

## 研究速報

スペクトラルドメイントランスフォームフィルタによるハイパースペクトル画像の高効率ノイズ除去

藤田 秀<sup>†</sup> (学生員) 草次 良樹<sup>†</sup>  
福嶋 慶繁<sup>†</sup> (正員)

Spectral Domain Transform Filter for Efficient Hyperspectral Image Denoising

Shu FUJITA<sup>†</sup>, Student Member,  
Yoshiki KUSATSUGU<sup>†</sup>, Nonmember, and  
Norishige FUKUSHIMA<sup>†</sup>, Member

<sup>†</sup>名古屋工業大学, 名古屋市

Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

DOI:10.14923/transinfj.2016IEI0001

あらまし 本論文では、効率的にハイパースペクトル画像のノイズ除去をするために、ドメイントランスフォームフィルタを拡張した、スペクトラルドメイントランスフォームを提案する。結果、提案手法は従来手法に比べ、高効率にノイズ除去が可能であることを示した。

キーワード ハイパースペクトル画像, ノイズ除去, エッジ保持平滑化フィルタ, ドメイントランスフォームフィルタ

### 1. まえがき

ハイパースペクトル画像 (HyperSpectral Image: HSI) は従来のカラー画像とは異なり、様々な波長帯の光の情報を保持している。そのため、物体検出やセグメンテーションなど、様々なアプリケーションへの応用が可能である。しかし、HSI はセンサ感度や内部光電効果等により、ノイズが頻繁に発生するため、ノイズ除去が不可欠である。HSI のノイズ除去を行うための代表的な手法として、エッジ保持平滑化フィルタを用いる手法 [1], [2] がある。しかし、HSI には高次元処理が必要なため、高い計算コストが要求される。

そこで本論文では、高効率に HSI のノイズ除去を行うために、高速なエッジ保持平滑化手法であるドメイントランスフォームフィルタ (Domain Transform Filter: DTF) [3] を HSI へと拡張する。

### 2. 従来手法

一般的に、エッジ保持平滑化フィルタの処理は以下の式で定義される。

$$J(\mathbf{p}) = \int_{N(\mathbf{p})} I(\mathbf{q})F(\hat{\mathbf{p}}, \hat{\mathbf{q}})d\mathbf{q} \quad (1)$$

ここで、 $I$  は入力画像、 $J$  は出力画像、 $\mathbf{p}$  は注目画素、 $N(\mathbf{p})$  は  $\mathbf{p}$  の近傍画素  $\mathbf{q}$  の集合を表す。また、 $\hat{\mathbf{p}}$  は、

注目画素  $\mathbf{p}$  の位置と画素値  $I(\mathbf{p})$  を要素としてもつベクトル、 $F$  はフィルタカーネルを表す。代表的なエッジ保持平滑化フィルタであるバイラテラルフィルタ [1] の場合、 $F$  は注目・参照画素間の空間距離と画素値距離を用いて計算される。しかし、これは非線形な処理が求められるため、計算コストが高い。

DTF は、エッジを考慮して空間ドメインを事前に変換することで、線形に処理するフィルタリング手法である。 $t(\hat{\mathbf{u}})$  をドメイン変換を行う関数とすると、式 (1) を以下のように近似できる。

$$J(\mathbf{p}) \approx \int_{N_{1D}(\mathbf{p})} I(\mathbf{q})H(t(\hat{\mathbf{p}}), t(\hat{\mathbf{q}}))d\mathbf{q} \quad (2)$$

$H$  は 1 次元線形フィルタカーネルである。文献 [3] では、ドメインの変換に測地線距離を利用しており、DTF の式は以下のように表すことができる。

$$J(\mathbf{p}) = \int_{N_{1D}(\mathbf{p})} I(\mathbf{q})H(ct(\mathbf{p}), ct(\mathbf{q}))d\mathbf{q} \quad (3)$$

$$ct(\mathbf{u}) = \int_0^{\mathbf{u}} 1 + \frac{\sigma_s}{\sigma_r} \sum_{k=1}^d |I'_k(\mathbf{x})|d\mathbf{x} \quad (4)$$

$N_{1D}(\mathbf{p})$  はある画素  $\mathbf{p}$  における画像の水平若しくは垂直方向での近傍画素集合、 $ct(\mathbf{u})$  は信号の測地線距離を求める関数、 $\sigma_s$ ,  $\sigma_r$  は平滑化パラメータ、 $I'_k$  は微分された入力画像  $I'$  の  $k$  番目の波長帯データ、 $d$  は画像の次元数であり、カラー画像の場合は  $d = 3$ 、HSI の場合は  $d$  は数十から数百の値をとる。DTF は 1 次元のフィルタを縦方向、横方向に順次適用することで、2 次元のフィルタとして用いられる。

### 3. 提案手法

HSI 中のある画素位置の各次元での画素値を考えると、波長帯が近い場合、それらの画素値は非常に近い。しかし、DTF を単純に HSI へ適用した場合、HSI を多次元画像として扱うため、共通する重みを用いて各波長帯の画像を空間的に平滑化する。これは、似た波長帯の画素値は似た値をとりやすいという性質を、利用できていない。そこで本論文では、空間方向の平滑化だけでなく、HSI のスペクトル方向に対する平滑化を加えた、スペクトラルドメイントランスフォームフィルタを提案する。提案手法では、HSI のある画素上のスペクトル方向のデータを 1 次元信号として、その信号に 1 次元フィルタを適用することで、スペクトル方向の平滑化を達成する。そのため提案手法は式 (2) に加えて、以下の処理を行う。

$$J_s(p_i) = \int_{N_s(p_i)} J(p_j)H(ct_s(p_i), ct_s(p_j))dj \quad (5)$$

$$ct_s(u_i) = \int_1^i 1 + \frac{\sigma_{w_s}}{\sigma_{w_r}} |I(p_k) - I(p_{k+1})| dk \quad (6)$$

ここで、 $p_i$  は画素  $p$  がもつ波長帯データの  $i$  番目の要素、 $N_s(p_i)$  はある波長帯  $p_i$  におけるスペクトル方向 (1次元軸上) での近傍波長帯集合、 $ct_s$  はある画素上での波長帯データに関する1次元信号の始点からある点までの測地線距離を求める関数、 $\sigma_{w_s}$  と  $\sigma_{w_r}$  は平滑化パラメータである。スペクトル方向の平滑化は、異なる画素間での平滑化とは異なり、同一画素内での平滑化である。そのため、縦方向や横方向の1次元フィルタとは異なり、式(5)と(6)のように隣り合う波長帯の情報のみを用いてドメイン変換を行い、それに基づき1次元フィルタを適用する。結果、エッジをまたいだ平滑化を行わないため、通常のDTFと比べて、エッジのぼけを抑制する効果がある。

#### 4. 実験結果

実験では、文献[4]のHSIのデータセットを用いる。HSIは450nm~650nmの光の波長を、10nm間隔で取得されている。比較手法として、各スペクトルに対してDTF[3]、バイラテラルフィルタ(BF)[1]を適用したものと、ベクターバイラテラルフィルタ(VBF)[2]を用いた。BFとVBFに用いたカーネルサイズは $13 \times 13$ とし、SDTFとDTF中の $H$ には、再帰フィルタ[3]を用いた。

図1に、デノイジング画像の結果を示す。なお、入力画像には分散が20であるガウシアンノイズを付与したものを用いた。従来手法であるBFとVBFはエッジのボケが引き起こされ、DTFはノイズ除去が不十分である。一方、提案手法はエッジを保ちつつノイズが除去されていることがわかる。次に、表1にPSNRでのデノイジング効果を示す。提案手法は比較した手法の中で最も精度が高いことが確認できる。最後に、表2に計算時間の結果を示す。なお、入力画像の解像度は $1338 \times 1021$ であり、シングルスレッド処理を

行った。提案手法は、HSIのためのノイズ除去手法であるVBFと比べて、高速に処理が可能である。

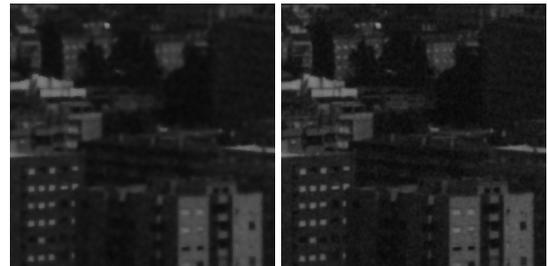
#### 5. むすび

本論文では、高速なエッジ保持平滑化フィルタであるドメイントランスフォームフィルタを、ハイパースペクトル画像のノイズ除去へ応用した手法である、スペクトラルドメイントランスフォームフィルタを提案した。実験では、従来手法に比べて、提案手法が高速かつ高精度なノイズ除去が可能であることを示した。



(a) Noisy input

(b) Grand truth



(c) BF [1]

(d) VBF [2]



(e) DTF [3]

(f) SDTF

表1 PSNRを用いた精度評価 [dB]  
Table 1 PSNR accuracy [dB].

| Method  | $\sigma = 10$ | $\sigma = 20$ | $\sigma = 30$ |
|---------|---------------|---------------|---------------|
| Input   | 28.30         | 22.87         | 19.84         |
| BF [1]  | 35.15         | 32.28         | 30.41         |
| VBF [2] | 39.48         | 34.92         | 31.78         |
| DTF [3] | 37.36         | 33.51         | 29.86         |
| SDTF    | <b>39.95</b>  | <b>36.36</b>  | <b>32.74</b>  |

図1 デノイジング結果  
Fig.1 Denoising results.

表2 計算時間比較 [sec]  
Table 2 Processing time [sec].

| Method | time       |
|--------|------------|
| VBF    | 12.1       |
| SDTF   | <b>2.0</b> |

謝辞 本研究は、科研費 15K16023 によって行われた。

文 献

- [1] C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images," Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp.839–846, 1998.
  - [2] H. Peng, R. Rao, and S.A. Dianat, "Multispectral image denoising with optimized vector bilateral filter," IEEE Trans. Image Process., vol.23, no.1, pp.264–273, 2014.
  - [3] E.S.L. Gastal and M.M. Oliveira, "Domain transform for edge-aware image and video processing," ACM Trans. Graph., vol.30, no.4, pp.69:1–69:12, 2011.
  - [4] D.H. Foster, K. Amano, S. Nascimento, and M.J. Foster, "Frequency of metamerism in natural scenes," J. Opt. Soc. Am. A, vol.23, no.10, pp.2359–2372, 2006.  
(平成 27 年 12 月 10 日受付, 28 年 4 月 4 日再受付,  
6 月 1 日早期公開)
-