

TV正則化法を用いたJPEG圧縮画像の超解像復元法

Super resolution restoration method of the JPEG compressed image data using the TV regularization

小松隆, 齊藤隆弘
Takashi Komatsu, Takahiro Saito

1. はじめに

JPEG圧縮された画像では、特に符号化レートが低い場合に、ブロック状ノイズやモスキートノイズが発生する。本稿では、TV正則化法を用いて、ブロック状ノイズやモスキートノイズの発生を抑圧しながらJPEG画像のデコードを行う新しい方式を提案する。

2. 方式の概要

F.Malgouyres と F.Guichard らは文献[1]において、Total-variation 正則化法 (以下 TV 正則化法) を導入した画像の拡大補間法を提案している。Malgouyres らは、サブサンプルされた画像に対するぼけ復元と補間拡大の問題を想定し、式(1)のエネルギー汎関数の最小化により拡大補間画像を求める手法を提案した。式(1)はサブサンプル画像 $u_{m,n}$ が与えられたときに、拡大補間画像 f を求めるためのエネルギー汎関数である。

$$\lambda \cdot \int_{\Omega} |\nabla f| \cdot d\Omega + \sum_{m,n=0}^{N-1} |\{\tilde{s} * f\}(m,n) - g_{m,n}|^2, \lambda > 0 \quad (1)$$

f : 補間拡大画像
 \tilde{s} : ぼけ作用素
 (m,n) : サブサンプル標本化
 $g_{m,n}$: 画像のサブサンプル値

第1項がTV正則化項である。第2項は忠実化エネルギー項である。第2項の意味は、ぼけ作用素 \tilde{s} により拡大補間画像 f をぼかした後でサブサンプル (m,n) した画像と、与えられたサブサンプル画像 $g_{m,n}$ との差分エネルギーを表している。

F.Malgouyres らは画像劣化作用素として、ぼけ作用素とサブサンプリングという処理 $\{\tilde{s} * v\}(m,n)$ を用いた。この部分には別の画像劣化作用素を用いることができる。JPEG符号化は画像をコサイン変換し、有意な変換係数を量子化する方式である。量子化ビット数は各係数のアクティビティに応じて決定されるが、符号化レートが低い場合、何れの係数もかなりの量子化誤差を含み、量子化ビット割り当てが0ビットとなった変換係数は切り捨てられる。JPEG符号化は、周波数領域での量子化と帯域制限とを行う画像劣化作用素とみなすことができる。本稿ではJPEG画像圧縮を周波数領域での劣化作用素とみなして、式(1)のぼけ作用素とサブサンプリング $\{\tilde{s} * v\}(m,n)$ の部分をJPEG圧縮に置き換えた復元法を提案する。

本稿で提案するJPEG画像のデコードのためのエネルギー汎関数を式(2)に示す。式(2)はJPEGエンコードされた画

像データ \tilde{g} が与えられた時に、デコード画像 f を求めるためのエネルギー汎関数である。

$$\lambda \cdot \int_{\Omega} |\nabla f| \cdot d\Omega + \sum_{m,n=0}^{N-1} |C_{jpeg}(f)_{m,n} - \tilde{g}_{m,n}|^2, \lambda > 0 \quad (2)$$

f : デコード画像
 \tilde{g} : JPEG圧縮された画像データ
 $C_{jpeg}(f)$: f のJPEG圧縮

$C_{jpeg}(f)$ はブロック分割、コサイン変換、変換係数の量子化を行い、符号化は行われていないものとする。即ち、 $C_{jpeg}(f)$ により f は量子化されたコサイン変換係数画像に変換される。 \tilde{g} もJPEG圧縮された画像データを、量子化されたコサイン変換係数画像にまで復号した変換係数画像を表すものとする。

式(2)のエネルギー汎関数の最小化は、式(3)または式(4)の時間発展方程式で解くことができる。 t は反復演算回数を表す。

$$f_{i,j}^{(t+1)} = f_{i,j}^{(t)} + \varepsilon \cdot \left[\lambda \cdot \left\{ \left(\frac{\Delta^x f_{i,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j)}^{(t)}} - \frac{\Delta^x f_{i-1,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i-1,j)}^{(t)}} \right) + \left(\frac{\Delta^y f_{i,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j)}^{(t)}} - \frac{\Delta^y f_{i,j-1}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j-1)}^{(t)}} \right) \right\} + D_{jpeg} \{C_{jpeg}(f^{(t)}) - \tilde{g}\}_{i,j} \right], \lambda > 0 \quad (3)$$

$$f_{i,j}^{(t+1)} = f_{i,j}^{(t)} + \varepsilon \cdot \left[\lambda \cdot \left\{ \left(\frac{\Delta^x f_{i,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j)}^{(t)}} - \frac{\Delta^x f_{i-1,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i-1,j)}^{(t)}} \right) + \left(\frac{\Delta^y f_{i,j}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j)}^{(t)}} - \frac{\Delta^y f_{i,j-1}^{(t)}}{|\nabla f_{(i,j-1)}^{(t)}} \right) \right\} + \left(D_{jpeg} \{C_{jpeg}(f^{(t)})\}_{i,j} - D_{jpeg}(\tilde{g})_{i,j} \right) \right], \lambda > 0 \quad (4)$$

ここで、 $D_{jpeg}(x)$ は、量子化されたコサイン変換係数画像 x を逆コサイン変換し復元画像を求める操作を表している。式(3)と式(4)との違いは忠実化項をコサイン変換領域で求めるのか、画像空間領域で求めるのかである。(4)の場合、 $C_{jpeg}(x)$ 、 $D_{jpeg}(x)$ を符号化、復号化を含むJPEGエンコード、JPEGデコードとみなすこともできる。

3. シミュレーション

式(4)を用いて $C_{jpeg}(x)$ 、 $D_{jpeg}(x)$ をJPEGエンコード、JPEGデコードとみなしてシミュレーションを行った。

表1の条件でシミュレーションを行った。シミュレーションの手順を示す。

表1 実験条件

$C_{jpeg}(x)$	cjpeg -quality 60
$D_{jpeg}(x)$	djpeg
ε	0.3
λ	1.5
反復回数	100回

[実験手順]

1. フィルムスキャンされた 1024 画素 1024 ライン RGB 原画像を `cjpeg -quality 60` で JPEG エンコードする。

2. $f_{i,j}^{(0)} = 0$ とする。

3. $t=0$ とし、式(4)の反復演算を 100 回繰り返す。■

[実験結果]シミュレーションによる得られた結果の部分拡大図を図 1, 図 2 示す。図 1 は `cjpeg -quality 60` で JPEG エンコードし 3145728byte の原画像が 155711byte に圧縮されたデータを `djpeg` でデコードした画像である。図 2 は同じ圧縮データを提案方式を用いて超解像デコードした画像 $f^{(100)}$ である。図 1 では JPEG 圧縮特有のブロックノイズとモスキートノイズとが、自転車のスポークの両側や、ワイングラスとラケットのエッジ近傍で見られる。一方、図 2 ではいずれの領域においてもブロックノイズとモスキートノイズはほとんど目立たない。原画像に対する図 1 画像の SN 比は R=30.17dB, G=31.06dB, B=28.57dB であった。一方、図 2 の SN 比 R=31.09dB, G=31.40dB, B=29.17dB であった。JPEG 圧縮では、画像のエッジ部周辺にブロックノイズやモスキートノイズが発生しやすい。式(3)または式(4)の TV 正則化項は、特に画像のステップ状エッジの周辺で、JPEG 圧縮により失われた周波数成分のうち、ブロックノイズやモスキートノイズを抑制する効果のある周波数成分を復元する効果があることがわかる。

4. むすび

本稿では、TV 正則化法を用いた新しい JPEG デコード方式を提案した。提案した方式は、F.Malgouyres らの TV 正則化法を用いた画像のぼけ復元拡大法を JPEG エンコードされた画像データの復元に応用したものである。JPEG エンコードのための反復アルゴリズムを導出し、シミュレーションにより JPEG デコード画像を求めた。その結果、低い符号化レートの JPEG 圧縮で問題となるブロックノイズやモスキートノイズが目立たないデコード画像が得られた。

TV 正則化法は、画像のステップ上エッジの近傍領域に対しては、超解像復元の効果が得られるが、細かなテクスチャのみ領域に対しては、信号の細かな上下変動を抑圧する働きがある。このため、デコードされた画像中の細かなテクスチャが失われる傾向がある。今後、より高品質なデコード画像を生成するために、画像の領域に応じて TV 正則化の適応制御を行う方式の検討が必要である。

本稿で提案したデコード法を実現するためには、JPEG のデコーディングとエンコーディングを数十回繰り返さなければならぬため、通常の JPEG デコーディングと比較して少なくとも数十倍の演算量を必要とする。しかし、仮に印刷用途への利用を想定すると、プリンタの印刷速度を考えれば、必ずしもそれほど高速なデコード法である必要はなく、十分に実現可能な方式であると考えられる。



図 1. `cjpeg -quality 60` で JPEG エンコードし、`djpeg` でデコードした画像



図 2. 提案方式で超解像デコードした画像 $f^{(100)}$

参考文献

1. F. Malgouyres and G. Guichard: Edge direction preserving image zooming: a mathematical and numerical analysis, *J. Num. Anal.*, **39**, 1, pp.1-37, 2001.