

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：32612
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2013～2015
課題番号：25420383
研究課題名(和文) 自己相似性を用いた画像の超解像に関する研究

研究課題名(英文) Image super-resolution using similarity

研究代表者
池原 雅章 (Ikehara, Masaaki)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：00212796
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、単一の画像から高速かつ高性能な超解像を行う幾つかの手法を提案する。一つは画像の自己相似性を利用し、辞書学習を必要とせず、自身の低解像度画像と原画像からランダムサンプルして辞書を作成し、これに基づいてL2近似により超解像を行う。もう一つはさらなる高速化を目指して、低解像度画像の画素差のバイラテラル重みを補間係数として、直接補間により高解像度化する超解像手法を提案する。これらの手法は従来法に比べ高速かつ高精度な超解像が実現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose some fast and high performance super resolution methods from a single image. One method is based on the similarity of image. This makes a dictionary from random sampled patches from original and down-sampled images and apply L2 approximation to obtain a high resolution image. Another method is based on interpolation for high speed implementation. This utilize the bilateral weight of pixels in low resolution image as interpolation coefficient. With local interpolation coefficients, the high resolution images are obtained by applying direct interpolation of LR image. Through the simulations, the proposed methods are shown to be efficient for fast and high performance super resolution.

研究分野：信号処理、画像処理

キーワード：超解像 画像補間

様式 C-19、F-19、Z-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

近年のディスプレイの大画面化は凄まじく、地上デジタル放送の開始とともに、ハイビジョン対応 TV (HDTV) が広く普及しつつある。にもかかわらず、すでに次世代の 4K、8K 規格や、HDTV の 16 倍の解像度を持つスーパーハイビジョン技術が検討されている。表示デバイスが高解像度化すると同時に、画像を取得するカメラも桁違いに感度を上げなければならず、スーパーハイビジョンカメラの開発も進められている。これに伴い画像の情報量も格段に増大し、より大容量の記憶装置や新たな情報圧縮技術の研究も重要になってくる。一方で、アナログ TV の時代に撮影された貴重な映像や近年のハイビジョン用に撮影された優れた映像も多数存在する。これをスーパーハイビジョン用のディスプレイで表示するためには高解像度化が重要になる。高解像度化が有効に実現できれば既存の設備や装置を有効に利用できるし、これまで取得された画像映像メディアをそのままスーパーハイビジョン用に変換することができ、経済的にも技術的にもエコシステムである。一方でこの超解像技術を用いることによりハイビジョン用の低解像度画像からスーパーハイビジョン用の高解像度画像を予測し、その残差画像を情報圧縮することにより、スーパーハイビジョン用の新たな圧縮技術を開発できる可能性等もあり、それに付随した様々な波及効果も期待できる。

一方で今日の携帯電話のほぼ全てにカメラが搭載され、一般のユーザーが写真を撮ることが日常化している。多画素化が進んでいるとはいえ、専用のデジタルカメラには劣り、携帯のカメラで撮影した画像を高解像度化して、鮮明に表現したいという欲求は多い。あるいは常時監視が必須の監視カメラ等では、容量の問題から低解像度のカメラが用いられており、高解像度化できればより監視能力はアップする。その他ワンセグ TV の高解像度化等、その応用範囲は無限である。

超解像技術は、入力画像の解像度を高めて出力画像を作る技術であり、大まかに 2 つの方法に分類される。1 つは複数の低解像度画像の高解像度画像における位置 (シフト量) を検出し、複数の低解像度画像を高解像度画像に配置するマルチフレーム超解像と、単一の画像から高解像度化するシングルフレーム超解像技術に大別される。マルチフレーム超解像については、従来多くの研究が行われ、有効な成果も得られて

いる。一方近年では単一画像からの超解像技術が注目されており、本研究課題では研究前半はシングルフレーム超解像に注力し、後半にマルチフレーム超解像についても検討する。

画像の高解像度化技術は、これまで様々な方法が示され、以下に分類する。

(1) スプライン関数等による画像の補間拡大

(2) TV 正則化によるエッジ保存形超解像

(3) スパース性に基づく辞書による超解像

1) の画素の補間により簡単に画像の拡大が可能となるが、サンプリング定理の限界により、高周波成分を復元することはできず、これに相当するエッジやテクスチャがぼけたり不鮮明になるという典型的な問題がある。これを解決するために、TV 正則化項を拘束条件とした超解像技術が提案され、エッジをスムーズにすること無く、強度を保ったまま超解像が可能である。TV 正則化項は信号の勾配強度の積分に相当し、L1 ノルムの最小化が必要である。

近年、信号を適切な基底で表現した場合に、基底系の中のわずかな基底を使って信号を表現する圧縮センシングが注目されている。これを信号のスパース表現といい、複数の画像の低解像度画像と高解像度画像を用意し、これをスパースに表現するそれぞれの辞書を作成する。単一の画像を低解像度辞書からスパース表現できれば、それに相当する高解像度辞書から超解像を行うことができ、注目されている。しかしこのアルゴリズムも L1 ノルムの最小化に相当する学習を必要とし、時間がかかるだけでなく、作成した辞書を常に保存しておかなければならないという問題がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、画像の自己相似性を用いた単一画像の超解像技術の新しい 2 つの方法を提案し、そのメリット、デメリットを確認し、応用に応じた利用方法を示す。本課題の基本概念はフラクタルで広く用いられている画像の自己相似性である。信号のどの部分 (パッチ) も、細部を拡大すると全体と同じ形状を示す性質を言う。画像のあるパッチは、同じ画像の他のパッチと類似しており、拡大、縮小や回転、反転等の変換画像に対しても同様の性質を有している。この性質を使ってシングル超解像のためのいくつかの手法を提案する。

(1) ランダムサンプル辞書を用いた L2 近似超解像

前述の(3)の方法では、膨大な計算を必要とし、辞書自体を保持しておく必要があった。この手法は学習を必要とせず、近似も L2 ノルムで行うため、従来法に比べ大幅に高速化できる。画質については予備実験により、従来法と同等の性能が得られることを確認している。

(2) バイラテラル重みによる高速補間

前述の手法はメモリ削減や計算量の低減など従来法を大きく改良できる利点はあるが、実際の TV 等に適用するのは非現実的である。そこで実時間処理を考慮した補間ベースの超解像手法を検討した。補間の場合には補間係数が重要になるが、バイラテラルフィルタの概念を利用して、低解像度の画素間差分のガウス関数を補間係数とすることにより、高精度な超解像が実現できることが分かった。

3. 研究の方法

本研究課題の目的を明確にし、定義を行う。図1のように原画像 X が与えられた時に、この解像度をアップさせ（この例では2倍であるが、任意の倍数が可能）高解像度画像 X_H を求めることを目的とする。参照



図1

(1) ランダムサンプル辞書を用いた L2 近似超解像

従来法では、複数の低解像度及び高解像度画像ペアを用意し、スパース性によりそれぞれの辞書を作成する必要があった。これは膨大な計算を必要とし、学習した辞書自体を保持しておく必要があった。これに対して、図2に示すように原画像をダウン

サンプリングして低解像度画像を作成し、これと原画像の空間的に同じ位置のパッチ（サイズは異なる）を、そのまま辞書とする。すなわち、低解像度画像のパッチを x_{Li} 、これと位置関係が同一な原画像のサイズの異なるパッチを x_{Hi} とし、これを列ベクトル化する低解像度辞書 D_L と高解像度辞書 D_H を作成する。低解像度辞書を使って原画像のパッチ \bar{x}_i を次式で表現する。

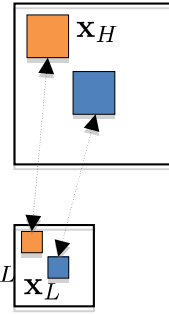


図2

$$\alpha_i = \min \|\bar{x}_i - D_L \alpha_i\|$$

パッチはランダムに選ぶこともでき、規則的に選択することもできる。結局この係数 α_i を使って、高解像度画像のパッチは

$$x_{Hi} = D_H \alpha_i$$

で得られ、全てのパッチに対して適用すると高解像度画像が得られる。この手法は学習を必要とせず、近似も自乗ノルムで行うため、従来法に比べ大幅に高速化できる。

(2) バイラテラル重みによる高速補間

前述の方法は、1枚の画像とそのダウンサンプリングした低解像度画像を用いて、低-高解像度関係を利用した高度な手法であるが、幾分煩雑である。そこで実際の応用を考えた補間ベースの超解像度手法を検討した。

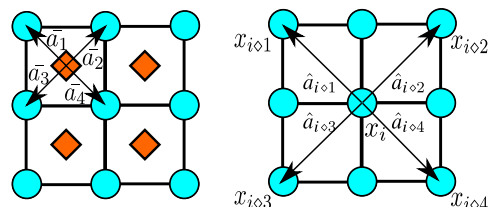
下図（左）のように高解像度画素を周囲4点の LR 画素から補間するために補間係数 \hat{a}_i を決定する。そのために HR 解像度の関係を LR 解像度の関係から（下図右）

$$\hat{a}_{i \circ t} = \exp \left(-\frac{(x_{i \circ t} - x_i)^2}{2\sigma^2} \right)$$

で求め、さらに周囲4点の LR 画素においても同様に求め、最終的に

$$\bar{a}_{k \circ t} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \hat{a}_{j \circ t}$$

とする。これを補間係数として、HR 画素 y_i と LR 画素 x_i の関係から



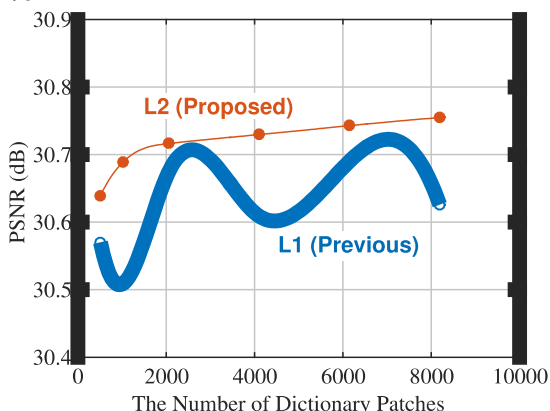
$$y = \arg \min_y \left\{ \sum_{i \in W} \left\| y_i - \sum_{1 \leq l \leq 4} \bar{a}_{i \otimes l} x_{i \otimes l}^{(s)} \right\| + \sum_{i \in W} \left\| x_i - \sum_{1 \leq l \leq 4} \hat{a}_{i \otimes l} y_{i \otimes l}^{(s)} \right\| \right\}$$

を解くことによって、高解像度画像が得られる。上式は簡単に計算することができるが、逆行列演算を含むため、多少の時間を要する。より高速化するため、上で求めた補間係数から直接 HR 画素を求めても同等な結果が得られることを確認した。

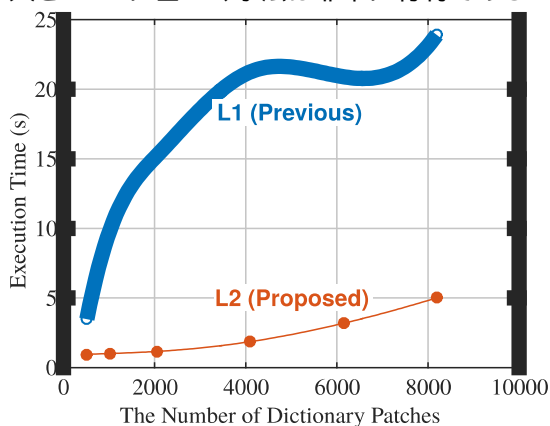
4. 研究成果

(1) ランダムサンプル辞書を用いた L2 近似超解像

下図に示すように、処理時間の短縮や、辞書の事前学習を排したにもかかわらず、従来の L1 に基づく手法とほぼ同等の復元精度を得ることができている。



実行時間の比較では、L2 に基づく手法は L1 に基づく手法と比較して処理時間を大幅に短縮しており、その度合いはパッチ数が多い時に顕著である（下図）。辞書ベースの超解像手法において、辞書に用いるパッチ数を増やすことは復元精度の向上に結びつくので、パッチ数が大きいほど時間短縮の効果が大きい L2 に基づく手法は非常に有利である。



(2) バイラテラル重みによる高速補間

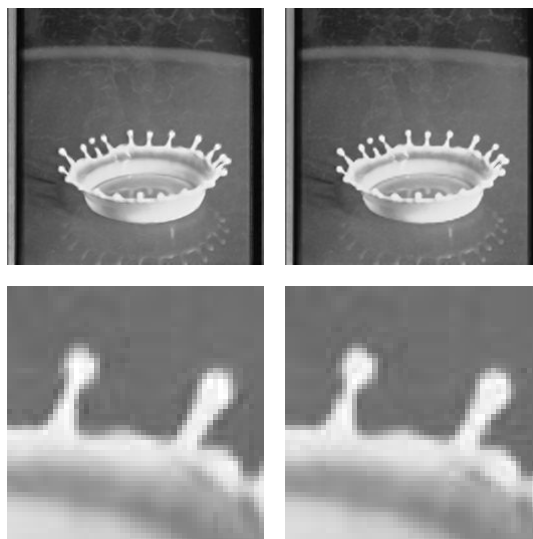
ここでは提案法による方法と単純な低解像度画像の直接補間による方法を加重平均とし、

従来法との比較を下の表に示す。従来法は効果的な方法として知られているSAIと比較したが、提案法はSAIより精度の高い超解像が得られており、計算時間はSAIが4.76s、提案法が1.21sと高速実現も可能である。一方直接補間である加重平均でも、計算時間はわずか0.18秒しかかかっていないにもかかわらず、SAIとほぼ同程度の超解像が得られており、実時間処理に向けた有効な方法であると考えられる。

	bicubic	SAI	加重平均	提案法
LENA	30.1145	34.5399	33.8388	34.2105
MILKDROP	30.7095	33.6912	33.9913	33.9884
AIRPLANE	27.5319	30.2496	30.2906	30.5750
PEPPER	28.4444	31.9677	31.8946	31.9597
GOLDHILL	28.6240	30.6788	30.7136	30.6900
BRIDGE	23.9906	25.7013	25.8056	25.7769
SAILBOAT	26.4204	29.0305	29.2468	29.3927
BOATS	26.9295	29.5475	29.2707	29.4433
average	27.8456	30.6758	30.6315	30.7546

更に、下図に超解像した結果を示す。左がSAI, 右が提案法であるが、ジャギーのない同等な性能の画像が得られる。

5. 主な発表論文等



〔雑誌論文〕(計6件)(以下全て査読有り)

1. Takanori Fujisawa, Taichi Yoshida, Kazu Mishiba, and Masaaki Ikehara "Single Image Super Resolution by L2 Approximation with Random Sampled Dictionary," IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences, Vol. E99-A, No. 2, pp. 612-620. Feb. 2016.

2. T. Suzuki and M. Ikehara, "Reversible symmetric nonexpansive convolution: an effective image boundary processing for mbiM-channel lifting-based linear-phase filter banks," *Image processing, IEEE transactions on*, vol. 23, iss. 6, pp. 2744-2749, 2014.
3. T. Yoshida, T. Suzuki, and M. Ikehara, "Adaptive reversible data hiding via integer-to-integer subband transform and adaptive generalized difference expansion method," *IEEE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences*, vol. 97, iss. 1, pp. 384-392, 2014.
4. Taizo Suzuki and Masaaki Ikehara, "Integer fast lapped transforms based on direct-lifting of DCTs for lossy-to-lossless image coding," *EURASIP J. Image. Video Process.*, vol. 2013, no. 65, pp. 1-9, Dec. 2013
5. Taichi Yoshida, Seisuke Kyochi, and Masaaki Ikehara, "Two dimensional M-channel non-separable filter banks based on cosine modulated filter banks with diagonal shifts," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E96-A, no. 8, pp. 1685-1694, Aug. 2013.
6. Yuichi Tanaka, Taichi Yoshida, Madoka Hasegawa, Shigeo Kato, and Masaaki Ikehara, "Rate-dependent seam carving and its application to content-aware image coding," *APSIPA Trans. Signal. Info. Process.*, vol. 2, no. -, pp. 1-15, 2013.

〔学会発表〕(計11件)

1. Shoji Sakamoto, Takanori Fujisawa, and Masaaki Ikehara, "Colorization-based Image Coding based on Superpixel," in *International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, Singapore, Dec 3 2015.
2. Yutaka Takagi, and Masaaki Ikehara, "Image Denoising by Arithmetic Means Based on Similarity," in *International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, Singapore, Dec 3 2015
3. Takuro Yamaguchi, Masaaki Ikehara, and Yasuhiro Nakajima, "Image Interpolation based on Weighting Function of Gaussian," in *Asilomar conference on signals, systems and computers*, Asilomar(USA), Nov 10 2015.
4. 樋口 聡一郎, 山口 拓朗, 藤沢 貴典, 池原 雅章, "線形変換を用いたカラー画像のブロックベース符号化", 第30回信号処理シンポジウム, P1-17, ハワイアンズ(福島県・いわき市), 2015年11月5日

5. 坂本 匠司, 藤沢 貴典, 池原 雅章, "Superpixelを用いた画像のColorization符号化," *電子情報通信学会技術研究報告(画像工学)*, 沖縄セルラー電話(沖縄県・那覇市), pp. 75-79. 6月19日 2015
6. 山口 拓郎, 中島 康博, 池原 雅章, "Image Interpolation based on Weighting Function of Gaussian," *電子情報通信学会技術研究報告(信号処理)*, pp. 181-185., ホテルミヤヒラ(沖縄県・石垣市), 3月3日 2015,
7. T. Suzuki and M. Ikehara, "Simplified dct-lifting-based reversible lapped transforms using parallel processing of two same type lapped transforms," in *Image processing (ICIP), 2014 IEEE international conference on*, Oct 28 2014, Paris(France), pp. 5586-5590.
8. S. Kyochi and M. Ikehara, "Fractional cycle spinning via modulated lapped transform for overcomplete image representation," in *Image processing (ICIP), 2014 IEEE international conference on*, Oct 28 2014, Paris(France), pp. 2664-2668.
9. K. Iwamoto, T. Yoshida, and M. Ikehara, "Super-resolutions based on shock filter and non local means with bm3d for congruity," *2014 IEEE Region 10 conference, Bangkok(Thailand)*, pp. Oct 23, 2014
10. Taichi Yoshida, Masaaki Ikehara, "Image super-resolution based on shock filter and non-local means," in *The Asia-Pacific Signal and Information Processing Association (APSIPA) Siem Reap(Cambodia)*, Dec 10 2014
11. Ikuo Degawa, Taichi Yoshida, Kazu Mishiba, Masaaki Ikehara, "Single Image Super Resolution by l2 Approximation without Learning" in *International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Bangkok(Thailand), Jan 7 2014

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tkhm.elec.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

池原 雅章 (IKEHARA MASAAKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 00212796

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし