

位相限定相関法に基づく映像の高解像度化手法の検討

A Study of a Resolution Enhancement Technique for Video Sequences Based on Phase-Only Correlation

○佐々木 絢也*, 瀧田 健児*, 青木 孝文*, 樋口 龍雄**

○Junya Sasaki*, Kenji Takita*, Takafumi Aoki*, Tatsuo Higuchi**

*東北大学大学院情報科学研究科, **東北工業大学電子工学科

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University,

**Department of Electronic Engineering, Tohoku Institute of Technology

キーワード : デジタル画像 (digital image), 高解像度化 (resolution enhancement), 超解像 (super-resolution), エイリアシング (aliasing), 位相限定相関法 (phase-only correlation)

連絡先 : 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 05 東北大学 大学院情報科学研究科青木研究室

佐々木 絢也, Tel.: (022)217-7169, Fax.: (022)263-9308, E-mail: sasaki@aoki.ecei.tohoku.ac.jp

1. まえがき

デジタル画像は、マルチメディア分野において、デジタルハイビジョン放送やインターネットにおけるストリーミング放送など、多くのアプリケーションに利用されている。近年、従来のアナログ CRT に代わって、マトリクス方式で表示する PDP (Plasma Display Panel) や LCD (Liquid Crystal Display) 等が台頭してきており、画素数が固定されている画像表示デバイスに画素数の異なるさまざまな映像を表示させる方法が必要とされてきている。

従来、画像拡大の方法として各種の補間法が用いられていたが、最近ではより高画質な画像拡大方法が求められるようになってきている。この要求に応えるために、複数枚の低解像度画像から 1 枚の高解像度画像を生成する超解像 (Super-Resolution) が研究されている^{1), 2)}。超解像は、微小に位置ず

れた複数の低解像度画像を入力画像とし、これらを統合して解像度を向上させた画像を生成する技術である。一般に動画像では、シーンの中のオブジェクトは近接するフレームで微小に変化する。そのため動画像は、近接フレームを用いて超解像を行うことにより解像度を向上させることができると考えられる。

超解像は、画像を空間領域で再構成する手法と周波数領域で再構成する手法に分けられる。空間領域で再構成する手法では、各種の画像歪みやノイズモデル、画像の滑らかさ等の拘束条件を再構成過程に容易に取り込むことができるが、一般に計算が複雑となり計算量は多い。一方、周波数領域で再構成する方法では、単純なモデルしか取り扱うことができないものの、計算量が少ないという利点がある。さらに周波数領域での超解像は、各周波数成分で独立に単純な演算を行うことで再

構成が行えるため、容易に処理を並列化することが可能である。

超解像により複数枚の低解像度画像から高解像度画像を再構成するためには、入力となる低解像度画像の微小変形を画像レジストレーションにより高精度に推定する必要がある。本研究では、入力画像のレジストレーション手法として位相限定相関法 (Phase-Only Correlation:POC) を用い、周波数領域において超解像により映像（特に動画像）を高解像度化する方法を検討する。筆者らの研究グループでは、これまでに位相限定相関法を用いた高精度な画像照手法とその応用について検討してきており³⁾、位相限定相関法は画像の平行移動、回転、スケール変化を高精度に推定可能であることが分かっている⁴⁾。また、周波数領域での超解像を実現する回路を考えた場合、位相限定相関法は周波数領域において計算されるため、超解像と位相限定相関法で共通の回路が使用できるので、この組み合わせは相性が良いと考えられる。

以下に本論文の構成を示す。第2章では、位相限定相関法に基づく超解像による画像の高解像度化の基本アルゴリズムを述べ実験を行う。第3章では、動画像を高解像度化するブロックベース高解像度化アルゴリズムを示し、実験を通して効果を確認する。第4章はむすびである。

2. 画像の高解像度化

超解像は、複数の微小変位した低解像度画像を利用して1枚の高解像度画像を生成する技術である。図1に超解像の概念図を示す。微小位置ずれした複数枚の低解像度画像の位置ずれ量が既知であれば、それぞれの低解像度画像をその位置ずれ量に対応させて再配置することができる。このようにして構成した画像はサンプリング間隔が不規則であるため、規則的に再サンプリングする必要がある。

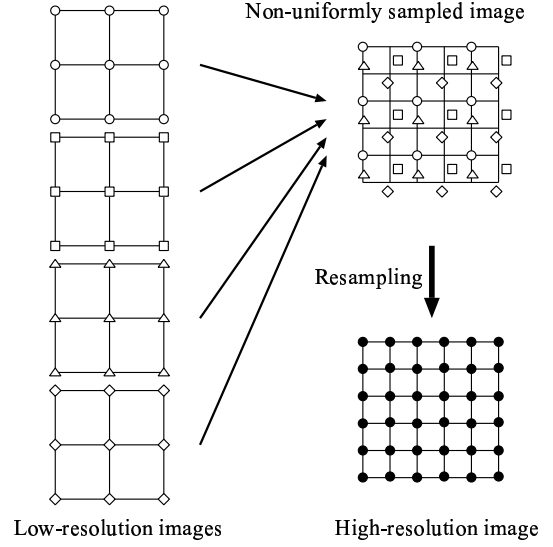


図1 低解像度画像と高解像度画像の関係

以下では、超解像の原理および位相限定相関関数に基づく画像の高解像度化アルゴリズムについて述べ、実験を通してアルゴリズムの性能を評価する。

2.1 1次元信号の超解像

連続空間で定義された1次元信号 $f_a(t)$ とそのフーリエ変換 $F(j\Omega)$ の関係は次式で表される。

$$\begin{cases} F_a(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_a(t) e^{-j\Omega t} dt & (\Omega = -\infty \sim \infty) \\ f_a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_a(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega & (t = -\infty \sim \infty) \end{cases} \quad (1)$$

連続信号 $f_a(t)$ を標本化間隔 T で標本化した1次元離散信号を $f(n)$ とすると、離散信号 $f(n)$ とその離散時間フーリエ変換 $F(e^{j\omega})$ の関係は次式で表される。

$$\begin{cases} F(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) e^{-j\omega n} & (\omega = -\pi \sim \pi) \\ f(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega & (n = -\infty \sim \infty) \end{cases} \quad (2)$$

このとき、離散信号 $f(n)$ と連続信号 $f_a(t)$ の関係は、式 (1), (2) より、

$$\begin{aligned} f(n) &= f_a(t) |_{t=nT} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_a(j\Omega) e^{j\Omega nT} d\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

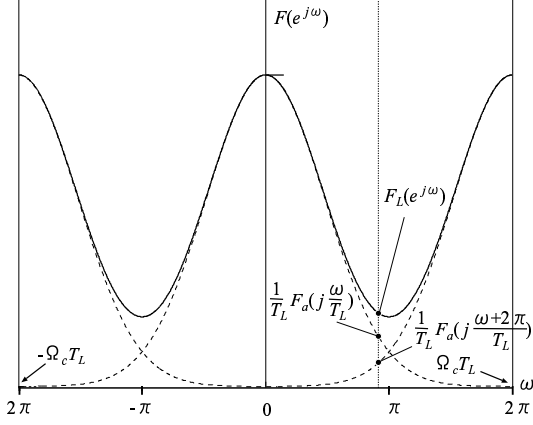


図2 一次元信号におけるエイリアシング

と表すことができる。また、上式の積分を $\frac{2\pi}{T}$ の間隔ごとの積分の和として表せば、次式を得る。

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} F_a \left(j\Omega + j\frac{2\pi p}{T} \right) e^{j\Omega n T} d\Omega \quad (4)$$

ここで、 $\Omega = \frac{\omega}{T}$ という変数変換を行うと、

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{T} \sum_{p=-\infty}^{\infty} F_a \left(j\frac{\omega}{T} + j\frac{2\pi p}{T} \right) e^{j\omega n} d\omega \quad (5)$$

となる。式 (2) と (5) の比較から次式が導出される。

$$F(e^{j\omega}) = \frac{1}{T} \sum_{p=-\infty}^{\infty} F_a \left(j\frac{\omega}{T} + j\frac{2\pi p}{T} \right) \quad (6)$$

式 (6) から離散信号 $f(n)$ の離散時間フーリエ変換 $F(e^{j\omega})$ は連続信号 $f_a(t)$ のフーリエ変換 $F_a(j\frac{\omega}{T})$ を標本化周波数 $\Omega_s = \frac{2\pi}{T} [\text{rad/sec}]$ の整数倍でシフトしたスペクトルの無限和となっていることがわかる。以下では、連続信号 $f_a(t)$ が次式のように帯域制限されているものとする。

$$F_a(j\Omega) = 0 \quad (|\Omega| \geq \Omega_c) \quad (7)$$

連続信号 $f_a(t)$ を $\Omega_H = 2\Omega_c$ なる周波数で標本化した信号を $f_H(n)$ とすると、その離散時間フーリエ変換 $F_H(e^{j\omega})$ とフーリエ変換 $F_a(j\Omega)$ の間には次の関係式が成り立つ。

$$F_H(e^{j\omega}) = \frac{1}{T_H} F_a \left(j\frac{\omega}{T_H} \right) \quad (8)$$

ただし、 $T_H = \pi/\Omega_c$ である。一方、連続信号 $f_a(t)$ を $\Omega_L = \Omega_c$ なる周波数で標本化した信号を $f_L(n)$ とし、その離散時間フーリエ変換を $F_L(e^{j\omega})$ とすると、連続信号 $F_a(j\Omega)$ と離散信号 $F_L(e^{j\omega})$ の間には次の関係式が成り立つ。

$$F_L(e^{j\omega}) = \frac{1}{T_L} \left\{ F_a \left(j\frac{\omega}{T_L} \right) + F_a \left(j\frac{\omega + 2\pi}{T_L} \right) \right\} \quad (9)$$

ただし、 $T_L = 2\pi/\Omega_c = 2T_H$ である。上式は、連続信号の低周波成分 $F_a(j\frac{\omega}{T_L})$ および高周波成分 $F_a(j\frac{\omega+2\pi}{T_L})$ が重なり、エイリアシングが発生していることを意味している。図2に式 (9) の関係を図示する。図中の実線で表される離散信号のスペクトルは、破線で表される連続信号のスペクトルの合成として表現される。式 (8) と (9) から次式を得る。

$$F_L(e^{j\omega}) = \frac{1}{2} \left\{ F_H \left(e^{j\frac{\omega}{2}} \right) + F_H \left(e^{j(\frac{\omega}{2} + \pi)} \right) \right\} \quad (10)$$

上式は、サンプリング間隔の異なる2つの信号のスペクトルの関係を表している。以下では、微少に位置ずれした複数の信号を用いて信号に生じたエイリアシングを解消し、 N 点の信号を $2N$ 点の信号に高解像度化する方法について述べる。

連続信号 $f_a(t)$ を $\Omega_L = \Omega_c$ なる周波数で標本化した N 点の信号を低解像度信号 $l_0(n)$ とし、 $\Omega_H = 2\Omega_c$ なる周波数で標本化した $2N$ 点の信号を高解像度信号 $h(n)$ とする。これらの離散フーリエ変換をそれぞれ $L_0(k)$ および $H(k)$ とする。このとき、式 (10) より、 $L_0(k)$ および $H(k)$ の間には次の関係式が成り立つ。

$$L_0(k) = \frac{1}{2} (H(k) + H(k+N)) \quad (11)$$

ただし、 $k = 0, \dots, N-1$ である。連続信号 $f_a(t-\delta)$ を $\Omega_s = \Omega_c$ なる周波数で標本化した N 点信号を $l_1(n) = f_a(t-\delta)|_{t=n}$ とし、その離散フーリエ変換を $L_1(k)$ とする。離散フーリエ変換の推移の性質および式 (10) より、 $L_1(k)$ と $H(k)$ の間には次の関係式が成り立つ。

$$L_1(k) = \frac{1}{2} \left(H(k) W_{2N}^{k2\delta} + H(k+N) W_{2N}^{(k+N)2\delta} \right)$$

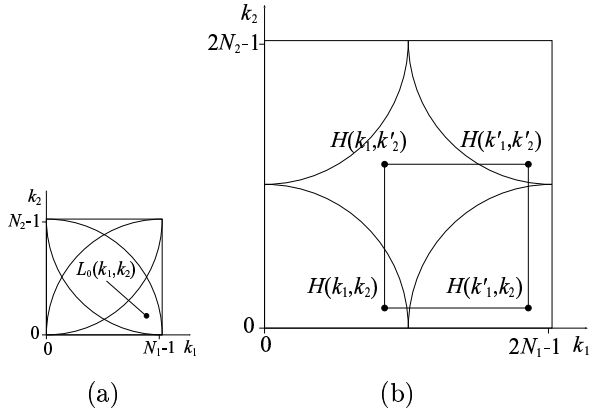


図3 低解像度画像と高解像度画像のスペクトルの関係：(a) 低解像度画像，(b) 高解像画像

(12)

ただし， $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ は回転因子を表す．式 (11) と (12) を連立させることにより，高解像度信号の離散フーリエ変換である $H(k)$ を求めることが可能となる．以上により，1次元信号を高解像度化可能であることを示した．以下では2次元信号(画像)の高解像度化の原理を述べる．

2.2 2次元信号の超解像

連続空間で定義された2次元信号 $f_a(x_1, x_2)$ の2次元フーリエ変換を $F_a(j\Omega_1, j\Omega_2)$ とする．ただし，各方向の周波数はそれぞれ $|\Omega_1| < \Omega_{c1}$ と $|\Omega_2| < \Omega_{c2}$ に帯域制限されているとする．2次元信号 $f_a(x_1, x_2)$ を標本化周波数 $2\Omega_{c1}$ と $2\Omega_{c2}$ で標本化した $2N_1 \times 2N_2$ 点の離散空間2次元信号(高解像度画像)を $h(n_1, n_2)$ とし，標本化周波数 Ω_{c1} と Ω_{c2} で標本化した $N_1 \times N_2$ 点の離散空間2次元信号(低解像度画像)を $l_0(n_1, n_2)$ とする．高解像度画像 $h(n_1, n_2)$ の2次元離散フーリエ変換を $H(k_1, k_2)$ ，低解像度画像 $l_0(n_1, n_2)$ の離散フーリエ変換を $L_0(k_1, k_2)$ とすると， $H(k_1, k_2)$ と $L_0(k_1, k_2)$ の間に次の関係式が成り立つ．

$$L_0(k_1, k_2) = \frac{1}{4} (H(k_1, k_2) + H(k'_1, k_2) + H(k_1, k'_2) + H(k'_1, k'_2)) \quad (13)$$

ただし， $k'_1 = k_1 + N_1$ ， $k'_2 = k_2 + N_2$ である．図3は式 (13) の関係を図示したものである．

式 (13) の未知数は4つであるため， $i = 0, \dots, 3$ として4枚の微少に位置ずれした低解像度画像 $l_i(n_1, n_2)$ を連立させて解くことで，これらの未知数を求めることができる．低解像度画像 $l_i(n_1, n_2)$ の2次元離散フーリエ変換を $L_i(k_1, k_2)$ とすると，以下の連立方程式を得る．

$$\mathbf{L} = \frac{1}{4} \mathbf{W} \mathbf{H} \quad (14)$$

ただし，

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_0(k_1, k_2) & W_0(k'_1, k_2) & W_0(k_1, k'_2) & W_0(k'_1, k'_2) \\ W_1(k_1, k_2) & W_1(k'_1, k_2) & W_1(k_1, k'_2) & W_1(k'_1, k'_2) \\ W_2(k_1, k_2) & W_2(k'_1, k_2) & W_2(k_1, k'_2) & W_2(k'_1, k'_2) \\ W_3(k_1, k_2) & W_3(k'_1, k_2) & W_3(k_1, k'_2) & W_3(k'_1, k'_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H(k_1, k_2) \\ H(k'_1, k_2) \\ H(k_1, k'_2) \\ H(k'_1, k'_2) \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_0(k_1, k_2) \\ L_1(k_1, k_2) \\ L_2(k_1, k_2) \\ L_3(k_1, k_2) \end{bmatrix}$$

である．上式において $W_i(k_1, k_2) = W_{2N_1}^{k_1 2\delta_1^i} \cdot W_{2N_2}^{k_2 2\delta_2^i}$ である．ただし， δ_1^i および δ_2^i はそれぞれの画像 $l_i(n_1, n_2)$ に対する画像 $l_i(n_1, n_2)$ の n_1 方向および n_2 方向の位置ずれ量を表している．

一般に， m ($m > 4$) 枚の画像が利用できる場合，式 (14) の $\mathbf{L}$ は $m \times 1$ の行列となり， $\mathbf{W}$ は $m \times 4$ の行列となる．この場合， $\mathbf{W}$ の疑似逆行列を用いることで，最小2乗的な意味で最適な $\mathbf{H}$ を求めることが可能である．

2.3 位相限定相関法を用いた画像レジストレーション

大きさ $N_1 \times N_2$ の2つの画像をそれぞれ $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ とする．これらの離散フーリエ変換をそれぞれ $F(k_1, k_2)$ および $G(k_1, k_2)$ とすると，位相限定相関関数 $\hat{r}(n_1, n_2)$ は次式を逆離散フーリエ変換することにより計算される．

$$\hat{R}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}|} = e^{j\theta(k_1, k_2)} \quad (15)$$

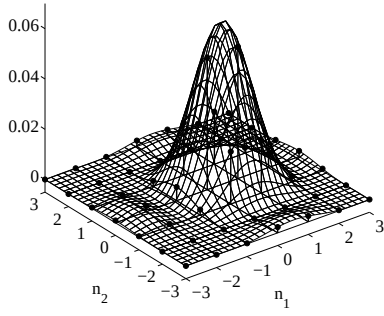


図4 関数フィッティングに基づく高精度ピーク位置推定。

ただし、 $\overline{G(k_1, k_2)}$ は $G(k_1, k_2)$ の複素共役である。互いに (δ_1, δ_2) だけ平行移動した2枚の画像に対する位相限定相関関数は次式で与えられる⁴⁾。

$$\begin{aligned} \hat{r}(n_1, n_2) &\simeq \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin\{\pi(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\pi(n_2 + \delta_2)\}}{\sin\{\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1)\} \sin\{\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2)\}} \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 α は画像 $f(n_1, n_2)$ および $g(n_1, n_2)$ の類似度を表すパラメータであり、 $0 \leq \alpha \leq 1$ である。

位相限定相関関数のピーク座標は2枚の画像の平行位置ずれ量に対応する。したがって、位相限定相関関数のピーク座標を調べることで、簡単に画像間の位置ずれ量を推定することが可能である。サブピクセルレベルで画像間の位置ずれ量を推定するためには、実際の計算によって得られた2次元データ配列に対して、上式で表される位相限定相関関数を最小2乗法によりフィッティングする。図4は黒点で表される2次元データ配列に式(16)をフィッティングした様子を表している。

実際には、画像レジストレーション精度を向上させるため、窓関数と低域通過フィルタを位相限定相関関数と組み合わせて使用している。詳細は⁴⁾を参照されたい。

2.4 高解像度化アルゴリズム

式(14)に示した連立方程式を解くためには、各画像間の位置ずれ量をサブピクセルレベルで推

定することが重要である。本節では、前節で述べた手法を用いてサブピクセルレベルの位置ずれ量推定を行い、超解像により画像を高解像度化する方法について述べる。

大きさ $N_1 \times N_2$ の m 枚の画像を $l_i(n_1, n_2)$ とする。基準画像を $l_0(n_1, n_2)$ として、 $i = 1, \dots, m-1$ に対して、画像 $l_0(n_1, n_2)$ と $l_i(n_1, n_2)$ の位置ずれ量 (δ_1^i, δ_2^i) を前節で述べた手法を用いてサブピクセルレベルで推定する。このとき画像間の類似度を表すパラメータ α の値がある閾値 r_{th} よりも低い場合、その画像については超解像に利用しないことにする。本稿の実験では、 $r_{th} = 0.5$ としている。

画像 $l_i(n_1, n_2)$ の離散フーリエ変換 $L_i(k_1, k_2)$ に対して、式(14)で表される連立方程式を $\mathbf{H}$ について解く。 $H(k_1, k_2)$ を逆離散フーリエ変換することにより、大きさ $2N_1 \times 2N_2$ の高解像度画像 $h(n_1, n_2)$ が生成される。ただし、複数枚の画像が得られていても、それらの画像間において水平方向（あるいは垂直方向）のみの位置ずれしかない場合、画像は水平方向（垂直方向）のみにしか高解像度化できない。このように画像間の位置ずれが水平方向（垂直方向）のみの場合は、画像を水平方向（垂直方向）の1次元信号の集合として捉え、1次元信号の超解像を行う。その結果、大きさ $2N_1 \times N_2$ ($N_1 \times 2N_2$) の高解像度画像が得られる。このままでは元の画像と縦横の比率が異なるため、適当な補間拡大手法を用いて垂直方向（水平方向）にも画像を拡大し、最終的に大きさ $2N_1 \times 2N_2$ の画像を生成する。本稿では、補間拡大手法として双3次補間を用いる。

2.5 高解像度化実験

本節では、前節で述べたアルゴリズムを用いて、実際に画像の高解像度化を実現できることを実験的に示す。本実験では、人工的にエイリアシングを発生させた微小位置ずれ画像と実際のカメ



図5 画像 *Lena* : (a) 原画像, (b) 低解像度画像, (c) 双3次補間拡大画像, (d) 高解像度化画像

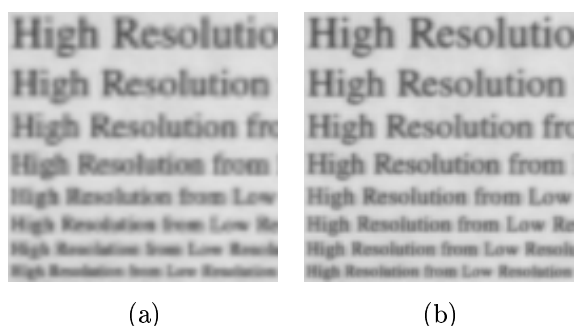


図6 文字画像 : (a) 双3次補間拡大画像, (b) 高解像度化画像

ラから撮影された画像に対して, それぞれ高解像度化を行った。

大きさ 128×128 の画像 *Lena* (図5 (a)) を2ピクセル毎にサブサンプリングすると, エイリアシングの発生した大きさ 64×64 の低解像度画像(図5 (b)) が得られる。サンプリング位置を調節することにより, 互いに微少位置ずれした低解像度画像を4枚作成することができる。実験では, 双3次補間により拡大した画像と高解像度化アルゴリズムにより4枚の画像を統合して拡大した画像を比較した。

図5 (c) に双3次補間により拡大した画像を,

同図 (d) に高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像を示す。補間拡大画像と比較して, 高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像は細部まで再構成できていることがわかる。また, 拡大した画像の画質を PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) を用いて評価した。PSNR は画像の S/N 比を表しており, 値が大きいほど原画像との差が小さい。補間拡大画像の PSNR が 34.9 dB であるのに対し, 高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像の PSNR は 47.5 dB となり原画像にほぼ一致する。高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像が原画像に完全に一致しない理由は, 位置ずれ量計測誤差によるものである。

つぎに, 通常の工業用 CCD ビデオカメラ (JAI CVM10, 640×480 ピクセル, モノクロ 256 階調, レンズ VCL-16WM) を用いて撮影した画像の高解像度化を行った。文字を印刷した紙をマイクロステージ上の平板に張り付け, カメラの画像面と平板が平行になるようにカメラを設置した。カメラに対して水平方向および垂直方向にマイクロステージをそれぞれ5段階ずつ移動させ, それぞれの位置において画像を撮影した。このようにして得られた25枚の画像を統合して拡大した画像と双3次補間により拡大した画像を比較した。

図6 (a) に双3次補間により拡大した画像を, 同図 (b) に高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像を示す。補間拡大画像では判別が困難である文字に対しても, 高解像度化アルゴリズムにより拡大した画像では文字の判別が可能になっていることがわかる。この結果より, 実際の CCD カメラで撮影された画像に対しても, 高解像度化アルゴリズムが有効であることが確認された。

3. 動画像の高解像度化アルゴリズム

動画像では、隣接するフレーム間では画像の相関が非常に高いため、各フレームの近傍フレームに対して超解像処理を適用することにより、動画像を高解像度化できると考えられる．前節では画像間の変形はグローバルな平行移動のみを仮定していたが、一般の動画像の場合、画像間には複数のローカルな変形（動き）があるため、前章のアルゴリズムをそのまま動画像に適用することはできない．

本節では、動画像に超解像処理を適用するアルゴリズムを提案する．具体的には、動画像を互いに重なり合う複数のブロックに分割し、各ブロック毎に個別に超解像処理を行う．以下では、動画像に対して超解像処理を適用し高解像度化するブロックベース高解像度化アルゴリズムについて述べる．

3.1 ブロックベース高解像度化アルゴリズム

大きさ $N_1 \times N_2$ のフレームによって構成される動画像を $l(n_1, n_2, t)$ とする．ただし、 t はフレーム番号を表す．フレーム t_0 をターゲットフレームとし、ターゲットフレームの前 N_f フレームおよび後ろ N_b フレームを利用してターゲットフレームを高解像度化する．ターゲットフレームを大きさ $P_1 \times P_2$ のブロックに分割し、個々の分割ブロックに対して独立に以下の処理を施す．図 7 にアルゴリズムの概要を示す．

いま分割ブロック画像の一つを P とし、分割ブロック画像 P の高解像度化ブロック画像 Q を生成することを考える．フレーム $l(n_1, n_2, t_0)$ 上における P の中心座標を $C_0 = (c_1, c_2)$ とする． $i = -N_f, \dots, N_b$ に対して、フレーム $l(n_1, n_2, i)$ における点 C_0 の対応点 C_i をピクセルレベルで探

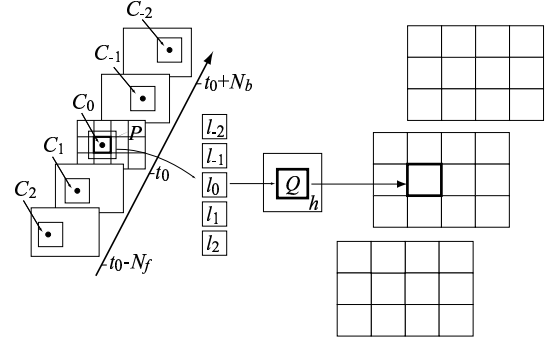


図 7 動画像の高解像度化アルゴリズム

索する．対応点の探索は、2.3 節で述べた画像レジストレーション手法と階層マッチングを組み合わせて行う．詳細は⁵⁾を参照されたい．

$i = -N_f, \dots, N_b$ に対して、フレーム $l(n_1, n_2, t_0 + i)$ から点 C_i を中心として切り出した大きさ $B_1 \times B_2$ の画像を $l_i(n_1, n_2)$ とする．ただし、 $B_1 \geq P_1$ 、 $B_2 \geq P_2$ である．大きさ $B_1 \times B_2$ の画像 $l_i(n_1, n_2)$ に対して、2.4 節で述べた画像の高解像度化アルゴリズムを適用し、大きさ $2B_1 \times 2B_2$ の高解像度画像 $h(n_1, n_2)$ を生成する．ただし、利用できる画像が $l_0(n_1, n_2)$ のみの場合は、補間拡大を行い $h(n_1, n_2)$ を生成する．高解像度画像 $h(n_1, n_2)$ の中心から切り出した大きさ $2P_1 \times 2P_2$ の部分画像が高解像度ブロック画像 Q である．

以上により、ターゲットフレームの分割ブロック画像 P の高解像度ブロック画像 Q を生成できる．この操作をすべての分割ブロックに適用することでターゲットフレーム全体が高解像度化される．さらに全フレームに対して上記の操作を繰り返すことで動画像全体が高解像度化される．なお、本稿の実験では、 $N_f = N_b = 4$ 、 $P_1 = P_2 = 8$ 、 $B_1 = B_2 = 31$ としている．

3.2 動画像の高解像度化実験

前節で述べたブロックベース高解像度化アルゴリズムの効果を確認するために、2つの動画像の高解像度化を試みた．最初の動画像は奥行きがほ

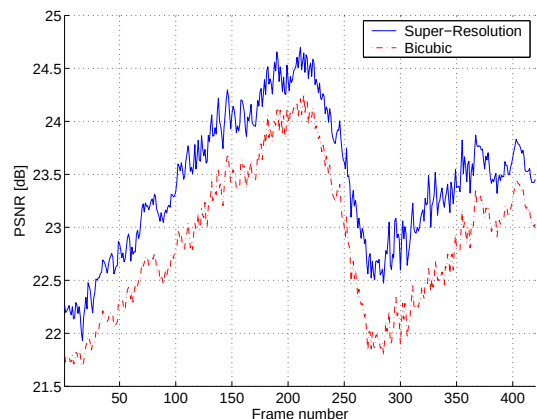
ぼ一定の建物を、建物の下部から上部まで、カメラをチルトアップしながら撮影した *Church* であり、もう1つの動画画は独立に動く複数の物体を撮影した *Mobile Calendar* である。

実験では、両方の動画画をそれぞれサブサンプリングすることにより低解像度動画画を作成し、ブロックベース高解像度化アルゴリズムにより拡大した動画画および双3次補間により拡大した動画画の PSNR 値を比較した。低解像度画の生成は、原画像に次式で表される重み係数を持つ 3×3 の平均値フィルタを適用した後に、2点ごとにサブサンプリングすることにより行った。

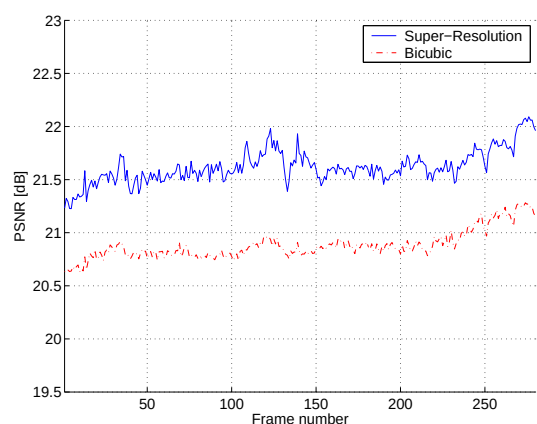
$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

双3次補間を用いた方法では、各フレームをそれぞれ独立に2倍の大きさに拡大し、ブロックベース高解像度化アルゴリズムを用いた方法では、各フレームの前後4フレームを利用しながらフレームを2倍の大きさに拡大した。高解像度化アルゴリズムにおいて、ブロックの動き推定に失敗したり、あるいは物体の境界部分のブロックにおいて複数の動きを含んでいる場合、再構成された画像は正しく高解像度されず、著しく画質が劣化する。前者の場合に対しては、動き推定をする過程で動き推定の信頼度を評価し、信頼できない動きを持つブロックを破棄して高解像度化に利用しないことで対処している。後者の場合に対しては、各ブロックの移動ベクトルと周囲のブロックの移動ベクトルを比較し、移動ベクトルの差分に大きな変化がみられたブロックを物体の境界部分であると判断して、そのブロックについては高解像度化を行わず双3次補間を行っている。

動画画 *Church* では、奥行きがほぼ一定の建物が下方向へと平行移動し、動画画の後半部分において、風にはためく旗が現れる。動画画 *Church* では、画像中のオブジェクトの動きがほとんど垂直



(a)



(b)

図8 PSNR の評価 : (a) *Church*, (b) *Mobile Calendar*

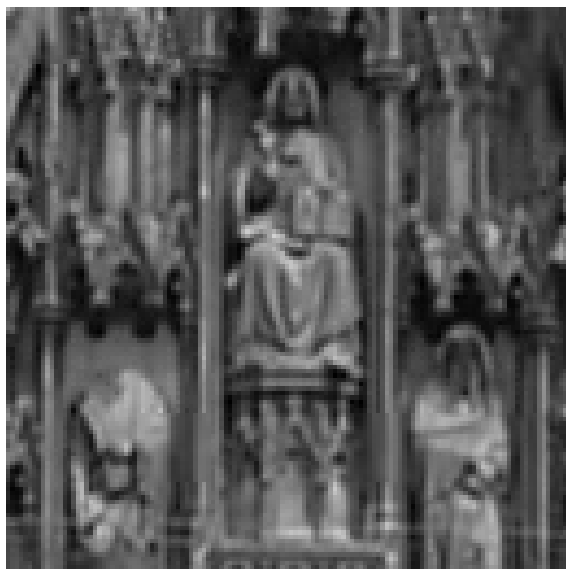
方向のみであるため、画像を垂直方向のみにしか高解像度化できない。図8(a)に双3次補間拡大画像と高解像度化アルゴリズムによる拡大画像の PSNR を比較した。全てのフレームにおいて、高解像度化画像の PSNR が約 0.5 dB 上昇している。図9に、 $t = 31$ のフレーム画像を示す。同図(a)の補間拡大画像では失われている細部の情報が(b)の高解像度化画像では再構成されていることを視認できる。

動画画 *Mobile Calendar* では、壁とカレンダーがそれぞれ独立に平行移動し、手前の玩具の列車が右から左へと移動しながらボールを押していく。押されたボールは回転しながら動く。

図8(b)に双3次補間拡大画像と高解像度化ア



(a)



(b)

図9 Church : (a) 双3次補間拡大画像, (b) 高解像度化画像

ルゴリズムによる拡大画像の PSNR を比較した．全てのフレームにおいて，高解像度アルゴリズムによる拡大画像の PSNR が約 0.7 dB 向上している．動画像 *Mobile Calendar* は，画像の一部が斜め方向に移動しているのので，水平方向および垂直方向の両方に対して高解像度化できる．したがって，動画像 *Church* の結果と比べて PSNR の向上が大きい．しかしながら，ボールが回転している部分は，高解像度化アルゴリズムの画像モデルに適合しないため正しく高解像度化することができない．従ってこのような部分は補間拡大画像に置き換えられている．また，動画像の開始フレーム直後ではズームアウトしているため，近傍フレームの画像変形は平行移動に加えて縮小もしているが，図8(b)よりそのような場合でも高解像度化できていることがわかる．図10に $t = 44$ のフレーム画像を示す．同図(c)は双3次補間拡大画像であり，同図(d)は高解像度化画像である．カレンダーの日付部分において解像度が向上していることを視認できる．

4. むすび

本論文では，位相限定相関法を用いた動画像の高解像度化アルゴリズムを示し，実際に動画像を高解像度化する実験を行った．その結果，既存の補間拡大手法に比べて PSNR が向上し，提案アルゴリズムにより動画像を高解像度化できることを確認した．

今後の課題としては，回転，スケール変化など平行移動以外の画像の変化に対応したアルゴリズムを開発することが挙げられる．

参考文献

- 1) R. Y. Tsai and T. S. Huang: Multiframe image restoration and registration, *Advances in Computer Vision and Image Processing*, JAI Press Inc. 317/339 (1984)
- 2) 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, May 2003, 21/36 (2003)
- 3) <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/poc/>
- 4) Kenji Takita, Takafumi Aoki, Yoshifumi Sasaki, Tatsuo Higuchi and Kouji Kobayashi: High-Accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation, *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol.E86-A No.8 August 2003, 1925/1934 (2003)



(a)



(b)



(c)



(d)

図10 *Mobile Calendar*: (a) 双3次補間拡大画像, (b) 高解像度化画像, (c) (a) の部分画像, (d) (b) の部分画像

- 5) 瀧田健児, 青木孝文, 樋口龍雄, 小林孝次: 位相限定相関法に基づく多眼ステレオビジョン, 信学技法, Vol. 102, No. 13, 55/60 (2002)