
複数のデジタル画像データによる超解像処理

Super Resolution Processing by Plural Number of Lower Resolution Images

青木 伸*

Shin AOKI

要 旨

カメラの手ぶれなどによる制御されない位置ずれをもつ複数のデジタル画像を入力し、入力画像以上の解像度を持つ1枚の高解像度画像を出力する処理を提案する。本手法では主に線形デジタルフィルタを使った高速処理が可能である。本稿ではその原理を説明し、シミュレーション実験により効果を示す。

ABSTRACT

A super resolution process is proposed to construct a high resolution image from plural number of unconstrained lower resolution images. The processed image includes higher frequency components compared to each input image. This algorithm is designed to achieve high speed processing using linear digital filters. The detail algorithm is described with the simulated results.

* 中央研究所 AIT研究センター
Research and Development Center,
Advanced Imaging Technology Research Department

1. 背景と目的

近年、デジタルカメラなど2次元センサを使った撮像デバイスが普及している。しかしCCDなどの撮像センサは画素数が大きくなるほど高価になるため、信号処理によりセンサの解像度以上の高解像度データを得ることが望まれる。この目的に対して、例えば撮像センサを1/2画素だけずらして2枚の画像を撮影した後、1画素ずつ交互に組み合わせて合成する方法が考えられる。しかしこのような単純な合成で高解像度化するためには、正確に1/2画素のずれを持った画像を得る必要がある。それには厳密に位置合わせされた2枚の撮像センサや、撮影対象を固定し1枚のセンサを正確に移動させて2回撮影する等、撮影時になんらかの付加的な機構が必要になり通常のカメラでは撮影できない。一方、このような正確に制御されたずれではなく、任意の位置、方向で撮影された複数の画像データを扱う方法として、人工衛星からのデータなどを元に高解像度データを復元する方法も提案されている¹⁾。しかし、この問題は基本的に非線形最適化問題であり、複雑で大規模な繰り返し演算が必要であった。

本稿では、カメラの手振れなどを想定した、微小な制御されないずれを持つ複数の画像データを使い、デジタルフィルタを中心とした高速な信号処理により高解像度画像データを復元する方法を提案する。

標本化定理より、原信号が標本化周波数の半分(ナイキスト周波数)以下に帯域制限されていれば、一組の標本信号から原信号が完全に復元できることが知られている。逆に、原信号がこのように帯域制限されていれば、それを標本化した信号がいくつあっても得られる情報量にかわりはないといえる。ここでは、帯域制限されていない、つまり折り返し歪みを含む画像データを複数使用し、原画像の高周波成分を復元することを目的とする。

さらに、使用する各デジタル画像の標本化位置のずれを基本的に微小な平行移動だけに限定する。この制約により、後述のように画像復元を線形信号処理の問題として解くことができる。

2. 技術

簡単のため、まず1次元の信号について、ナイキスト周波数の2倍に帯域制限された原信号を、標本化位置をずらして標本化した2つの標本信号の周波数特性を考える。原信号を $f(x)$ 、 $f(x)$ を位置 $(0, 1, 2, \dots)$ で標本化した標本信号を $d(x)$ 、同じく $f(x)$ を位置 $(0+, 1+, 2+, \dots)$ で標本化した標本信号を $d(x)$ とする。

$f(x)$ のフーリエ変換を $F(\omega)$ とすると、 $d(x)$ 、 $d(x)$ のフーリエ変換 $D(\omega)$ 、 $D(\omega)$ はそれぞれ次式のようになる。

$$D(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} F(\omega - k) \quad (1)$$

$$D_{\Delta}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi i k \Delta) F(\omega - k) \quad (2)$$

(1)(2)式の $k = 0$ の項は原信号と同じ成分(以下、オリジナル成分と呼ぶ)であり、その他の項は標本化によって生じた成分である(折り返し成分と呼ぶ)。(2)式は標本信号の折り返し成分は標本化位置のずれに比例してオリジナル成分と位相がずれることを示している。本処理法は、この折り返し成分の標本化位置に応じた位相のずれを利用し、折り返し成分を打ち消すことにより原信号の高周波成分を復元するものである。

2-1 処理

提案する処理方法は以下の3段階の処理からなる(Fig.1)。

I. 位置推定

与えられた複数の画像データ自身から、それぞれの画像データの撮影時の標本化位置のずれを推定する。

II. 高帯域補間

各画像データを折り返し成分も含め原信号の高周波成分をすべて透過する帯域の広いローパスフィルタ(以下、LPF)を使い高密度化する。

III. 加重和

各高密度化データの標本化位置に応じた重みを使った加重和をとることにより折り返し歪みを打ち消し、同時に原信号の高周波成分を復元する。

以下、それぞれの処理について説明する。

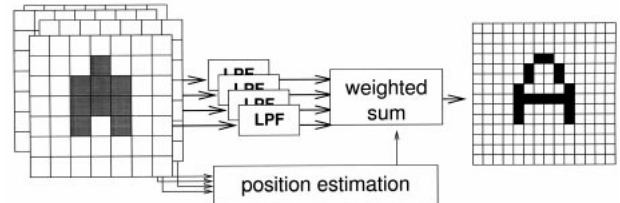


Fig.1 A block diagram of the proposed super resolution process.

2-1-1 位置推定

後述の処理のために標本化位置のずれ量を画素以下の精度で知る必要がある。そこで画像の時空間微分を用いる方法²⁾を使用し、与えられた複数の画像データから標本化位置のずれを推定する。

ここでは標本化位置を固定し、撮影対象 $f(x, y)$ が、速度 u, v で移動しているものとする。この対象を微小な時間間隔 Δt をおいて撮影した2枚の画像 $f_1(x, y)$ $f_2(x, y)$ は、

$$f_2(x, y) = f_1(x - u\Delta t, y - v\Delta t) \quad (3)$$

なる関係を持つ。 $f(x, y)$ を1次近似し、 x, y, t でそれぞれ偏微分すると

$$u \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + v \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial f(x, y)}{\partial t} \approx 0 \quad (4)$$

がいたるところ成り立つはずである。雑音低減のため、上式の成立の悪さを左辺の近傍領域での2乗積分で評価し、これを最小化する速度 u', v' を求めると、

$$\begin{aligned} u' &= \frac{S_{yt}S_{xy} - S_{xt}S_{yy}}{S_{xx}S_{yy} - S_{xy}^2} \\ v' &= \frac{S_{xt}S_{xy} - S_{yt}S_{xx}}{S_{xx}S_{yy} - S_{xy}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

ただし

$$S_{ij} = \int \int \frac{\partial f}{\partial i} \frac{\partial f}{\partial j} dx dy$$

となる。これを2枚の画像データ f_1, f_2 のいずれの推定値とする。また今回の対象は折り返し歪みを含む濃淡変化の激しい画像なので、1次近似の誤差を減少させるためあらかじめ平滑化フィルタをかけたデータを使用する。

1枚の画像データを基準とし各データのずれを推定することにより、全ての画像データについて相対的な標本化位置のずれを推定することができる。

2-1-2 広帯域補間

sinc関数を用いた補間によって標本数を増やす高密度化処理は、ナイキスト周波数以下だけを透過するローパスフィルタ(LPF)処理と考えることができる。このようなフィルタで2倍の $d(x)$ のような折り返し成分を含む標本信号を補間すると、原信号の高周波成分が失われ、かわりに折り返し歪みを含むことになる(Fig.2)。

一方、原信号をすべて透過する帯域の広いLPFで処理するとFig.3のようになる。このような広帯域フィルタによって高密度化したデータは、折り返し成分も多く残っているが、原信号に含まれる高周波成分をすべて含んでいるため、この後の加重処理によりオリジナル成分のすべてを復元することができる。

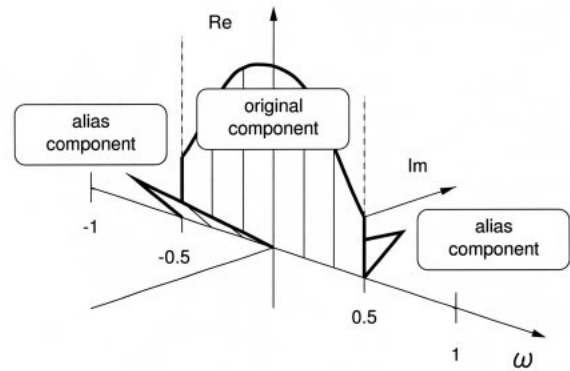


Fig.2 A signal interpolated by sinc function.

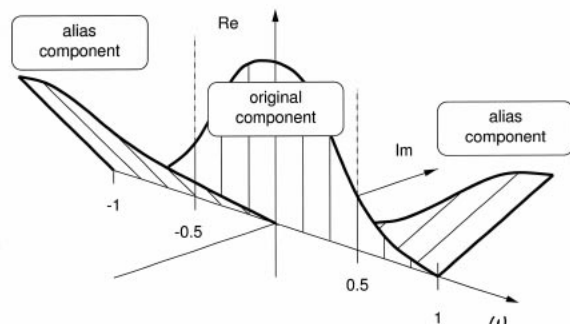


Fig.3 A signal interpolated by the wide band LPF.

2-1-3 加重和

上述の方法で補間された各入力画像に対して、折り返し成分を打ち消し、かつ雑音を低減するために加重和をとる。そのための重みは以下のようにして決定することができる。

1. 折り返し成分の打ち消し

原信号はナイキスト周波数の2倍の帯域を持つものとし、その原信号を3つの異なる位置 ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2 で標本化した信号 $d_0(x), d_1(x), d_2(x)$ を考える。これらをナイキスト周波数の2倍の帯域、つまり原信号の持つすべての帯域を透過する高帯域LPFでそれぞれを処理した結果は、前節の考察から、原信号と同じオリジナル成分と、それぞれの標本化位置に応じた位相を持つ1次折り返し成分の和になっている(Fig.4)。

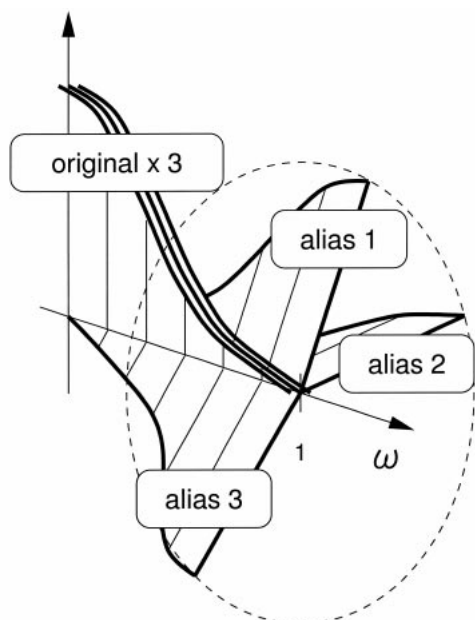


Fig.4 3 signals sampled at same rate and different phase.

そこでこれら3つの信号の w_m を使った加重和をとると、周波数空間では、

$$\begin{aligned}
 O(\omega) &= \sum_{m=0,1,2} w_m \cdot \mathcal{F}(\omega) & (6) \\
 &+ \sum_{m=0,1,2} \{w_m \exp(-2\pi i \Delta_m) \mathcal{F}(\omega - 1)\} \\
 &+ \sum_{m=0,1,2} \{w_m \exp(2\pi i \Delta_m) \mathcal{F}(\omega + 1)\}
 \end{aligned}$$

となる。ここで、重み w_m が

$$\sum_m w_m = 1 \quad (7)$$

$$\sum_m w_m \exp(2\pi i \Delta_m) = 0 \quad (8)$$

つまり

$$\sum_m w_m \cos(2\pi \Delta_m) = 0$$

$$\sum_m w_m \sin(2\pi \Delta_m) = 0$$

なる条件を満たせば(6)式は R となる。つまり折り返し成分はすべて打ち消され、原信号と同じオリジナル成分が高周波成分を含めて復元される。このような重み w_m は、それぞれの信号の標本化位置 Δ_m から(7)(8)式の連立1次方程式を解くことにより得られる。

ここでは原信号はナイキスト周波数の2倍の帯域を持つとしたので、折り返し成分を1つだけ打ち消せば良かった。原信号がより広い帯域を持ち、標本信号により多

くの折り返し成分が重なっている場合には、1個の折り返し成分を打ち消すために(8)式と同様の2つの条件式が加わる。そのため N 個の折り返し成分を打ち消すためには $2N + 1$ 枚の画像データが必要となる。

II. 誤差の低減

入力標本信号は一般に雑音を含んでいる。ここで各信号に含まれる雑音が、それぞれ独立で分散が同じであると仮定すると、(6)式の加重和をとることにより雑音の分散は w_m^2 倍になる。これは w_m つまり標本化位置 Δ_m によっては加重和により雑音が拡大する場合もあることを示している。

これに対し、入力信号の数をさらに増やし、増えた自由度を使って高周波成分を復元しながら雑音を低減することができる。前節で3つの信号を使用したのに対し、4つ以上の入力信号を使い、(7)(8)式の条件を満たし、かつ雑音の評価値

$$\sum_m w_m^2 \quad (9)$$

を最小化する重み w_m を使った加重和をとる。この重みにより、折り返し成分を打ち消しながら、雑音も低減することができる。この最小化は1次制約つき線形最小2乗法であり、やはり各信号の標本化位置 Δ_m から単純な行列演算により求めることができる。

2-2 2次元信号の処理

前節では1次元信号を使って提案する超解像処理の原理を説明したが、画像は2次元信号である。以下に2次元信号への適用方法を簡単に説明する。

2-2-1 折り返し成分

画像は2次元信号であり、標本化による折り返しも縦横2次元的に生じる(Fig.5)。 n 個の折り返しを打ち消し、高周波成分を復元するためには、 $2n + 1$ 枚の画像データを使用すれば良い。例えば上下左右に2倍の帯域を復元するためには、打ち消す必要がある折り返し成分は周波数空間の対称性から4つになるので、最低9枚の画像データが必要になる。

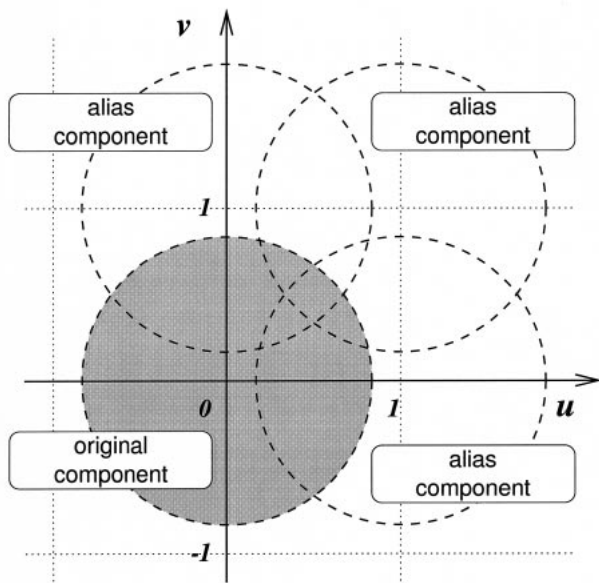


Fig.5 Alias components in a 2D signal.

2-2-2 平行移動以外の位置ずれ

これまで、標準化位置のずれは一定つまり、画像全体が平行移動するものと仮定していた。この仮定により処理は単純化されるが、カメラの手ぶれなどを利用する場合には位置ずれは平行移動だけとは限らず、一般には回転、拡大縮小などを含んでしまう。

しかし、これら平行移動以外のずれもその程度が小さければ、局所的には平行移動と近似することができる。つまり、画像全体を小さなブロックに分割し、ブロック毎に異なる方向、距離の平行移動をするものと考えれば、上述の処理をブロック毎に行うことで微小な回転などを含む画像にも適用することは可能である。

2-3 実験

2-3-1 条件

以下のように人工的にずれを持つ低解像度画像データを作り、高解像度化の実験を行った。

I. 原画像

標準自然画像データ(SCID N2)のマゼンタプレーンを反転してモノクロの原画像とする。原画像のサイズは2048×2560画素である。

II. 低解像度画像

上記原画像を縦横10×10画素の平均をとり、1/10に低解像度化(縮小)した。縮小画像のサイズは204×256画素である。これは開口率100%のモノクロCCDセンサでの撮影をシミュレートするものである。

III. ずれ画像

さらに10×10画素のブロック位置を1画素単位でランダムに変え、計10枚の低解像度画像を作成した。低解像度画像としては1/10画素単位で標準化位置がずれていることになる。

この10枚の低解像度画像を使い、まず標準化位置を推定し、さらに推定された標準化位置を使い縦横2倍の帯域を復元するための重みを求め、縦横2倍の倍率で高解像度画像データを作成した。

2-3-2 結果

標準化位置推定の結果をFig.6に示す。図中が縮小時に設定した真の標準化位置、矢印の先がその推定値を示す。推定の誤差は、平均0.024画素、最大0.042画素であった。

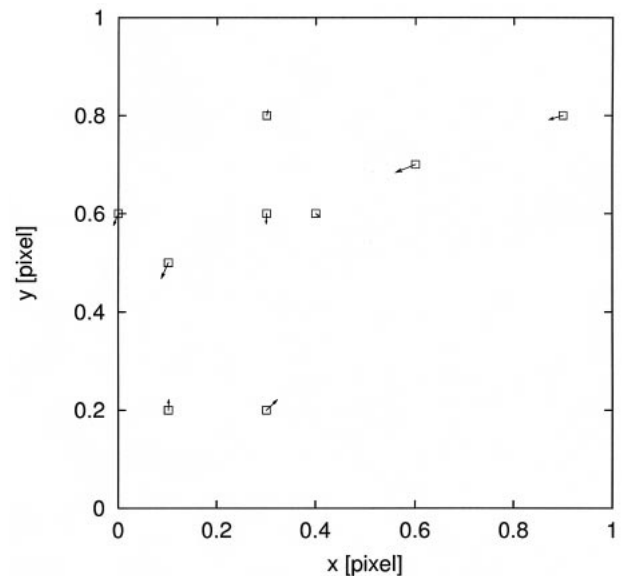


Fig.6 The result of the displacement estimation and errors.

提案する超解像処理を行った結果と、比較のため1枚の画像を補間処理して拡大した結果の画像などのサンプルをFig.7からFig.11に示す。以下に各サンプルについて説明する。

Fig.7 原画像

Fig.8 低解像度画像

原画像を1/10に低解像度化した入力画像のうちの1枚(原画像と同じ大きさになるよう1画素の大きさを拡大してある。以下同様)。解像度不足と折り返し歪みのため、看板の文字などは全く読めない。

Fig.9 従来技術による拡大結果1

1枚の低解像度画像をcubic spline補間で2倍に拡大した結果。補間処理により画素数は増えるが高周波成分がないためぼけている。

Fig.10 従来技術による拡大結果2

各低解像度画像を、推定されたずれに応じて位置合わせをした上で、cubic spline補間し10枚分平均した結果。Fig.9と比べ、平均により折り返し歪みが低減されているため、斜線の凹凸などは減っている。しかし提案する

超解像処理と異なりcubic splineで補間しているため、高周波成分が失われ全体にぼけている。

Fig.11 本手法による超解像処理の結果

Fig.10と比べ、看板の文字などより細かい構造が再現されている。これは原画像の高周波成分が高帯域補間処理によって保存され、復元されたことを示している。

以上の結果から提案する超解像処理によって、1枚の画像データからは復元不可能な原画像の高周波成分が復元されていることが分かる。

また、300MHz UltraSPARC-^{注1}の計算機で10枚の縮小画像を使った処理に要した時間は、約10秒であった。

3. 成果

折り返し歪みを含む、制御されない微小で平行なずれを持つ複数の画像データから、折り返し歪みのない高解像度画像データを復元する超解像処理アルゴリズムを開発した。

本手法は繰り返し演算による非線型最適化など複雑な演算を必要とせず、主にデジタルフィルタ演算からなる方法であり高速処理が可能である。

4. 今後の展開

今回確認された超解像処理の原理を適用するための許容できるずれ量などや最適な撮影条件を明らかにして、実際のカメラへ応用したい。



Fig.7 Original image.



Fig.8 A simulated low resolution image.



Fig.9 The result of the cubic spline interpolation from one low resolution image.



Fig.11 The result of the proposed super resolution process.



Fig.10 The average of the cubic spline interpolated images.

謝辞

本研究を推進するにあたりご指導ご協力をいただいた、情報通信研究所、(株)リコーシステム開発、およびパーソナル事業部の方々に感謝します。

参考文献

- 1) Peter Cheeseman, Bob Kanefsky, Obin Hanson : Super-Resolved Surface Reconstruction From Multiple Images, NASA Technical Report, FIA-93-02.
- 2) 安藤繁 : 画像の時空間微分算法を用いた速度ベクトル分布計測システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.12, (1986) pp.1330-1336

注1) すべてのSPARCの商標は、米国SPARC International, Inc.のライセンスのもとに使用している、同社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。