

コントラスト不変性に基づく着目領域のTV-L1画像分解高速化 Acceleration of TV-L1 Image Decomposition of ROI Based on Contrast Invariance

佐々木崇元[†]
Takayuki Sasaki

谷田隆一[†]
Ryuichi Tanida

清水淳[†]
Atsushi Shimizu

1. はじめに

TV-L1 画像分解は入力画像の Cartoon 成分と Texture 成分を良好に分解でき、ノイズ除去やテクスチャ抽出の他、顔画像認識や色調補正の前処理等に利用されている。この信号分解は輝度勾配の変化量を示す TV ノルムとスパース正則の L1 ノルムから定義される目的関数の最小化により求められるが、反復演算の収束に多くの計算時間を要する。そこで本研究では、目的関数がコントラスト変換に関して不変である性質を用いて、TV-L1 画像分解の前後に着目領域の輝度分布に基づくコントラスト変換を行うことで、着目領域の収束を速める手法を提案する。実験では自然画像について提案手法を適用し、効果を確認する。

2. TV-L1 画像分解

TV-L1 画像分解は入力画像を、平坦部分やエッジなどのマクロな輝度変化を表す Cartoon 成分と、微細振動などのミクロな輝度変化を表す Texture 成分に分解するものである。画像のノイズ除去に使われる他、映像の色調補正 [1] や顔認識技術 [2] 等に応用されている。

TV-L1 画像分解では、高さ M ピクセル、幅 N ピクセルの画像 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ について以下の最適化問題

$$\min_{\mathbf{u}} J(\mathbf{u}) = \|\nabla \mathbf{u}\| + \lambda \|\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_1 \quad (1)$$

の解を、Cartoon 成分 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ および Texture 成分 $\mathbf{d} = \mathbf{f} - \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ と定義する。式 (1) の目的関数 $J(\mathbf{u})$ は、Cartoon 成分 \mathbf{u} の滑らかさに関するペナルティ項 $\|\nabla \mathbf{u}\|$ と、Texture 成分 \mathbf{d} のスパース性に関するペナルティ項 $\|\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_1$ を、正のパラメータ λ を用いて線形結合した凸関数である。第 1 項の ∇ は画像の空間差分を計算する線形作用素で、空間差分画像を $\mathbf{p} = (\mathbf{p}^{\text{vrt}}, \mathbf{p}^{\text{hrz}}) = \nabla \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{M \times N \times 2}$ とすると、

$$p_{i,j}^{\text{vrt}} = \begin{cases} u_{i+1,j} - u_{i,j} & (1 \leq i < M) \\ 0 & (i = M) \end{cases} \quad (2)$$

$$p_{i,j}^{\text{hrz}} = \begin{cases} u_{i,j+1} - u_{i,j} & (1 \leq j < N) \\ 0 & (j = N) \end{cases} \quad (3)$$

と定義される。また空間差分画像のノルム $\|\mathbf{p}\|$ を

$$\|\mathbf{p}\| = \sum_{i,j} \sqrt{(p_{i,j}^{\text{vrt}})^2 + (p_{i,j}^{\text{hrz}})^2} \quad (4)$$

と定め、目的関数の第 1 項 $\|\nabla \mathbf{u}\|$ を定義する。第 2 項 $\|\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_1$ は Texture 成分 $\mathbf{d} = \mathbf{f} - \mathbf{u}$ の L1 ノルム

$$\|\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_1 = \sum_{i,j} |f_{i,j} - u_{i,j}| \quad (5)$$

である。

この最適化問題 (1) の解法は数々提案されており、Pock と Chambolle の P-PD 法 [3] は最も高速な手法の一つである。この手法は、 $F(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p}\|, G(\mathbf{u}) = \lambda \|\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_1$ として、以下の反復処理を行う。

Step 1

収束条件 $\|\Sigma^{\frac{1}{2}} \mathbf{K} \mathbf{T}^{\frac{1}{2}}\| < 1$ を満たす正定対角行列 \mathbf{T}, Σ を求める。初期値 \mathbf{u}, \mathbf{p} を設定する。

Step 2

以下の更新式を計算。

$$\mathbf{u}^{n+1} = \text{prox}_{\mathbf{T}G}(\mathbf{u}^n + \mathbf{T} \text{div } \mathbf{p}^n) \quad (6)$$

$$\mathbf{p}^{n+1} = \text{prox}_{\Sigma F^*}(\mathbf{p}^n + \Sigma \nabla(2\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n)) \quad (7)$$

Step 3

終了判定をし、収束していなければ Step 2 に進む

ここで F^* は関数 F のルジャンドル変換、 prox は近接写像、 div は $-\nabla$ の共役写像である [3]。

以上のアルゴリズムで解が求まるが、収束までに非常に多くの反復を要する。

3. 着目領域における収束の高速化

P-PD 法では反復更新の途中で打ち切って分解結果を出力することが多いが、この場合可能な限り真の分解結果に近づけることが望まれる。特に画像の分解に優先度がある場合、優先度の高い部分ほど真の分解画像により近づくことが望ましい。

例えば TV-L1 画像分解による雑音除去を用いて映像符号化のプレフィルタとすることを考える。この場合人が注視する領域は前景物体や人の顔など限られることが多い。従ってこの様な領域を優先的に雑音除去することで、符号化結果の主観品質を高めることができる。

そこで本研究では、限られた反復回数の中でも画像の優先度に基づいて優先的に収束させる方法を提案する。

自然画像は近傍における輝度値の変化はなだらかなため、ある領域に着目するとその輝度値は狭い帯域に分布することが多い。このため領域ごとの優先度は輝度帯ごとの優先度に関連付けられる。

さて文献 [4] によると、TV-L1 画像分解にはコントラスト変換に関して不変である性質があり、問題 (1) により入力画像 \mathbf{f} の Cartoon 成分を求めることを $\mathbf{u} = \text{TVL1}(\mathbf{f})$ と表記したとき、

$$g(\mathbf{u}) = \text{TVL1}(g(\mathbf{f})) \quad (8)$$

[†]日本電信電話株式会社 メディアインテリジェンス研究所

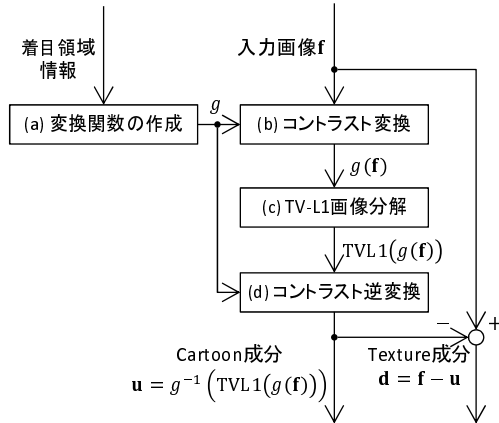


図1: 提案手法のブロック図

が成立する. ただしここで g は単調関数で, 画像のコントラスト変換を表す関数である. これは, コントラスト変換を施した画像の Cartoon 成分は, 元の画像の Cartoon 成分のコントラスト変換に等しいという性質を示している.

一方で P-PD 法の反復計算は, 輝度変化が小さな箇所ほど速く収束することが実験的に分かっている. このため, 優先度が高い領域の輝度変化を小さくするようにコントラスト変換 g を適正に設定することで, TV-L1 画像分解の収束を部分的に速められる.

以上より本提案手法のブロック図を図1に示す. 本提案手法は, P-PD 法などの TV-L1 画像分解法 (c) に, コントラスト変換関数 g を作成する処理 (a) と, 変換関数 g を用いて変換あるいは逆変換を行う (b), (d) の処理を接続して構成する. (a) において領域ごとに付与される優先度を輝度帯ごとの優先度に変換し, 優先度が高い輝度帯ほど勾配が小さい変換関数 g を作成すれば, (c) において優先度が高い領域での反復の収束を速めることができ, 反復回数を削減できる.

4. 実験と考察

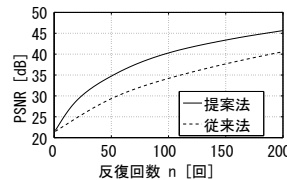
ここでは, TV-L1 画像分解を用いた雑音除去の例を示す. 図2は実験で用いた入力画像 [5] である. 入力画像は 8bit 960×540 の自然画像に分散 25^2 のガウス性雑音を付加したものである. 着目領域は被写体の顔や衣服が存在する輝度値が 150 以上の領域とし, コントラスト変換関数は着目領域での勾配が緩やかになるよう, 輝度値が 150 以上の区間がその他の輝度帯と比較して $1/4$ 倍の勾配をもつ区分線形関数をコントラスト変換関数とした.

図3では反復途中における Cartoon 成分と, 収束するまで反復させたときの真の Cartoon 成分の残差を PSNR で表示している. 提案法は従来法と比べ, 画面全体での PSNR がやや劣化しているが, 着目領域内での PSNR が向上している. 例えば PSNR が 40.0dB に達するまでの反復回数は画面全体では約 17% 増加しているが, 着目領域内では約 49% 減少している.

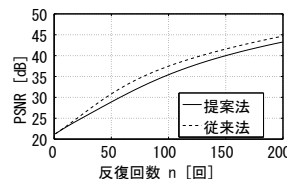
また図4は 50 回反復した時点での Cartoon 成分を示



図2: 入力画像



(a) 着目領域内



(b) 画面全体



提案法 (PSNR = 34.7 dB)

従来法 (PSNR = 29.3 dB)

図3: 真の Cartoon 成分と 図4: Cartoon 成分の比較の残差 (PSNR) (反復回数 $n = 50$)

しており, 提案法は従来法と比べて着目領域の雑音が良く取れていることが分かる. この時の着目領域内の PSNR は提案法で 34.7dB , 従来法で 29.3dB であった.

以上の実験の通り, 与えられた入力画像と着目領域について本提案手法を適用することで, 着目領域内の収束を速め, 反復回数を減らせることを示した.

5. まとめと今後の課題

本研究では TV-L1 画像分解の前後に着目領域の輝度分布に基づくコントラスト変換を行うだけで, 着目領域の収束を速められる手法を提案し, 実験で効果を確認した. 今後の課題としてはより収束の速いコントラスト変換関数を設計する手法の考案と, Color TV に対応して特定色の分解を速める手法の考案が考えられる.

参考文献

- [1] W. Ma, S. Osher, "A TV Bregman Iterative Model of Retinex Theory," UCLA CAM Report, 2010
- [2] T. Chen, W. Yin, X.S. Zhou, D. Comaniciu, T.S. Huang "Total Variation Models for Variable Lighting Face Recognition," PAMI 2006
- [3] T. Pock, A. Chambolle, "Diagonal Preconditioning for First Order Primal-dual Algorithms in Convex Optimization," ICCV 2011
- [4] V. Duval, JF. Aujol, Y. Gousseau, "The TVL1 Model: A Geometric Point of View," Multiscale Modeling & Simulation 8.1 2009
- [5] ITE, "ハイビジョン・システム評価用標準動画第2版," 2010