

H^∞ 最適線形フィルタによる静止画像の超解像処理

銭谷謙吾 山本裕 永原正章 (京都大学)

Super-Resolution Processing of Still Images via H^∞ -Optimal Linear Filters

* K. Zenitani, Y. Yamamoto, and M. Nagahara (Kyoto University)

Abstract— In this article, we propose a new super-resolution processing of still images via sampled-data H^∞ optimal filters. The proposed super resolution is executed by enlarging a digital image by using an up-sampler and a digital filter, which is linear processing with low computational complexity, while existing methods such as TV (total variation) regularization methods require high computational cost. Moreover, since our method takes account of analog characteristics of original images, the reconstructed images contain less artifacts. Examples are presented to show the effectiveness of our method.

Key Words: Super resolution, image processing, sampled-data control, H^∞ optimization

1 はじめに

超解像処理とは、観測による劣化を受けた低解像度・低画質の観測画像から、高解像度・高画質の原画像を復元する画像処理である⁷⁾。扱いやすい定式化として、処理は次のようにモデル化される。まず、画素の集まりで表される高解像度・高画質の原画像が存在するものとする。そして、原画像に対するノイズ付加やダウンサンプルといった画質劣化処理を観測とみなす。原画像の観測によって得られる低解像度・低画質の画像が観測画像である。この観測画像から原画像を復元する処理が超解像処理である。

超解像処理は入力となる観測画像の数によって2種類に分類できる。すなわち、1枚の静止画像を入力とするものと、複数の静止画像を入力とするものである。本研究で取り組むのは、1枚の静止画像を入力とする超解像処理である。1枚の静止画像からの超解像処理としては、パイリニア法、パイキュービック法⁶⁾、Lanczos法³⁾などが従来よりよく用いられる。これらはローパス特性を持った線形フィルタによる処理であり、実装が容易である一方で、高周波成分の再現には向かず、エッジのシャープネスを保った復元が難しい。これに対して、近年、TV (Total Variation) 正則化にもとづく手法が提案されている^{2, 8)}。TV 正則化による超解像処理では、エッジをシャープに保ちつつ、リングングやオーバーシュートをほぼ解消できる。しかし、その処理には最適化問題を解くための反復計算が必要であり、計算量が膨大になるため、リアルタイム処理には適していない。

これらの問題に対処するために、本研究では、観測に伴うゲイン低下の影響を考慮した上で、サンプル値制御理論^{10, 12)}にもとづく H^∞ 最適線形フィルタ⁴⁾による超解像処理を提案する。この処理は線形処理であり、計算量はTV正則化法に比べ非常に少ない。さらに、復元性能はLanczos法やTV正則化法よりも優ることをいくつかの画像処理実験により示す。

2 サンプル値 H^∞ 最適フィルタによる超解像処理

2.1 問題設定

本研究で考察する静止画像の超解像処理問題を次のように定式化する。

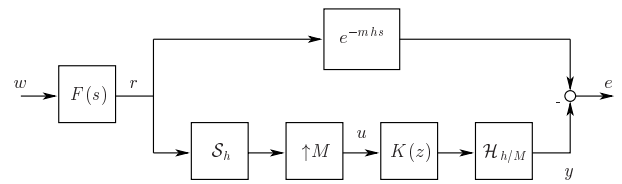


Fig. 1: YY フィルタ設計のための誤差系

問題 1 原画像を $R \in \mathbb{R}^{H \times W}$, $H, W \in \mathbb{N}$ とする。観測画像 $X \in \mathbb{R}^{h \times w}$, $h, w \in \mathbb{N}$ は未知の観測関数によって原画像 R を $1/Z$ に縮小した画像であり、 $H/h = W/w = Z \in \mathbb{N}$ とする。観測画像 X と縮小倍率 Z とが与えられたとき、原画像 R を復元せよ。

この問題は明らかに悪条件問題であり、一意に解を決定することはできない。超解像処理とは、無数の解の候補から、なんらかの意味で「最適」な復元画像 $Y \in \mathbb{R}^{H \times W}$ を一つ定める処理であるといえる。

2.2 サンプル値制御理論にもとづく方法

本研究では、超解像処理をサンプル点間補間処理とみなし、サンプル値制御理論を用いた線形補間フィルタによる超解像処理を提案する。提案法においては、パイキュービック法やLanczos法などの従来法と同じく、観測画像 X の Z 倍のアップサンプルデータに対する2次元の線形畳み込みによって、超解像処理を行うものとする。従来法と異なるのは、畳み込みカーネルの設計にサンプル値制御理論を用いる点である。

カーネルに用いる線形フィルタの設計のための誤差形を Fig. 1 に示す。この誤差系における w から e へのシステムの H^∞ ノルムを最小化する最適化問題を解き、得られる最適フィルタ $K(z)$ のインパルス応答によって、畳み込みカーネルを定義する。

この最適線形フィルタ $K(z)$ はサンプル点間補間を行う離散時間フィルタであり、復元したいアナログ信号の持つ特性を連続時間の伝達関数 $F(s)$ として与えることで、この特性に極力忠実に補間を行う⁴⁾。

超解像処理への適用においては、原画像を与えるサンプル対象となった連続的な風景が、復元したいアナログ信号に当たる。しかしながら、適当な観測モデルを仮定し、原画像から観測画像を作り出して超解像処

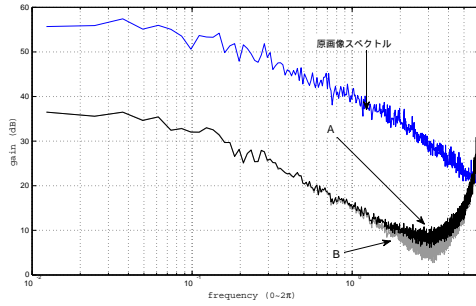


Fig. 2: 観測モデルに応じた u の変化

理実験を行うと、上記の方法では、復元画像と原画像の一致度が Lanczos 法に劣る。

2.3 観測によるゲイン低下への考慮

これまでのサンプル値制御理論にもとづく方法⁴⁾の問題点は、観測モデルの影響が考慮されていない点にある。通常、観測モデルは未知である。しかし、ローパス特性を持つことは明らかであり、また、一般的な状況を想定することは可能である。例えば、コンピュータ上の画像処理を通じて観測画像が作られる場合には、原画像に対する平均化とダウンサンプルの組み合わせを想定しうる。あるいは、カメラなどの光学系を経て観測画像が得られる場合には、ガウシアンフィルタによるぼけの追加としてモデル化が可能である。

これに対して、Fig. 1 の誤差系では、 $K(z)$ に与えられる入力 u は、復元したいアナログ信号 r をサンプル、アップサンプルした信号である。前述のような平均化やぼけを含む観測モデルとは異なっている。この差違は、 u のゲイン特性の差違として立ち現れる。観測モデルに応じた u の変化の例を、Fig. 2 に示す。このグラフは、標準テスト画像セットに含まれるある画像の DCT スペクトルにもとづくゲイン線図である。

Fig. 2 において、Fig. 1 の誤差系が想定する u を A とおく。A は、テスト画像を原画像と見なして、これをサンプル、アップサンプルしたものである。観測画像が原画像の平均化とダウンサンプルによって作られる場合の u は B で表している。B のゲインが A よりも低下していることが分かる。この変化は、サンプル、アップサンプルの組み合わせよりも、平均化処理が低周波寄りのローパス特性を持つことに由来する。観測モデルとしてガウシアンフィルタによるぼけの追加を想定する場合にも同様の変化が生じる。従って、一般的な状況下では、 $K(z)$ にはフィルタ設計時の想定よりもゲインの低い信号が与えられることになる。このことは、復元信号 y におけるゲインの低下に繋がり、復元性能にも影響を及ぼす。

以上の考察を踏まえ、Fig. 3 の誤差系にもとづく $K(z)$ の設計を本研究では提案する。

ここで $P(s)$ はポストフィルタと呼ばれ、ホールド要素 $\mathcal{H}_{h/M}$ の出力を周波数領域で重み付けする。 $P(s)$ をローパスフィルタとすると、 $P(s)$ によるゲイン低下を補うよう、中高域における $K(z)$ のゲインが高まる。このことを利用して、観測モデルによるゲイン低下が補われるよう $P(s)$ を設計する。このゲイン補償によって復元画像のスペクトルはより原画像に近付き、超解像

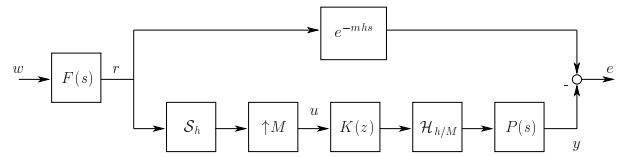


Fig. 3: 超解像処理フィルタ設計のための誤差系



Fig. 4: Lena (grayscale)

処理の復元性能も向上すると考えられる。

3 提案法による超解像処理例

3.1 実験概要

提案法について検証するために 3 つの実験を行う。最初の実験では、 $P(s)$ を与える場合と与えない場合とで提案法の結果を比較し、観測モデルに由来するゲイン低下が補償されることと、それによって復元性能が向上することを確かめる。

次の実験では、標準テスト画像セットに含まれる自然画像を対象にバイリニア法、Lanczos 法、提案法による超解像処理を行い、提案法の復元性能を従来法と比較する。

最後の実験では、Lanczos 法、TV 正則化法、提案法による超解像処理を行い、復元画像を比較することで画質の考察に繋ぐ。

3.2 ゲイン補償効果の確認

原画像として用いるテスト用グレイスケール画像を Fig. 4 に示す。Fig. 4 を縦横 1/2 に縮小して観測画像とする。縮小に当たっては、 2×2 画素を平均化した後、2 倍ダウンサンプルする。

次に、提案法による超解像処理に用いる $K_1(z)$ 、 $K_2(z)$ を設計する。 $K_1(z)$ の設計には Fig. 1 の誤差系を用い、 $K_2(z)$ の設計には Fig. 3 の誤差系を用いるものとする。設計に当たっては次のパラメータを用いる。

$$F(s) = \frac{1}{(10s+1)^2}, \quad P(s) = \frac{1}{0.28s+1}.$$

サンプリング周期 h を 1 とし、ディレイ m を 4 とする。サンプル値 H^∞ 最適化を解くための FSFH (Fast Sampling/Fast hold) 近似^{5, 11)}における高速サンプル倍率 N は 2 とする。

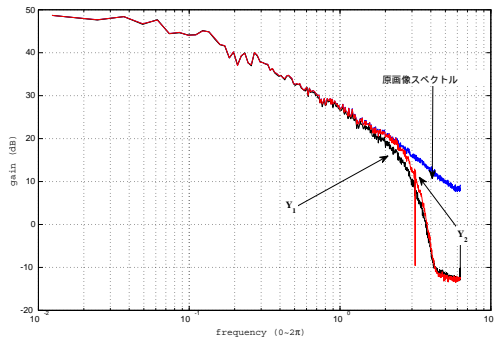


Fig. 5: 復元画像 Y_1, Y_2 のスペクトル

以上の設定の下で超解像処理を行う。実験結果として得られる復元画像のスペクトルを Fig. 5 に示す。ゲイン補償のない $K_1(z)$ から得られる復元画像を Y_1 、ゲイン補償のある $K_2(z)$ から得られる復元画像を Y_2 とする。 Y_1 と原画像の PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) は 30.6999dB, SSIM (Structural Similarity)⁹⁾ は 0.9687 である。 Y_2 と原画像の PSNR は 35.2726dB, SSIM は 0.9996 である。この処理結果より、ゲイン補償を導入したほうが PSNR および SSIM の指標に関して良い結果が得られることがわかる。

3.3 復元性能評価

Kodak 社の Photo CD PCD0992¹ に含まれる 24 枚のカラー自然画像を対象に、バイキュービック法、Lanczos 法、提案法を用いて 2 倍の超解像処理を行い、復元性能を比較する。実験に当たっては、テスト画像を原画像として、その縮小画像を観測画像とみなす。縮小の方法や提案法におけるフィルタ設計パラメータは前節の実験に準ずる。復元画像と原画像を比較して得られる PSNR および SSIM の平均値を Table 1 に示す。こ

Table 1: 復元性能評価結果

手法	PSNR 平均	SSIM 平均
提案法	29.6286	0.9972
Lanczos 法	29.4433	0.9923
バイキュービック法	29.2284	0.9893

これらの結果より、PSNR および SSIM の指標に関して、提案法が、バイキュービック法および Lanczos 法に比べて優れていることがわかる。

3.4 画質評価

ここでは、標準テスト画像セット¹に含まれる 2 つのカラー画像、Lena (Fig. 6) と Baboon (Fig. 7) を対象に超解像処理を行い、画質を比較する。適用対象となる手法は、Lanczos 法、TV 正則化法、提案法である。実験に当たっては、テスト画像 Lena と Baboon を原画像とし、これを 1/2 に縮小したものを観測画像と見なして、2 倍の超解像処理を適用する。縮小の方法お

¹Kodak Lossless True Color Image Suite
<http://r0k.us/graphics/kodak/>

¹Image Database
 Signal and Image Processing Institute, University of Southern California
<http://sipi.usc.edu/database/database.php?volume=misc>



Fig. 6: Lena



Fig. 7: Baboon

よび提案法のフィルタ設計パラメータは前節の実験と同じとする。2 倍超解像処理の実験については、復元画像と原画像が同一の大きさとなるため、PSNR および SSIM による復元度の評価を行う。

ここで、実験に用いる TV 正則化法は、⁸⁾ を参考として次の手順に沿う。

1. 観測画像を骨格画像とテクスチャ画像に分離する。
2. 骨格画像を DCT にもとづくシャノンの内挿法で拡大し、TV 正則化を適用する。
3. テクスチャ画像を Lanczos 法で拡大する。
4. 処理後の骨格画像とテクスチャ画像を合成し、結果画像を得る。

骨格画像とテクスチャ画像への分離には¹⁾の方法を用いる。分離制御のパラメータは $\mu = 10, \lambda = 1$ とする。TV 正則化には²⁾の方法を用いる。正則化パラメータは $\lambda = 0.5$ とし、反復回数は 500 回で固定とする。観測関数には特に仮定を設けない。

各復元画像と原画像の一致度を示す客観評価指標値を Table 2 と Table 3 に示す。2 倍超解像処理後の復

Table 2: 復元画像の再現性評価 (PSNR 値)

画像名	Lanczos 法	TV 正則化法	提案法
Lena	33.5497	33.3760	33.6748
Baboon	23.2691	23.2303	23.2813

Table 3: 復元画像の再現性評価 (SSIM 値)

画像名	Lanczos 法	TV 正則化法	提案法
Lena	0.9962	0.9962	0.9992
Baboon	0.9881	0.9893	0.9989

元画像を以下に示す。Baboon の左目周辺の拡大画像を切り出している。提案法に比べ Lanczos 法は若干ぼやけた画像になっている。また TV 正則化法はエッジが強調されすぎており人工的な印象を与える。

4 結論

本研究では、サンプル値制御理論を用いて設計された最適線形フィルタによる超解像処理を提案した。フィルタ設計に当たって、観測に伴うゲイン低下への補償を取り入れることにより、従来法に比して同等以上の復元性能を与えることを示した。

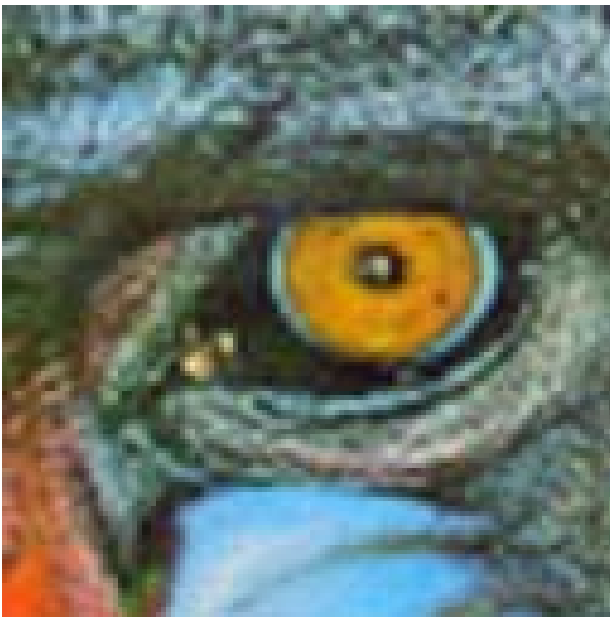


Fig. 8: Lanczos 法による 2 倍拡大 (Baboon)

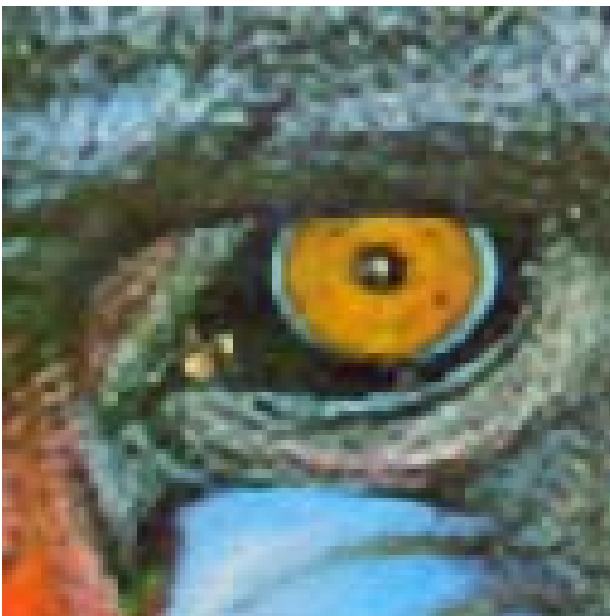


Fig. 9: TV 正則化法による 2 倍拡大 (Baboon)

参考文献

- 1) J.-F. Aujol, G. Aubert, L. Blanc-Féraud, A. Chambolle, Image decomposition into a bounded variation component and an oscillating component, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 22, pp.71-88 (2005)
- 2) A. Chambolle, An algorithm for total variation minimization and applications, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol.20, no. 1-2 (2004)
- 3) C. E. Duchon, Lanczos filtering in one and two dimensions, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 18, issue 8, pp.1016-1022 (1979)
- 4) 掛水, サンプル値 H^∞ 制御理論によるデジタル画

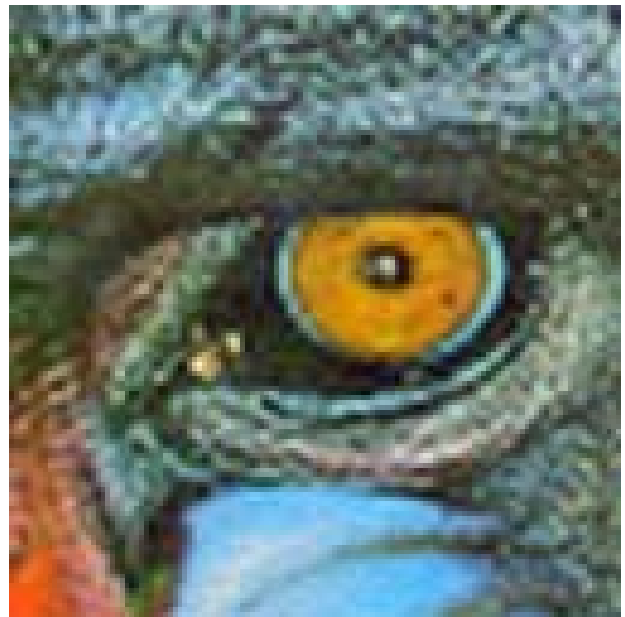


Fig. 10: 提案法による 2 倍拡大 (Baboon)

像復元, 修士論文, 京都大学 (2005)

- 5) J. P. Keller, B. D. O. Anderson, A new approach to the Discretization of continuous-time controllers, *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 37, issue 2, pp.214-223 (1992)
- 6) R. G. Keys, Cubic convolution interpolation for digital image processing, *IEEE Trans. on Acoustic, Speech and Signal Processing*, vol. 29, issue 6, pp. 1153-1160 (1981)
- 7) S. C. Park, M. K. Park, M. G. Kang, Super-resolution image reconstruction: a technical overview, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, issue 3, pp.21-36 (2003)
- 8) 齊藤, 1 枚の画像からの超解像度オーバーサンプリング サンプリング定理の壁を打ち破る, *映像情報メディア学会誌*, vol. 62, no. 2, pp.181-189 (2008)
- 9) Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli, Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 13, no. 4 (2004)
- 10) Y. Yamamoto, A function space approach to sampled-data control system and tracking problems, *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.39, no. 4, pp.703-712 (1994)
- 11) Y. Yamamoto, A. G. Madievski, B. D. O. Anderson, Computation and convergence of frequency response via fast sampling for sampled-data control systems, *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision & Control*, pp.2157-2162 (1997)
- 12) 山本, 藤岡, 原, サンプル値制御理論 VI デジタル信号処理への応用, *システム/制御/情報*, vol. 7, no.6, pp.1-9 (2000)