研究速報

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

A Study on Applicability and Two-dimensional Extension of the Restoration to Super-resolution Using Phase-shifted Images

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

あらまし 超解像技術の再構成処理における反復演算の不要化に向け、2枚の画像から1枚の高解像画像を再構成できるTPS法に着目し、画像にさまざまな動きが含まれる場合にもTPS法を適用可能であることを理論的に示すとともに、TPS法の2次元拡張方式を提案した。

キーワード：超解像、再構成、TPS (Time domain Phase compensated Sub-sampling) 法、位相シフト、2次元拡張

1. ま え が き

撮影された画像の解像度限界(ナイキスト周波数)を超えて、その画像に含まれる高周波成分を復元し、高解像化する「超解像技術」の開発が盛んである¹⁾。

超解像技術として、複数の画像を1枚に合成して高解像化する方式が広く用いられている。この方式は、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り¹⁾、複数の画像に映った対象(被写体)をサブピクセル精度で正確に位置合わせする処理と、位置合わせ後の画像を1枚に合成する再構成処理からなる¹⁾。

再構成処理として、MAP法²⁾やIBP法³⁾に代表されるような、反復演算による逐次近似が一般に用いられているが、処理時間の短縮に向け、反復回数の削減が課題となっており、これまでに多くの検討がなされている。例えば、Farsiuらは、反復回数削減のためにL1ノルム最小化とバイラテラル・フィルタに基づく正則化を導入し、大気ゆらぎや撮像素子による画像のぼけ、折返し成分、ノイズを低減しながら、約20回の反復演算で解が安定に収束する再構成処理を提案した⁴⁾。また、米司らは、反復演算の初期画像の折返し成分を低減しておくことにより、反復回数を従来の1/4程度に削減した⁵⁾。

一方、Tsaiらは、入力信号をフーリエ変換し、周波数領域で連立方程式を解くことにより、高解像画像を得る手法⁶⁾を提案している。この手法は、反復演算が不要であり、簡単な計算で画像を生成できる利点があるが、複数の画像に

映る被写体の動きが画像全体で同一かつ平行移動(すなわち、Linear Shift-Invariant)でなければならない、という条件が必要である⁷⁾。

これと同様に反復演算が不要で、2枚の画像から1枚の高解像な画像を再構成できる技術として、上田らは画像の位相シフトを利用したTPS (Time domain Phase compensated Sub-sampling) 法を発表した⁸⁾。TPS法は、前述したような画像のぼけやノイズの低減効果はなく、折返し成分の低減だけに効果を絞っている。発表⁸⁾の中で、1枚のCZPチャートを元に、固定(90°)の位相差で水平方向にサンプリングした2枚の画像を入力としてTPS法の効果確認実験を行い、高解像化の効果を示した。

しかしながら、2枚の画像に映った被写体間の位相差が画像全体で一定でない場合にもTPS法が適用可能かについて、これまでに論じられていない。また、2次元方向(水平、垂直)への拡張方法についても明らかにされていない。もし、時間とともに被写体の見かけの大きさが変わったり、回転したり、変形したりした場合にも、2次元のTPS法を適用できれば、2次元周波数領域の折返し成分を反復演算なしで低減できるようになる。

そこで本稿では、2枚の画像間に被写体のさまざまな動きが含まれる場合にもTPS法を適用可能であることを理論的に示す。また、TPS法の2次元拡張方式を提案し、シミュレーション実験によって折返し成分の低減効果を確認する。

2. TPS法⁸⁾による超解像再構成処理(従来技術)

TPS法⁸⁾では、サブピクセル精度の位置合わせ結果(既知)に基づき、入力画像間のサンプリング位相差に応じた位相シフト画像を生成する。この画像を入力画像と加算し、

2014年1月21日受付、2014年1月25日再受付、2014年2月20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 TPS法⁸⁾の動作

サンプリングの際に生じた折返し成分をキャンセルして、アップサンプルした広帯域の出力画像を得る。以下、上田らの発表内容⁸⁾を要約する。

まず、入力連続信号 $a(t)$ に対し、水平方向のサンプリング周波数 ω_s 、位相 α_0 、 α_1 でサンプリングした2つの信号系列 $s_0(t)$ 、 $s_1(t)$ を考え、そのフーリエ変換を $S_0(\omega)$ 、 $S_1(\omega)$ とすると、以下のように表すことができる。

$$S_0(\omega) = A(\omega) + \exp(-j\alpha_0(1 - \omega/\omega_s))B(\omega) \quad (1)$$

$$S_1(\omega) = A(\omega) + \exp(-j\alpha_1(1 - \omega/\omega_s))B(\omega) \quad (2)$$

ここで、 $A(\omega)$ はベースバンド成分、 $B(\omega)$ は水平方向1次の下側帯波成分(折返し成分)である。また、指数関数部第1項はサンプリングの際の位相ずれ、同第2項は時間ずれに起因する項である。時間ずれを補正して2倍アップサンプルした信号の和と差は、以下ようになる。

$$S_0' + S_1' = 2A(\omega) + (\exp(-j\alpha_0) + \exp(-j\alpha_1))B(\omega) \quad (3)$$

$$S_0' - S_1' = (\exp(-j\alpha_0) - \exp(-j\alpha_1))B(\omega) \quad (4)$$

図1に、各信号の位相関係を示す。図1(a)の信号 S_0' と図1(b)の信号 S_1' の和信号は図1(c)のようになり、差信号は図1(d)のようになる。ここで、(c)和信号と(d)差信号のベクトルはかならず直交することから、(d)差信号に式(5)の係数 K (純虚数)を乗じて(c)和信号に加えることにより下側帯波成分(折返し成分)がキャンセルされ、(e)出力(帯域が2倍化されたベースバンド信号)が得られる。

$$K = -j \cot((\alpha_0 - \alpha_1)/2) \quad (5)$$

図2に、TPS処理のブロック構成⁸⁾を示す。位相 α_0 、 α_1 でサンプリングされた2つの入力信号系列 $s_0(t)$ 、 $s_1(t)$ に対し、ポリフェーズ・フィルタによって時間ずれを補正するとともに2倍アップサンプルする。ヒルベルト変換器(奇対称FIRフィルタ)によって差信号を -90° 位相シフト

図2 TPS処理のブロック図⁸⁾

し、式(5)に示した利得係数を乗じて和信号に加算して、帯域が2倍化された出力信号を得る。

3. 画像のさまざまな動きに対するTPS法の動作検証

前述したTPS法では、2枚の画像の間に平行移動以外の被写体の動きがあった場合に、単純には各信号が周波数領域で重ならなくなるため、折返し成分をキャンセルできなくなるのではないかと、という懸念がある。例えば、画面上で被写体が徐々に小さくなっていくと、被写体の大きさに反比例して、ベースバンド成分の周波数は高くなっていく。このとき、サンプリング周波数 ω_s で折り返された下側帯波成分(折返し成分)の周波数は、逆に低くなっていく。したがって、図1に示した(c)和信号と(d)差信号を単純に加算しても、折返し成分をキャンセルできないように思われる。

ここで筆者らは、図2に示したTPS処理は差信号の瞬時値に対して適切な係数を乗じて和信号と加算しているだけであって、近傍の画素値との関係で定義される「周波数」が直接関係していないことに着目し、被写体の見かけの大きさが変化した場合には、サブピクセル精度の位置合わせが、2枚の画像間の周波数の違いを吸収している可能性を考えた。以下、その詳細を述べる。

一般に、入力された2枚の画像間の時間間隔が十分に小さければ、そこに映る被写体は、ほぼ剛体とみなすことができる。このとき、式(5)に示した係数 K は、隣り合う画素間でほぼ同一の値になるため、図2に示したTPS処理の全体を線形処理とみなすことができる。線形処理では、複雑な波形を持った入力信号に対する応答(出力信号)は、入力信号を一旦単純な正弦波に分解し、それぞれの正弦波に対して処理を行ったのちに、それらの結果をすべて加算した信号と同一になる。そこで、大きさが異なる被写体を想定した2種類の正弦波を2つの入力信号として、TPS法の動作を以下のように検証した。

まず、以下のように、ベースバンド成分(第1項)と折返し成分(第2項)を含む2つの信号系列を定義する。

$$S_0(t) = \cos(\omega_0 t + \alpha_0) + \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)) \quad (6)$$

$$S_1(t) = \cos(\omega_1 t + \alpha_1) + \cos(\pi t - (\omega_1 t + \alpha_1)) \quad (7)$$

ここで、式 (6) と式 (7) のベースバンド成分の対応点を一致させるため、式 (8) を用いて、 $s_1(t)$ の標本点を $\delta(t)$ 移動する。なお、この移動は線形補間により実現できる。

$$\omega_1 t + \alpha_1 \rightarrow \omega_1 t + \alpha_1 + \delta(t) \quad (= \omega_0 t + \alpha_0) \quad (8)$$

式 (8) を用い、式 (7) を式 (9) に変換する。

$$\begin{aligned} S_1'(t) &= \cos(\omega_1 t + \alpha_1 + \delta(t)) + \cos(\pi t - (\omega_1 t + \alpha_1) + \delta(t)) \\ &= \cos(\omega_0 t + \alpha_0) + \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t)) \end{aligned} \quad (9)$$

このとき、式 (5) に示した係数 K は、式 (10) になる。

$$K' = -j \cot(\delta(t)) \quad (10)$$

式 (6) と式 (9) の和と差、および式 (10) を用いて TPS 処理を行うと、式 (11) が得られる (付録参照)。

$$\begin{aligned} (s_0(t) + s_1'(t)) + K'(s_0(t) - s_1'(t)) \\ &= 2\cos(\omega_0 t + \alpha_0) \\ &+ (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)) + \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t)) \\ &- j\cos(\delta(t)) \\ &* (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)) - \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t))) \\ &= 2\cos(\omega_0 t + \alpha_0) \\ &+ 2(\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + \delta(t)) * \cos(-\delta(t))) \\ &+ 2\cos(\delta(t)) / \sin(\delta(t)) * (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + \delta(t)) \\ &* \sin(-\delta(t))) \\ &= 2\cos(\omega_0 t + \alpha_0) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $\sin(\delta(t)) \neq 0$

式 (11) は、折返し成分がキャンセルされ、帯域が2倍化された出力信号を表す。したがって、2枚の画像間で被写体の見かけの大きさが異なっているとしても、両者のベースバンド成分の対応点を正確に見つけることができれば、TPS 法が適用可能であることを証明できたことになる。

4. TPS法の2次元拡張 (提案方式)

図3に示すように、水平方向および垂直方向の TPS 処理 (1次元処理) の各出力を、それぞれの直交方向の線形補間により拡大し、画素数を揃えて混合することにより、2次元に拡張する方式を提案する。

提案方式は、以下の3つの処理で構成される。

- (1) 入力された2フレームの各標本点をサブピクセル精度で対応づけ、2次元方向で位置合わせする。
- (2) 水平、垂直方向の各標本点移動量 ($\delta(x)$, $\delta(y)$) を用いて、各方向に1次元の TPS 処理を行う。
- (3) 上記2つの処理結果の画素数を揃えて混合する。

以下、この動作を説明する。

例えば、被写体が斜め方向に移動した場合を想定すると、水平方向のヒルベルト変換 (-90° 位相シフト) だけを行う水平 TPS 処理の出力には垂直成分の歪が含まれることになるが、元の入力信号の垂直高周波成分が少ない領域 (縦線など) では、この歪が無視できる程度に小さい。同様に、垂直 TPS 処理の出力は、水平高周波成分が少ない領域 (横

ただし、水平高周波成分 ≫ 垂直高周波成分のとき、 $p=0$
水平高周波成分 ≪ 垂直高周波成分のとき、 $p=1$

図3 TPS処理の2次元拡張 (提案方式)

線など) では水平成分の歪が小さい。

この性質を利用し、小領域ごとに被写体のテクスチャに含まれる2次元高周波成分量に応じて、各 TPS 処理の出力を混合すれば、2次元の TPS 処理を実現できる。

なお、水平あるいは垂直の各標本点移動量 (式 (8) における $\delta(t)$ 、(ただし、 $t=x$ あるいは $t=y$) が整数画素間隔になった場合は、 $\sin(\delta(t)) = 0$ となって式 (11) を計算できないため、各 TPS 処理の動作を一般的な線形補間に切替えることにする。この詳細は、次章で述べる。

ここで、前章で述べた TPS 法の動作検証において、水平周波数を μ 、垂直周波数を ν 、水平座標を x 、垂直座標を y とおき、例えば式 (6) における変数 ($\omega_n t + \alpha_n$) を式 (12) のように置換したのちに、式 (6) から式 (11) に至る変形を行えば、2フレームの間の2次元周波数 (μ_0, ν_0) と (μ_1, ν_1) の関係に関わらず、折返し成分をキャンセルできることが証明できる (詳細省略)。

$$\omega_n t + \alpha_n \rightarrow \mu_n x + \nu_n y + \alpha_n \quad (12)$$

ただし、 $n=0$ or 1

また、回転や変形などの複雑な動きも、局所的に見れば拡大と縮小で表すことができるため、さまざまな動きを含む画像に対しても、TPS 法を適用可能なことがわかる。

5. シミュレーション実験

提案方式による折返し成分の低減効果を確認する実験を行った。まず、フル HD サイズ (1920×1080 画素) の原画 (静止画) をもとに、縮小後のナイキスト周波数における利得が 0.375 (約 8.5 dB 減衰) となるように設計した線形フィルタを用いて、折返し成分を若干残しながら縮小するとともに、画像中央を回転中心として 400 フレームで 1 回転するテストチャート (640×360 画素、動画) をシミュレーションにより作成した。この際、図4(a)～図4(c)に示すように、回転中心を基準位置として、回転後の画像の垂直方向に拡大し、水平方向に縮小するような変形も加えた。これと併せ、式 (8) (ただし、 $t=x$ あるいは $t=y$) に基づいて、サブピクセル精度の2次元動きベクトル (標本点移動量) を画素ごとに作成した。

このテストチャート (動画) を入力として、提案方式に

図4 実験に用いた入力画像 (640 × 360 画素)

図5 シミュレーション実験結果
(フレーム#4の出力画像 (1280 × 720 画素) のうち、中央部分 (320 × 240 画素) を抜粋)

よって処理した結果を、図5に示す。

図5 (a) は、一般的なバイリニア・フィルタによる拡大画像であり、次に述べる図5 (b) の折返し成分 (モアレ) との比較のために示した。

図5 (b) は、提案方式による拡大画像であり、折返し成分が低減されるとともに、高解像になっている。例えば、図中の「40」、「50」の付近に描かれている垂直線 (画像中央やや右上) と水平線 (画像中央やや左、画像下部やや右)、および「60」より上に描かれている垂直線 (画像上部やや左) など、図5 (a) に比べて折返し成分によるモアレが低減され、本来の直線が復元されている。

その一方で、図5 (b) の一部に、折返し成分が残留したり、直線であるべきところが曲線に見えたりする画質劣化がある。これは、2枚の画像間の移動量が整数画素間隔になってしまい、式 (10) に示した係数 K の分母 ($\sin(\delta(t))$)、ただし、 $t=x$ あるいは $t=y$ が0 になって式 (11) の TPS 処理を行うことができず、局所的に線形補間に切替えたことが原因である。

図5 (c)、図5 (d) に、提案方式における水平 TPS 処理および垂直 TPS 処理の適用領域を示す。これらの図は、式 (10) における分母が0 近傍になった領域を白く表示したものである。具体的には、式 (10) に示した係数 K の値の絶

対値 ($|K|$) に応じて、以下のように場合分けした。

- (1) $|K| < 1.0$ のとき, TPS 処理
- (2) $1.0 \leq |K| < 5.0$ のとき, TPS 処理と線形補間の加重混合 (すなわち, TPS 処理結果 + (線形補間結果 - TPS 処理結果) * ($|K| - 1.0$) / 4.0)
- (3) $5.0 \leq |K|$ のとき, 線形補間

ここで, 上記 (2) は, TPS 処理と線形補間を切替えた部分が不自然にならないように, 両者を徐々に切替えるための処理である。

6. むすび

超解像技術の再構成処理における反復演算の不要化に向け, 2枚の画像から1枚の高解像画像を再構成できる TPS (Time domain Phase compensated Sub-sampling) 法⁸⁾について検討し, 2枚の画像間に被写体のさまざまな動きが含まれる場合にも TPS 法を適用可能であることを理論的に示した。また, TPS 法の2次元拡張方式を提案し, シミュレーション実験によって折返し成分の低減効果を確認した。なお, 2枚の画像間の被写体の移動量が, たまたま整数画素間隔になってしまうと, 計算途中の分母が0になって TPS 処理できなくなり, まだら状の画質劣化が生じるため, この対策が今後の課題である。

〔文 献〕

- 1) 例えば, 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”, 映情学誌, 82, 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) 米司, 浜田, 影山: “映像劣化モデル簡略化による超解像処理の反復数低減手法の提案”, 2009年映情学冬季大, 6-6 (2009)

- 6) R. Tsai and T. Huang: "Multiframe Image Restoration and Registration", Advances in Computer Vision and Image Processing, 1, 2, pp.317-339 (1984)
- 7) 杉本, 奥富: “画像の超解像度化処理”, 日口誌, 12, 3, pp.305-309 (2005)
- 8) 上田, 大森: “位相シフト画像を用いた画像の高解像化”, 1994年テレビ年次大, 8-1, pp.111-112 (1994)

< 付録 >

式 (11) の導出の際に, 式の途中で, $A = \pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)$ および $B = \pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t)$ と置き, 以下に示す付・式 (1) および付・式 (2) の変形を行った。

$$\begin{aligned} & (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)) + \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t))) \\ &= \cos(A) + \cos(B) \\ &= 2\cos((A+B)/2)\cos((A-B)/2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &= 2(\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + \delta(t)) * \cos(-\delta(t))) \\ &\quad - j\cot(\delta(t)) * (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0)) \\ &\quad \quad - \cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + 2\delta(t))) \\ &= -j\cot(\delta(t)) * (\cos(A) - \cos(B)) \\ &= \cot(\delta(t)) * (\sin(A) - \sin(B)) \quad (2) \\ &= 2\cot(\delta(t)) * \cos((A+B)/2)\sin((A-B)/2) \\ &= 2\cos(\delta(t)) / \sin(\delta(t)) * (\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + \delta(t)) \\ &\quad * \sin(-\delta(t))) \\ &= -2(\cos(\pi t - (\omega_0 t + \alpha_0) + \delta(t)) * \cos(-\delta(t)))) \end{aligned}$$

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。