

欠落した高周波成分の推定による画像拡大の一方法

A Method for Image Enlargement with Estimation of Lacked High-frequency Components

折居英章，福島宏美，河野英昭，前田博

Hideaki Orii, Hiromi Fukushima, Hideaki Kawano, and Hiroshi Maeda

九州工業大学大学院工学研究院

Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology

あらまし：フォトタッチソフト等で広く用いられる Naive Enlargement (共一次線形補間，3次畳み込み補間など)による補間ベースの画像拡大法では，画像の高周波成分が欠落したぼけ(ブラー)のある拡大画像となる．本稿で提案するメタウェアは，欠落高周波成分を事例ベースの推定によって補填し，鮮鋭な拡大結果を得るための枠組みを提供している．

Keywords：画像拡大，自己縮小画像，線形推定，固有空間 BPLP

1 はじめに

近年，パソコンやデジタルカメラの普及，カメラ付き携帯電話のカメラ画質の向上などにより銀塩写真からの移行が進み，デジタル画像の利用頻度は急速に向上している．その中で，パソコンから携帯電話・携帯電話からパソコンへなど解像度の違う機器から機器への画像の移動を行う際に，画像の解像度変換の方法が問題となってくる．特に，過去に撮影したビデオカメラの映像やテレビ番組などの低解像映像を高解像デジタルテレビ(HDTV)で表示する場合，データの解像度と表示システムの解像度の差により，表示された画像が粗く表示されるという問題が生じる．したがって，今後高品位に画像の拡大を行う技術が必要不可欠となる．

既存の画像拡大手法の中で，特に利用頻度が高い方法として，次の方法がある．

- ニアレストネイバー法 (Nearest Neighbor Interpolation: NNI)
- バイリニア法 (Bi-linear Interpolation: BLI)
- キュービックコンボリューション法 (Cubic Convolution Interpolation: CCI)

これらは，Photoshop や Paintshop 等の多くの商用フォトタッチソフトで標準的に実装されている．ニアレストネイバー法は補間部分に最近隣の画素を用いるため，原画像のコントラストは再現されているが階段状のギザギザ(ジャギー)が目立ち，不自然さが残る．バイリニア法・キュービックコンボリューション法は平滑化を行うためジャギーの発生を防止できるが，エッジ部分の高周波成分の欠落により，ぼけ(ブラー)が生じる．

本研究では，バイリニア法やキュービックコンボリューション法のような広く知られた補間ベースの拡大画像において，欠落している高周波成分を推定し，その推定成分を重畳することで，高品位の拡大結果を得る方法を提案する．提案方法は，補間ベース拡大方法としてキュービックコンボリューション法を，高周波成分の推定方法として線形推定を想定しているが，本稿では，本手法がメタウェアからの派生手法であるという視点に立ち，より抽象化・一般化した画像拡大のためのメタウェアを提供する．

以降，2節では，画像拡大に関する補間ベースの従来手法とその問題点について述べる．3節では，欠落高周波成分の推定による画像拡大のため

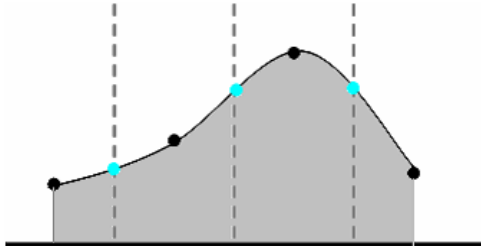


図 1: キュービックコンボリューション (CCI) 法による補間

のメタウェアについて述べ、4 節で、メタウェアから派生した具体的実現例として、新しい画像拡大アルゴリズムを提案する。5 節では、提案手法の有効性を実験により、定量的に評価する。最後に 6 節で、結論と今後の課題について述べる。

2 補間ベース画像拡大手法

画像拡大に関する従来手法は、主に「補間」によるものが広く用いられている。以下では、その代表的な手法であるキュービックコンボリューション法について紹介し、特長と問題点を述べる。

2.1 キュービックコンボリューション法

補間画素の周辺のピクセル値 16 個の重み付け平均をして補間画素の値を求める方式である。計算量が多いため時間はかかるが、バイリニア法と同様にジャギーは生じず、またバイリニア法に比べ観測点の数が多いため、より精度の高い拡大画像を得ることが出来る。現在最も一般的に用いられている方法である。図 1 は、キュービックコンボリューション法による補間の様子を示したものである。また、図 2 は、キュービックコンボリューション法による拡大結果の一例である。

2.2 補間ベース画像拡大手法の問題点

ニアレストネイバー法ではジャギーが発生する。バイリニア法とキュービックコンボリューション



理想画像 キュービックコンボリューション法

図 2: CCI 法による拡大画像

法では、平滑化を行うためにエッジの高周波成分が消失し、必然的にブラーが発生する。観測点の数の違いから、キュービックコンボリューション法はバイリニア法に比べブラーを抑えられているが、基本的な原理は同じなため高倍率での拡大やテクスチャの細かいものの拡大ではやはりブラーが生じてしまう。

3 欠落高周波成分の推定による画像拡大のためのメタウェア

3.1 本稿でのメタウェアの捉え方

本稿では「メタウェア」を設定された課題や問題に対するアプローチの方向性を示すものと捉える。すなわち、その方向性に従って派生した様々なアルゴリズムを包含する、より抽象的・一般的な考え方をさす。

3.2 メタウェアの概要

本稿で提案するメタウェアは、広く普及している補間ベース画像拡大法の欠点である欠落高周波成分を事例ベースの推定によって補填し、鮮鋭な拡大画像を得る枠組みを提供する。図 3 に、本稿で提供するメタウェアが方向付けするアプローチの図式的説明を示す。

本メタウェアは、2つのフェーズから成り、それぞれ学習フェーズ、実行フェーズと呼ぶことにする。学習フェーズにおいては、事前に低解像画像と高解像画像の組を用意し、それらの関係性が

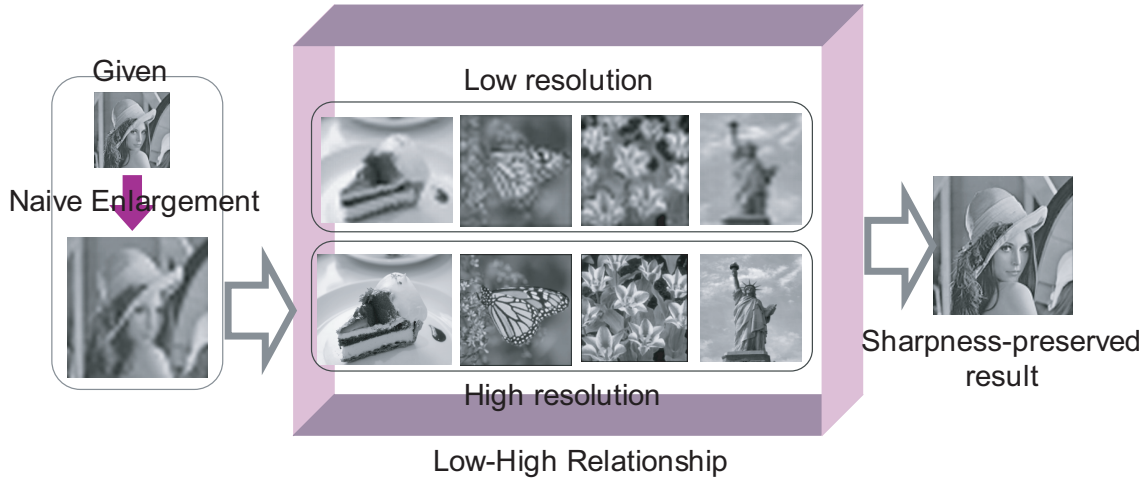


図 3: 欠落高周波成分の推定による画像拡大のメタウェア

ら導かれる欠落高周波成分を出力とするような事例ベース推論エンジンを学習により構築する．実行フェーズにおいては，補間ベース画像拡大法によって得られる低解像度の拡大結果から，補填されるべき高周波成分を構築した推論エンジンによって求め，補間ベースによる拡大結果に重畳することで，高品位の拡大結果を得る．

4 固有空間 BPLP を用いた画像拡大法

本節では，前節で述べたメタウェアに基づいた具体的な実現例について述べる．

4.1 提案法の概要

高周波成分の推定を行うにあたり，従来画像補完の技術として用いられていた固有空間 BPLP の技術を援用する．

本研究では，補間ベース画像拡大法の中でも比較的良好的なキュービックコンポリューション法で得られる拡大画像を基に，固有空間 BPLP を用いて，失われた高周波成分の推定を行う．推定した高周波成分をキュービックコンポリューション法によって得られた拡大画像に重畳することで，

エッジの先鋭性が再現され，ブラーの少ない鮮明な拡大画像が得られる．

4.2 固有空間 BPLP

4.2.1 固有空間 BPLP の概要

ここでは，天野らが提案した固有空間 BPLP 法 [3] について概要を説明する．データ x_1, \dots, x_N を要素にもつ N 次元のベクトル

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \quad (1)$$

を一つのサンプルとし， M 個のベクトルデータ群を学習サンプルとして用意する．このような学習サンプルに対して共分散行列を計算し， D 個 ($D \leq M$) の固有ベクトル $\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_D\}$ を求める．それらを基底とする固有空間への射影行列 E^T を

$$E^T = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_D]^T \quad (2)$$

とおく．ここで，補間するべき失われたデータ（欠損データ）をもつベクトル x' が与えられたとき， $N \times N$ 次元単位行列のうち対応する部分だけが 0 である欠損行列

$$\Sigma = \text{diag}(1, 1, \dots, 0, \dots, 1) \quad (3)$$

を定義する．そしてデータの欠損を

$$\tilde{x} = \Sigma x \quad (4)$$

とみなし，欠損データを含むベクトル \tilde{x} から欠損を含まない真のベクトル x を推定する．具体的には，推定ベクトル \hat{x} は以下の式で近似的に求めることができる．

$$\hat{x} \cong E (E^T \Sigma E)^{-1} E^T \tilde{x} \quad (5)$$

本稿では，オリジナルのBPLPを改良した，線形推定理論に基づくBPLP[4]を用いているが，基本的な原理は上述したとおりである．

4.3 固有空間BPLPを用いた画像拡大法

本節では，固有空間BPLPの画像拡大への応用について述べる．

まず，原画像 I_H にローパスフィルタを施し，縮小を行う．このとき，サンプリング定理を考慮せずに縮小を行うとエイリアシングが発生する恐れがある．このエイリアシングを防ぐためにローパスフィルタを施し，その後縮小を行う．本稿では，この画像を自己縮小画像と呼ぶ．自己縮小画像をキュービックコンボリューション法を用いて，もとのサイズに拡大し，低解像画像 I_L を得る．原画像 I_H と低解像画像 I_L の差をとり，拡大によって消失した高周波成分 I_{fH} を得る．

$$I_{fH} = I_H - I_L \quad (6)$$

また，低解像画像 I_L に対して1次微分を行いエッジを検出する．エッジが検出されたピクセルを含むウィンドウのみに着目し，学習サンプルを作成する．低解像画像 I_L と高周波成分 I_{fH} からそれぞれウィンドウサイズで切り出したもののペアを学習サンプルとし，学習サンプル列 X を作成する．

$$x_i = \begin{bmatrix} I_L \\ I_{fH} \end{bmatrix} \quad (7)$$

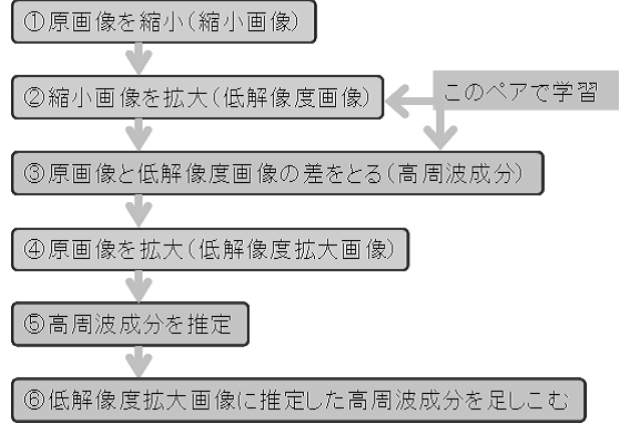


図 5: フローチャート

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_N] \\ = \begin{bmatrix} I_{L_1} & I_{L_2} & \dots & I_{L_N} \\ I_{fH_1} & I_{fH_2} & \dots & I_{fH_N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

次に，キュービックコンボリューション法を用いて原画像 I_H の拡大を行い，低解像度の拡大画像 I_{L_2} を得る．推定すべき拡大画像の高周波成分を欠損領域と考え0とし，低解像度の拡大画像 I_{L_2} とペアにしたものを \tilde{x} とする．このときも先に述べたとおり，低解像度の拡大画像 I_{L_2} に対して1次微分を行い，エッジが検出されたピクセルを含むウィンドウのみを画像ベクトルとする．

$$\tilde{x}_i = \begin{bmatrix} I_{L_2} \\ \emptyset \end{bmatrix} \quad (9)$$

この \tilde{x} において固有空間BPLPを適用し，欠損領域とした高周波成分を推定する．

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{L_2} \\ \hat{I}_{fH_2} \end{bmatrix} \cong E_p A^{-1} E_p^T \tilde{x}_i \\ = E_p A^{-1} E_p^T \begin{bmatrix} I_{L_2} \\ \emptyset \end{bmatrix} \quad (10)$$

推定した高周波成分をキュービックコンボリューション法を用いて得た低解像度の拡大画像に重畳した画像を，本研究の提案手法によって得られる拡大処理画像 I_{H_2} とする．

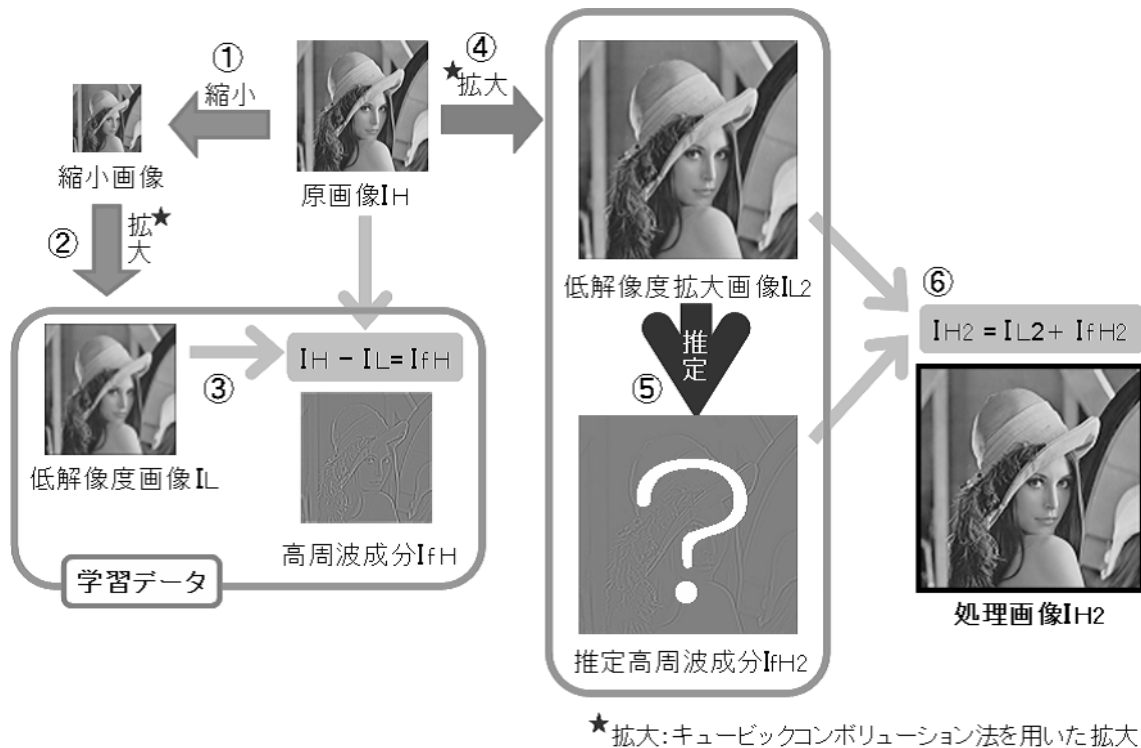


図 4: 提案手法の概要

5 実験

提案手法の有効性を確認するために、キュービックコンボリューション法 (CCI) [1] と Greenspan らの Nonlinear Extrapolation 法 (NE) [2] を従来手法として比較する。提案手法のパラメータである画像パッチのサイズは予備実験により 9×9 とした。

図 6 に示すサイズ 256×256 、256 階調カラー画像 4 種類に対して、低域通過フィルタを施した後、縦横それぞれ $1/2$ 倍し、CCI、NE、提案手法のそれぞれによって 2 倍に拡大する。拡大画像と元画像の平均二乗誤差 (MSE) によって、拡大画像の画質評価を行う。各画像に対する各手法の MSE を表 1 に示す。当然の結果であるが、補間に基づく拡大法である CCI に対しては、補間結果に推定高周波成分を重畳する NE や提案手法が有利であることが確認できる。次に、MSE の改善が視覚的な意味でいかに反映されているかを示すために、図 7 に "Butterfly" の拡大結果の一部

表 1: 提案法の性能評価 (MSE)

| | CCI | NE | 提案手法 |
|--------------|-------|-------|-------|
| Butterfly | 90.4 | 81.2 | 53.5 |
| Flower | 59.1 | 51.2 | 31.7 |
| Ship | 151.4 | 150.7 | 123.1 |
| Illustration | 58.7 | 45.5 | 24.0 |

を切り出した画像を示す。CCI に比べて NE、提案手法ではともに画質が改善されていることが確認できる。しかしながら、提案手法の方が視覚的にくっきりした画像になっており、元画像のエッジ成分を従来法よりも良好に再現できていることがわかる。



図 6: テスト画像

6 おわりに

本稿では、欠落高周波成分の推定による画像拡大のメタウェアを提案し、その具体的実現例として、新しい画像拡大法を開発した。本画像拡大法では、キュービックコンボリューション法によって得られた拡大画像を基に、拡大によって欠落した高周波成分を固有空間 BPLP 法を用いて推定し、拡大画像に重畳することで、より高解像度の拡大画像を得ることが可能である。提案手法により得られた拡大結果画像および従来手法に対して MSE による評価を行い、提案手法が理想画像により近い拡大結果を得ることが出来ることを確認した。また、目視評価においてもブラーを抑えることが出来ていることが確認された。今後、さらに良好な結果を得るために、高周波成分の推定の再現率向上を図ることが挙げられる。

参考文献

- [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] Hayit Greenspan, Charles H. Anderson, and Sofia Akber, "Image Enhancement By Nonlinear Extrapolation in Frequency Space," IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, VOL. 9, NO. 6, June 2000.
- [3] 天野 敏之, 佐藤 幸男, "固有空間法を用いた BPLP による画像補間," 電子情報通信学会論文誌 D-II Vol.J85-DII No.3 pp.457-465, 2002.
- [4] 田中 章, 宮腰 政明, "線形推定理論に基づく固有空間 BPLP 法の改善," 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J90-D No.10 pp.2840-2847, 2007.

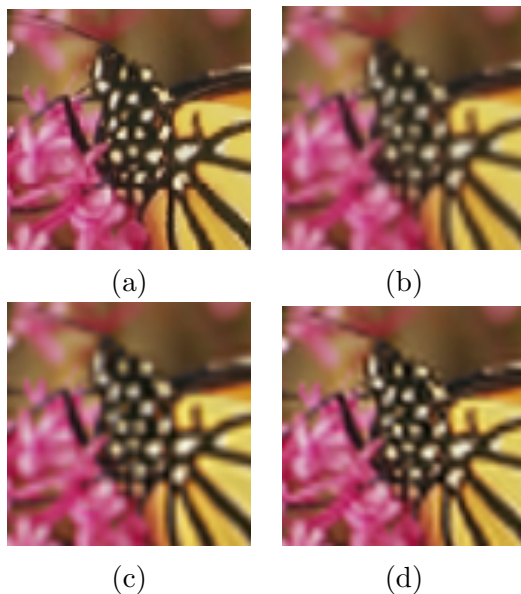


図 7: 画像 "Butterfly" の拡大結果 (a) 元画像 (b) CCI (c) NE (d) 提案手法