

## ランダムにサブピクセルシフトした低解像度画像を用いた 反復逆投影法による超解像再構成

美齊津 宏幸<sup>†</sup> 稲村 實<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京電力株式会社 技術開発研究所 〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

<sup>‡</sup> 群馬大学工学部 〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

E-mail: <sup>†</sup> misaizu.h@tepcoco.jp, <sup>‡</sup> inamura@el.gunma-u.ac.jp

あらまし 超解像 (SR) 再構成は複数の低解像度画像から 1 つの高解像度画像を復元する方法であり、様々な方法が提案されている。反復逆投影法 (IBP) は X 線 CT 画像の再構成に使用されており、SR 再構成法の中で比較的アルゴリズムが簡易で SR 性能が良い方法として知られている。従来、IBP 法で解像度を N 倍にしたい場合、縦・横方向に 1/N ピクセルづつ位置ずれのある  $N \times N$  枚の観測低解像度画像を必要とした。実際に入手できる観測画像はカメラの手ぶれなどによる制御できない位置ずれがあり、枚数も  $N \times N$  未満な場合がある。本論文では、ランダムに位置ずれした不十分な数の観測画像を用いた IBP 法による SR 再構成について、予備補間することで従来の問題を解決する手法を提案する。本手法は、観測画像の高解像度空間への配置、ランダムな位置ずれの離散化点への再配置、離散化点の欠落の 2 次元補間、低解像度画像の再作成、などの前処理を施すことにより IBP アルゴリズムを用いた SR 再構成を可能にする。本手法により、観測画像が全て揃った場合と同程度の画質が得られることを確認した。

キーワード 超解像, 再構成, 反復逆投影法, 補間

## Super-resolution reconstruction using randomly subpixel shifted image sequence by iterative back-projection

Hiroyuki MISAIZU<sup>†</sup> and Minoru INAMURA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> R&D Center, Tokyo Electric Power Company

4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-8510 Japan

<sup>‡</sup> Faculty of Engineering, Gunma University 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryuu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

E-mail: <sup>†</sup> misaizu.h@tepcoco.jp, <sup>‡</sup> inamura@el.gunma-u.ac.jp

**Abstract** Super-resolution (SR) reconstruction is the method of restoring one high resolution image from two or more low resolution images, and various methods are proposed. In the SR reconstruction method, iterative back-projection (IBP) currently used for reconstruction of an X ray CT image has comparatively simple algorithm, and has a sufficient performance. Conventionally, when resolution is raised N times by the IBP method, observation images of  $N \times N$  sheets with a 1/N-pixel position shift in a horizontal and a vertical direction are needed. The actual observation images may have the uncontrollable position shift by blurring, and number of sheets may also be under  $N \times N$ . In this paper, the method of solving the conventional problem is proposed by preliminary interpolation about IBP SR reconstruction using observation images that have an insufficient number and randomly position shift. By our proposed method, conventional SR reconstruction using IBP algorithm become possible by having arrangement to the high resolution space of observation images, rearrangement to a discrete point of a random position shift, 2-dimensional interpolation to lack of discrete points, and re-creation of low resolution images. The results by our proposed method show that quality of image comparable as the case where there are all the observation images are obtained.

**Keyword** Super-resolution, Reconstruction, Iterative back-projection, Interpolation

## 1. まえがき

超解像 (SR : Super-resolution) 再構成とは、複数の位置ずれのある低解像度画像から 1 枚の高解像度画像を再構成する処理方法である。その際、低解像度画像それぞれの位置ずれは 1 ピクセル以下(サブピクセル)である必要がある。SR に関してはこれまでも多くの方法が報告されている[1]。初期には画像の空間周波数に着目した手法により SR が始められた[2]。この手法は、サンプリング始点がそれぞれ異なるサブピクセルだけずれた低解像度画像を複数使うことで、それらの折り返し(エイリアシング)成分から高周波成分を復元する方法である。観測画像を周波数領域に変換し、ターゲットとなる高解像度画像の周波数成分との関係を示す連立方程式を解いた後に逆変換して SR 画像を得る。周波数領域における SR は比較的計算量が少ないため高速に SR 画像が生成できるといった利点がある。

近年、空間領域の SR 再構成について数多くの方法が提案されている。空間領域の SR 再構成法では、観測された低解像度画像から初期の高解像度画像を推定し、その高解像度画像からカメラモデルに基づいて低解像度画像を推定する。推定した低解像度画像と観測した低解像度画像との誤差が最小になるように高解像度画像を更新する。この誤差が収束するまで更新処理を繰り返してターゲットとなる高解像度画像を得る。空間領域 SR として代表的な方法は、反復逆投影法 (IBP : Iterative backward projection) [3][4], MAP (Maximum a posteriori) 法[5], POCS (Projection onto convex sets) 法[6], ML (Maximum likelihood) 法 [7] である。IBP 法は X 線 CT (Computer tomography) 画像の再構成に使用される逆投影法を応用した方法であり、推定した低解像度画像と観測した低解像度画像との誤差を高解像度化し、SR 画像に逆投影する操作を反復することで最終的な SR 画像を得る方法である。MAP 法はベイズ推論に基づいた確率論的な方法で、高解像度画像に対するある先見情報を利用して事後確率を最大化する最適化問題として SR 画像を推定する方法である。POCS 法は高解像度画像と低解像度画像の画素値に関して連立方程式を作成し、その方程式を逐次的に解くことにより SR 画像を推定する方法である。ML 法は最尤推定の原理に基づく方法であり、MAP 法の特別な場合であると言える。

本研究では、計算量が多いがアルゴリズムが比較的簡単で性能の良い IBP 法による SR 再構成に関し、カメラの手ぶれなどによる制御できないランダムな位置ずれのある複数の観測低解像度画像を用いた場合の処理法を提案する。

従来、IBP 法で解像度を N 倍にする場合、縦・横方向

に 1/N ピクセルずつ位置ずれのある  $N \times N$  枚の観測低解像度画像を必要とした。提案手法では、観測画像の数が  $N \times N$  未満で、その位置ずれがランダムな場合の SR 再構成を考える。まず観測画像の幾何学的補正を実施し、高解像度空間において位置合わせを行い、観測画像のそれぞれの画素を高解像度空間の所定の座標に配置することでランダムにサンプリングされた高解像度の画素として扱う。次に高解像度空間に配置された画素を、高解像度画像の 1 ピクセル(低解像度画像における 1/N ピクセル)に相当する位置を離散化点として、離散化点に再配置するように補間する。観測画像が  $N \times N$  未満であることから、離散化点には欠落した部分ができ、この欠落部分を 2 次的に補間することにより初期の高解像度画像ができる。この高解像度画像から正確に 1/N ピクセルだけ位置ずれした  $N \times N$  枚の低解像度画像を作成することができ、以降通常の IBP による SR 再構成が可能となる。

観測画像のサブピクセルレベルでの位置合わせや回転量の推定に関しても様々な方法が報告されており、その中でも特に位相限定相関法[8][9]が優れていると考えられるため、本論文ではこの方法を利用する。

## 2. IBP 法概要

IBP 法は Irani と Peleg によって提案された SR 再構成法であり、推定した低解像度画像と観測した低解像度画像との誤差を高解像度化し、SR 画像に逆投影する操作を反復することで最終的な SR 画像を得る方法である。観測低解像度画像を SR 再構成により N 倍の高解像度画像にする処理を考える。観測画像を  $g_k(x', y')$  とする。ここで、 $x', y'$  は低解像度画像の座標、 $k=1, 2, \dots, K$  で、 $K=N \times N$  (観測画像の数) である。画像劣化モデルは以下の(1)式で表される。

$$g_k(x', y') = \sigma_k \{h\{T_k(f(x, y))\} + \eta_k(x, y)\} \quad (1)$$

ここで、 $f$  はオリジナル高解像度画像(または離散化された物体像)、 $h$  はぼけ関数、 $\sigma_k$  は低解像度化オペレータ、 $\eta_k$  は付加ノイズ、 $T_k$  は  $f$  から  $g$  への幾何学的変換である。この画像劣化モデルの逆変換が SR 再構成である。IBP アルゴリズムではこの過程を反復的に実行する。

(1)式の画像劣化モデルにより作成された  $K$  枚の低解像度画像、即ち観測画像は  $g_k$  であり、 $g_k$  を 0 次補間により N 倍に高解像度化し、位置ずれに応じて重ね合わせることで初期推定高解像度画像  $f^{(0)}$  が作成される。 $g_k$  を 0 次補間し、サブピクセルの位置ずれをもって重ね合わせることによりエイリアシングが生じ、折り返し周波数が付加される。次に  $f^{(0)}$  から  $K$  枚のサブ

ピクセルシフトした低解像度画像  $g_k^{(0)}$  を作成し、観測画像  $g_k$  との差を取る。  $g_k^{(0)}$  と  $g_k$  が同一であれば  $f^{(0)}$  はオリジナル画像  $f$  と等しいことになる。また、  $f^{(0)}$  の推定誤差が大きいほど  $g_k^{(0)}$  と  $g_k$  との差は大きくなる。そこで、この差分画像  $\varepsilon_k^{(0)} = g_k - g_k^{(0)}$  を 0 次補間により高解像度化し、位置ずれに応じて重ね合わせて  $f^{(0)}$  に加算することで更新された高解像度画像  $f^{(1)}$  を得る。この処理を以下の(2)式で示す誤差関数が十分に小さくなるまで繰り返すことで、折り返し周波数成分から適切な高周波成分を復元する。

$$e^{(n)} = \sqrt{\sum_k \sum_{(x',y')} \{g_k(x',y') - g_k^{(n)}(x',y')\}^2} \quad (2)$$

$n$  回反復計算をして得られる  $g_k^{(n)}$  は以下の(3)式で表される。

$$g_k^{(n)} = \{T_k(f^{(n)} * h)\} \downarrow s \quad (3)$$

ここで  $\downarrow s = \sigma_k$  は  $1/s$  の低解像度化オペレータ、  $*$  は畳み込みオペレータである。高解像度画像へ更新する反復計算は以下の(4)式で表される。

$$f^{(n+1)} = f^{(n)} + \frac{1}{k} \sum_{k=1}^K T_k^{-1} \{ \{ (g_k - g_k^{(n)}) \uparrow s \} * p \} \quad (4)$$

ここで  $\uparrow s$  は  $s$  倍の高解像度化オペレータ、  $p$  は  $h$  と  $T_k$  によって決定される逆投影オペレータである。位置ずれのある低解像度画像を重ね合わせることは付加的なノイズを平均化する効果があり、結果的にノイズを低減させる。IBP において、オリジナル画像  $f$  は未知であるが、(4)式に従って反復回数  $n$  を増やすことで  $f^{(n)}$  を  $f$  に近づけることができる。IBP 法はアルゴリズムが単純であり、指数関数的に収束するため、少なくとも 10 回程度の反復回数で十分な画質が得られるとの報告もされている[4][10][11]。

IBP 法で解像度を  $N$  倍にする場合、観測サブピクセルシフト低解像度画像系列は  $K$  枚必要である。しかし実際の観測において観測画像が全て揃うとは限らない。そこで、観測低解像度画像が全て揃った場合と欠落がある場合における IBP 再構成法をシミュレーションにより比較する。図 1(a)はオリジナル画像であり、解像度は  $256 \times 256$  である。この画像から観測画像を模擬して解像度  $1/4$  である低解像度画像を 16 枚作成する。それぞれの観測画像は縦・横方向に  $1/4$  ピクセルづつ(高解像度画像の  $1$  ピクセルづつ)位置ずれがある、サブピクセルシフト画像系列となっている。そのうちの 1 枚を図 1(b)に示す。この低解像度画像系列から IBP 法により求めた SR 高解像度画像(反復回数 20 回)を図 1(c)に示す。オリジナル画像との差異を評価する尺度

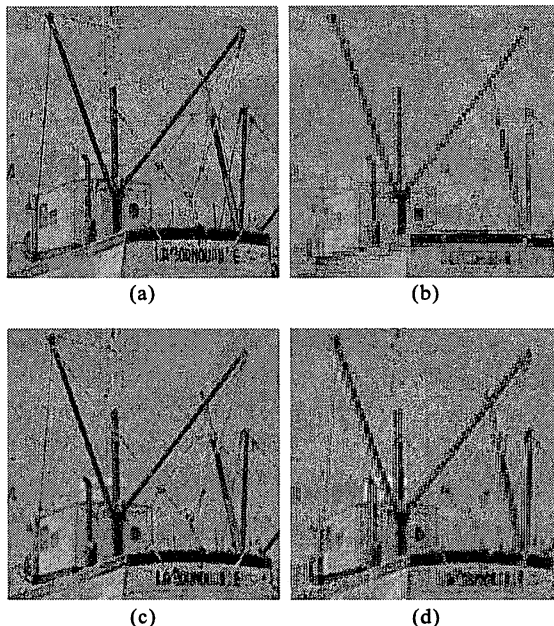


図 1 従来の IBP 法による SR 再構成。(a)はオリジナル画像、(b)は解像度  $1/4$  の低解像度画像、(c)16 枚の低解像度画像を用いた IBP 法による SR 高解像度画像、(d)は 8 枚の低解像度画像を用いた SR 高解像度画像

である PSNR(Peak signal to noise ratio) は 33dB と、十分に性能の良い SR 再構成結果となる。尚、PSNR は以下の式で表される。

$$PSNR = 10 \log \left( \frac{M \cdot L^2}{\sum_{i,j} (F(i,j) - Y(i,j))^2} \right) \quad (5)$$

ここで、  $F(i,j)$  はオリジナル画像の画素値、  $Y(i,j)$  は SR 画像の画素値、  $L$  は階調数、  $M$  は画素数である。

次に、観測画像が 8 枚である場合の IBP 法による SR 高解像度画像(反復回数 5 回)を図 1(d)に示す。欠落している観測画像の位置により結果に多少の相違は生ずるが、超解像しきれないため所々にブロック歪が見られ、PSNR は 23dB 程度の不十分な性能の SR 再構成結果となる。また、反復回数を重ねると不適切な高周波成分が増えるために画質が劣化する。観測画像が 16 枚の場合は反復回数 20 回が最適であり、8 枚の場合は 5 回が最適であった。

### 3. 予備補間処理した IBP 法

観測低解像度画像の  $N$  倍の解像度である高解像度画像を得る SR 再構成において、観測画像の数が  $N \times N$  未満で、その位置ずれがランダムである場合を考える。

本論文では、観測画像の幾何学的補正は実施済みであるか、または単純な平行移動のみが存在する場合を考えるものとする。まず図2の右側に示すように、高解像度空間において観測画像の位置合わせを行う。観測画像のそれぞれの画素を高解像度空間の所定の座標に配置することでランダムにサンプリングされた高解像度画像の画素として扱う。この際、観測画像の画素面積と高解像度空間における画素面積を同じであるとして扱い、解像度の相違により各画素の位置をとびとびに配置する。次に図2の左側に示すように、高解像度空間に配置された画素を高解像度画像の1ピクセル（低解像度画像における $1/N$ ピクセル）に相当する位置を離散化点として、離散化点に再配置するように2次元補間する。観測画像の数は $N \times N$ 未満であることから、離散化点には欠落した部分ができる。この欠落した部分を2次元的に補間してできる高解像度画像を予備高解像度画像と呼び、 $f_p(i,j)$ で表すことにする。また、この処理を予備補間処理と呼ぶことにする。

通常、観測低解像度画像の1ピクセルにおける画素値は、ターゲットとなる高解像度画像の $N \times N$ ピクセルにおける画素値の平均値に相当する。従って、 $1/N$ ピクセルずつ規則正しくサブピクセルシフトした観測画像により高解像度空間に作成した予備高解像度画像の離散化点において、隣接する離散化点どうしである $f_p(k,l)$ と $f_p(k \pm 1, l \pm 1)$ は互いに空間的な移動平均になっている。即ち予備高解像度画像と $N \times N$ の移動平均フィルタを通したオリジナル画像とは等価になっている。そのため隣接する離散化点どうしは相関が高く、従って欠落した離散化点を補間することは妥当な方法であると言える。同様に、観測画像の画素を離散化点

へ再配置する際の補間も妥当であると言える。予備補間処理に関して、オリジナル画像の周波数特性などによって最適な補間方法は相違すると考えられる。例えば観測画像数が比較的多い場合はバイリニア補間で十分であるが、観測画像数が少ない場合やオリジナル画像の周波数特性が高い（と推測される）場合はバイキュービック補間やスプライン補間が有効であると考えられる。

高解像度空間に離散化点を設けず、連続的な値として予備補間処理する方法もある。観測画像の画素面積を $1/(N \times N)$ にして該当する位置に離散的に配置し、その値から2次元補間を行って連続量を算出する。または観測画像の1画素を点として高解像度空間に配置し、2次元補間して連続量を算出する。この連続的な高解像度空間を、ターゲットとする解像度に離散化する。離散化する際にはサンプリングではなく、相当する画素面積の平均値とする。また、高解像度空間を完全な連続面として扱うことは実際には困難なので、予備高解像度画像の数～数十倍の解像度で高解像度空間を定めて予備補間し、予備高解像度画像の解像度まで落とす。この場合、再配置に伴う補間処理はなくなるが、予備補間処理のデータ数は非常に多くなってしまふ。

次に、予備高解像度画像から正確に $1/N$ ピクセルずつ位置ずれた $N \times N$ 枚の初期低解像度画像 $g_{pq}$ を作成する。ここで、添字の $p, q = 0, 1, \dots, N-1$ はそれぞれ行方向、列方向の位置ずれを表す。予備高解像度画像の離散化点 $f_p(i,j)$ を低解像度画像の各画素に当てはめることで初期低解像度画像系列を作成する。例えば $N=4$ の場合、 $g_{00}(m,n)=f(4k,4l)$ 、 $g_{01}(m,n)=f(4k,4l+1)$ 、 $\dots$ 、 $g_{33}(m,n)=f(4k+3,4l+3)$ の16枚が作成される。この $g_{pq}$ をそれぞれ0次補間により $N$ 倍に高解像度化し、位置ずれに応じて重ね合わせることで初期高解像度画像 $f^{(0)}$ が作成される。以降は従来のIBPによるSR再構成が可能になる。

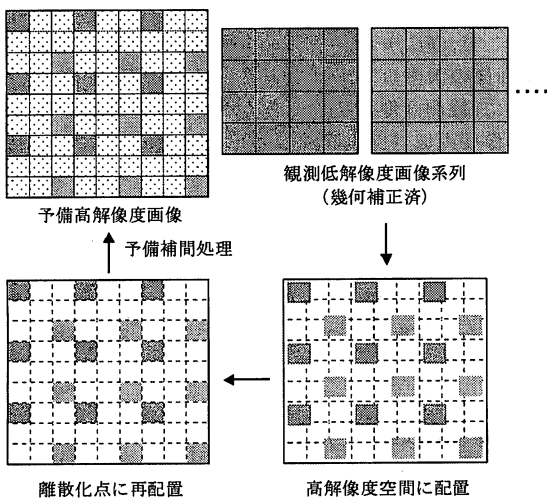


図2 予備補間処理の概念図

#### 4. サンプル画像による実験

観測低解像度画像の $N$ 倍の解像度である高解像度画像を得る場合において、観測画像の数が $(N \times N)/2$ 以下と不十分であり、その位置ずれがランダムである場合のSR再構成に関して、従来のIBP法と提案手法によるIBP法をシミュレーションにより比較する。観測低解像度画像から分解能が4倍の高解像度画像をSR再構成する場合を考える。図3(a)に示すオリジナル画像の解像度は $256 \times 256$ である。観測画像を模擬し、オリジナル画像の $4 \times 4$ ピクセル内でランダムな位置ずれのある解像度 $1/4$ 、即ち $63 \times 63$ の低解像度画像を8枚生成する。低解像度画像のうちの1つを図3(b)に示す。低解像度画像は、オリジナル画像の $4 \times 4$ ピクセルの平

均値を1ピクセルの画素値としている。これらの位置ずれは、予備高解像度画像への補間、即ち予備補間処理の有効性のみを評価するため、離散化点単位（オリジナル画像の1ピクセル単位）であるものとして、その範囲内でランダムに生成した。図3(c)に8枚の低解像度画像を用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像（反復回数5回）を示す。図3(c)のPSNRは21dBであり、ブロック歪が目立つ画像である。図3(d)に提案方法である、予備補間処理したIBP法によるSR高解像度画像（反復回数20回）を示す。図3(d)のPSNRは30dBであり、十分に満足できる画質である。図3(d)の予備補間処理は双3次スプライン補間を用いた[12][13]。

次に、観測低解像度画像が4枚の場合について図4に示す。オリジナル画像および低解像度画像はそれぞれ図3(a), (b)と同様である。低解像度画像を4枚用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像を図4(a)に、予備補間処理したIBP法によるSR高解像度画像を図4(b)に示す。図4(a)のPSNRは15dBであり、図3(c)よりもさらにブロック歪が目立つ画像である。図4(b)はPSNRが27dBであり、周辺部にノイズはあるものの十分に満足のできる画質である。また、比較のために図4(c)に16枚の低解像度画像を用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像（反復回数20回）を示す。図4(c)のPSNRは31dBである。以上のように、観測画像が必要とする数の1/4であっても全て揃った場合と遜色の無い結果となり、本提案手法の有効性が証明された。

### 5. むすび

本論文では、ランダムに位置ずれした不十分な数の観測画像を用いたIBP法によるSR再構成について、予備補間処理をすることで観測画像が全て揃った場合と同等な性能となる手法を提案した。

従来のIBP法では、観測低解像度画像の数が少なくなるほどSR再構成は良い効果が出ず、ブロック歪が目立つようになる。反復回数をむやみに増やしても効果が無いばかりか、かえってノイズ成分が増えて画質が劣化する。IBP法は低解像度画像を0次補間で高解像度化し、位置ずれを考慮して重ね合わせることで折り返し周波数として高周波成分が付加され、反復計算により周波数特性を適切にしていく方法であるため、低解像度画像の数が足りないと高周波成分の情報が適切ではなくなり、反復計算の効果が低下してしまう。本提案の手法では、高解像度空間の離散化点に配置した観測低解像度画像は隣接する画素どうしが移動平均の関係にあり、相関が高いということを利用して予備

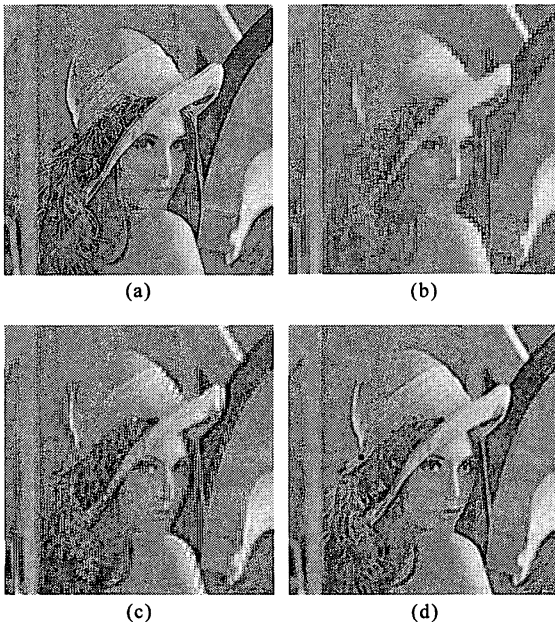


図3 予備補間処理したIBP法によるSR再構成。(a)はオリジナル画像、(b)は解像度1/4の低解像度画像、(c)は8枚の低解像度画像を用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像、(d)は本提案によるSR高解像度画像

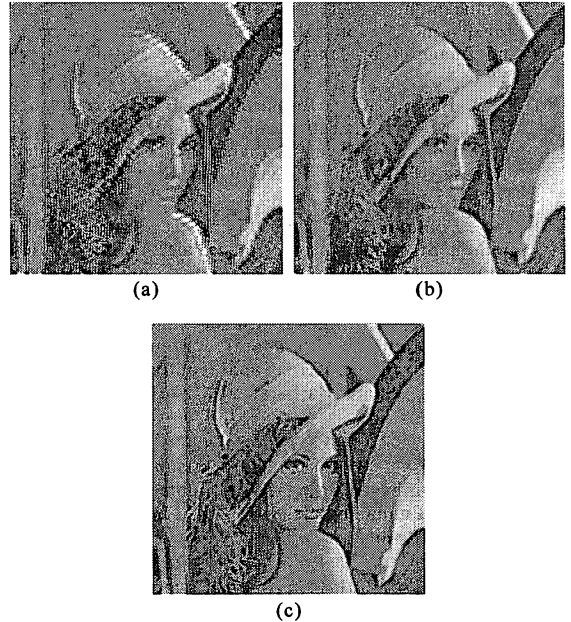


図4 予備補間処理したIBP法によるSR再構成。(a)は4枚の低解像度画像を用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像、(b)は本提案によるSR高解像度画像、(c)は16枚の低解像度画像を用いた従来のIBP法によるSR高解像度画像

補間処理することにより、欠落した観測画像を合理的に作り出している。その結果、観測画像の数が 1/4 程度であっても、必要とする全ての観測画像が揃った場合における従来の IBP 法と同程度の SR 再構成性能となる。これら提案手法に関し、サンプル画像を用いた実験により有効性を確認した。

今後は、観測画像を高解像度空間に配置した後、 $N \times N$  ピクセル単位か、またはそれをいくつか合わせた小ブロック単位で平面回帰して予備高解像度画像を作成した後に IBP 法で SR 再構成する方法に関して有効性を確認したいと考えている。

## 文 献

- [1] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang, "Super-resolution image reconstruction: A technical overview," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.20, no.3, pp.21-36, May 2003
- [2] T. S. Huang, and R. Y. Tsai, "Multi-frame image restoration and registration," in *Advances in Computer Vision and Image Processing*, vol.1, pp.317-339, JAI Press Inc., 1984
- [3] M. Irani, and S. Pereg, "Improving resolution by image registration," *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, vol.53, no.3, pp.231-239, May 1991
- [4] M. Irani, and S. Pereg, "Motion analysis for image enhancement: Resolution, occlusion, and transparency," *Journal of Visual Communications and Image Representation*, vol.4, pp.324-335, Dec 1993
- [5] R. C. Hardie, K. J. Barnard, and E. E. Armstrong, "Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images," *IEEE trans. IP*, vol.6, no.12, pp.1621-1633, 1997
- [6] D. C. Youla, and H. Webb, "Image restoration by the method of convex projections: Part1-theory," *IEEE Trans. on Med. Img.*, vol.MI-1, no.2, pp.81-94, Oct. 1982
- [7] A. Lorette, H. Shekarforoush, and J. Zarubia, "Super-resolution with adaptive regularization," in *Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing*, Santa Barbara, CA, vol.I, pp.169-172, Oct. 1997
- [8] K. Takita, T. Aoki, Y. Sakai, T. Higuchi, K. Kobayashi, "High-accuracy subpixel image registration based on phase-only correlation," *IEICE Trans. on Fundamentals*, vol.E86-A, no.8, Aug. 2003
- [9] 萩原 瑞木, 川又 政征, "位相限定相関法を用いた画像のサブピクセル精度の位置ずれ検出," *信学技報*, CAS2001-11, pp.79-86, June 2001
- [10] Y. Lu, M. Inamura, "Super-resolution of undersampled and subpixel shifted image sequence by pyramid iterative back-projection," *IEICE Trans. on Inf. and Syst.*, vol.E85-D, no.12, pp.1929-1937 Dec. 2002
- [11] Y. Lu, M. Inamura, "Pyramid-based super-resolution of the undersampled and subpixel shifted image sequence," *International Journal of Imaging System and Technology*, vol.12, pp.254-263, Feb. 2003
- [12] J. A. Parker, R. V. Kenyon, and D. E. Troxel, "Comparison of interpolating methods for image resampling," *IEEE Trans. on Med. Img.*, vol.MI-2, no.1, Mar. 1983
- [13] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, "Numerical recipes in C: The art of scientific Computing," *Cambridge University Press*, Cambridge, pp.96-118, 1988