

JPEG 圧縮における画質改善方法の比較検討

新井悠祐 † 甲藤二郎 †

早稲田大学理工学部 †

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

E-mail: † {arai, katto}@katto.comm.waseda.ac.jp,

あらまし 本稿では JPEG 圧縮の際に問題となるブロックノイズを低減する方法についての比較検討を行う。POCS や TV 法など従来の JPEG 圧縮静止画像の画質改善方法について述べるとともに、それぞれの方法について実験を行うことにより性能を比較する。さらに、上記の方式と、著者らが提案している動き検出を用いた Motion JPEG 画像の画質改善手法との組合せについて検討を行い、その実験結果について報告を行う。

A Comparative Study on Denoising Methods for JPEG Compression

Yusuke ARAI † Jiro KATTO †

School of Science and Engineering, Waseda University †

3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

E-mail: † {arai, katto}@katto.comm.waseda.ac.jp

Abstract This paper presents comparison results of denoising methods for JPEG compressed images, especially focusing on reduction of quantization errors and blocking artifacts. We overview typical conventional methods like POCS and TV and provide their performance comparison results using actual still images. In addition, we consider combination of the above methods with the technique we had proposed for quality improvement of the Motion JPEG image sequences by using motion estimation and pixel shift, and report some experiment results.

1 はじめに

画像符号化方法は主に DCT (Discrete Cosine Transform) 系と Wavelet 系に大別されるが、JPEG や MPEG に代表される DCT 系では、ブロック分割に伴う境界部のブロックノイズが主観的な大きな問題となっている。その一方で、画像の撮像時には熱雑音が混入し、焦点ずれや手振れによってボケが発生し、さらには圧縮時には量子化雑音が発生することから、圧縮画像には多種多様な雑音が混在することになる。このため、画像復元の分野から画像圧縮の分野に至るまで、これまで多種多様な画質の改善手段 (雑音低減手段、

denoising 手法) が提案されている。その具体例としては、ウィーナーフィルタなどの古典的なフィルタ演算に基づくものから、POCS (Projection onto Convex Sets) 法[1][2][3][4]、TV (Total Variation) 法[5][6][7]、あるいはまた Ridgelet や Curvelet に代表される Wavelet の拡張手法 (冗長基底表現法) などが挙げられる。

本稿では、Wavelet 変換拡張法を除く上記の画質改善方式を検討対象とし、ブロックノイズや熱雑音が入った静止画像に対して雑音低減効果のシミュレーション実験を行うことにより、それぞれの方法の比較と検討を行う。また、それらの方法と、著者らが提案してい

る Motion JPEG 画像の画質改善方法[8]との組み合わせについても検討を行い、その実験結果を示す。

2 静止画像の画質改善方法

画像の劣化は、熱雑音による劣化、デジタルカメラなどによるぼけによる劣化、量子化誤差による劣化、などに分類することができる。特に量子化誤差は、ブロックノイズやモスキート雑音など、画像圧縮特有の主観的なひずみを引き起こす。本稿では特に、量子化誤差が引き起こすブロックノイズによる劣化に注目した画像改善方法について述べ、ぼけの改善はカメラのフィルタなどによる一般的なものではなく、ブロックノイズを低減するための過程として利用する。

2.1 線形フィルタ

ブロックノイズ、あるいは熱雑音を低減するための最も簡単な方法として、画像にローパスフィルタをかけ、平滑化を行うことが挙げられる。しかしながら、この方法はぼけを伴うため、平滑化した画像にさらにハイパスフィルタをかけた画像を重ね合わせることで画像が鮮鋭化される。これは従来のコントラスト強調に対応する。

2.2 POCS (Projection Onto Convex Sets)

POCS とは、複数の制約条件が凸集合であるとき、ある初期値から凸集合への射影を繰り返し行うことで、それらの共通集合への1点へと収束させる方法であるが、この方法を非線形の画像復元方法として提案したのが Youla である[1][4]。

この考えを応用し、鮮鋭化の際、2.1のハイパスフィルタの代わりに、最急降下法を用いる方式が知られている。この場合、ある画素を中心とする復元画像のローパスフィルタ出力を計算し、その値と観測画像(入力画像)の中心画素との差分を重みとし、(通常)ローパスフィルタのインパルス応答に乗じて復元画像に加算する。この処理を繰り返すことで復元画像は収束し、画像の特徴に合わせた適応的な鮮鋭化を行うことができる。

また、POCS を用いたブロックノイズ低減方法が Zakhor や Yang らによって提案されている[2][3]。量子化の際に利用した量子化テーブルと量子化後の DCT 係数を参照することで、量子化を行う前に DCT 係数が存在してい

た範囲を特定できる。そこで Zakhor の方式では、初めに圧縮画像の平滑化を行い、その後 DCT 係数がその範囲を超えていた場合、範囲内に収まるように補正を行う処理を繰り返す。DCT 係数が存在する範囲は C を補正前の係数、 C' を補正後の係数、 Q を量子化テーブルの係数とすると、 $[C-Q/2 \leq C' \leq C+Q/2]$ となるため、以下の式のように範囲外の係数を範囲の上限、下限に補正することで、平滑化によるぼけを抑制することができる。なお、この方法の平滑化処理は、任意の画像処理に置き換えることができる。

$$C' = \begin{cases} C - \frac{Q}{2} & (C' \leq C - \frac{Q}{2}) \\ C + \frac{Q}{2} & (C' \geq C + \frac{Q}{2}) \\ C & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

2.3 TV (Total Variation)

TV 正則化は制約条件付き最適化問題として定義され、画像の雑音除去に適用した際にエッジの保存性が高いなど、近年大きな注目を集めている。Rudin らが定義した TV 正則化[5]は、以下のエネルギーができるだけ小さくなるように繰り返し処理を行うものであり、隣接画素間の差分 (TV ノルム)、ならびに観測画像と復元画像の差分の二乗和 (L2 ノルム) で表される。

$$E_{TV} = \int_{\Omega} (|\nabla I| + \frac{1}{2} \lambda (I - I_0)^2) dx dy$$

ここで I_0 は観測画像、 I は復元画像、 ∇I は隣接画素間の差分、 λ はラグランジュの係数であり、 Ω は実数空間の画像を定義する。

また TV 正則化は、処理毎に λ の値を変更していくことで、雑音除去にも効果的となる。さらに、画像は骨格画像とテクスチャ成分、残差に分解することができ、大半の雑音成分はテクスチャ成分に分離されるため、テクスチャ成分の性質に合わせた処理を行うことで雑音除去の効果を高めることもできる。

Alter や小松らによって、上記の観測画像と復元画像の距離を、DCT 変換と量子化操作を反映した距離として再定義し、TV 正則化を JPEG 画像のブロックノイズやリングングの削減に特化した方式が提案されているが[6][7]、本稿では上記のオリジナルの TV 正則

化方式を用いた結果を報告する。

2. 4 局所的改善処理

これまでの改善処理は画像全体を対象にしてきたが、ここではブロック境界周辺のみで局所的に処理を行うことを考える。局所的に処理を行うものとして H.264 のデブロッキングフィルタ [9]などが挙げられる。これは、ブロックの境界のみを適応的に平滑化することで画像全体をぼけさせることなくブロックノイズを効率よく低減させるものである。本稿ではブロック境界のみで処理を行うという特徴に注目し、局所的に平滑化と鮮鋭化を行う方式を検討し、それらの性能について考察を行う。

3 評価実験

3. 1 JPEG 実験

上記の改善方法の性能を比較するため、図 1 に示す 5 枚の静止画像を用いて 3 つの実験を行い、PSNR を計算した。

3. 1. 1 熱雑音の低減効果

1 つ目の実験はガウス性雑音を与えた画像を対象とするものである。雑音を与えた画像に対して、ローパスフィルタによる平滑化、ハイパスフィルタによる鮮鋭化、通常の TV、雑音除去に適した TV (λ を適応的に変更する TV) をそれぞれ行う。この結果を図 2 に示す。ここでは、処理前の雑音画像を NOISY、ローパスフィルタによる平滑化を LP、ハイパスフィルタによる鮮鋭化を HP、通常の TV を TV1、 λ を変更しながらの TV を TV2 と表している。

図 2 より、平滑化は熱雑音除去の効果が高く、逆に鮮鋭化は雑音をさらに増加させてしまう結果となっている。また、TV は画像に関係なく効果が高いが、熱雑音除去に適した方法を取り入れることでさらなる効果が得られることが確認できる。

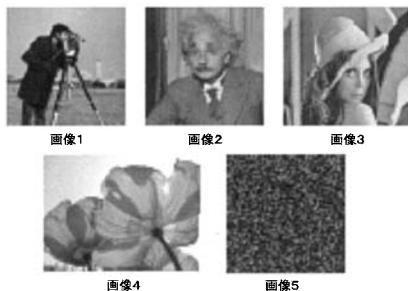


図 1 使用する画像

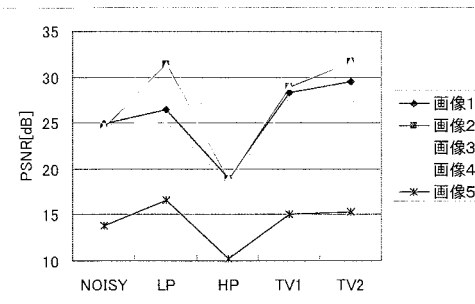


図 2 熱雑音の低減効果

3. 1. 2 量子化雑音の低減効果 I

2 つ目の実験はブロックノイズを低減させるために JPEG 圧縮した画像を平滑化してぼけた画像を対象とするものである。これは、ローパスフィルタを使用する POCS を想定し、対になる復元画像の更新処理として、各種手法の比較評価を行うことを目的としている。なお、以降の POCS は、ローパスフィルタと画素差分の重み加算を行う POCS を表し、量子化補正を行う POCS の更新処理は「DCT 係数補正」と表記して区別する。

具体的には、ローパスフィルタで平滑化した画像に対して、ハイパスフィルタによる鮮鋭化、および POCS (画素差分の重み加算) による鮮鋭化を適用する。さらに、それぞれの鮮鋭化画像に対して、DCT 係数補正を行なった場合の PSNR の変化も調べた。この結果を図 3 に示す。ここで処理前の圧縮画像を JPEG、ローパスフィルタによる平滑化画像を LP とする。また、平滑化画像 LP に対してハイパスフィルタによる鮮鋭化を行った画像を HP、画素差分の重み加算を行った画像を POCS とする。また、量子化テーブルを考慮した DCT 係数補正を DCT と表し、HP と POCS に適用した場合、及び、LP に直接適用した場合 (Zakhor の方式に対応) の結果を示している。なお、複数列挙しているものは、表記の順に処理を行っていることを示している。

図 3 より、平滑化の際にブロックノイズは低減されるものの、高周波成分も取り除かれてしまうため、各処理後 PSNR は向上しているが、元の圧縮画像より数値が向上するものは少ない。しかし、画像によっては数値が向上する可能性がある。また、各処理後に DCT 係数補正を行うことで数値が向上しているこ

とが確認できるが、処理の内容や画像によっては逆に下がってしまうこともある。

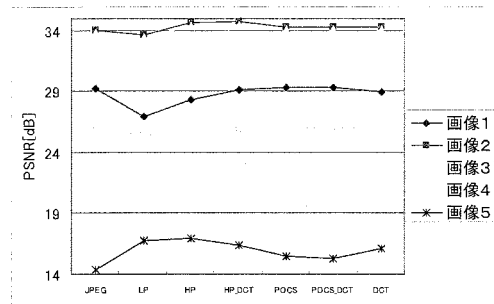


図3 量子化雑音の低減効果 I

3. 1. 3 量子化雑音の低減効果 II

3つ目の実験は JPEG 圧縮画像を直接対象とするものである。圧縮画像に対して、TV 正則化、および 2.4 節のブロック境界のみに平滑・鮮鋭化を行う方式、および前節と同様に、それぞれに DCT 係数補正を加えた方式の比較を行う。この結果を図 4 に示し、TV 正則化を適用した画像を TV、ブロック境界のみに平滑化を行った画像を BLP、その BLP にハイパスフィルタによる鮮鋭化を行った画像を BHP と表す。この結果より、TV 正則化は画像の性質に左右されにくく、一様に PSNR が向上していることが確認できる。また、通常はブロック境界を平滑化することで数値が下がるが、鮮鋭化により再び向上した結果、元の圧縮画像よりも PSNR が向上する場合がある。ただし、この特性は画像の性質に左右されやすく、差が大きい。この傾向は、図 3 の実験結果にも表れている。また、各処理後に DCT 係数補正を行うことで、一様に数値が向上する可能性が高いことが確認された。

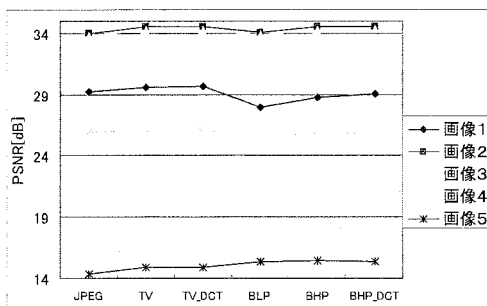


図4 量子化雑音の低減効果 II

3. 2 MotionJPEG 実験

前節の改善処理を、著者らが提案している Motion JPEG 画像の画質改善方式[8]に組み合わせることを考える。

この画質改善方式は、1枚の画像を互いに異なる符号化方式で圧縮し、複数枚の復号画像を重ね合わせると、平均化によって量子化誤差が低減する効果を利用している。この原理を動画像に適用し、復号時に、動き検出によって同一の領域をトラッキングし、その領域の重ね合せ(フレーム合成)を行うことで、同様の量子化誤差の削減効果が得られる。この方式は、時間方向の雑音除去フィルタリング[10]と同様の処理と考えることもできる。

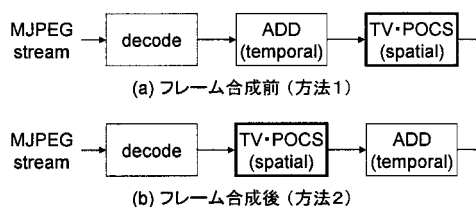


図5 二通りの組合せ方法

この方式に先の改善処理を組み合わせるにあたっては、図 5 に示す 2 つの可能性がある (ADD は[8]のフレーム合成処理を、TV・POCS は前節までの画質改善処理を示す)。1 つは、フレーム合成を行った後に各フレームに対して画質改善処理を行うもの (図 5 (a))、もう 1 つは先に復号した各フレームに対して画質改善処理を行った後にフレーム合成を行うもの (図 5 (b)) というものである。前者を方法 1、後者を方法 2 として、それぞれの方法について 10 種類の標準動画像を quality=5 で JPEG 圧縮したものを用いてシミュレーションを行い、PSNR の改善効果の検証を行う。また、画質改善処理は、POCS による鮮鋭化、TV、境界を平滑化、さらに鮮鋭化の 4 つの方法を用い、以降の実験結果では、PSNR は動画 5 フレームの平均値を JPEG 圧縮動画像を基準とする差分値として示している。それぞれの動画像の基準 (JPEG) となる PSNR は表 1 に示すとおりである。

まず、方法 1 についての実験結果を図 6 に示す。ADD は[8]のフレーム合成処理を表しており、その後にそれぞれの改善処理を行っ

ている。これより、合成処理によって PSNR が向上していることが確認でき、合成を行ってからの改善処理も先の実験と同じような効果があり、さらに数値が向上しうることが示された。

表 1 基準となる PSNR 値

動画像	PSNR[dB]
akiyo	34.39
children	30.65
coastguard	29.38
container	28.76
flower	27.31
ftball	35.55
mobile	25.89
news	32.19
sean	30.49
weather	26.43

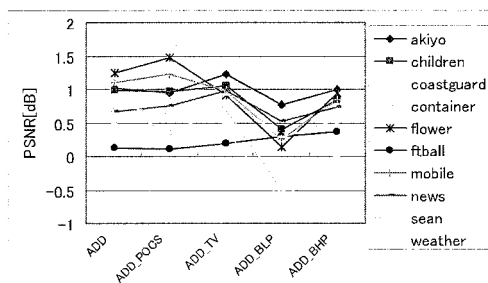


図 6 方法 1 による量子化雑音の低減効果

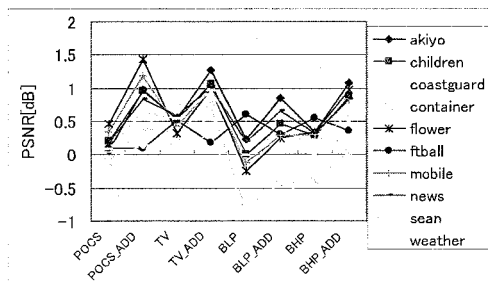


図 7 方法 2 による量子化雑音の低減効果

次に、方法 2 による実験結果を図 7 に示す。こちら先の実験同様、改善方法や動画によっては数値が下がってしまう場合もあるが、改善処理によって PSNR が向上していることが確認できる。また、それぞれの改善処理後に合成を行うことで ftball を除き、PSNR がさ

らに向上しており、改善後の動画に対してもフレーム合成処理による改善効果があることが示された。

最後に方法 1 と方法 2 による改善効果の比較を図 8 に示す。この実験結果は、それぞれの改善方法について、方法 2 での改善結果から方法 1 の改善結果の差分を表しており、正の値であれば方法 2、負の値であれば方法 1 がより優れていることを意味する。また、10 種類の動画の平均値は点線で示している。これまでの結果のように動画や改善の種類によって多少の違いはあるものの、この結果から POCS 鮮鋭化を除き、方法 2 のほうが方法 1 に比べて改善効果が高いことが確認できる。よって、著者らが提案している手法に対しての改善処理は合成処理後に行うことでも効果があるが、合成処理を行う前の動画に対して行うことでさらなる改善効果が得られることが示された。

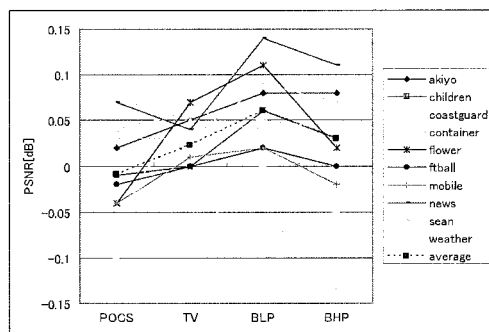


図 8 方法 1 と方法 2 による低減効果の比較

4 むすび

本稿では熱雑音や量子化雑音が入った画像に対して POCS や TV など従来の画質改善方法について述べ、実験によりそれらの性能の比較を行った。また、著者らが提案している Motion JPEG 動画像の画質改善方法との組み合わせについても検討を行い、合成後に改善を行う場合と改善後に合成を行う場合の 2 通りについて実験により改善効果の比較を行った。実験結果から後者の方法が平均してより優れた効果があることが示された。また、合成前の改善効果が高いほど合成後の改善効果も高くなる傾向があるため、合成前の改善の性能を上げることでさらなる改善効果が期待できる。

参考文献

- [1] D.C. Youla and H.Webb, "Image Restoration by the Method of Convex Projections: Part1-Theory". IEEE Trans. on Medical Imaging, Vol.MI-1, No.2, pp.81-94, Oct.1982.
- [2] Zakhor, "Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding", IEEE Trans. on CSVT, Vol.2, No.1, pp.91-95, Mar.1992.
- [3] Y.Yang, N.P.Galatsanos and A.K. Katsaggelos, "Regularized Reconstruction to Reduce Blocking Artifacts of Block Discrete Cosine Transform Compressed Images", IEEE Trans. on CSVT, Vol.3, No.6, pp.421-432, Dec.1993.
- [4] 山田, "凸射影アルゴリズムの考え方とハイブリッド最急降下法", 電子情報通信学会誌, Vol.83, No.8, pp.616-623, Oct, 2000.
- [5] L.Rudin, S.Osher and E.Fetami, "Nonlinear total variation based on noise removal algorithm," Physica D, Vol.60, pp.259-268, 1992.
- [6] F. Alter, S. Durand, and J. Froment, "Adapted total variation for artifact free decompression of JPEG images", J. Mathematical Imaging and Vision, Vol.23, No.2, pp.199-211, Sep.2005.
- [7] 小松, 齊藤, "TV 正則化を用いた JPEG 圧縮画像の超解像デコーディング", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J90-D, No.7, pp.1671-1674, Jul.2007.
- [8] 鈴木他, "動き検出を用いた量子化誤差低減に基づく分散映像符号化", AVM 研究会 AVM-58-5, Sep.2007.
- [9] 大久保他: "H.264/AVC教科書". インプレス, 2004.
- [10] M.K.Ozkan, M.I.Sezan and A.M.Tekalp: "Adaptive Motion-Compensated Filtering of Noisy Image Sequences," IEEE Trans. on CSVT, Vol.3, No.4, pp.277-290, Aug.1993.