

研究速報

ズーム量が異なる多視点画像を用いた再構成型超解像

大森 達也[†] 保坂 忠明[†] (正員)佐藤 俊一[†] 浜本 隆之[†] (正員)

Super-Resolution Image Reconstruction Using Multi-Viewpoint Zoomed Images

Tatsuya OMORI[†], Nonmember, Tadaaki HOSAKA[†], Member,
Shunichi SATO[†], Nonmember,
and Takayuki HAMAMOTO[†], Member[†] 東京理科大学大学院工学研究科, 東京都Graduate School of Engineering, Tokyo University of Science,
1-14-6 Kudankita, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-0073 Japan

あらまし 多視点から撮影される画角の広い低解像度画像及び画角の狭いズーム画像群を用いる超解像手法を提案する。再構成処理において、視点間の画素対応推定を繰り返し行うことで解を修正していく。評価実験により、提案手法の有効性を定性的・定量的に確認した。

キーワード 再構成型超解像, 多視点画像, ズーム, MAP 推定, ステレオマッチング

1. ま え が き

近年、低解像度画像から高周波成分を復元し、高解像度画像を生成する超解像技術が盛んに研究されている。代表的な手法の一つは、位置ずれのある複数枚の低解像度画像を用いる再構成型超解像である [1]。しかし、拡大率が大きくなるにつれて解空間が指数関数的に増大するため、正確な位置ずれ量が既知であったとしても、理想的な高解像度画像の近傍領域を求めることは困難となる [2]。

そこで、ズーム画像を利用した超解像技術が考えられている。ここでズーム画像とは、画素数を一定に保ったまま画角を小さくすることによって撮影された高精細な画像を指す。文献 [3]~[5] では、単視点でズーム量を段階的に変えて撮影された複数の高精細画像を利用する再構成型超解像手法が提案されている。しかし、単視点からズーム量の異なる画像を同時に取得することはできないため、この手法を動画像に対して適用することはできない。また、ズーム量の調節に伴い光軸が変動し得るため、実環境において理想的な撮影を行うことは困難である。一方で、複数の視点からズーム量の異なる複数枚の画像を同時に撮影し、それらの画像群を用いる超解像手法 (画像群の中で最も画角が広い画像の解像度を向上させる) も提案されている [6]。多視点画像を用いることで、単視点の場合の欠点を克

服することはできるが、再構成処理を行うためには異なる画像間での視点移動演算が必要となる。文献 [6] の手法は、被写体を平面であると仮定して視点移動演算を単一の射影変換により表現している。実際に被写体が平面であり、射影変換行列が正しく推定できれば、画像に関する事前分布を必要とせずに最尤推定により理想的な高精細画像が得られる。しかし、被写体が平面でない場合には、画質が著しく劣化する。

本研究では、平面に限定されない一般の被写体に対して、複数の視点から撮影したズーム量の異なる画像群を利用した超解像手法を提案する。まず、擬似高周波成分を抑制する正則化項が導入された目的関数を定義する。そして、最急降下法による反復最適化を実行するが、この過程において、ステレオマッチングによる画素対応推定も繰り返し行う。これにより、高解像度画像と視点移動演算の推定精度が共に高まっていくことを期待する。評価実験により、提案する再構成型超解像処理の有効性を検証する。

2. 提案する再構成型超解像処理

2.1 観測モデルの設定

再構成型超解像処理を行うためには、高解像度画像と観測画像を関連づける観測モデルを設定する必要がある [1]。本研究では、観測画像として、(1) 超解像処理を施す低解像度画像、(2) 低解像度画像から高解像度画像への拡大率と等しいズーム倍率で J 個の視点から撮影したズーム画像群、を用いる。なお、全ての観測画像の画素数は等しいものとする。

低解像度画像の観測モデルとして、理想の高解像度画像に対する加重平均による縮小処理を用いる。低解像度画像を N 次元ベクトル l により表し、高解像度画像を $M (> N)$ 次元ベクトル h により表す。更に、点拡がり関数の畳み込み演算に対応する $M \times M$ 次元行列を B で表し、ダウンサンプリング演算に対応する $N \times M$ 次元行列を D とする。このとき、低解像度画像の観測モデルは

$$l = DBh \quad (1)$$

と定式化される。

ズーム画像の観測モデルとして、理想の高解像度画像に対する視点移動及びズーム倍率に応じた切り出し処理を用いる。 $j (= 1, 2, \dots, J)$ 番目のズーム画像を N 次元ベクトル z_j により表し、先と共通の高解像度画像を M 次元ベクトル h により表す。更に、画素の視点移動演算に対応する $M \times M$ 次元行列を W_j で

表し、画像の切出しを行うトリミング演算に対応する $N \times M$ 次元行列を C_j とする。このとき、ズーム画像の観測モデルは

$$z_j = C_j W_j h \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (2)$$

と定式化される。

2.2 MAP 推定による再構成処理

観測した低解像度画像 l とズーム画像群 $\{z_j\}$ から式 (1) と式 (2) に基づき高解像度画像 h を逆推定することが再構成型超解像の基本的な考え方である。

本研究では、MAP (Maximum A Posteriori) 推定による再構成処理 [1] を用いる。すなわち、ベクトル h に関する目的関数 $f(h)$ を定義し、与えられた観測画像に対してボルツマン分布により規定される事後確率を最大にするベクトル h を求める (これは、目的関数を最小化することと等価である)。目的関数 $f(h)$ は、(1) 観測モデルに従い推定される画像と観測画像との間の誤差を表す項、(2) 過剰な高周波成分を抑えるための正則化項、からなり

$$f(h) = \|e_0\|^2 + \alpha_1 \sum_{j=1}^J \|e_j\|^2 + \alpha_2 \|Lh\|^2 \quad (3)$$

と定義される。ここで、 $\|\cdot\|$ は l_2 ノルムを表し、 N 次元ベクトル e_0 、 e_j は、それぞれ低解像度画像 l と $j(=1, 2, \dots, J)$ 番目のズーム画像 z_j に関する誤差であり、式 (1) と式 (2) をもとに

$$e_0 = DBh - l, \quad (4)$$

$$e_j = C_j W_j h - z_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (5)$$

と定義される。また、行列 L はラプラシアンフィルタの畳込み演算に対応し、 Lh は高周波成分を反映したベクトルとなる ($\|Lh\|$ の代わりに、 h の全変動ノルムなどを用いることもできる)。変数 α_1 、 α_2 は各項の重みを制御するパラメータである。

本研究では、式 (3) の目的関数の値を小さくするように、最急降下法により高解像度画像 h を

$$h^{k+1} = h^k - \beta^{k+1} \left. \frac{\partial f(h)}{\partial h} \right|_{h=h^k} \quad (6)$$

に従って更新する。ここで、 h^k は k 回目の更新後の高解像度画像ベクトルを表し、 β^{k+1} は更新速度を制御するパラメータである。なお、初期高解像度画像 h^0 としては、低解像度画像 l にバイキュービック補間処

理を施した画像を用いる。

2.3 モデルパラメータ W_j の推定

再構成処理により質の良い高解像度画像 h を求めるためには、視点移動演算に対応する行列 W_j を正確に知る必要がある。一方で、行列 W_j を正確に求めるためには、理想的な高解像度画像 h を用いて、カメラ配置に依存するエピソード拘束の下でステレオマッチングを行う必要がある。すなわち両者は循環的な関係にあるといえる。

そこで本研究では、式 (6) における第 $k+1$ 回目の更新において、 k 回目の更新後の高解像度画像 h^k と j 番目の観測ズーム画像 z_j の間で双方向ステレオマッチングを行うことで行列 W_j を繰り返し推定する。以降の記述では、目的関数 (3) を未知変数 h と W_j の関数であるとみなし、 $f(h, \{W_j\})$ と記す。上記のように高解像度画像ベクトル h と行列 W_j を交互に推定することにより、関数 $f(h, \{W_j\})$ が更新回数 k に関して単調に減少し収束するという保証はなくなる。しかし、行列 W_j の更新は多くの場合に式 (5) で表される誤差を減少させる方向に働くと推察し、結果的に関数 $f(h, \{W_j\})$ の値は減少し、(準) 最適解に漸近すると予測する。

3. 5 眼カメラによる提案手法の評価実験

筑波大学多視点画像データベースに含まれる SANTI (ぬいぐるみ)、CITY (街のジオラマ)、PLNT (植物) の評価画像群を利用して実験を行った。本論文では、低解像度画像を縦横 2 倍及び 4 倍に拡大する状況を扱う。いずれの場合もデータベースに含まれる 81 視点から 5 視点を選択することで、図 1 に示すような多視点カメラシステムを想定した。ここで、使用する 5 台のカメラの視野角以外の特性は同じであるとする。

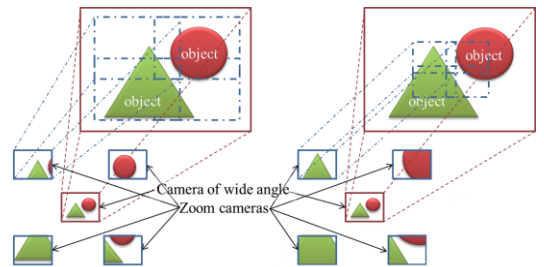


図 1 各カメラの配置と撮影範囲 (左: 2 倍拡大の場合, 右: 4 倍拡大の場合)。

Fig. 1 Camera configuration and view angles (left: magnification factor of 2, right: magnification factor of 4).

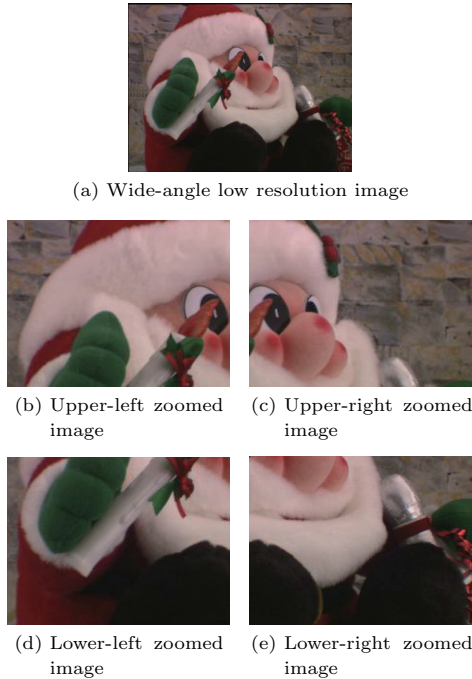


図 2 入力画像群 (画素数: 320×240)
 Fig. 2 Input images (the number of pixels: 320×240).

周囲の 4 台のカメラに対するズーム倍率を、視野角の広い中央カメラに対して 2 倍または 4 倍と設定し、中央のカメラ画像に対して超解像処理を施す。なお、低解像度画像の輝度信号のみに超解像処理を施し、色差信号についてはバイキュービック補間処理を行い、最後に両者を統合する。

本評価実験では、低解像度画像 I はデータベース内の画像から人工的に生成されるが、そこで用いた行列 B 、 D は再構成処理の際に既知であるとした。同様に、各カメラのズーム倍率に依存する行列 C_j も既知であるとした。また、パラメータ α_1 、 α_2 については、画像に応じて適切な値を設定した。

縦横をそれぞれ 2 倍に拡大する際に用いた画像 (SANT) を図 2 に示す。この画像群を用いて再構成型超解像処理を行った場合の更新回数 k に対する目的関数 $f(\mathbf{h}, \{\mathbf{W}_j\})$ の変化を図 3 に示す。2.3 での予測のとおり、更新とともに関数の値は減少していくことが分かる。本実験の範囲では、他の画像や倍率に対しても同様の振舞いが観察された。ただし、十分な更新の後にも関数値が収束せずに、わずかに振動することもある。その場合には、一定回数の更新をもって反復処理

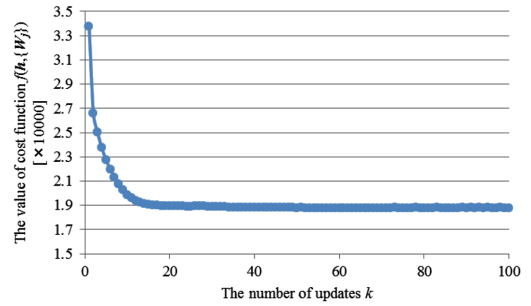


図 3 更新回数に対する目的関数の変化の例
 Fig. 3 Changes in the objective function with respect to the number of updates k .



図 4 再構成型超解像の結果 (2 倍拡大, 画素数: 640×480)
 Fig. 4 Reconstructed super-resolution image. (magnification factor: 2, the number of pixels: 640×480).

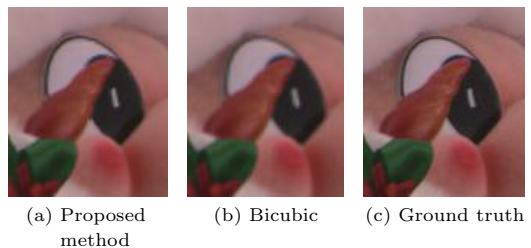


図 5 拡大画像による比較 (SANT, 2 倍拡大)
 Fig. 5 Comparison in enlarged images (SANT, magnification factor: 2).

を終了させた。

図 2 の画像群 (SANT) を用いて、提案した再構成型超解像処理により縦横をそれぞれ 2 倍に拡大した画像を図 4 に示す。低解像度画像 I が存在するため全体として大きな破綻は生じていない。図 5 (a) に一部を拡大した画像を示し、比較として図 5 (b) にバイキュービック補間による結果、図 5 (c) には理想的な高解像度画像を示す。バイキュービック補間による結果と比

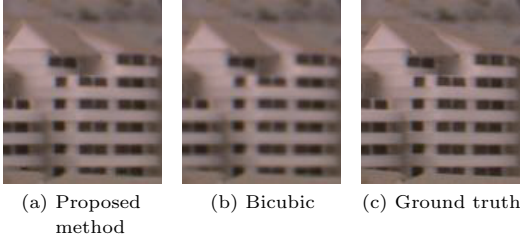


図 6 拡大画像による比較 (CITY, 2 倍拡大)

Fig. 6 Comparison in enlarged images (CITY, mag. factor: 2).

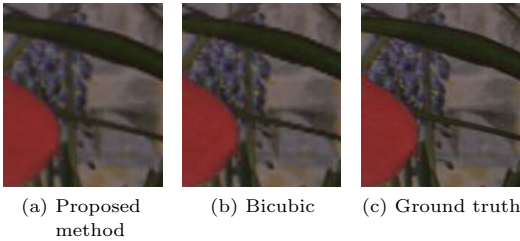


図 7 拡大画像による比較 (PLNT, 2 倍拡大)

Fig. 7 Comparison in enlarged images (PLNT, mag. factor: 2).

べ提案手法では、眼の輪郭などのエッジ部でぼけが少なくより鮮明な高周波成分の復元がなされている。また、評価画像として CITY, PLNT を用いた場合に得られる結果の一部を拡大して図 6, 図 7 にそれぞれ示す。倍率が小さいため補間結果に対する顕著な差は紙面から分かりにくいですが、画素対応の推定誤りなどによる大きな破綻はなく窓枠や枝などのエッジ部についても良好に再現されている。

それぞれの評価画像に対して縦横をそれぞれ 4 倍に拡大した場合の結果を図 8 に示す。2 倍に拡大した場合と比べて画質の劣化は生じてしまうものの、補間による結果と比較してエッジ部がより鮮明に再現されており、両者の差異は顕著になっていることが分かる。

提案手法及びバイキュービック補間により得られた画像に対して求めた PSNR (peak signal-to-noise ratio) を表 1 に示す。ただし、2 倍拡大については画像全体で PSNR を求めており、4 倍拡大についてはズーム画像の影響が及ぶ範囲 (ズームカメラの視野角内、図 1 参照) に限定して PSNR を算出した。いずれの評価画像、拡大率においても提案手法はバイキュービック補間を上回る数値を示している。特に拡大率を 4 倍にした場合では、2 倍の場合と比較して両手法間の PSNR の差が広がっており、高倍率の状況における提案手法の有効性が示唆されている。

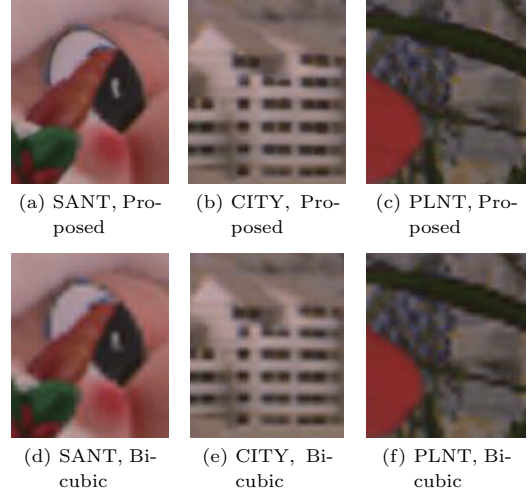


図 8 拡大画像による比較 (4 倍拡大)

Fig. 8 Comparison in enlarged images (mag. factor: 4).

表 1 PSNR [dB] による定量評価
Table 1 Quantitative evaluation in terms of PSNR [dB].

Scene	Magnification factor of 2		Magnification factor of 4	
	Proposed	Bicubic	Proposed	Bicubic
SANT	38.2	37.6	34.1	32.6
CITY	35.8	35.4	35.4	33.8
PLNT	37.1	36.5	32.3	31.6

4. むすび

本論文では、多視点から撮影されたズーム量の異なる複数枚の画像を用いて再構成型超解像処理を行う手法を提案した。MAP 推定による再構成処理の過程でステレオマッチングによる視点間の画素対応推定を繰り返し行った結果、バイキュービック補間に比べ、高周波成分が精度良く復元できていることを確認した。

本論文の評価実験では 5 眼カメラを用いて 2 倍及び 4 倍に拡大する状況を扱ったが、今後はより大きな倍率の場合も含めて、有効なカメラ配置やカメラ数の検証を行う予定である。

文 献

- [1] S.C. Park, M.K. Park, and M.G. Kang, "Super-resolution image reconstruction: A technical overview," IEEE Signal Process. Mag., vol.20, no.3, pp.21-36, May 2003.
- [2] S. Baker and T. Kanade, "Limits on super-resolution and how to brake them," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.24, no.9, pp.372-379, Sept. 2002.

- [3] M.V. Joshi, S. Chaudhurim, and R. Panuganti, "Super-resolution imaging: use of zoom as a cue," *Image Vis. Comput.*, vol.22, no.14, pp.1185–1196, April 2004.
 - [4] K.Ng. Michael, H. Shen, S. Chaudhuri, and A.C. Yau, "Zoom-based super-resolution reconstruction approach using prior total variation," *Opt. Eng.*, vol.46, issue 12, 127003, Dec. 2007.
 - [5] P. Gajjar and M. Joshi, "Zoom based super-resolution: A fast approach using particle swarm optimization," *Image Signal Process.*, vol.6134/2010, pp.63–70, June 2010.
 - [6] C.K.K. Jayasooriya, Zoom-based super-resolution image reconstruction from images with different orientations, Master Thesis, Wichita State University, Dec. 2006.
(平成 23 年 12 月 16 日受付, 24 年 3 月 28 日再受付)
-