

## IM-GPDCT と動き検出を用いた圧縮動画像の高解像度化

井上 義隆<sup>†</sup> 甲藤 二郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 早稲田大学

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 55N-06-09B

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

あらまし HDTV の普及により、映像を高解像・大画面で視聴する機会が増えている。画像の拡大手法として Bicubic 法が広く用いられるが、画像にボケが発生する。本稿では IM-GPDCT と呼ばれる超解像技術を圧縮動画像へ適用する方法を提案した。まず、IM-GPDCT における拡張領域パディング方法が高解像度化に与える影響について検討した。次に、拡大法により周波数分布が異なるという特性を IM-GPDCT のアルゴリズムの中で利用することで性能改善を行った。また従来の IM-GPDCT で発生するリングングの発生を抑制した。さらに IM-GPDCT を圧縮動画へ適用し、複数フレームと動き検出を用いた画質改善を行った。

キーワード 画像拡大, 画像補間, IM-GPDCT, Gerchberg-Papoulis

## Resolution enhancement of compressed video using IM-GPDCT and motion estimation

Yoshitaka INOUE<sup>†</sup> and Jiro KATTO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Waseda University

55N-06-09B, 3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555 JAPAN

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

**Abstract** By the popularization of HDTV, opportunities of watching high-resolution images on large-screen are increasing. For enlarging images, bicubic interpolation is widely used, but blur occurs. In this paper, we proposed super-resolution using IM-GPDCT applied to the compressed video. First, we considered the effect of padding the extended area in the process of IM-GPDCT. Second, IM-GPDCT was improved by using the difference of frequency distribution between magnification methods. The occurrence of ringing was also suppressed. Finally, in addition to the IM-GPDCT applied to compressed video frames, using motion detection and multiple frames improved image quality.

**Key words** Image magnification, Interpolation, IM-GPDCT, Gerchberg-Papoulis

### 1. はじめに

近年の大型ディスプレイの普及は、2011 年のアナログ停波を迎えるにあたり、今後ますます加速すると同時に、映像を大画面かつ高画質で視聴する機会が増えるだろう。これまで VHS や DVD に記録してきた映像資産も大画面かつ高画質で視聴したい、さらには、新しい記録メディアへ移行したいという要求が高まりつつある。

画像拡大法として Bicubic 法などが広く使われるが、得られる解像度には限界があり、ボケが発生するという問題がある。画像の解像度を向上させる手法として超解像技術がある [1]。これは一般に、位置ずれを持つ複数枚の低解像画像を用意し、各々

の位置を揃えた後に再構成処理を施すことで 1 枚の高解像画像を生成する技術である。静止画では複数枚の低解像画像を入力として用いるが、動画では時間方向近傍のフレーム複数枚を用いる。[4] は MPEG-2 圧縮動画を対象とした超解像技術である。対象としているフレーム内のブロックと近傍フレーム内のブロックを動き検出によって対応付け、これらの重み付け和を新たに超解像ブロックとすることで画質を改善する。

本研究では超解像技術のひとつ IM-GPDCT [3] の圧縮動画適用を考える。IM-GPDCT は 1 枚の低解像画像から 1 枚の高解像画像を生成することができるため、動画において多数のフレームを処理する際に処理時間を短縮できるという利点がある。まず、IM-GDPCT における拡張領域のパディング方法が

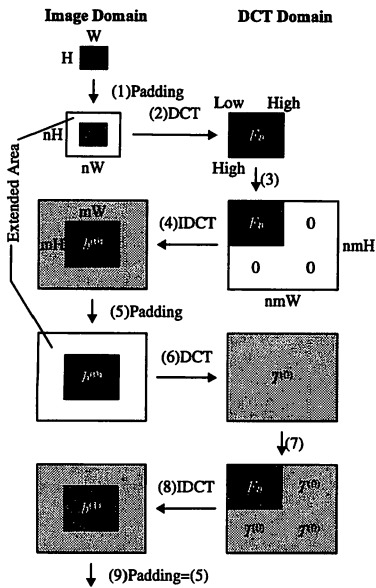


図 1 IM-GPDCT 法の処理フロー

Fig. 1 Flow diagram of the IM-GPDCT method.

高解像度化に与える影響について検討する。次に異なる拡大法によって生成された画像の周波数分布は異なるという特性を IM-GPDCT のアルゴリズムの中で利用することで性能改善を図る。最後に圧縮動画へ適用し、近傍フレームを利用した画質改善を行う。

## 2. IM-GPDCT

### 2.1 概要

帯域制限された信号の高周波成分を復元することで高解像度化する手法の一つとして Gerchberg-Papoulis の反復法 (GP 反復法) がある [2]。これは信号に対して正逆のフーリエ変換を繰り返す過程において、信号の空間的な広がり限定されている、かつ低周波成分の情報が既知であるという二つの条件を用いて高周波成分を復元する手法である。デジタル画像のような離散信号においては離散フーリエ変換を用いるが、Shinbori らによって、離散コサイン変換を代用することで GP 反復法の演算負荷を低減させた IM-GPDCT [3] が提案されている。[3] では IM-GPDCT と 3 種の従来法 Nearest Neighbour, Bilinear, Cubic Convolution の比較が行われている。IM-GPDCT はこれら従来法以上に優れていることが示されている。処理フローを図 1 に示す。

### 2.2 拡張領域パディング法の検討

[3] では図 1 中の処理 (1) および (5) における拡張領域をパディングする画素値について、0 (黒)、画像全体の平均値、255 (白) の 3 通りで比較を行い、平均値を用いた場合に再生誤差が最小になるとしている。しかし、画像の境界画素値と拡張領域の値との差分が大きいため、高周波成分の回復に伴い、生成した高解像画像の境界付近に黒い波模様のひずみが生じる。例えば、図 2 は標準動画の Foreman の 1 フレームを Bicubic

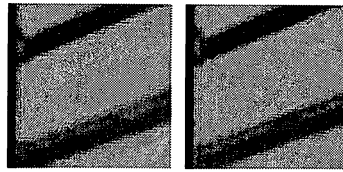


図 2 波状ひずみ. (左) Bicubic, (右) IM-GPDCT

Fig. 2 Wave-like distortion. (Left) Bicubic, (Right) IM-GPDCT

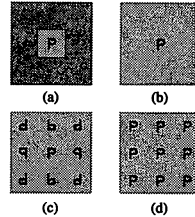


図 3 4 種のパディング法. (a)Average, (b)Border, (c)Mirror, (d)Tile

Fig. 3 Four methods of padding. (a)Average, (b)Border, (c)Mirror, (d)Tile.

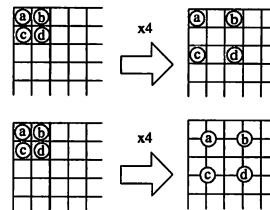


図 4 解像度変換と空間的位置の関係

Fig. 4 Relation between resolution conversion and space position.

および IM-GPDCT によって拡大した際の画像左端の一部を切り取ったものである。Foreman の左端には黒い領域が存在しているが、IM-GPDCT によって拡大した場合に強くひずみが現れる。標準静止画像の Airplane の左端にも周囲と輝度の異なる線が入っており、同様な現象が確認される。一方でこのような特徴のない画像ではひずみの現れ方は小さい。ゆえにパディング時に境界での差分を小さくすることでひずみの影響を抑えることができると思われる。そこで図 3 のように、平均値を用いる方法に次の 3 通りのパディング法を加えて比較を行う。(1)Average: 平均値, (2)Border: 境界値を引き伸ばす, (3)Mirror: 鏡像を繰り返す, (4)Tile: 画像を繰り返す。Border 法および Mirror 法では差分が小さくなり、ひずみが抑制されると期待できる。一方、Tile 法ではより差分が大きくなり、ひずみが強調されることが予測できる。

### 2.3 解像度変換と空間的位置の関係

Bicubic などの補間法を用いて縦横 2 倍に拡大する際、一般的に図 4 上段のように座標  $(2i, 2j)$  の画素はそのまま保持され、座標  $(2i, 2j + 1), (2i + 1, 2j), (2i + 1, 2j + 1)$  の画素値が周囲の画素から求められる。一方、IM-GPDCT の場合、図 4 下段のように拡大前の 1 画素は拡大後の 4 画素の中央に位置する。相

表 1 画像特徴による分類

Table 1 Classification by image feature.

Group	Video frame	Still image
A	City, Mobile	Girl, Lenna, Mandrill, Parrots
B	Flower, Foreman	Airplane, Pepper, Sailboat, Milkdrop

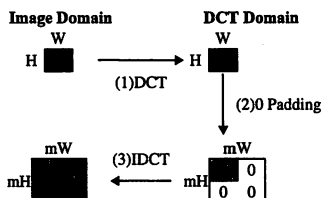


図 5 DCT による拡大

Fig. 5 Magnification using DCT.

対的に Bicubic が左上にずれるため、比較する際に不都合である。本研究で用いる Bicubic は図 4 下段のように補間させるものを用いる。

#### 2.4 シミュレーション

用いる画像は CIF サイズの標準動画 City, Flower, Foreman, Mobile の先頭フレーム、および 256×256 の標準静止画像 Airplane, Girl, Lenna, Mandrill, Milkdrop, Parrots, Pepper, Sailboat である。これらの画像のうち Flower と Foreman は画像境界の一部に黒い帯を持つ特徴がある。また、Airplane, Pepper, Sailboat, Milkdrop は境界に周囲と輝度が異なる数 pixel 幅の線を持つ。このように境界上に周囲と輝度の異なる領域を持つ画像を画像群 B とする。逆にこのような特徴を持たない画像を画像群 A とする。したがって、全ての画像を表 1 のように分類した。

画像に対してサイズ 3×3、標準偏差 0.95 のガウシアンフィルタで平滑化処理を行った後、面積平均法によって縦横 1/2 に縮小を行った。これは 2×2 の 4 画素の平均値から 1 画素を作成したことになる。標準動画は QCIF へ、標準静止画像は 128×128 へ縮小した。ただし縮小の前後いずれにおいても画像圧縮は行っていない。

縮小画像を Bicubic, DCT による拡大、各パディング法を用いた IM-GPDCT で縮小画像を縦横 2 倍に拡大した。ここで DCT による拡大とは図 5 のように、縮小画像を DCT 後に高周波成分を 0 で埋め、IDCT を行い空間領域へ戻すという拡大法である。図 1 のように、IM-GPDCT にはパラメータとして、拡張領域サイズの画像サイズに対する倍率  $n$  および縦横の拡大率  $m$  が必要となるが、本稿では  $n = 8, m = 2$  を用いた。また、40 回まで反復を行った。拡大画像の YUV 成分のうち Y 成分を、縮小前の画像を基準とする PSNR によって画質を評価した。

図 6 および図 7 はそれぞれ画像群 A および B の PSNR である。横軸は IM-GPDCT の反復回数、縦軸は PSNR である。図 6 すなわち画像群 A では Border 法が、図 7 すなわち画像

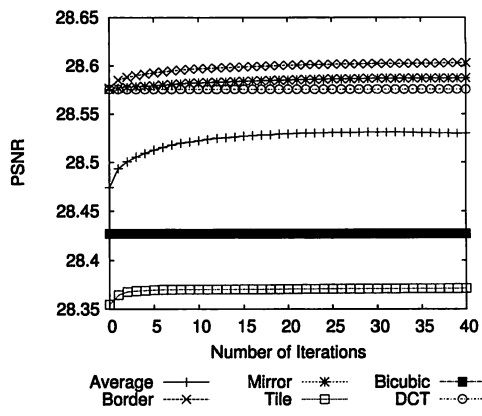


図 6 拡大法の比較 (画像群 A)

Fig. 6 Comparison of magnification methods (group A).

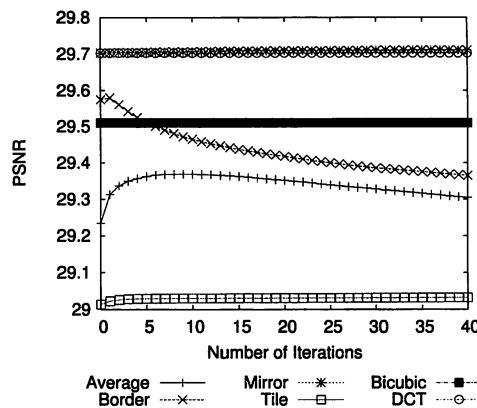


図 7 拡大法の比較 (画像群 B)

Fig. 7 Comparison of magnification methods (group B).

群 B では Mirror 法が最も優れていた。画像群 A においては Border 法によって、Average 法よりも +0.0719dB, Bicubic よりも +0.176dB, DCT による拡大よりも +0.0275dB 増加した。画像群 A では Border 法の PSNR は反復回数の増加にともない緩やかに増加しており、最も高い PSNR を示した。一方、画像群 B においては Border 法の PSNR は反復数の増加にともない減少した。これは画像群 A および B に所属する個々の画像においても例外なく同様の現象が確認された。Average 法と Bicubic を比較すると、画像群 A では Average 法が優れ、画像群 B では Bicubic が優れていた。これは境界上に輝度の異なる領域が存在するため強く発生する波状ひずみが原因と考えられる。Tile では PSNR が大きく減少した。Mirror 法と DCT による拡大を比較すると、画像群 A では反復回数の増加にともないわずかに増加したが、画像群 B では大きな差はなかった。

IM-GPDCT は高周波成分の復元によって高解像度化を実現する。そこで拡大画像の周波数スペクトルを確認した。図 8 は生成した各画像の DCT から得られた周波数スペクトルである。IM-GPDCT では矩形の低周波領域から右方向、下方向に

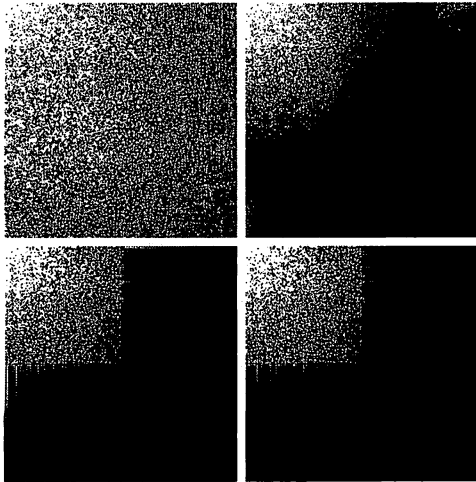


図 8 Mandrill の DCT 周波数スペクトル。左上から時計回りに縮小前画像, Bicubic, IM-GPDCT (Border 法, 40 回反復), IM-GPDCT (Average 法, 40 回反復)  
 Fig. 8 DCT frequency spectrum of "Mandrill". Clock-wise from upper left: Original, Bicubic, IM-GPDCT(Border-Padding, 40 iterations), IM-GPDCT(Average-Padding, 40 iterations).

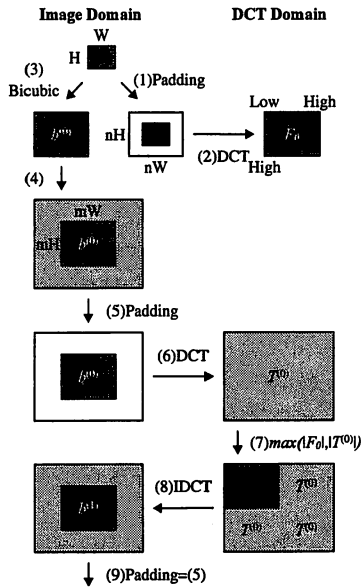


図 9 IM-GPDCT 法の処理フロー (提案手法)  
 Fig. 9 Flow diagram of the proposed IM-GPDCT method.

高周波成分が伸びていることが確認できた。また, Average 法と Border 法では高周波の現れ方が異なった。

### 2.5 拡大画像の初期化と低周波数の選択的置換

画像群 B において, Average 法は反復回数 0 の段階で大きく劣化している。これは図 1 中処理 (4) 後に生成される画像  $b^{(0)}$  である。  $b^{(0)}$  を Bicubic や DCT による拡大画像によって初期化した方が高い PSNR が得られると期待できる。だが, 図 1 中

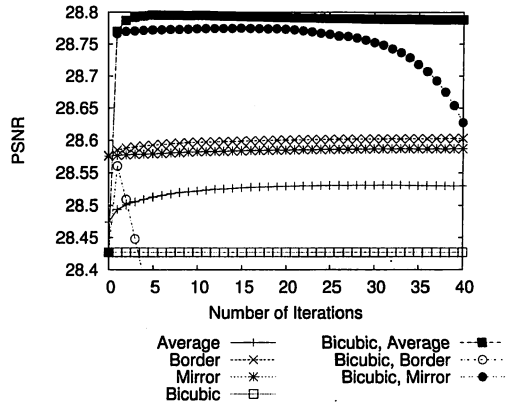


図 10 拡大法の比較 (画像群 A)  
 Fig. 10 Comparison of magnification methods (group A).

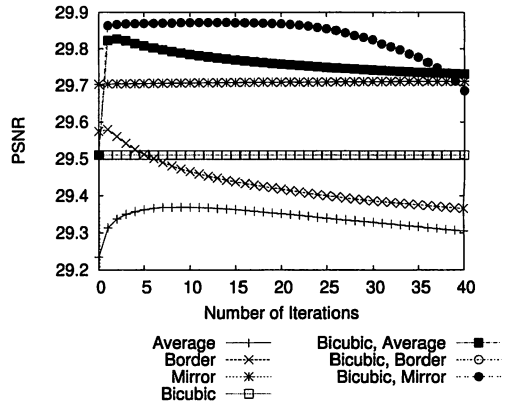


図 11 拡大法の比較 (画像群 B)  
 Fig. 11 Comparison of magnification methods (group B).

処理 (7) において既知の低周波成分  $F_0$  への置換が行われるため, 与えた  $b^{(0)}$  の低周波成分は失われる。また, 中域で復元された周波数成分は置換によって失われてしまう可能性がある。そこで, まず, 図 8 のように IM-GPDCT と周波数分布の大きく異なる Bicubic を  $b^{(0)}$  として与える。次に, 図 1 中 (7) の低周波数置換の処理において次の処理を行う。第  $n$  回目の反復における置換前の周波数成分  $T^{(n)}$  と既知の低周波成分  $F_0$  として, その  $(i, j)$  要素ごとに

$$T_{new}^{(n)}(i, j) = \begin{cases} T_{old}^{(n)}(i, j) & (|T_{old}^{(n)}(i, j)| > |F_0(i, j)|) \\ F_0(i, j) & otherwise. \end{cases} \quad (1)$$

として, 振幅の絶対値が大きい要素を選択的に残す。以上の変更点を加えた IM-GPDCT の処理フローを図 9 に示す。

### 2.6 シミュレーション

画像の種類及び縮小方法は 2.4 と同条件の下, シミュレーションを行った。比較した拡大法は IM-GPDCT (Average, Border, Mirror), Bicubic に加え, 2.5 で提案した方法を用いた。

結果を図 10, 11 に示す。2.5 で提案した方法のうち, Border

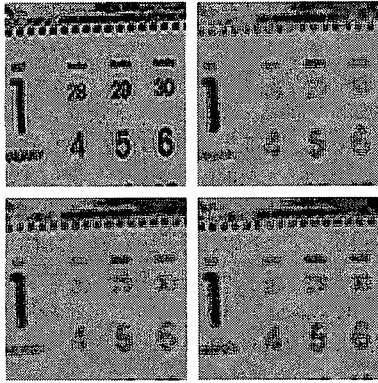


図 12 拡大法の比較 (Mobile) . 左上から時計回りに, 縮小前画像, Bicubic, IM-GPDCT (Bicubic による初期化, Average 法, 40 回反復), IM-GPDCT (Border 法, 40 回反復)  
 Fig. 12 Comparison of magnification method (Mobile). Clockwise from upper left: Original, Bicubic, IM-GPDCT(initialized by Bicubic, Average-Padding, 40 iterations), IM-GPDCT(Border-Padding, 40 iterations).

法によってパディングした場合に PSNR が急落したものの, Average 法, Mirror 法でパディングした場合はともに PSNR が上昇した. 特に画像群 A では Bicubic で初期化し, Average 法でパディングした場合に, 6 回の反復で PSNR の極大値をとった. 画像 Mobile におけるカレンダー部分に注目したものが図 12 である. Bicubic ではカレンダーのリング (画像上部, 白黒が横方向に規則的に並ぶ) が潰れていたが, IM-GPDCT ではある程度復元された. また IM-GPDCT によって文字の鮮鋭化されたが, リンギングが現れるという問題があった. 2.5 で提案した手法によってリンギングの抑制が確認できた.

### 3. 圧縮動画への適用

2.5 で提案した IM-GPDCT をフレームごとに行うことで, Bicubic 補間以上の画質が得られるが, 動き検出を利用することでさらに画質改善を行う. 対象フレームに対して, その時間近傍である前後数フレームとの間でブロックマッチング処理を行い, 動き検出を行う. その際, 精度を高めるためにオーバーラップ動き補償 [5] の考え方を応用する. 本稿では  $8 \times 8$  pixel サイズのブロックに分割するが, 4pixel ずつオーバーラップさせてブロック分割する. 対象フレーム内の対象ブロック  $x_2$  に対して, 参照フレーム内でマッチングしたブロックを参照ブロックと呼ぶこととする. 参照ブロックは参照フレーム数個存在するが, その中で最小の量子化パラメータを持つブロック  $x_1$  を選択する. 選択したブロック  $x_1$  と対象ブロック  $x_2$  について重み付け和をとり, 新しく用意したフレームのブロック  $\hat{x}$  へマッピングする. 重み付けは [4] に従い, 次の式を用いる.  $x_1, x_2$  の重みをそれぞれ  $h_1, h_2$ , 量子化パラメータをそれぞれ  $q_1, q_2$  として,

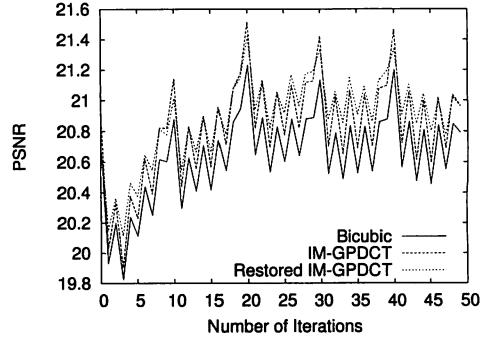


図 13 IM-GPDCT の圧縮動画適用 (Mobile, 300kbps)  
 Fig. 13 IM-GPDCT applied to compressed video (Mobile, 300kbps)

表 2 近傍フレーム利用による PSNR 上昇

Table 2 PSNR gain by using neighborhood frames.

Name	Bit rate	Average	Maximum
Mobile	300kbps	0.059938	0.23588
Foreman	300kbps	0.0632022	0.26214
Mobile	500kbps	0.023928	0.19443
Foreman	500kbps	0.0276228	0.2304

$$\begin{cases} \hat{x} &= h_1 x_1 + h_2 x_2 \\ h_1 &= 1 - (1 - \alpha)^{(q_2/q_1)^\beta} \\ h_2 &= 1 - h_1 \end{cases} \quad (2)$$

とする. ここで  $h_1, h_2$  はパラメータ  $\alpha, \beta$  によって調節される. ブロックが 4pixel ずつオーバーラップしているので, 最大 4 ブロックが重複してマッピングされる領域が存在する. 重複した領域では画素の平均値をとる.

#### 3.1 シミュレーション

CIF の動画 Foreman, Mobile を用意し, 先頭から 50 フレーム分を用いた. 2.4 と同条件でフレームごとに QCIF へ縮小した. 作成された QCIF 動画画像を H.264 で 300kbps, 500kbps に圧縮を行った. また, I フレームを 10 フレーム毎に挿入した. まず, 縮小動画をフレームごとに IM-GPDCT で拡大した. その際, 2.5 で提案したように  $b^{(0)}$  を Bicubic で初期化し, 低周波成分の選択的置換を行った. パディングにはいずれの画像においても安定して優れていた Mirror 法を用いた. 反復回数は 4 回に固定し, 拡張領域サイズの画像に対する倍率  $n = 8$ , 縦横の拡大率  $m = 2$  とした. 近傍フレームを利用した画質改善処理では Foreman は前後 2 フレームずつを参照, Mobile は前後 5 フレームずつを参照した. 式 2 における重み付けのパラメータは  $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$  とした.

比較した方法は (1)Bicubic : Bicubic 補間によりフレームごとに拡大, (2)IM-GPDCT : 2.5 で提案した IM-GPDCT によりフレームごとに拡大, (3)Restored IM-GPDCT : (2) で生成された拡大動画に対して近傍フレームを利用することで画質改善を行ったもの.

結果を図 13~16 に示す. また, フレーム毎の PSNR 上昇に

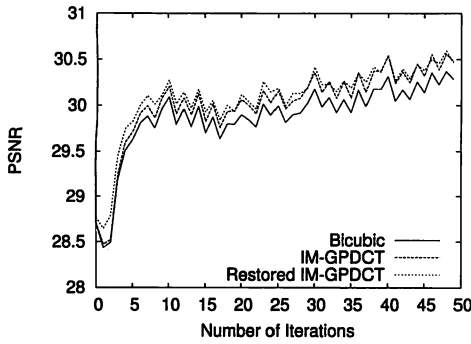


図 14 IM-GPDCT の圧縮動画適用 (Foreman, 300kbps)

Fig.14 IM-GPDCT applied to compressed video (Foreman, 300kbps)

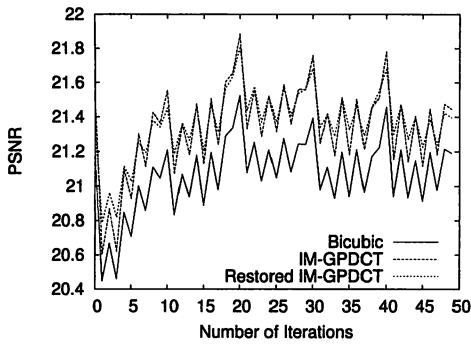


図 15 IM-GPDCT の圧縮動画適用 (Mobile, 500kbps)

Fig.15 IM-GPDCT applied to compressed video (Mobile, 500kbps)

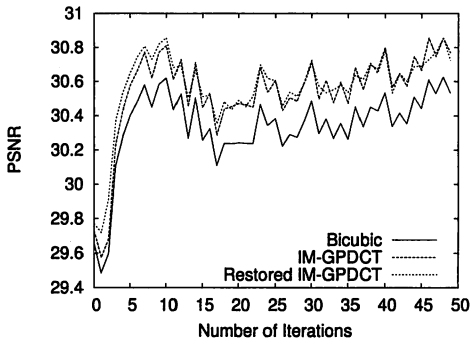


図 16 IM-GPDCT の圧縮動画適用 (Foreman, 500kbps)

Fig.16 IM-GPDCT applied to compressed video (Foreman, 500kbps)

ついて、その平均値と最大値を 2 に示す。I フレームで PSNR が低下したものの、多く P および B フレームにおける PSNR 上昇を確認した。また、IM-GPDCT によってエッジと同時に圧縮時のノイズも強調されていたが、近傍フレームの利用によりこれらのノイズが軽減した。残存していたリングングも目立たなくなった。

#### 4. むすび

IM-GPDCT 法の拡張領域について新たなパディング法を提案し、高解像度化に与える影響について検討を行った。これにより平均値でパディングする既存の IM-GPDCT や、Bicubic 補間、DCT による拡大以上の PSNR が得られた。また、IM-GPDCT の処理において Bicubic 補間画像を用いて初期化することでさらに高い PSNR を得た。これにより従来の IM-GPDCT で問題視されていたリングングの発生が抑制された。さらに圧縮動画へ適用する際に、近傍フレームとの動き検出を利用することで画質を改善した。IM-GPDCT およびパディング法の定式化による解析が今後の課題である。

#### 文 献

- [1] Moon Gi Kang, Chaudhuri, S., "Super-resolution image reconstruction," IEEE Signal Processing Magazine, vol.20, no.3, pp.19-20, May 2003.
- [2] Jones, M., "The discrete Gerchberg algorithm," IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol.34, no.3, pp.624-626, Jun 1986.
- [3] 新堀 英二, 高木 幹雄, "DCT を用いた Gerchberg-Papoulis の反復法を適用した高画質画像拡大," 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J76-D2, No.9, pp.1932-1940, 1993 年 9 月.
- [4] Martins, B., Forchhammer, S., "A unified approach to restoration, deinterlacing and superresolution of MPEG-2 decoded video," Proc. of IEEE ICIP 2000, vol.1, pp.1008-1011, Sep. 2000.
- [5] J. Katto, M. Ohta, "An analytical framework for overlapped motion compensation," ICASSP-95, vol.4, pp.2189-2192, May 1995.