論文

アップコンバート画像の超解像処理に向けた拡大前の画素数およびリサンプリング位相の推定法

Estimate of the Original Number of Pixels before Enlarging and Re-sampling Phase for Super-resolution from an Up-converted Image

正会員 影山昌広[†], 正会員 浜田宏一[†]
Masahiro Kageyama[†] and Koichi Hamada[†]

あらまし 超解像処理が「折返し成分として画像に現れている高周波成分を正しく復元する処理」であることを鑑みると、すでに拡大されたアップコンバート画像を超解像処理する際に、撮像からアップコンバート画像に至る過程における折返し成分の挙動を正確にモデル化することが重要である。しかしながら、未知の倍率で拡大されたアップコンバート画像の場合には、折返し成分の挙動を正確にモデル化することが困難であった。そこで本稿では、このモデル化に必要な「拡大前の画素数、および折返し成分の位相を決定づけるリサンプリング位相」の推定手法を提案する。画像拡大前のナイキスト周波数では、ベースバンド成分と折返し成分の信号強度が必ず一致し、複素平面上で信号が直線状に分布することを利用して、未知の倍率で拡大されたアップコンバート画像における拡大前の画素数およびリサンプリング位相を推定する。シミュレーション実験によって提案手法の有効性を示した。

キーワード：アップコンバート画像、超解像処理、画素数、リサンプリング位相、折返し、複素平面

1. ま え が き

撮像時の解像度限界(ナイキスト周波数)を超えて、画像に含まれる高周波成分を復元し高解像化する超解像処理の技術開発が盛んである¹⁾。超解像処理として、複数の画像を1枚に合成して高解像化する処理が広く用いられている。この処理は、周波数領域の折返し成分(エイリアシング)として画像に現れている高周波成分を正しく復元する処理である¹⁾。

超解像処理は、画像の拡大を伴うことが多く、所望の拡大倍率を明示的に処理パラメータとして設定するのが一般的である。その一方で、未知の倍率で拡大された画像を入力として、超解像処理したい場合もある。本稿では、このような「すでに拡大されている画像」のことを、アップコンバート画像と呼ぶことにする。

超解像処理には、逐次近似による逆変換手法^{2)~4)}や、入力信号をフーリエ変換して周波数領域で連立方程式を解く手法⁵⁾、位相シフトを利用した手法⁶⁾⁷⁾などが利用されている。これらのいずれの手法においても、超解像処理が「折返し成分として画像に現れている高周波成分を正しく復元する処理」¹⁾であることを鑑みると、撮像からアップコン

バート画像に至る過程における折返し成分の挙動を正確にモデル化することが重要である。

仮に、拡大処理の詳細が既知であれば、折返し成分の挙動をモデル化することは比較的容易である。その一方で、未知の倍率で拡大されたアップコンバート画像の場合には、折返し成分の挙動を正確にモデル化することはこれまで困難であった。

そこで本稿では、このモデル化に必要な「アップコンバート画像における拡大前の画素数とリサンプリング位相(後述)」の推定手法を提案する。2章で拡大前の画素数・位相を推定することの重要性について述べたのちに、3章で提案手法について述べ、4章でシミュレーション実験によって提案手法の有効性を示す。

2. 拡大前の画素数・位相を推定することの重要性

本章では、一般的なアップコンバート処理について説明したのちに、超解像処理の代表例を挙げて、拡大前の画像の画素数とリサンプリング位相(後述)を推定することの重要性を説明する。

まず、図1を用いてアップコンバート処理について説明する。同図(a)は、同処理の構成を示したものであり、 m/n 倍(ただし、 m, n は正整数)に拡大する際には、 m 倍アップサンプリング(零挿入)を行ったのちに、LPF (Low

2014年3月31日受付, 2014年7月29日採録

[†]株式会社日立製作所中央研究所

(〒185-8601 東京都国分寺市東恋ヶ窪1-280, TEL 042-323-1111)

図1 アップコンバート処理

Pass Filter) によって不要な折返し成分を除去し、1/n ダウンサンプリングを行う。

図1 (b) は、8/3倍拡大(すなわち $m=8$, $n=3$) を例に挙げて各段階の周波数スペクトルを示したものである。同図 (b-1) に示す入力信号は、ベースバンド成分と、サンプリングキャリア(周波数 ω_s , $2\omega_s$, $3\omega_s$ ...) によってベースバンド成分が畳み込まれた折返し成分からなる。

ここで、超解像処理の効果を得るためには、ベースバンド成分の最高周波数がナイキスト周波数 ($\omega_s/2$) を超え、折返し成分との重なりが生じている必要がある¹⁾。

図1 (b-2) は、8倍アップサンプリング後の周波数スペクトルを示しており、サンプリングキャリアの周波数の間隔が ω_s から $8\omega_s$ に広がることを示している。

図1 (b-3) は、LPF 処理後の周波数スペクトルを示している。LPF 処理により、 $\omega=0$ と $\omega=8\omega_s$ の近傍の周波数成分だけを残し、その他の周波数成分は除去される。このとき、ナイキスト周波数 ($\omega_s/2$) 以上の周波数成分は、折返し成分として残留する。

図1 (b-4) は、1/3ダウンサンプリング後の信号(出力信号)の周波数スペクトルを示しており、アップコンバート後のサンプリング周波数 $\omega_s' (=8\omega_s/3)$ の整数倍の位置に新たなサンプリングキャリアが生じる。このキャリアによって、LPF を通過した成分が畳み込まれる。

アップコンバート画像に対する超解像処理では、図1 (b-4) に示した信号から、折返し成分として残っている高周波成分を正しく復元する必要がある。

続いて、超解像処理の動作原理を、文献4)に記載されている手法を例に挙げて説明する。この手法では、高解像画

像が低解像画像に劣化する過程(変形、ぼけ、縮小、ノイズ)を式(1)でモデル化し、逆演算を行うことによって、N枚(Nは正整数)の低解像画像から高解像画像を得る。

$$Y_k = D_k * H_k * F_k * X + E_k \quad (1 \leq k \leq N) \quad (1)$$

なお、Xは高解像画像(出力画像)、 Y_k は再構成処理に用いるN枚の低解像画像(入力画像)の中の1枚を表す。また、 D_k は画像縮小、 H_k は点広がり関数(PSF: Point Spread Function)、 F_k は各低解像画像 Y_k に対応した変形、*は畳み込み演算をそれぞれ表し、これにノイズ E_k を加算することで、高解像画像 X から低解像画像 Y_k が得られる、と定義する。再構成処理では、この過程を逆演算することで、N枚の低解像画像 Y_k から高解像画像 X を得る。この逆演算は、反復演算によって行うのが一般的である。

この中で、 H_k (PSF) の推定には、例えば文献8) 9) のような検討例がある。また、 F_k (変形) には複数の画像間でサブピクセル精度の正確な位置合わせが必要であり、この位置合わせ技術として、例えば文献10) 11) のような検討例がある。 E_k (ノイズ) は、文献4) のようにガウシアンノイズで代用されることが多い。しかし、 D_k (画像縮小) については、倍率を既知とするのが一般的であり、入力画像から推定する技術の検討例は見当たらない。

この D_k (画像縮小) によって、低解像画像 Y_k に含まれる折返し成分の周波数や位相が規定される。したがって、 D_k の設定が不正確だと、式(1)の逆演算の際に、折返し成分から高周波成分への復元が正しく行われぬ。

また、画像を拡大する際の中心を、例えば画像の左上の角とするか、画像の中央とするか、によって、図1 (b-4) に示した拡大後のサンプリングキャリア(周波数 ω_s' , $2\omega_s'$ ...) の位相が変化し、これに伴って折返し成分の位相も変化する。この位相が正しい値からずれると、折返し成分から復元した信号成分とベースバンド信号成分との間で干渉が生じ、信号が減衰したり、本来まっすぐだった線がうねったりする。本稿では、拡大後のサンプリングキャリアの位相を決定づける値を「リサンプリング位相」と呼ぶことにし、次章で詳しく述べる。

図2に、位相ずれの一例を示す。同図は、横方向に等間隔で描いた3本の基準線の上に、この間隔を1周期(360°)として正弦波状に縦方向の明暗が変化する模様を3本の横線として描いたものである。同図に示すように、基準線からの位相を縦方向に 0° から 20° まで変化させると、位相ずれが約 4° 以下であれば本来の位相 (0°) との差がほとんど判別できないが、位相ずれが約 5° を超えると差が判別できるようになることがわかる。

このように、拡大(逆演算では縮小)の倍率(すなわち、拡大前(未知)と拡大後(既知)の画素数の比)やリサンプリング位相を式(1)に正しく設定することによって、高解像画像を正しく復元できるようになる。したがって、拡大処理の詳細が未知のアップコンバート画像を超解像処理する

図2 位相ずれの一例

場合には、拡大前の画素数とリサンプリング位相を正しく推定することが重要である。

3. 提案する画素数・位相推定法

筆者らは、後述するように、アップコンバート画像の信号を複素平面上にプロットしたときに、拡大前のナイキスト周波数（サンプリング周波数の1/2の周波数）の成分の分布が、他の周波数成分の分布と異なることに着目した。本章では、この性質を利用し、1次元フーリエ変換と主成分分析を用いることによって、アップコンバート画像における拡大前の画素数およびリサンプリング位相を推定する方法を提案する。

3.1 リサンプリング位相

本稿では、リサンプリング位相 θ_{RS} を、図3に示すように「画像の端（左端あるいは上端）における拡大前のサンプリングキャリアの位相」と定義することにする。この位相は、拡大前後の各画素数と拡大中心の位置によって一意に定まる。例えば、同図(a)に示すように、画像の左端を基準として拡大した場合のリサンプリング位相は0だが、同図(b)に示すように画像の中央を基準として拡大した場合は以下になる。

拡大前の画像の画素数を k とすると、画像の端から中央までの画素数は $(k-1)/2$ である。サンプリング周波数における画素間隔の位相差は 2π なので、画像の中央では、端よりも $2\pi(k-1)/2 (= \pi(k-1))$ だけ位相が進むことになる。一方、拡大後の画像の画素数を k' とすると、画像の端から中央までの画素数は $(k'-1)/2$ である。また、拡大前のサンプリング周波数 ω_s が、拡大後には $\omega_s \cdot k/k'$ に変換される。したがって、拡大後の画素間隔では元のサンプリング周波数成分の位相差は $2\pi k/k'$ となり、画像の端では、画像の中央よりも $2\pi(k'-1)/2 \cdot k/k' (= \pi(k'-1)k/k')$ だけ位相が遅れることになる。画像の中央を基準として拡大した場合、中央の位相は拡大の前後で変わらないので、画像の端のリサンプリング位相 θ_{RS} は、式(2)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \theta_{RS} &= \pi(k-1) - \frac{\pi(k'-1)k}{k'} \\ &= \frac{\pi(k-k')}{k'} \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 画像の拡大前後における折返し成分の挙動

複雑な波形を持った信号も、単純な正弦波の線形和で表すことができる。そこで、信号 $s(t)$ のうち周波数 ω を持つ

リサンプリング位相 $\theta_{RS} = 0$
(a) 画像の端を拡大中心とした場合

(b) 画像の中央を拡大中心とした場合

図3 リサンプリング位相 (例: 8/3倍拡大)

たベースバンド成分を、以下に示す正弦波とする。

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\omega t + \delta) \\ &= \frac{A(e^{j(\omega t + \delta)} + e^{-j(\omega t + \delta)})}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

なお、 A は信号振幅、 δ は画像の内容に応じた任意の値を持つ位相、 j は虚数単位を表す。また、式(3)第1項は、複素平面上で左回りする正の周波数成分を表し、同第2項は、複素平面上で右回りする負の周波数成分を表す。

ここで、拡大前（すなわち撮像時）のサンプリング周波数を ω_s とし、拡大後のサンプリング周波数を ω_s' （ただし、 $\omega_s' > \omega_s$ ）とする。簡単のため拡大を理想的な処理とすると、図1(b-4)より $0 \leq \omega \leq \omega_s'/2$ の周波数範囲だけを考えればよく、拡大後の信号 $s'(t)$ はリサンプリング位相 θ_{RS} を用いて(4)式で表すことができる。

$$s'(t) = \frac{Ae^{j(\omega t + \delta)}}{2} + \frac{Be^{j(\omega_s t + \theta_{RS} - \omega t - \delta)}}{2} \quad (4)$$

なお、式(4)右辺の第2項は撮像時の標本化により発生した折返し成分、 B はこの成分の信号振幅である。

ここで筆者らは、拡大前のナイキスト周波数 $\omega_N (= \omega_s/2)$ では、周波数領域での対称性により、ベースバンド成分と折返し成分の信号振幅は必ず一致することに着目した。この性質を利用し、 $\omega = \omega_N$ における信号 $s'(t) |_{\omega = \omega_N}$ は、信号振幅 $B=A$ 、 $\omega_s = 2\omega_N$ 、および $e^{j\alpha} + e^{j\beta} = 2e^{j(\alpha+\beta)/2} \cos((\alpha-\beta)/2)$ を用いて、以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} s'(t) |_{\omega = \omega_N} &= \frac{Ae^{j(\omega_N t + \delta)}}{2} + \frac{Ae^{j(\omega_s t + \theta_{RS} - \omega_N t - \delta)}}{2} \\ &= Ae^{\frac{j(\omega_N t + \theta_{RS})}{2}} \cos(\omega_N t + \delta - \frac{\omega_s t + \theta_{RS}}{2}) \\ &= Ae^{j(\omega_N t + \frac{\theta_{RS}}{2})} \cos(\delta - \frac{\theta_{RS}}{2}) \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) の右辺において、信号振幅 A と $\cos(\delta - \theta_{RS}/2)$ は実数のため、複素平面上における信号の回転には寄与せず、虚数を含む $e^{j(\omega_N + \theta_{RS}/2)}$ のみによって回転する。この回転の初期位相 ($\theta_{RS}/2$) は、入力信号の位相 δ には依存しない。

3.3 提案する画素数・位相推定法の動作原理

3.2節で述べた現象を利用した画素数・位相推定法の動作原理を、図4に示す。まず、同図(a)に画像信号の周波数スペクトルの一例を示す。拡大前のナイキスト周波数 ω_N を超えた原信号の高周波成分は、 ω_N を対称軸として折返し成分に変換されている。ここで、周波数 $\omega = \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 (= \omega_N), \omega_5$ を例に挙げ、各周波数における信号成分の実部と虚部を複素平面上にプロットすることを考える。

折返し成分は、原信号に含まれる負の周波数成分がサンプリングキャリアによって周波数シフトしたものであることを考慮すると、図4(b)に示す複素平面上で、ベースバンド成分は左回りに、折返し成分は右回りに、それぞれの信号振幅に応じた半径の円軌道上を回転していると考えることができる。なお、同図中に示す位相は、式(5)における $\theta_{RS}/2$ である。

図4(a)に示した周波数 $\omega = \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 (= \omega_N), \omega_5$ における信号成分の実部と虚部を複素平面上にプロットすると、 $\omega = \omega_1$ の周波数にはベースバンド成分しか存在せず、離れた画素位置の信号強度や位相は一般に無関係であるため、同図(c-1)に示すように、プロットした各点は円状に散らばった分布になる。

$\omega = \omega_2$ の周波数では、 $\omega = \omega_1$ のときと同様にベースバンド成分しか存在しないため、図4(c-2)に示すように、プロットした各点は円状に散らばった分布になるが、円の半径は信号振幅に応じて変化する。

$\omega = \omega_3$ の周波数では、図4(a)に示すように折返し成分をわずかに含んでいる。同図(b)に示すようにベースバンド成分と折返し成分は互いに逆方向に回転をしているため、両者のベクトル和の分布は、同図(c-3)に示すように、真円ではなく楕円状になる。

$\omega = \omega_4 (= \omega_N)$ の周波数では、折返しの対称軸上にあたるため、ベースバンド成分と折返し成分の信号強度は必ず一致することに筆者らは着目した。この周波数では、互いに逆回転するベースバンド成分と折返し成分の各信号強度が等しくなるため、両者のベクトル和の分布は、同図(c-4)に示すような直線状になる。また、この直線と実軸のなす角は、式(5)より $\theta_{RS}/2$ となる。

$\omega = \omega_5$ の周波数では、信号が減衰しているため、複素平面上にプロットした各点は、同図(c-5)に示すように原点付近に集中し、ノイズによって円状の分布になる。

折返し成分が一旦発生してしまえば、途中で他の信号処理が入っても、ベースバンド成分と折返し成分の信号強度が一致する関係は保存される。したがって、アップコンバート画像の信号成分の実部と虚部を複素平面上にプロットしたときに、その分布が最も直線状になるときの周波数

図4 提案する画素数・位相推定法の動作原理

が、画像拡大前のナイキスト周波数 ω_N である、と推定できる。

ここまで、1次元方向の拡大について議論してきたが、2次元方向(画像の水平方向と垂直方向)についても、それぞれ独立した1次元方向として考えることができる。すなわち、前述した画素数 k を水平画素数 w あるいは垂直画素数 h に、位置 t を水平位置 x あるいは垂直位置 y に、周波数 ω を水平周波数 μ あるいは垂直周波数 ν に、位相 θ を水平位相 ϕ あるいは垂直位相 ψ にそれぞれ置換すれば、式(2)や式(5)をそのまま用いることができる。

なお、画像の水平周波数を、画面の横幅を基準とした lpw (lines per width) の単位で表すと、水平方向のナイキスト周波数を表す数値 (lpw) は、画像の水平画素数と一致する。同様に、垂直方向のナイキスト周波数を表す数値 (lph: lines per height) は、画像の垂直画素数と一致する。したがって、水平方向および垂直方向の各ナイキスト周波数を求めれば、その値が画像拡大前の水平および垂直の各画素数を示すことになる。

3.4 提案する画素数・位相推定法の構成

3.3節で述べた画素数・位相推定法の具体的な構成を図5に示す。同図において、拡大後の水平画素数が w' 、垂直画素数が h' のアップコンバート画像をもとにして、同図の上半分の処理で、拡大前の水平ナイキスト周波数 μ_N (すなわち、水平画素数 w) と水平リサンプリング位相 ϕ_{RS} を求め、同図の下半分の処理で、拡大前の垂直ナイキスト周波数 ν_N (すなわち、垂直画素数 h) と垂直リサンプリング位

1D DFT : 1次元離散フーリエ変換, Re : 実数成分値, Im : 虚数成分値,
PCA : 主成分分析, μ : 水平周波数, ν : 垂直周波数

図5 提案する画素数・位相推定法の構成

相 ψ_{RS} を求める。

まず、図5の上半分の処理において、アップコンバート画像の各画素値を、水平方向に1行ずつ1次元離散フーリエ変換 (1D DFT: One Dimensional Discrete Fourier Transform) し、水平周波数 $\mu = 0$ から $\mu = (w' - 1)$ (単位: lpw) までの実数成分値 (Re) と虚数成分値 (Im) を求める。続いて、同一の周波数成分におけるすべての行の実数成分値 (Re) と虚数成分値 (Im) の組をまとめて2次元データとし、周波数ごとに図4(c)に示すような複素平面上の分布を得る。

ここで、この分布が直線状かどうかを判定するために、2次元データ (Re, Im) の主成分分析 (PCA: Principal Component Analysis) を行い、PCAの結果における第1主成分の固有値 (λ_1) と第2主成分の固有値 (λ_2) を比較して、 $\lambda_1 \gg \lambda_2$ となっていれば直線状である、と判定することにした。このとき、 λ_2 の値が小さいほど直線状の分布になるため、 λ_1 と λ_2 の比 (λ_1 / λ_2) を「主成分比」と定義し、この主成分比が最も大きくなったときに直線状の分布になったと判定して、そのときの水平周波数 μ を「拡大前の水平ナイキスト周波数 μ_N 」(すなわち、拡大前の水平画素数 w) と推定する。

また、主成分比 (λ_1 / λ_2) が最も大きくなったときの第1主成分の固有ベクトルの方向 (Re, Im) から位相 $\theta_{RS}/2$ ($=\text{atan}(\text{Im}/\text{Re})$) を求め、この値を2倍することによって、水平リサンプリング位相 θ_{RS} を推定する。

同様に、図5の下半分の処理において、アップコンバート画像の各画素値を、垂直方向に1列ずつ1次元離散フーリエ変換 (1D DFT) し、その後は同図の上半分と同一の処理を行うことによって、拡大前の垂直ナイキスト周波数 ν_N (すなわち、拡大前の垂直画素数 h) と垂直リサンプリング位相 ψ_{RS} を推定することができる。

4. シミュレーション実験

3章で述べた提案手法の有効性を確認するために、以下に述べる実験を行った。実験には、図6に示すITE標準動画像 (720 × 480画素, プログレッシブ走査) を用いた。

まず、図6(a)に示す画像 (1フレーム) を原画とし、一般的なバイキュービック補間により、画像の中央を拡大中心として、水平方向に8/3倍、垂直方向に9/4倍に拡大したアップコンバート画像 (1920 × 1080画素) を作成した。この画像に対して図5に示した処理を行い、3章で述べた周波数ごとの主成分比を求めて、水平および垂直の拡大前の画素数とリサンプリング位相を推定した。

図7(a-1) (a-2) に、水平と垂直の各主成分比を示す。同図の横軸は水平周波数あるいは垂直周波数を示し、縦軸は各周波数に対応した主成分比 (λ_1 / λ_2) を示す。なお、縦軸の主成分比については、見やすいように、全周波数の中で最も大きな主成分比が一定値 (1.0) となるように線形正規化して示している。同図 (a-1) (a-2) において、拡大前の画素数に対応した周波数 (水平: 720 lpw, 垂直: 480 lph)

図6 実験に使用した画像

図7 提案する画素数・位相推定法の実験結果

の主成分比が突出して大きくなっており、拡大前の画素数を正しく推定できていることがわかる。

図7 (a-3) (a-4) に、拡大前の水平と垂直の各ナイキスト

周波数における複素平面上の信号の分布を示す。それぞれの第1主成分の固有ベクトルと実軸がなす角が、各リサンプリング位相の1/2を示しているはずである。

式 (2) を用いて、拡大前後の画素数から各リサンプリング位相を求めると、以下ようになる。まず、水平については、 $k=w=720$, $k'=w'=1920$ とおくと、 $\theta_{RS} = \phi_{RS} = \pi (k - k') / k' = \pi (720 - 1920) / 1920 = -5\pi/8 = -112.5^\circ$ となり、図7 (a-3) に示した $\phi_{RS} / 2 = -56.5^\circ$ ($\phi_{RS} = -113^\circ$) とよく一致している。同様に、垂直についても、 $\theta_{RS} = \psi_{RS} = \pi (480 - 1080) / 1080 = -5\pi/9 = -100^\circ$ となり、図7 (a-4) に示した $\psi_{RS} / 2 = -50.2^\circ$ ($\psi_{RS} = -100.4^\circ$) とよく一致し、リサンプリング位相をほぼ正しく推定できていることがわかる。

続いて、図6 (b) および (c) に示す画像を原画とし、先ほどとは拡大の条件を変更して、一般的なバイリニア補間により、画像の中央を拡大中心として、水平方向に16/9倍、垂直方向に3/2倍に拡大したアップコンバート画像 (1280×720画素) を作成して、同様の実験を行った。ここで、同図 (b) (c) は一連の動画から抜粋したフレームであるが、(c) は (b) に比べてカメラが大きく水平移動 (パン) しており大幅な解像度低下 (ぼけ) が生じている。

図7 (b-1) (b-2) に示すように、水平・垂直ともに主成分比が突出して大きくなる周波数が存在し、各ナイキスト周波数を正しく推定できている。また、リサンプリング位相については、同図 (b-3) (b-4) に示す各値 ($\phi_{RS} / 2 = -37.8^\circ$ ($\phi_{RS} = -75.6^\circ$), および $\psi_{RS} / 2 = -31.2^\circ$ ($\psi_{RS} = -62.4^\circ$)) となった。式 (2) から求めた理論値 ($\phi_{RS} = \pi (720 - 1280) / 1280 = -78.75^\circ$, $\psi_{RS} = \pi (480 - 720) / 720 = -60^\circ$) と比較すると、 ϕ_{RS} が 3.2° , ψ_{RS} が 2.4° ずれているが、図2を参照すると、この程度の位相ずれは実運用上問題にならないと考えられる。

その一方で、図7 (c-1) (c-2) については、拡大前のナイキスト周波数以外にも大きな主成分比が見られる。特に、垂直については、同図 (c-2) に示すように、0lphと720lphの近傍にそれぞれ大きな主成分比がある。その結果、同図 (c-4) に示すように、拡大前の垂直ナイキスト周波数を4lphと誤推定してしまっている。

この誤推定は、前述したカメラの大きな移動に伴う解像度低下により、ナイキスト周波数成分が大きく減衰し、複素平面上にプロットした各点が原点付近に集まってしまう、ノイズによって明確な直線状の分布にならず、他の周波数の主成分比が相対的に大きくなってしまったことが原因と考えられる。

本提案手法の原理上、前述のように拡大前のナイキスト周波数成分が大きく減衰している場合には、拡大前の画素数とリサンプリング位相を正しく推定することができない。しかし、この場合には、折返し成分を利用した超解像処理ではもともと大きな効果は期待できないと考えられる。したがって、主成分比が大きくなる周波数が複数検出されて拡大前の画素数を推定できないときには、超解像処理を止めるなどの対策を講じることにより、実運用上は問題にならないと考えられる。

5. むすび

未知の倍率で拡大されたアップコンバート画像における「拡大前の画素数および折返し成分の位相を決定づけるリサンプリング位相」を推定する手法を提案し、シミュレーション実験によってその有効性を示した。

本手法において、拡大前のナイキスト周波数では、ベースバンド成分と折返し成分の信号強度が必ず一致し、アップコンバート画像信号の実部と虚部を複素平面上にプロットすると、直線状に分布することを利用する。

なお、本手法の原理上、拡大前のナイキスト周波数成分が減衰している場合や折返し成分がない場合には、拡大前の画素数とリサンプリング位相を正しく推定することができない。また、テストチャート (例えば、円形ゾーンプレートなど) のように、離れた画素位置の信号強度や位相が無相関でない場合や、1枚の画像の中にさまざまな倍率で拡大された複数の画像が混在して貼り込まれている場合にも本手法は適用できないため、これらの対策が今後の課題である。

〔文 献〕

- 1) 田中, 奥富: “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, 62, 3, pp.337-342 (2008)
- 2) R. Schultz and R. Stevenson: "A Bayesian Approach to Image Expansion for Improved Definition", IEEE Trans. Image Processing, 3, 3, pp.233-242 (1994)
- 3) M. Irani and S. Peleg: "Improving Resolution by Image Registration", CVGIP, 53, 3, pp.231-239 (1991)
- 4) S. Farsiu et al: "Fast and Robust Multiframe Super Resolution", IEEE Trans. On Image Proc., 13, 10, pp.1327-1344 (2004)
- 5) R. Tsai and T. Huang: "Multiframe Image Restoration and Registration", Advances in Computer Vision and Image Processing, 1, 2, pp.317-339 (1984)
- 6) 上田, 大森: “位相シフト画像を用いた画像の高精細化”, 1994年テレビ年次大, 8-1, pp.111-112 (1994)
- 7) 影山, 浜田: “画像の位相シフトを利用した超解像再構成処理の適用可能性と2次元拡張に関する検討”, 映像学誌, 68, 6, pp.J247-J251 (2014)
- 8) W. Richardson: "Bayesian-based iterative method of image restoration", J. Opt. Soc. Am., 62, 1, pp.55-59 (1972)
- 9) 浅井 ほか: “ケプストラム解析を用いたブレ画像の Blind Deconvolution”, 2009-CVIM-167, 26, 1-8 (2009)
- 10) R. Szeliski and D. Scharstein: "Symmetric sub-pixel stereo matching", Proc. European Conf. Computer Vision, 2, pp.525-540 (2002)
- 11) B. Zitova and J. Flusser: "Image registration methods: A survey", Image Vis. Comput., 32, 11, pp.977-1000 (2003)

影山 昌広 1987年, 名古屋大学大学院修士課程修了。同年, (株)日立製作所に入社。中央研究所に勤務し, 画像の信号処理に関する研究に従事。博士 (工学)。正会員。

浜田 宏一 1996年, 東京大学大学院修士課程修了。2003年より, (株)日立製作所中央研究所にて, 画像の信号処理に関する研究に従事。博士 (情報理工学)。正会員。