

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Deep Unsupervised Hyperspectral Image Super-resolution (教師無し深層学習によるハイパースペクトル画像の超解像度)
氏名(Name)	LIU ZHE

Hyperspectral (HS) imaging can capture the detailed spectral signature of each spatial location of a scene and leads to better understanding of different material characteristics than traditional imaging systems. However, existing HS sensors can only provide low spatial resolution images at a video rate in practice. Thus reconstructing high-resolution HS (HR-HS) image via fusing a low-resolution HS (LR-HS) image and a high-resolution RGB (HR-RGB) image with image processing and machine learning technique, called hyperspectral image super resolution (HSI SR), has attracted a lot of attention. Existing methods for HSI SR are mainly categorized into two research directions: mathematical model based method and deep learning based method. Mathematical model based methods generally formulate the degradation procedure of the observed LR-HS and HR-RGB images with a mathematical model and employ an optimization strategy for solving. Due to the ill-posed essence of the fusion problem, most works leverage the hand-crafted prior to model the underlying structure of the latent HR-HS image. Recently, deep learning-based approaches have achieved impressive reconstruction results but they are usually implemented in a fully supervised manner, and require a large-scale external dataset. They aim to learn a common model from training triplets and generally assume that the spatial and spectral degradation procedures for capturing the LR-HS and HR-RGB images are fixed and known. To overcome the above limitations, our research focuses on proposing the unsupervised learning-based framework for HSI SR to learn the specific prior of an under-studying scene without any external dataset. To deal with the observed images captured under different degradation procedures, we further automatically learn the spatial blurring kernel and the camera spectral response function (CSF) related to the specific observations, and incorporate them with the above unsupervised framework to build a high-generalized blind unsupervised HSI SR paradigm. Moreover, motivated by the fact that the cross-scale pattern recurrence in the natural images may frequently exist, we synthesize the pseudo training triplets from the degraded versions of the LR-HS and HR-RGB observations and themselves, and conduct supervised and unsupervised internal learning to obtain a specific model for the HSI SR, dubbed as generalized internal learning. Overall, the main contributions of this dissertation are three-fold and summarized as follows:

1. A deep unsupervised fusion-learning framework for HSI SR is proposed. Inspired by the insights that the convolution neural networks themselves possess large amounts of image low-level statistics (priors), this study proposes an unsupervised framework to automatically generate the target HS image with the LR-HS and HR-RGB observations only without any external training database. Specifically, we explore two paradigms for the HS image generation: 1) learn the HR-HS target using a randomly sampled noise as the input of the generative network from data generation view; 2) reconstruct the target using the fused context of the LR-HS and HR-RGB observations as the input of the generative network from a self-supervised

learning view. Both paradigms can automatically model the specific priors of the under-studying scene by optimizing the parameters of the generative network instead of the raw HR-HS target.

2. A novel blind learning method for unsupervised HSI SR is proposed. In the above introduced deep unsupervised framework for HSI SR, the spatial and spectral degradation procedures are required to be known. However, different optical design of the HS imaging devices and the RGB camera would cause various degradation processes such as the spatial blurring kernels for capturing LR-HS images and the camera spectral response functions (CSF) in the RGB sensors, and it is difficult to get the detailed knowledge for general users. Moreover, the concrete computation in the degradation procedures would be further distorted under various imaging conditions. Then, in real applications, it is hard to have the known degradation knowledge for each under-studying scene. To handle the above issue, this study exploits a novel blind unsupervised approach by automatically and jointly learning the degradation parameters and the generative network.

3. A generalized internal learning method for HSI SR is proposed. We synthesize labeled training triplets using the LR-HS and HR-RGB observation only, and incorporate them with the un-labeled observation as the training data to conduct both supervised and unsupervised learning for constructing a more robust image-specific CNN model of the under-studying HR-HS data. With the synthesized training samples, it is possible to train an image-specific CNN model to achieve the HR-HS target with the observation as input, dubbed as internal learning. However, the synthesized labeled training samples usually have small amounts especially for a large spatial expanding factor, and the further down-sampling on the LR-HS observation would bring severe spectral mixing of the surrounding pixels causing the deviation of the spectral mixing levels at the training phase and test phase. To mitigate the above limitations, we incorporate naive internal learning with our self-supervised learning method for unsupervised HSI SR, and present a generalized internal learning method to achieve more robust HR-HS image reconstruction.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	LIU ZHE
審 査 委 員	主 査： 韓 先花
	副 査： 西井 淳
	副 査： 末竹 規哲
	副 査： 坂井 伸之
	副 査： 野崎 隆之
論 文 題 目	Deep Unsupervised Hyperspectral Image Super-resolution (教師無し深層学習によるハイパースペクトル画像の超解像度)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>ハイパースペクトル (HS) 画像は、HS センサーで数百の連続した狭いスペクトル帯域でスペクトル反応信号を収集し、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。このような豊富なスペクトルを持つ HS 画像は、多くのコンピュータビジョン応用において精度の向上が検証された。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 比が低く、空間上の詳細情報を得られないという課題がある。ハードウェア上に同時に観測できない詳細な空間とスペクトル情報を獲得するため、数理論算に基づく高解像度 HS 画像復元手法の開発が望まれている。そのため、計測とターゲットデータ間の物理的な関係を数式化した知識駆動モデルや外部データを用いて教師あり学習モデル (データ駆動) を幅広く検討されているが、ユーザの経験 (Hand-crafted Prior) や外部データから共通 Prior の学習を用いられている。処理データに最適な Prior (事前知識) の学習や多様な実環境に対応できる汎用性手法をまた検討されず、実応用上において十分な精度を得られないのは依然として挑戦的な課題である。</p> <p>本論文は、外部トレーニングデータを必要とせず教師無し深層学習を用いて、既存のイメージングセンサーで計測した低解像度ハイパースペクトル画像と高解像度 RGB 画像を融合することで空間とスペクトルドメインとも高解像度な画像を生成すること (ハイパースペクトル画像超解像度) のできる新たな方法について述べたものである。</p> <p>第 1 章は序論であり、本論文の背景と目的について述べ、論文の構成について記している。</p> <p>第 2 章では、ハイパースペクトル画像超解像度の概要について述べている。また、知識駆動モデルや教師あり学習モデルにおいていくつかの主要な手法について述べ、知識とデータ駆動の数理論算技術の観点からそれらの問題点を明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、深層畳み込みネットワーク構造自身で大量な画像の低次統計情報を捉えることから、深層生成ネットワークを用いて教師無しハイパースペクトル画像超解像度法を提案し、</p>	

(様式第9号)

処理データに特化した Prior を自動的に学習している。具体的に、ノイズの入力から画像生成教師無しモデルと計測データをガイドした自己教師あり学習法を提案し、2種類のハイパースペクトル画像データベースに適用し、良好な結果が得られることを確認している。

第4章では、自然画像内に異なるスケール間のパターン類似性に基づく内部学習を取り入れ、3章に開発した処理画像に特化した Prior を自動的に学習できる教師無し生成ネットワークと統合することで新たな一般化内部学習枠組を提案している。

第5章では、高解像度ハイパースペクトル画像と空間やスペクトルドメインの劣化モデルを同時に学習できる汎用性の高い深層モデルを提案している。提案方法を様々な条件で計測したデータに適用し、その有効性を示している。

第6章は結論である。

本審査委員会と公聴会においては、①第3章で提案の処理データに特化した Prior を自動的に学習する方法では、2乗誤差の損失関数を使用しているかが、他の損失関数を使えるか。また、損失関数を変更したら、どのように実験結果に影響されるか。②高解像度な HS 画像度と劣化モデルを同時に学習する高汎用性の手法について、具体的な実現プロセスを教えてください。③ネットワークのエンコーダとデコーダ間のスキップコネクションはどのように実現されたか。④用いたハイパースペクトル (HS) 画像はどのようなスペクトル情報をもっているか。スペクトルドメインの解像度も教えてください。⑤実験においてどの解像度な画像を使用しているか。使用したデータはどのように得られたか。⑥提案法を用いて生成した高解像度なハイパースペクトル画像は実世界のタスクに適應したか。などの説明が求められたが、いずれも申請者からの確かな回答がなされた。

以上より本論文は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士(理学)の論文に十分に値するものと判断された。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。(関連雑誌論文 計2編)

- 1) Zhe Liu, Yinqian Zhen, Xian-Hua Han, "Deep Unsupervised Fusion Learning for Hyperspectral Image Super Resolution," Sensors, Vol. 21, No. 7, 2348:1-19, 2021.
- 2) Zhe Liu, Yinqiang Zhen, Xian-Hua Han, "Deep self-supervised hyperspectral image reconstruction," ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications, Vol. 18, No. 3s, pp. 149:1-20, 2022.