

サブピクセルシフト画像を用いた複数フレーム超解像技術

Multiframe Super-Resolution Technology Using Subpixel-Shifted Images

竹島 秀則

加藤 宣弘

金子 敏充

■ TAKESHIMA Hidenori

■ KATO Nobuhiro

■ KANEKO Toshimitsu

ハイビジョンテレビ (TV) やパソコン (PC) の液晶ディスプレイ (LCD) の大型化並びに多画素化が進み、DVDコンテンツなど低解像度の画像を拡大表示すると画像の粗さが目立つようになった。画像の粗さを解決する技術として、低解像度の画像から精細な高解像度の画像を生成する超解像技術が注目されている。画像処理の分野では、超解像技術により生成された高解像度画像の画質の高さは以前から知られていたが、演算量の多さなどの課題がありこれまで実用化されていなかった。

このような課題を克服して東芝は、フレーム内再構成型超解像技術を開発し、2008年にその一部を製品化してハイビジョン液晶テレビ“レグザ (REGZA)™”やAVノートPC Qosmio™に搭載した。更に、より高画質を実現できる複数フレーム超解像技術の製品化に向けた研究・開発を推進している。

When playing standard-definition video contents such as DVDs on high-definition television (HDTV) sets and notebook PCs equipped with a large, high-resolution liquid crystal display (LCD), the quality of the magnified video images has been insufficient due to the performance limit of the conventional image upscalers based on linear filters. In recent years, expectations have been focused on a super-resolution technology to enhance the quality of magnified video images in the field of image processing. In practice, however, it is difficult to apply this technology to products because it requires very high computational complexity.

To overcome these problems, Toshiba has developed a one frame reconstruction-based super-resolution technology and incorporated it into the REGZA™ series digital HDTVs and the Qosmio™ series audiovisual (AV) notebook PCs in 2008. We have also been engaged in the research and development of a multiframe super-resolution technology using subpixel-shifted images toward practical applications for higher image quality.

1 まえがき

TVやPCに搭載されたLCDの大型化、並びに多画素化が進み、DVDコンテンツなど低解像度の画像を拡大表示すると画像の粗さが目立つようになってきている。このような低解像度の画像を高画質で表示するための技術として、超解像技術が注目されている⁽¹⁾。

東芝は、フレーム内再構成型超解像技術を開発し、その一部を製品化した。また、更なる高画質化への取組みとして、複数フレーム超解像技術の開発を進めている。ここでは、これらの超解像技術について述べる。

2 超解像技術

低解像度の画像を高解像度の画面に表示する際、従来は線形の補間技術が使われてきた。しかし、線形の補間技術で拡大された画像はぼけたものになることが知られている。このぼけは、高い解像度を生かすために重要な高周波成分の欠落によって起こる。超解像技術とは、このような線形の補間技術の限界を超えることを目指した技術である。

以下に、再構成型超解像技術の原理、及び当社が開発した

フレーム内処理による再構成型超解像技術について述べる。

2.1 再構成型超解像技術

再構成型超解像技術では、カメラの撮像モデルに従って高解像度の画像を復元する。撮像モデルとは、被写体とカメラのレンズや検出素子などを介して記録された画像の情報量の差を、数学的にモデル化したものである。

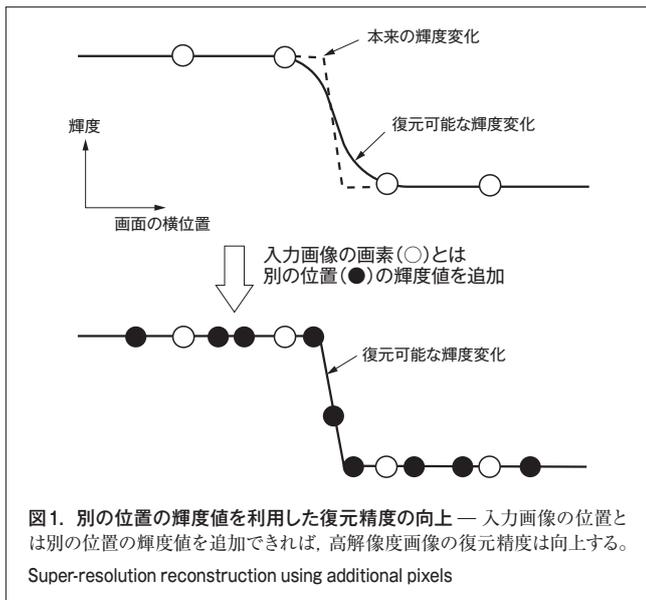
撮像モデルとして、入力された低解像度画素の輝度値 y_j ($j=1, \dots, M$) を、対応する高解像度画像上の各画素 x_k ($k=1, \dots, N$) の加重平均で表すモデルを考える。このモデルは、低解像度画素の位置や画像のぼけ方によって決定される重み w_{jk} を高解像度画素の重みとした、次の拘束式として表せる。

$$y_j = \sum_k w_{jk} x_k \quad (j=1, \dots, M) \quad (1)$$

(1)式は x_k を求めるための線形連立方程式 (線形システム) を与える。 $M < N$ であることから、この線形システムの解は一意には定まらず、 $N - M$ の自由度を持つ。

線形システムの拘束式を満たす $\{x_k\}$ の一つを得る方法はいろいろと提案されている。例えば、バックプロジェクションでは次の手順で解を求める。

(1) 補間技術などで、仮の高解像度画像を生成する。



- (2) 低解像度の画像内で注目する画素を決める。
- (3) カメラの撮像モデルに従って、 y_j の拘束式に対する誤差 e_j を求める。

$$e_j = y_j - \sum_k w_{jk} x_k \quad (2)$$

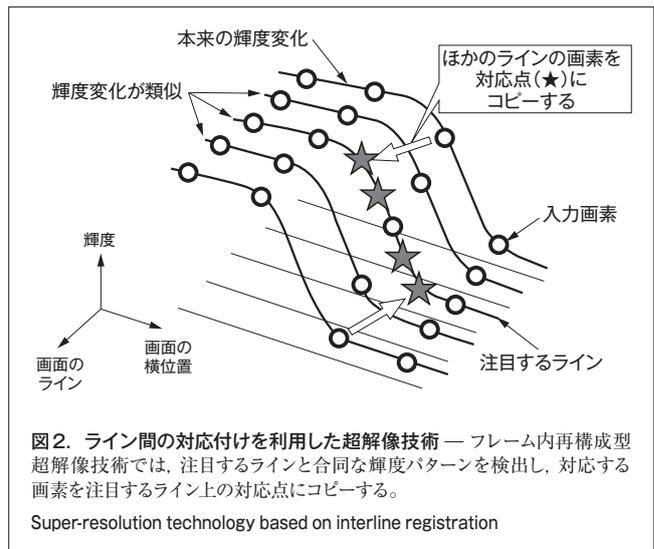
- (4) その誤差を補償するように、高解像度の輝度値を更新する。具体的には、 $x_k \leftarrow x_k - \beta w_{jk} e_j$ (β は更新の重みを表す)を実行する。
- (5) 低解像度の画像内で注目する画素を切り替えながら、ステップ(3)~(4)を数回から数十回繰り返す。

経験的には、拘束式が不足した状態で線形システムの解 $\{x_k\}$ を求めても、期待する高解像度画像と比べぼけた画像が得られることが多い。そこで、拘束式の数を増やすことを考える。拘束式の数を増やすには、図1に示すように、入力された低解像度画像の画素とは別の位置の輝度値をなんらかの方法で知る必要がある。もし別の位置(図1の●)の輝度値がわかるなら、それを新たな y_j として入力画像内の画素(図1の○)と同様に拘束式を立てることで、 M の値が増え、より正確な高解像度画像を復元することができる。

2.2 フレーム内再構成型超解像技術

当社は、フレーム内の対応付けを利用して別の位置の輝度値を知る、フレーム内再構成型超解像技術を開発した⁽²⁾。これにより、超解像技術に必要な演算量を従来と比べ大幅に削減できる。

フレーム内再構成型超解像技術では、被写体の輪郭などのエッジ部分はそのエッジに沿って輝度の変化が類似したパターンが並ぶことが多い、という自然画像の性質(自己合同性)を利用する。具体的には、まず図2に示すように入力画像中で、注目するライン(縦又は横方向の画素列)と輝度パターンが類似するラインをほかの隣接する数ラインから検出する。次に、



ほかのラインにある画素を、注目するライン内で対応する位置(対応点)にコピーする。コピーされた画素の位置とその輝度値に基づき新たな拘束式を立てることで、 M を増やして高解像度画像を復元する。

2.3 超解像技術の製品への適用

当社は、フレーム内再構成型超解像技術の一部を製品化し、2008年7月にAVノートPC QosmioTM、同年10月にはハイビジョン液晶テレビ レグザにそれぞれ搭載した。QosmioTMについてはメディアストリーミング処理プロセッサSpursEngineTM、レグザについては専用LSIの映像エンジン“メタブレインTMプレミアム”に組み込んで各製品に搭載することで、高速な超解像処理を実現している。

3 複数フレーム超解像技術

前述したフレーム内再構成型超解像技術では、高解像度画像の復元精度が向上する領域は自己合同性のある領域に限定される。これに対して、複数のフレーム間で画素の対応付けを行い、ほかのフレーム(参照フレーム)の画素を対象とするフレーム(対象フレーム)にコピーして利用することで、自己合同性のない領域の画素も利用できるようになり、高解像度画像がより正確に復元される。このような複数のフレームを利用した超解像技術を複数フレーム超解像技術と呼ぶことにする。

ここでは、フレーム間の対応付けの方法と、この方法で問題となる点を解決する方法について述べる。

3.1 ブロックマッチングに基づくフレーム間の対応付け

フレーム間で被写体を対応付ける方法の一つに、多様な画像や被写体の動きに追従しやすい方法として知られている、ブロックマッチングと呼ばれる方法がある。

ブロックマッチングでは、参照フレームに配置されたブロック(参照ブロック)と類似したブロックを、次の手順に従い対象フ

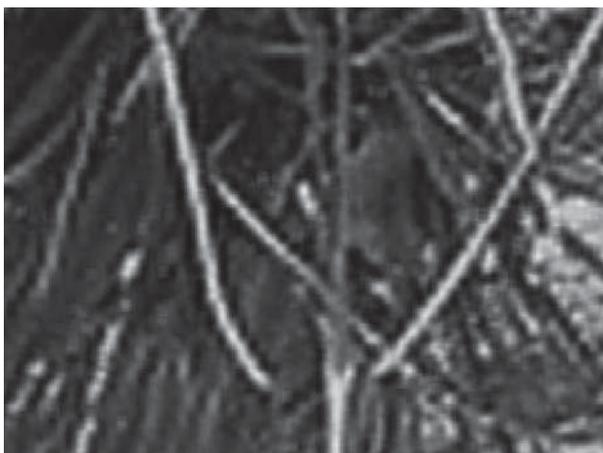


図3. ブロックマッチングに基づく複数フレーム超解像技術の結果 — フレーム間の対応付けにブロックマッチングを用いると、輪郭線などでジャギーが見られることがある。

Reconstructed image using block matching algorithm

フレーム上で探す。

- (1) 対象フレーム上に探索範囲を設定する。
- (2) 設定した範囲内で候補となるブロック（候補ブロック）を1画素単位でずらしながら、各候補ブロックと参照ブロックの誤差（ブロック間誤差）を計算する。
- (3) ブロック間誤差が最小となるブロックを、参照ブロックに対応するブロック（対応ブロック）として選択する。

ここではブロック間で対応する各輝度値の2乗誤差を求め、その総和をブロック間誤差とした。

別の位置における輝度値を知るには、図1からもわかるように、1画素間隔よりも細かい精度（小数精度）での対応付けが必要になる。しかし、先に述べたブロックマッチングでは対応付けの精度は1画素になる。そこで、小数精度での対応付けを行うために、関数近似を利用する。関数近似を利用する場合、1画素間隔で算出された誤差を放物線などの関数で近似し、その関数値が最小となる位置に対応ブロックを修正する。

この方法により参照フレームの画素をコピーし、それを利用して高解像度画像を復元した場合、輪郭線などでぎざぎざとした不自然なパターン（ジャギー）が見られることが多い（図3）。この現象の原因は、得られた対応点の多くが対象フレーム上の低解像度画素の近くに対応付けられるためである。低解像度画素の近くに対応付けが行われると、低解像度の画素と画素の中間付近の輝度値が得られなくなる結果、画素と画素の中間付近における輝度値は、離れた位置の情報から復元されるため復元精度が低下する。

3.2 サブピクセルシフト画像を用いたフレーム間の対応付け

ブロックマッチングと関数近似を用いた場合に、前節で述べたような対応付けが行われる理由は次のとおりである。輪郭線などでは、一意な対応付けができない開口問題（Aperture

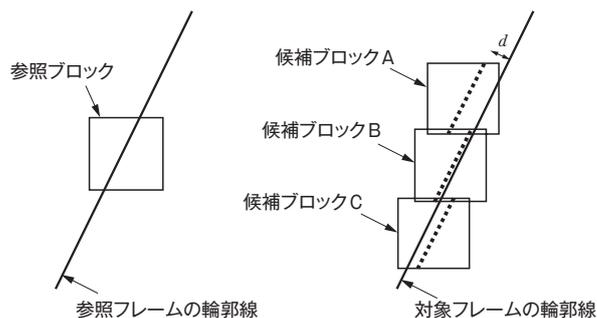
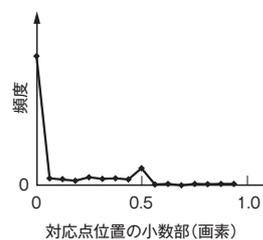
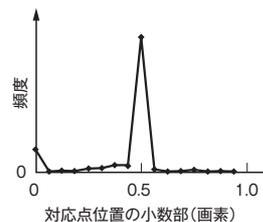


図4. 候補ブロックの位置とブロック間誤差の関係 — 候補ブロックの、輪郭線からのずれが大きいほど、ブロック間誤差は大きくなる。

Relationship between candidate blocks and their interblock errors



(a) ブロックマッチングの場合



(b) サブピクセルシフトトリックの場合

図5. ブロックマッチングとサブピクセルシフトトリックにより得られた対応点の小数部の分布 — 対応点の小数部は、(a)では0の近く、(b)では0.5の近くに集中した。サブピクセルシフトトリックにより、対応点の集まる位置を低解像度の画素から画素と画素の中間へ動かしたことが確認できる。

Histograms of fractional parts of registered locations using block matching algorithm (a) and subpixel shift trick (b)

Problem) が起こる⁽³⁾。このとき、候補ブロックの輪郭線からの法線方向のずれ d が大きいほど、ブロック間誤差は大きくなる（図4）。候補ブロックは1画素間隔で配置、評価され、それらのうち d が最小となるものが本来の動きとは無関係に選ばれる。輪郭線に沿って同じ絵柄が並ぶことが多いため、候補ブロックの中には、 d が0に非常に近いブロックがしばしば存在する（図4の候補ブロックB）。 d が0に近いブロックが選択された場合、関数近似により対応ブロックを修正してもその修正量はわずかになるため、得られる対応点は低解像度の画素位置の近くに集中することになる。

ある動画像に対して、対象フレーム上の対応点を求め、その

小数点以下のヒストグラムを求めた結果を図5(a)に示す。対応点の小数部が0に集中しており、対応点が対象フレーム上の画素の近くに集まっていることが確認できる。

このジャギーの問題を解決するために当社は、サブピクセルシフト画像と呼ぶ画像を利用したフレーム間の新しい対応付け方法である、サブピクセルシフトトリックを開発した⁽³⁾。サブピクセルシフトトリックでは、図6のように対象フレームをあらかじめ0.5画素ずらしたサブピクセルシフト画像を作り、ブロックマッチングと関数近似を用いて参照フレームからサブピクセルシフト画像への対応付けを行うようにした。この方法を用いると、対応点はサブピクセルシフト画像上の画素の近くに集まりやすくなる。このとき、例えば図5(a)のヒストグラムは図5(b)のようになり、対象フレーム上では、画素と画素の中間付近に対応点の多くが対応付けられる。

このサブピクセルシフトトリックを使えば、画素間の情報が効率的に得られ、復元される高解像度画像の画質が更に向上

する。例えば、図3で見られたジャギーは、図7に示すようにほとんど見られなくなる。今後は実用化に向け、演算量の削減に取り組んでいく。

4 あとがき

ここでは、当社が開発してきた超解像技術及びその更なる高画質化への取組みについて述べた。

ハイビジョンTVが普及し、フルHD(1,920×1,080画素)の約4倍の解像度である4K×2Kの画像が注目されはじめる一方で、ネットワーク配信画像のような低解像度のコンテンツがいつその広がりを見せている。今後も、低解像度のコンテンツを高解像度で美しく視聴したいという要求は高まり続けると予想され、当社は、ここで紹介した超解像技術をはじめとする高画質化技術により、そのような要求に応えていく。

文献

- (1) Park, S. C., et al. Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview. IEEE Signal Processing Magazine. 20, 3, 2003, p.21 - 36.
- (2) 熊谷 明, ほか. 映像の高画質化を実現した超解像技術. 東芝レビュー. 63, 11, 2008, p.46 - 49.
- (3) Takeshima, H., et al. "Image Registration Using Subpixel-shifted Images for Super-resolution". Proc. Int'l Conf. Image Processing. San Diego, 2008-10, IEEE. p.2404 - 2407.

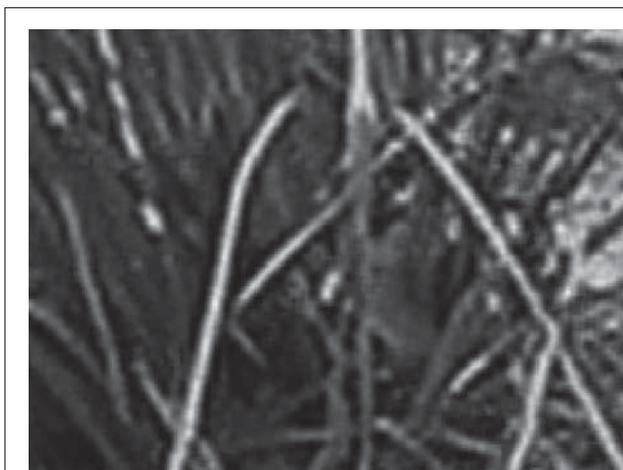
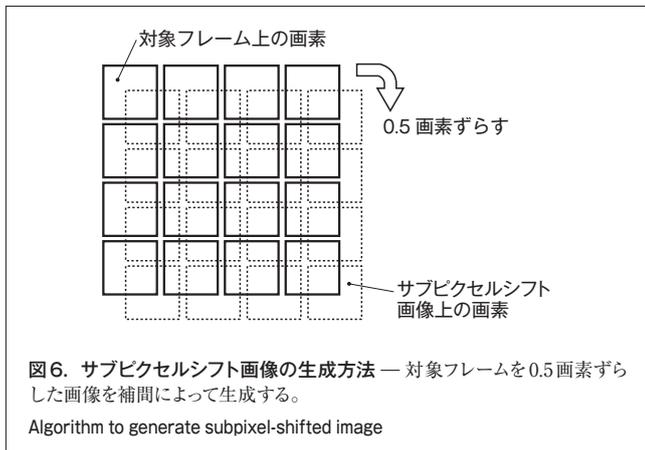


図7. サブピクセルシフトトリックに基づく複数フレーム超解像技術の結果 — フレーム間の対応付けにサブピクセルシフトトリックを用いれば、ジャギーのない美しい高解像度画像を復元できる。

Reconstructed image using subpixel shift trick



竹島 秀則 TAKESHIMA Hidenori

研究開発センター マルチメディアラボラトリー。
超解像技術の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。
Multimedia Lab.



加藤 宣弘 KATO Nobuhiro

デジタルメディアネットワーク社 コアテクノロジーセンター
エンベディッドシステム技術開発部グループ長。組込みシステムのソフトウェア開発に従事。情報処理学会会員。
Core Technology Center



金子 敏充 KANEKO Toshimitsu, D.Eng.

研究開発センター マルチメディアラボラトリー主任研究員、
工博。画像高画質化技術の研究・開発に従事。
電子情報通信学会会員。
Multimedia Lab.