

画像のエッジ部の自己合同性を利用した再構成型超解像

松本 信幸[†] 井田 孝[†]

Reconstruction-Based Super-Resolution Using Self-Congruency around Image Edges

Nobuyuki MATSUMOTO[†] and Takashi IDA[†]

あらまし 画像が1枚の場合にも適用できる再構成型超解像方式を提案する。従来の再構成方式では、同じ被写体を撮影した複数の画像において、被写体に対する標本点の位置のずれを画像ごとに検出し、そのずれを補正しながら1枚に合わせることで標本点の密度を高める。今回、同じ輝度変化が被写体の輪郭に沿って連続することに着目し、入力画像のエッジ付近の画素値を、エッジの傾きに応じて同じ画像の別の位置に配置することで、1枚の画像だけで標本点の密度を高めた。人工的に作成した縞模様の画像を高解像度化する実験を行い、三次畳込み内挿法よりも少ない誤差で原画像を復元でき、また、実写の静止画像ではエッジ部分において高い鮮鋭感が得られることを確認した。

キーワード 超解像, 高解像度化, 再構成, 自己相似, 自己合同

1. ま え が き

テレビやパソコンにおける表示, プリンタによる印刷などの画素密度が増加し, 画像の解像度感が画質を決めるポイントの一つになっている。これら出力機器に対して画像データの画素が少ない場合, 事前に信号処理により画素を増やす高解像度化技術が必要となる。

従来の高解像度化技術としては, 双一次内挿法, あるいは三次畳込み内挿法 [1] ~ [3] など標本化定理に基づく補間フィルタを用いることが多かった。しかし, これらの手法では画素が増えた画像で表現が可能になる高い周波数成分は生成されず, 出力画像はぼやけたものになってしまう。そこで, 補間フィルタの改良が検討され [4], [5], 例えば, Kim らは, Winscale という面積画素モデルに基づく手法を提案した [6]。簡単な処理で最近傍内挿と双一次内挿の性質を併せもつ拡大を行うが, 高い解像度感は得られない。また, エッジ適応型内挿法として, Li らは, 高解像度化前後の画像の局所共分散の双対性を利用した手法 [7] を, Battiato らは, 画像の局所構造に応じて内挿に用いる画素を選択する LAZA という手法 [8] を提案しているが, 基本

は内挿処理なので鮮鋭感が不足する, あるいは, 拡大率が整数倍のみであるといった問題がある。Feng らは, 入力画像をセグメンテーションして, エッジ領域ではエッジ適応型内挿法, テクスチャ領域では強調処理, 平坦領域では双一次内挿を用いる手法を提案している [9] が, セグメンテーションの境界領域での不自然さを抑えるためにブレンド処理が必要であったり, また, 主観的な画質改善の効果はあるが, 真の高解像度画像を再構築できる保証はないといった問題がある。

これに対し, 入力画像の解像度の限界を超えるという意味で「超解像度化」と呼ばれる画像の高解像度化技術の研究が盛んである。超解像度化の方式としては, 事例ベース方式 [10], フラクタル超解像方式 [11], [12] など様々あるが, その一つである再構成方式 [13], [14] は被写体本来の輝度を再現できる特長があり注目されている。

再構成方式は, 動画のフレームを高解像度化する際に前後のフレームを参照する。カメラや被写体にわずかでも動きがあれば, 参照フレームの画素値は, 同じ被写体の同じ輝度変化を処理フレームとは異なる位置で標本化した値になっている。そこで, フレーム間の動きをサブピクセル精度で検出し, その動きに合わせて参照フレームの画素値を処理フレームの標本値として追加する。このようにして処理フレームにお

[†](株) 東芝研究開発センター, 川崎市
Corporate Research and Development Center, Toshiba Corporation, Kawasaki-shi, 212-8582 Japan

ける標本点の密度を高めた後に、高解像度画像の画素値を算出する。高解像度画像の画素値の算出は再構成処理と呼ばれ、Back-Projection 法 [15], [16], MAP 法 [17], [18], POCS 法 [19] などの手法が用いられる。再構成方式は、動きを正確に検出できれば鮮鋭な高解像度画像が得られる。

しかし、従来の再構成方式では、同じ被写体を撮影した複数の画像が必要なため、通常のスナップ写真など画像が 1 枚しかない場合には適用できない。そこで、撮影される被写体の光の分布、あるいは、それを、十分に高い解像度で撮影した画像では、被写体の輪郭に沿って、同じ輝度変化が空間的に連続する性質、いわば局所的な自己合同性に着目し、入力画像のエッジ付近の画素値を同じ画像の別の点の標本値として配置することで標本点の密度を高める再構成方式を提案する [20]。提案方式は 1 枚の画像の高解像度化にも適用でき、そのエッジの本来の輝度変化を正確に復元できる。

エッジ領域に着目した再構成型方式としては、事前知識を用いる手法が提案されている。例えば、Sun らは事前にエッジのこう配断面の事前知識を学習しておく手法 [21] を、Fattal らは異なる解像度での統計的なエッジの依存性を事前知識として用いる手法 [22] を、Tai らはエッジの滑らかさを保存する事前知識をカラー画像に導入した手法 [23] を提案している。しかしながら、標本点の追加による再構成処理とは異なり、仮定した事前知識に応じてエッジが鮮鋭化された高解像度化が行われる。

一方、画像の自己合同性に類似した手法としては、フラクタル超解像方式 [11], [12] において、Luong らが、画像の繰返し性を利用して、補間画素の複数の標本値を収集する手法を提案している [24], [25]。しかしながら、画像の大域的な繰返し性をもとに収集した標本値では、再構成処理での追加標本点として利用できる精度はなく、Median 推定によって画素値を算出している。よって、エッジの局所的な自己合同性を用いた再構成処理による提案手法のように、真の高解像度画像に近づく復元ができる保証はない。

本論文の構成は以下である。まず、従来の再構成型超解像方式を 2. で説明する。3. で画像の自己合同性について説明するとともに、提案方式のアルゴリズムを説明する。4. で実験結果を示し、最後に本論文をまとめる。

2. 従来の再構成型超解像方式

2.1 標本点の追加

従来の再構成方式を図 1 を用いて説明する [13]。図 1 (a) に、撮影した動画の画素を黒丸で表し、その第 p フレームの画素値を $y_{p,1}, y_{p,2}, y_{p,3}, \dots$ 、同様に、第 $p-1$ フレームの画素値を $y_{p-1,1}, \dots$ と表す。第 p フレームを縦横 2 倍に高解像度化する、つまり図 1 (b) に白丸で示した高解像度画像の画素値 x_1, x_2, x_3, \dots を求める。撮影時の点広がり関数が既知の場合、それに合わせて、低解像度画像の画素ごとに、 $y_{p,m}$ が、周辺の高解像度画像の画素値 x_i の加重平均に等しいという以下の条件式を立てられる。

$$y_{p,m} = \sum_{i \in G_{p,m}} x_i \cdot w_{p,m,i} \quad (m=1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

ここで、 $G_{p,m}$ は $y_{p,m}$ の標本点を中心にした加重平均を計算する範囲、 $w_{p,m,i}$ はその x_i ごとの重み、 M は低解像度画像の画素数である。更に、カメラと被写体に相対的な動きがあると仮定して、第 $p-1$ フレームの各画素に写った被写体の第 p フレームへの移動先をサブピクセル精度で検出する。その検出結果に基づいて、図 1 (a), (b) に黒三角で示したように第 $p-1$ フレームの画素値を第 p フレームの標本値として追加する。同様に、複数のフレーム、例えば前後各 K フレームの画素値を標本値として追加し、それらの条

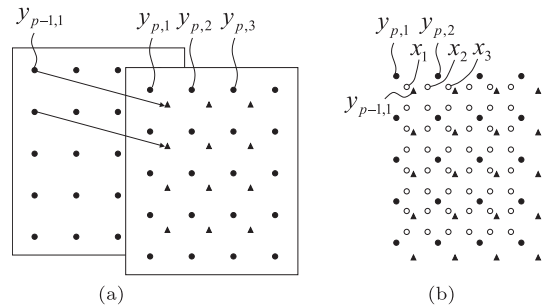


図 1 複数のフレームを用いる従来方式 (a) 別のフレームの画素値をその動きに基づいて標本値として追加する。(b) 低解像度画像の画素 (黒丸) と、高解像度画像の画素 (白丸)、追加した標本点 (黒三角) の位置関係

Fig. 1 A conventional method using multiple frames. (a) Pixels in the other frames are copied as new sampling data depending on their motions. (b) Relative position of low-resolution pixels (black circle), high-resolution pixels (white circle), and new sampling data (black triangle).

件式

$$y_{k,m} = \sum_{i \in G_{k,m}} x_i \cdot w_{k,m,i} \quad (2)$$

$$(p-K \leq k \leq p+K, m=1, \dots, M)$$

を求める．

ここで、動き検出としては、例えば、まずブロックマッチング法でピクセル精度で動きベクトルを求め、その位置を中心にして、パラボラフィッティング法でサブピクセル精度の動きを計算する [26]．

条件式を立てた後、補間フィルタなどを用いて x_n ($n = 1, 2, \dots, N$: N は高解像度画像の画素数) に初期値を設定し、各条件式の左辺と右辺の差が小さくなる方向に、 x_n を再帰的に更新することで、被写体の本来の輝度分布を復元する．具体的には、例えば MAP (Maximum A Posteriori) 法 [17], [18] や POCS (Projections Onto Convex Sets) 法 [19] を用いる．

2.2 MAP 法による再構成処理

MAP 法は、評価関数の最小化問題として定式化される．MAP 法における評価関数は、低解像度画像の画素値 $y_{k,m}$ と高解像度画像から推定される画素値との差に基づく誤差項と、高解像度画像の事前確率に基づく正則化項の和として、

$$E(x) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=p-K}^{p+K} \left(y_{k,m} - \sum_{i \in G_{k,m}} x_i \cdot w_{k,m,i} \right)^2 + \alpha \|Lx\|^2 \quad (3)$$

として表される．ここで、 x は高解像度画像の画素値をラスタスキャンの順番に並べたベクトル、 L はラブラシアンオペレータを表す行列、 α は正則化の強さを示すパラメータである．この評価関数 $E(x)$ を最小化するような解 x を高解像度画像として出力するのが、MAP 法による再構成処理である．実際に x を得る方法は、最急降下法などの繰返し計算による最適化手法が用いられる [17], [18]．

以上の処理により、画像の鮮鋭感や分解能を向上できるが、従来の再構成型超解像方式では、複数の画像を必要とし、例えば通常のスナップ写真など画像が 1 枚しかない場合には適用できない．また、参照画像を保持するために多くのメモリを必要とする．

3. 提案手法

従来の再構成方式では、同じ輝度分布を異なる位置

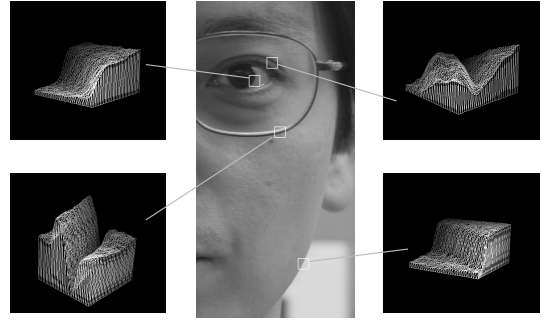


図 2 画像の自己合同性．エッジの近くでは同じ輝度変化が連続して存在する．

Fig.2 Self-congruency of images. Patterns of the same intensity appear successively around the edge.

で標準化した画素が、処理フレームとは別のフレームにあることを利用して高解像度画像の画素値を求めた．その同じ輝度分布がフレーム内においても空間的に、被写体の輪郭などのエッジに沿って存在する．提案方式は、この性質を利用する．

3.1 自己合同性

十分に解像度が高い写真の一部を切り出し、輝度を立体的に表示したグラフを図 2 に示す．例えば、左上に示す黒目の輪郭では、輝度の傾きがほぼ一定であり、エッジの立上りの部分の変化も似ている．同様に、右下の頬の輪郭も、黒目の場合とは異なる傾きであるが、この部分で一定である．他の部分も同様である．画面の座標 $(z_x, z_y) \in R^2$ の輝度を g とし、領域 A で、

$$\forall (z_x, z_y) \in A, g(z_x, z_y) = g(z_x + s_x, z_y + s_y) \quad (4)$$

となる平行移動ベクトル (s_x, s_y) が存在することを自己合同性というすると、エッジの近くは近似的に自己合同である．

自己合同な部分を撮影した画素は、その点だけでなく、その近くの別の位置での標本値として用いることができる．

3.2 提案方式のアルゴリズム

図 3(a) に、エッジ部の模式図を示す．スキャンラインごとの輝度変化を曲線で、撮影された低解像度の画素を黒丸で表す．実際には輝度値がそのまま標準化されることは少ないが、ここでは説明の簡単のため単純に描いた．図のように、エッジ部の画素値はラインごとに異なるが、それらは同じ輝度変化を異なる位置で標準化したものとなっている．

そこで、各ラインの低解像度の画素を一つずつ注目

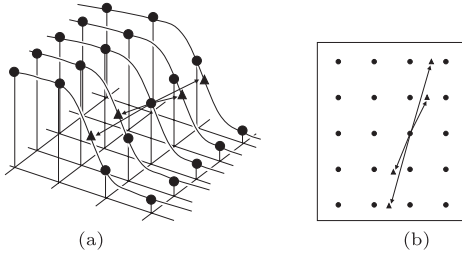


図 3 提案方式により、低解像度の画素（黒丸）が、他のラインの標本点（黒三角）として追加される。(a) 縦軸に輝度をとった立体図、(b) 画面への投影図

Fig. 3 In the process of the proposed method, low-resolution pixels are copied as new sampling data in other lines. (a) 3D figure whose vertical axis is intensity value. (b) Projection onto the image plane.

画素とし、エッジに対する相対的な位相が同じになる点を他のラインから検出し、図 3(a) に黒三角で表したように、検出した対応点の標本値として用いる。標本点を追加した様子を図 3(b) に示す。このように、例えば上下の 4 ラインにそれぞれ対応点を追加する。そのために、注目画素を基準にして横座標を u 、縦座標を v として、図 4 に黒丸で表したように 4 種類の一次元の探索範囲を設ける。ここで、黒丸や白丸の間隔は低解像度画像の画素間隔である。そして、それぞれの黒丸のラインにおいてサブピクセル精度で対応点の位置を計算する [26]。従来方式である図 1(a) では、他のフレームの画素値を新たな標本値として追加したのに対し、提案方式では同じフレームの画素値で標本値を追加する。

なお、エッジが画面の左右方向である場合は、図 3(b) や図 4 を 90 度回転して、探索範囲は横方向でなく縦方向に設定し、対応点は左右のラインごとに追加する。

このようにして、動画であれば第 p フレームの第 m 画素ごとに、所定の数 Q ラインの対応点を同じフレームの上下ライン（若しくは左右列）から求め、それぞれについて $(2Q + 1)$ 個の条件式

$$y_{p,m} = \sum_{i \in G_{p,m,q}} x_i \cdot w_{p,m,q,i} \quad (5)$$

$$(m=1, 2, \dots, M, q=-Q, \dots, -1, 0, 1, \dots, Q)$$

を立てる。ここで、 $G_{p,m,q}$ は $y_{p,m}$ の q 番目の対応点（特に $q=0$ は $y_{p,m}$ 自身）を中心にした加重平均を計算する範囲、 $w_{p,m,q,i}$ はその x_i ごとの重みである。

式 (5) を用い、あとは、従来と同様にして、MAP 法 [17], [18]、あるいは POCS 法 [19] などで再構成処

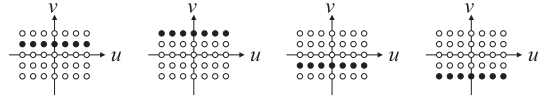


図 4 注目画素から対応点への相対ベクトルを (u, v) としたときの、各対応点の探索範囲（黒丸のライン）

Fig. 4 Search area for each corresponding point (line of black circles). (u, v) shows the relative vector from a low-resolution pixel to the corresponding point.

理を行う。アルゴリズムを以下に示す。

- Step 1 $m = 1$ に設定する。
 - Step 2 低解像度画像の第 m 画素がエッジ部にあるか否かを判定し、エッジ部にあれば Step 3 に、そうでない場合は Step 5 に進む。
 - Step 3 第 m 画素でのエッジの方向（上下方向あるいは左右方向）を判定する。
 - Step 4 エッジが上下方向であれば、図 4 のように第 m 画素の上下の所定数の行からそれぞれ対応点を検出する。エッジが左右方向であれば、左右の列から同様に検出する。
 - Step 5 低解像度画像のすべての画素の処理が終わっていれば Step 6 に進み、そうでない場合は、 m を 1 増やして Step 2 に戻る。
 - Step 6 低解像度画像に補間フィルタなど（今回の実験では三次畳込み内挿法）を用いて高解像度画像を生成する。
 - Step 7 低解像度画像の画素とそれぞれの対応点で決まる条件式を用いて、Step 6 で生成した高解像度画像を初期値として、繰返しによる再構成処理を行う。
- 提案方式はテクスチャ部や、向きが異なる複数のエッジが組み合わさった部分では自己合同性がないため効果は得られないが、単純なエッジや縞模様の部分を鮮鋭にできる。また、静止画像にも適用でき、処理に用いるメモリは少なくて済む。

4. 実 験

4.1 人工的に作成したエッジ画像を用いた実験

原画像として、中央部で間隔が狭くなる縞模様の濃淡画像（図 5、 512×512 [画素]、256 [階調]）を作成した。エッジの角度は $0 \sim 45$ [度] まで 3 [度] きざみの 16 種類、明部の輝度を 240、暗部を 20 とした。低解像度画像は、方形の面積平均を用いて原画像を 128×128 [画素] に縮小して生成した。

この低解像度画像に対して、提案方式で標本点の追

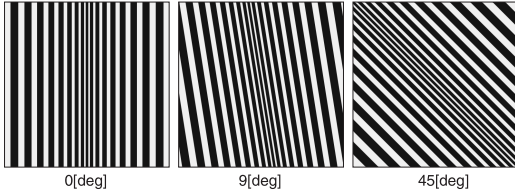


図 5 実験に用いたエッジ画像の例

Fig. 5 Examples of edge images used in the experiments.

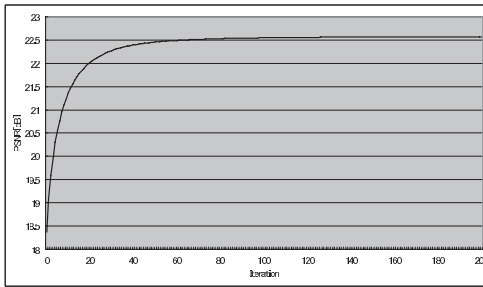


図 6 画像変換の反復回数に対する PSNR

Fig. 6 Variation of PSNR with the iteration number of image transformation.

加を行い、2.2 で説明した MAP 法 [17], [18] による再構成処理で縦横 4 倍に高解像度化した。3.2 で説明した提案アルゴリズムにおいて、Step 2, Step 3 のエッジの判定は行わず、すべての画素を注目画素として上下ラインでそれぞれ対応点を探索した。対応点は、二乗誤差和を用いた 3×3 画素のブロックマッチングでピクセル精度で求めた後、パラボラフィッティングでサブピクセル精度で検出した。Step 6 で生成する再構成処理の初期画像は三次畳込み内挿法で生成し、Step 7 での MAP 法のパラメータ $\alpha = 5.0 \times 10^{-3}$ として画像更新を反復した。点広がり関数としては矩形の面積平均を用いた。収束判定は、正解画像と高解像度化した画像との PSNR の変化量が、 1.0×10^{-7} [dB] より小さくなった場合とした。ここで、

$$PSNR [dB] = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (6)$$

であり、 MSE は、正解画像と高解像度化した画像の平均二乗誤差である。高解像度化での端点処理の影響を除くため、上下左右 16 [画素] ずつをトリミングした 480×480 [画素] で PSNR を算出した。

まず、図 6 に、追加標本点のライン数 $Q = 4$ 、エッジ角度が 15 [度] の画像における、画像更新の回数に対する PSNR を示す。約 200 回でほぼ収束した。

また、図 7 に、エッジ角度が 15 [度] の画像にお

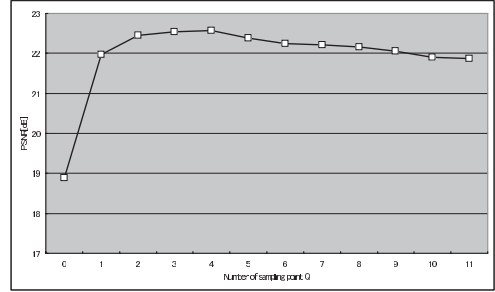


図 7 追加標本点の数に対する PSNR

Fig. 7 Variation of PSNR with the number of additional sampling points Q .

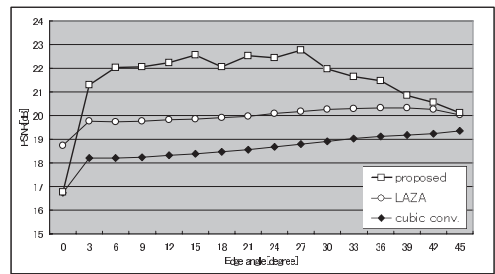
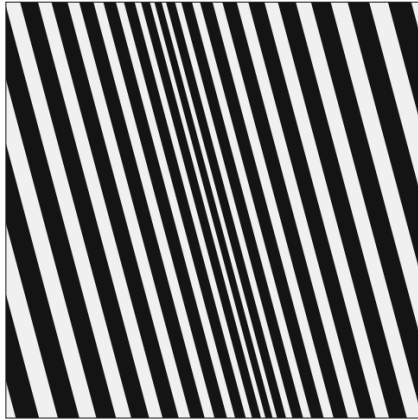


図 8 エッジの角度に対する PSNR

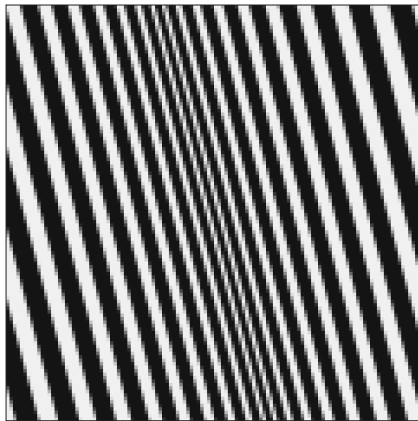
Fig. 8 Variation of PSNR with edge angle.

ける、追加標本点のライン数 Q に対する PSNR を示す。 $Q = 4$ で PSNR は最大になり、その後、減少した。これは、一定以上の Q では、再構成処理の条件式は過剰になり、反面、対応点の推定誤差の影響が増大するためである。最後に、エッジの角度に対する PSNR の変化を図 8 に示す。提案手法 (proposed) と三次畳込み内挿法 (cubic conv.)、エッジ適応型内挿法 (LAZA) [8] によって高解像度化した。エッジ適応型内挿法による拡大は、2~4 画素の平均操作であり鮮鋭感が不足するため、アンシャープマスク処理と組み合わせさせた。アンシャープマスク処理のぼかしは方形ぼかしとし、方形サイズ、鮮鋭化重みは、角度 15 [度] での PSNR が最も高くなるパラメータを用いた。

すべての角度において、提案方式 (proposed) の PSNR は、三次畳込み内挿法 (cubic conv.) よりも高く、角度が 15 [度] のときの差が最大で、4.2 [dB] の差であった。提案方式による原画像の復元効果が確認できた。一方、角度が 0 [度] と 45 [度] のときの提案方式と三次畳込み内挿法の差は小さく、また、角度が 0 [度] のときは、提案方式の PSNR はエッジ適応型内挿法を下回った。角度が 0 [度] では、低解像度



(a)



(b)

図 9 エッジ画像 (a) 正解画像, (b) 入力画像

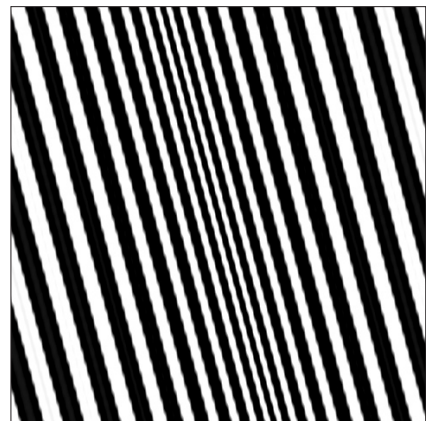
Fig. 9 Edge images. (a) True high-resolution image and (b) input low-resolution image.

画像の上下に異なるラインであっても、エッジに対して同じ位相で標本化した画素しかなく、また、角度が 45 [度] でも、多くて二つの異なる位相で標本化した画素しかない。よって、追加した標本点が、既に画素がある位置に重なってしまうために PSNR が向上しない。図 9 (a) に角度が 15 [度] のときの正解画像、図 9 (b) に入力画像を示す。図 10 (a) に三次畳込み内挿法による高解像度化画像、図 10 (b) にエッジ適応型内挿法による高解像度化画像、図 10 (c) に提案方式による高解像度化画像を示す。

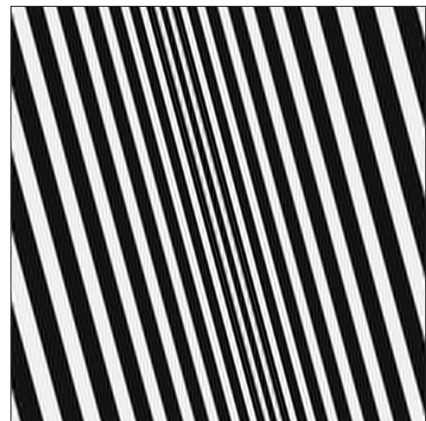
正解画像に比べて三次畳込み内挿法は全体的にぼやけ、また、折返しひずみが縦方向のジャギーとして現れた。エッジ適応型内挿法は、アンシャープマスクの効果で鮮鋭にはなっているが、ジャギーが残った。それに対し、提案方式は鮮鋭でジャギーも少なく、正解



(a)



(b)



(c)

図 10 エッジ画像での結果 (a) 三次畳込み内挿法, (b) エッジ適応型内挿法, (c) 提案方式

Fig. 10 Experimental results using edge images. Output high-resolution images using (a) the cubic convolution method, (b) LAZA and (c) the proposed method.



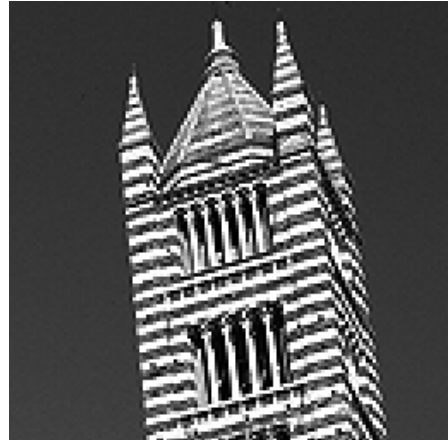
図 11 実験に用いた実写画像
Fig. 11 Photograph used in the experiments.

画像に近い。

4.2 実写画像を用いた実験

図 11 に示した実写画像 (640 × 480 [画素], 256 [階調]) を縦横 2 倍に高解像度化した。提案方式では, Sobel オペレータを水平方向と垂直方向にそれぞれ施し, 二つの出力の絶対値の和が 32 より大きい画素をエッジと判定し, 二つの大小比較でエッジの向きを判定した。注目画素ごとに上下あるいは左右 2 ラインずつ, 合計四つの対応点を検出した ($Q = 2$)。Step 6 で生成する再構成処理の初期画像は三次畳込み内挿法で生成し, Step 7 での MAP 法による画像更新は 10 回とし, パラメータ α , 対応点の検出方法, 点広がり関数は 4.1 の実験と同じにした。

図 12 に, 低解像度の入力画像, 三次畳込み内挿法による結果, 提案方式による結果の一部分を示す。入力画像の粗さは三次畳込み内挿法により解消されたが, 提案方式により全体的な鮮鋭感が向上し, 特に横線が明りようになった。別の部分を図 13 に示す。これにおいても円弧状のアーチなどで鮮鋭感の向上が認められた。一方, 自己合同性が弱い部分, 例えば図 11 の下部に小さく写った人物では改善効果は小さかった。なお, エッジ判定のしきい値は, 主観画質が良くなる値を試行錯誤により求めた。しきい値を小さくしてエッジ画素が多く選択されるようにすると, よりジャギーが軽減され鮮鋭感が高まるがアーチファクトが目立つようになった。逆に, しきい値を大きくしてエッジ画素があまり選択されないようにすると, アーチファクトは減るが鮮鋭感も弱まる傾向になった。



(a)



(b)



(c)

図 12 結果の部分 1 (a) 入力画像, (b) 三次畳込み内挿法, (c) 提案方式

Fig. 12 Comparison at the image part 1. (a) Input image. (b) Cubic convolution method. (c) Proposed method.



(a)



(b)



(c)

図 13 結果の部分 2 (a) 入力画像, (b) 三次畳込み内挿法, (c) 提案方式

Fig. 13 Comparison at the image part 2. (a) Input image. (b) Cubic convolution method. (c) Proposed method.

5. む す び

画像の自己合同性を利用し、入力される低解像度画像の画素値を同じ画像の別の点の標本値として用いる新しい再構成型超解像方式を提案した。これにより従来は動画像間での対応位置の探索で標本点の密度を増していた再構成方式を静止画像にも適用できるようにした。また、静止画像の高解像度化の実験を行い、提案方式では、三次畳込み内挿法よりも高い PSNR、及び主観的画質が得られることを示した。

今回は、画像の数～十数画素程度の狭い範囲で、その自己合同性を利用した。これに加えて、フラクタル超解像などで用いている比較的長い距離の繰り返しパターンも利用できれば、復元性能を更に高められると思われるが、被写体表面の陰影などにより、そのままでは、再構成に有効な精度の標本値は得られない。これへの取組みが今後の課題である。

文 献

- [1] R.G. Keys, "Cubic convolution interpolation for digital image processing," *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, vol.29, no.6, pp.1153–1160, 1981.
- [2] J.-K. Han and H.-M. Kim, "Modified cubic convolution scaler with minimum loss of information," *Opt. Eng.*, vol.40, no.4, pp.540–546, 2001.
- [3] S.-M. Kwak, J.-H. Moon, and J.-K. Han, "Modified cubic convolution scaler for edge-directed nonuniform data," *Opt. Eng.*, vol.46, no.10, 107001-1–107001-11, 2007.
- [4] M. Zhao, J.A. Leita, and G.de Haan, "Towards an overview of spatial up-conversion techniques," *Proc. ISCE'02*, pp.E13–E16, 2002.
- [5] J.D. van Ouwerkerk, "Image super-resolution survey," *Image Vis. Comput.*, vol.24, no.10, pp.1039–1052, 2006.
- [6] C.-H. Kim, S.-M. Seong, J.-A. Lee, and L.-S. Kim, "Winscale: An image-scaling algorithm using an area pixel model," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol.13, no.6, pp.549–553, 2003.
- [7] X. Li and M.T. Orchard, "New edge-directed interpolation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol.10, no.10, pp.1521–1527, 2001.
- [8] S. Battiato, G. Gallo, and F. Stanco, "A locally adaptive zooming algorithm for digital images," *Image Vis. Comput.*, vol.20, no.11, pp.805–812, 2002.
- [9] X. Feng and J.P. Allebach, "Segmented image interpolation using edge direction and texture synthesis," *Proc. ICIP'08*, pp.881–884, 2008.
- [10] W.T. Freeman, T.R. Jones, and E.C. Pasztor, "Example-based super-resolution," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol.22, no.2, pp.56–65, 2002.

- [11] N. Lu, "Fractal blowup," in *Fractal Imaging*, pp.217–222, Academic Press, San Diego, 1997.
- [12] *Genuine Fractals 4*, <http://www.ononesoftware.com>
- [13] S.C. Park, M.K. Park, and M.G. Kang, "Super-resolution image reconstruction: A technical overview," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol.20, no.3, pp.21–36, 2003.
- [14] 田中正行, 奥富正敏, "画素数の壁を打ち破る: 複数画像からの超解像技術," *映像学誌*, vol.62, no.3, pp.337–342, 2008.
- [15] T. Komatsu, T. Igarashi, K. Aizawa, and T. Saito, "Very high resolution imaging scheme with multiple different-aperture cameras," *Signal Process., Image Commun.*, vol.5, pp.511–526, 1993.
- [16] M. Irani and S. Peleg, "Improving resolution by image registration," *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol.53, no.3, pp.231–239, 1991.
- [17] R.R. Schulz and R.L. Stevenson, "Extraction of high-resolution frames from video sequences," *IEEE Trans. Image Process.*, vol.5, no.6, pp.996–1011, 1996.
- [18] 田中正行, 奥富正敏, "再構成型超解像処理の高速化アルゴリズムとその精度評価," *信学論 (D-II)*, vol.J88-D-II, no.11, pp.2200–2209, Nov. 2005.
- [19] A.J. Patti, M.I. Sezan, and A.M. Tekalp, "Super-resolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and nonzero aperture time," *IEEE Trans. Image Process.*, vol.6, no.8, pp.1064–1076, 1997.
- [20] 井田 孝, 松本信幸, 五十川賢造, "画像の自己合同性を利用した再構成型超解像," *信学技報*, IE2007-135, 2007.
- [21] J. Sun, J. Sun, Z. Xu, and H.-Y. Shum, "Image super-resolution using gradient profile prior," *Proc. CVPR'08*, pp.1–8, 2008.
- [22] R. Fattal, "Image upsampling via imposed edge statistics," *ACM Trans. Graphics*, vol.26, no.3, pp.95-1–95-8, July 2007.
- [23] Y.-W. Tai, W.-S. Tong, and C.-K. Tang, "Perceptually-inspired and edge-directed color image super-resolution," *Proc. CVPR'06*, vol.2, pp.1948–1955, 2006.
- [24] H. Luong, A. Ledda, and W. Philips, "An image interpolation scheme for repetitive structures," *Proc. International Conference on Image Analysis and Recognition*, pp.104–115, 2006.
- [25] H. Luong, A. Ledda, and W. Philips, "Non-local image interpolation," *Proc. ICIP'06*, pp.693–696, 2006.
- [26] 清水雅夫, 奥富正敏, "画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質," *信学論 (D-II)*, vol.J85-D-II, no.12, pp.1791–1800, Dec. 2002.

(平成 21 年 5 月 19 日受付, 9 月 28 日再受付)



松本 信幸 (正員)

平 7 東大・工・計数卒・平 9 同大大学院工学系研究科修士課程了。同年(株)東芝入社。現在,画像処理に関する研究に従事。平 21 電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)受賞。



井田 孝 (正員)

昭 62 早大・理工・電気工学卒・平 1 同大大学院理工学研究科修士課程了。同年(株)東芝入社。平 15, 及び平 17 より早大理工学部非常勤講師。平 19 より東工大大学院総合理工学研究科連携准教授。博士(工学)早稲田大学。動画像の符号化やフラクタルを利用した画像処理に関する研究に従事。平 6 年度本会学術奨励賞, 同年度電気学会研究会優秀論文発表賞, 平成 8 年度日本ファジイ学会奨励賞, 平 12 電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞), 同年画像センシングシンポジウム優秀論文賞, 平 21 電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)各受賞。IEEE 会員。