y=Dz+n$ 、 $x=Rz+n$ で表せる。ここでは、 D はダウンサンプリングを、 R はスペクトル反応関数を示す。HS 画像の高解像度化は観測画像 x 、 y から z を予測する一種の逆問題である。従来の知識駆動数理モデルでは目的関数： $\text{argmin} \|x - Dz\|^2 + \|y - Rz\|^2$ にターゲット HR-HS 画像の空間構造やスペクトルの相似性を正則化した項目を加え、最小化することで直接的にターゲットの z を最適化する。HR-HS 画像を直接的に求めるのは最適化な解を得られないだけでなく、最適化過程も複雑で不安定な解しか得られず。本研究で深層畳み込みネットワーク (DCNN) 構造自身で多くの画像統計情報を効率的にモデリングできることから、DCNN を用いて潜在的な HR-HS 画像を予測し ($z = F(\cdot)$)：パラメータ θ を持つ DCNN)、直接的に z の最適化ではなく、DCNN のパラメータ θ を調整することと $\|x - DF(\cdot)z\|^2 + \|y - RF(\cdot)z\|^2$ を最小化する新たな教師無し深層モデルを提案した。提案の教師無し深層モデルは図 2 に示す。

ブラインド教師無し深層モデルの開発：上記に開発し教師無し深層モデルではターゲット HR-HS 画像の空間劣化モデル (D ：ダウンサンプリング行列) とスペクトル劣化モデル (R ：スペクトル反応関数) を既知で仮定し、DCNN で予測した HR-HS 画像を変換することで計測した LR-HS と HR-RGB 画像を近似する。しかし、実環境で計測したデータでは一般的な正確な劣化モデルを得られないことが多い。本研究では空間とスペクトルドメインの劣化モデルをパラメタリング化し、HR-HS 画像を予測する DCNN のパラメータと劣化モデルのパラメータを同時に学習するブラインド教師無し深層学習モデルを提案した。

4. 研究成果

本研究プロジェクトでは主に以下の研究成果を獲得した。

- 1) 空間構造が大きく異なる多モダリティデータを効率的に融合する新たな深層ネットワーク構造の提案：具体的に、計測した HR-RGB 画像と LR-HS 画像を効率的に融合するため、マルチスケール・マルチレベル深層畳み込みネットワーク構造を構築し、HR-RGB と LR-HS 画像から有効な表現特徴を学習しながら、段階的に高精度な空間構造と豊富なスペクトル情報を持つ 2 種類の特徴を統合することで空間とスペクトル方向とも高解像度な HR-HS 画像復元法を提案した。提案した手法は三つのベンチマークデータベースに適応し、この有効性を検証した。研究成果は国際学会で研



- 究発表をしたと共に、国際雑誌「ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications」に論文を掲載された。また、提案したマルチスケール・マルチレベル深層畳み込みネットワーク構造には、その他のマルチモダリティデータの融合に適応が可能になり、幅広い分野への応用を期待できる。
- 2) 柔軟性の高い教師無し深層学習モデルの提案：外部の学習データを必要としない、教師無しハイパースペクトル画像再構成モデルを構築することで、計測した低画質画像のみで高精度な HR-HS 画像の復元に成功した。提案したモデルでは既知の任意な劣化条件で計測したデータに簡単に適用可能になり、柔軟性の高い深層モデルの構築ができた。研究成果は国際学会 ICIP, ACCV Workshop などで発表した共に、国際雑誌「Sensors」にも論文を掲載された。提案した手法は CAVE データセットでの検証および従来法との比較結果は図 3 に示す。
 - 3) 汎用性の高い教師無し深層学習モデルの提案：空間とスペクトルドメインの劣化モデルをパラメタリング化し、HR-HS 画像を予測する DCNN のパラメターと劣化モデルのパラメターを同時に学習するブランド教師無し深層学習モデルを提案した。研究成果は国際学会と雑誌に掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kazuhiro Yamawaki, Xian-Hua Han	4. 巻 14
2. 論文標題 Zero-Shot Blind Learning for Single-Image Super-Resolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Information	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/info14010033	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 Zhe Liu, Xian-Hua Han	4. 巻 18
2. 論文標題 Deep self-supervised hyperspectral image reconstruction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Multimedia Computing, Communication, and Applications	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3510373	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 Xian-Hua Han, YinQiang Zheng and Yen-Wei Chen	4. 巻 18
2. 論文標題 Hyperspectral Image Reconstruction using Multi-Scale Fusion Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Transactions on Multimedia Computing Communications and Applications	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3477396	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 Kazuhiro Yamawaki, Yongqing Sun, Xian-Hua Han	4. 巻 10
2. 論文標題 Blind Image Super Resolution Using Deep Unsupervised Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 2591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics10212591	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 Kohei Yamamichi and Xian-Hua Han	4. 巻 9
2. 論文標題 Lightweight Multi-Scale Context Aggregation Deraining Network With Artifact-Attenuating Pooling and Activation Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 146948-146958
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3122450	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 Zhe Liu, YinQiang Zheng, Xian-Hua Han	4. 巻 21
2. 論文標題 Deep Unsupervised Fusion Learning for Hyperspectral Image Super Resolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21072348	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 Titinunt Kitrungrotsakul, Xian-Hua Han, Yutaro Iwamoto, Satoko Takemoto, Hideo Yokota, Sari Ipponjima, Tomomi Nemoto, Wei Xiong, Yen-Wei Chen	4. 巻 18
2. 論文標題 A Cascade of 2.5D CNN and Bidirectional CLSTM Network for Mitotic Cell Detection in 4D Microscopy Image	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE ACM Trans. Comput. Biol. Bioinform.	6. 最初と最後の頁 396-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCBB.2019.2919015	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 該当する

1. 著者名 Xian-Hua Han, Yinqiang Zheng, Jiande Sun, Yen-Wei Chen	4. 巻 16
2. 論文標題 Hyperspectral Reconstruction with Redundant Camera Spectral Sensitivity Functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3386313	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 該当する

1. 著者名 Min Gao, Xian-Hua Han, Jing Li, Hui Ji, Huaxiang Zhang, Jiande Sun	4. 巻 79
2. 論文標題 Image super-resolution based on two-level residual learning CNN	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Multimedia Tools and Applications	6. 最初と最後の頁 4831-4846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11042-018-6751-5	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 該当する

1. 著者名 Zhe Liu, YinQiang Zheng and Xian-Hua Han	4. 巻 21
2. 論文標題 Deep Unsupervised Fusion Learning for Hyperspectral Image Super Resolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21072348	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19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 Zhe Liu, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Generalized Deep Internal Learning for Hyperspectral Image Super Resolution
3. 学会等名 ICIP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhe Liu, Xian-Hua Han, Jiande Sun, Yen-Wei Chen
2. 発表標題 Unsupervised Generative Network for Blind Hyperspectral Image Super Resolution
3. 学会等名 ICIP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamawaki, Kouhei Yorimoto, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Hyperspectral Reconstruction Using Auxiliary RGB Learning from a Snapshot Image
3. 学会等名 ICIP2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamawaki, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Deep Image and Kernel Prior Learning for Blind Super-Resolution
3. 学会等名 MMAsia (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Namba, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Multi-Scale Channel Transformer Network for Single Image Deraining
3. 学会等名 MMAsia (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhe Liu, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Deep RGB-Driven Learning Network for Unsupervised Hyperspectral Image Super-Resolution
3. 学会等名 ACCV (Workshops) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamawaki, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Lightweight Hyperspectral Image Reconstruction Network with Deep Feature Hallucination
3. 学会等名 ACCV (Workshops)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamawaki, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Deep Unsupervised Blind Learning for Single Image Super Resolution
3. 学会等名 MIPR 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Nanba, Hikaru Miyata, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Dual Heterogeneous Complementary Networks for Single Image Deraining
3. 学会等名 CVPR Workshop
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yorimoto Kohei, Xian-Hua Han
2. 発表標題 HyperMixNet: Hyperspectral Image Reconstruction with Deep Mixed Network from a Snapshot Measurement
3. 学会等名 ICCVW 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamawaki, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Deep Blind Un-Supervised Learning Network for Single Image Super Resolution
3. 学会等名 ICIP 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenhao Fang, Xian-Hua Han, Xu Qiao, Huiyan Jiang, Yen-Wei Chen
2. 発表標題 Multi-Scale Context Interaction Learning network for Medical Image Segmentation
3. 学会等名 MIPR 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jian Wang, Xian-Hua Han, Lanfen Lin, Hongjie Hu, Yen-Wei Chen
2. 発表標題 A Tensor Sparse Representation-Based CBMR System for Computer-Aided Diagnosis of Focal Liver Lesions and its Pilot Trial
3. 学会等名 ICMR 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsuhiko Nakai, Xu Qiao, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Angular Margin Constrained Loss for Automatic Liver Fibrosis Staging
3. 学会等名 MVA 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Yamamichi, Xian-Hua Han:
2. 発表標題 MCGKT-Net: Multi-level Context Gating Knowledge Transfer Network for Single Image Deraining
3. 学会等名 ACCV2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Seiya Fujita, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Cell Detection and Segmentation in Microscopy Images with Improved Mask R-CNN
3. 学会等名 ACCV Workshops 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zhe Liu, Yinqiang Zheng, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Unsupervised Multispectral and Hyperspectral Image Fusion with Deep Spatial and Spectral Priors
3. 学会等名 ACCV Workshops 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wenhao Fang, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Spatial and Channel Attention Modulated Network for Medical Image Segmentation
3. 学会等名 ACCV Workshops 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohei Yorimoto, Xian-Hua Han
2. 発表標題 Deep Residual Attention Network for Hyperspectral Image Reconstruction
3. 学会等名 ICPR2020 (国際学会)
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
研究分担者	陳 延偉 (Chen Yen-Wei) (60236841)	立命館大学・情報理工学部・教授 (34315)	
研究分担者	末竹 規哲 (Suetake Noriaki) (80334051)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	

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2件

国際研究集会 ACCV2022 Workshop: MLCSA2022	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 ACCV2020 Workshop: MLCSA2020	開催年 2020年～2020年

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		
中国	山東師範大学		