

## ステレオ画像を用いた画像の品質と奥行き推定精度の同時改善

池田 薫, 清水 雅夫, 奥富 正敏

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻  
東京都目黒区大岡山 2-12-1

{kiked, mas}@ok.ctrl.titech.ac.jp, mxo@ctrl.titech.ac.jp

### 概要

本論文では、ステレオ画像を利用した画質と奥行き推定精度の同時改善方法を検討した。この方法では、入力画像ペアでステレオ対応点探索を行い、求められた視差を使って対応点が重なるように画像を変形してから、入力画像ペアを平均することでノイズを低減する。このノイズを低減した入力画像ペアで、再びステレオ対応点探索を行なう。この処理を繰り返すことで、画質と奥行き推定精度を同時に改善する。この方法は多眼ステレオ画像に拡張することもでき、このときには画質の改善だけでなく、原画像に対して解像度の高い画像を得ることができる。合成画像および実画像を用いた実験を行い、方法の有効性を確認した。

## Simultaneous Improvement of Image Quality and Depth Estimation using Stereo Images

Kaoru IKEDA, Masao SHIMIZU and Masatoshi OKUTOMI

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

**Abstract** In this report, a method to simultaneously improve the depth estimation accuracy of stereo measurement and the image quality of the input stereo images is studied. Firstly, the correspondences between the stereo image pair are obtained. Secondly, each image is warped onto another image and averaged images are generated to reduce noise. Thirdly, an improved correspondences between the noise reduced image pair is obtained to improve the disparity. The iterative computation provides both higher quality images and accurate depth estimation. The method can be extended to the multi-camera stereo to obtain a higher resolution image. Experimental results using both synthetic and real images are shown to demonstrate the effectiveness of the method.

### 1 はじめに

ステレオ3次元計測は、カメラの高精度化と低コスト化により、応用分野がますます広がっている。一方、カメラによって撮影される画像には高い品質が求められることが多い。記録、解析、鑑賞など、なるべく高画質画像を得たいという需要は尽きない。また、より安価なカメラを用いてコストを抑えたいという需要も高い。

こうした要求から、時系列画像を利用した超解像処理[5]などが、撮影画像よりも高い解像度を得る手法として知られている。また、画像上のノイズに対しても様々な研究が行われており、Wavelet変換を用いて行うノイズ除去法[2]などが存在する。

単眼画像におけるこうした画像品質向上手法に対して、ステレオ画像を用いた奥行き推定時に、同時に画質を向上する手法も提案されている。ステレオ3次元計測では入力画像にノイズが付加されることにより対応点が正しく求まらず、最終的な3次元座標の精度が低下する可能性があるため、ノイズや画質への対策は重要である。たとえばStrechaら[7]は、ステレオ画像上の画素値と奥行きの推定値をベイズ確率で表現し、ノイズのない画素値と奥行きを最適化により求める手法を示した。これは、画像の確率パラメータの推定とエネルギー関数の最小化を交互に繰り返すEM法(Estimation-Minimization)を用いた手法であり、初期値として与えられた値から繰り返す。

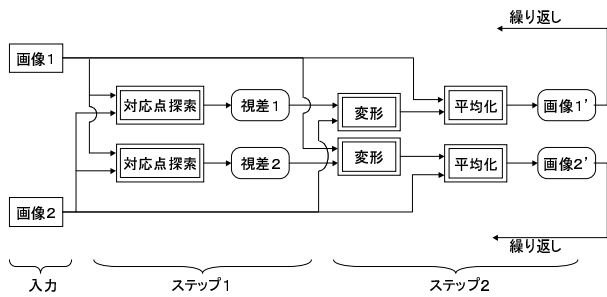


図 1. 処理の概略.

返し処理を行うことで、ノイズを含まない画素値と奥行きを同時に推定する手法である。一方、Rajagopalanら [6] は、画像とデプスマップをマルコフランダム場を用いてモデル化することにより、ステレオ入力画像に生じたばげと奥行き推定精度を同時に改善する手法を示している。

これらの手法は、ステレオ 3 次元計測から得られる奥行き情報を用いて原画像の画質を改善しつつ、同時にステレオ 3 次元計測の主目的である奥行き推定精度を向上させるための手法である。つまり、ステレオ画像から 3 次元位置を推定するだけではなく、入力した画像をより有効に利用する手法である。

本論文では、ステレオ入力画像を用いて、ステレオ 3 次元計測による奥行き推定精度と入力された画像の品質を同時に向上する方法について検討する。この方法は、視差に基づいて入力画像を統合し、統合して改善された画像を再び入力画像とすることで視差を更に改善する方法である。また、この提案方法を合成画像および実画像に対して適用し、実験を通して有効性を検討した。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では本論文で検討する方法の手順を説明する。第 3 章では 2 章で説明した方法の有効性を検討し、原理の考察を行う。第 4 章では合成画像および実画像を用いた実験を行い、有効性を確認する。最後に、第 5 章で本論文のまとめを行う。

## 2 画像と奥行き推定精度の同時改善処理

### 2.1 処理の概略

図 1 に、提案方法での処理について概要を示す。この方法は処理全体の入力として、画像 1 と画像 2 のステレオ画像を入力として、2 段階の処理を行う。ステップ 1 では対応点探索により画像 1 を基準にした画像 2 に対する視差 1 と、同様に画像 2 を基準にした画像 1 に対する視差 2 を求める。ステップ 2 ではこの視差に基づいて画像を変形してから平均化処理を行い、画像 1' と画像 2' を出力する。画像 1' と画像 2' を再度入力画像として用いることで繰り返し処理を行うことができ、繰り返すことで視差推定精度を向上させることができる。

なお、この処理は、画像 1 と画像 2 に対して対称な構造を取っている。このため、以降は一方の画像につい

て方法を説明する。

### 2.2 対応点探索と平均化処理

まず、図 1 のステップ 1 に示される処理を説明する。ここでは 2 枚の画像から通常のステレオと同様にして対応点探索を行い、視差を求める。対応点探索には SSD (Sum of Squared Differences) に基づく領域ベースマッチングを利用し、その有効性を高めるために、サブピクセルマッチング [8] やオフセットフィルタ [4],[9] を用いている。

対応点探索を行うことによって求められた視差は、それぞれの画像上での対応点同士の座標位置の差である。従って、視差を用いて画像を変形し、参照画像が基準画像に対して重なるような画像を生成できる。

ステップ 2 では、ステップ 1 で求められた視差を用いて参照画像と基準画像の対応点同士を平均化する。この平均化処理を行うことで、出力として基準画像側に参照画像上の情報が平均化された新しい基準画像を得ることができる。この新しい基準画像が、画質の改善された画像となる。

なお、ステップ 2 では、その前の段階で求められている視差がノイズの影響などによって正確に求められているとは限らないことと、オクルージョン領域が存在することにより基準画像上の全ての点に対して対応点が存在しないという問題がある。このため、参照画像の変形および平均化には、信頼性の評価値を用いて適用箇所を判断している。この評価値として、それぞれ 2 枚の画像を基準として求めた視差マップを、視差マップ自身を用いて変形して比較する方法を用いた。視差に対してバックマッチング [1] を行うことで、左右の画像上で対応点と判断された点同士が同一の視差にあるかどうかを比較し、一定の閾値内であった場合にはその点を対応点であるとして採用し、異なった視差を持っている場合には、採用しない。

### 2.3 繰り返し入力処理

前節では、2 枚の画像を平均化し、画質改善した画像を得る方法について示した。しかし、誤対応を生じた領域は画質が改善されない。そこで、処理により得られた画像を、再び処理の入力として与えることにより再度一

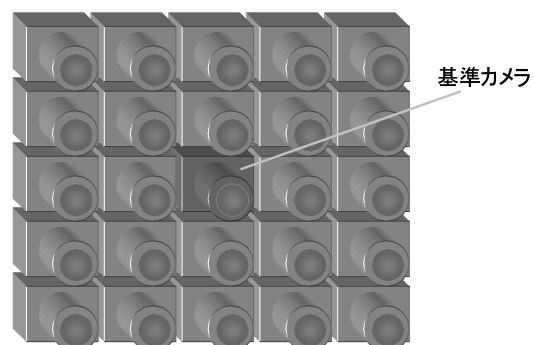


図 2. 多眼カメラ配置の例.

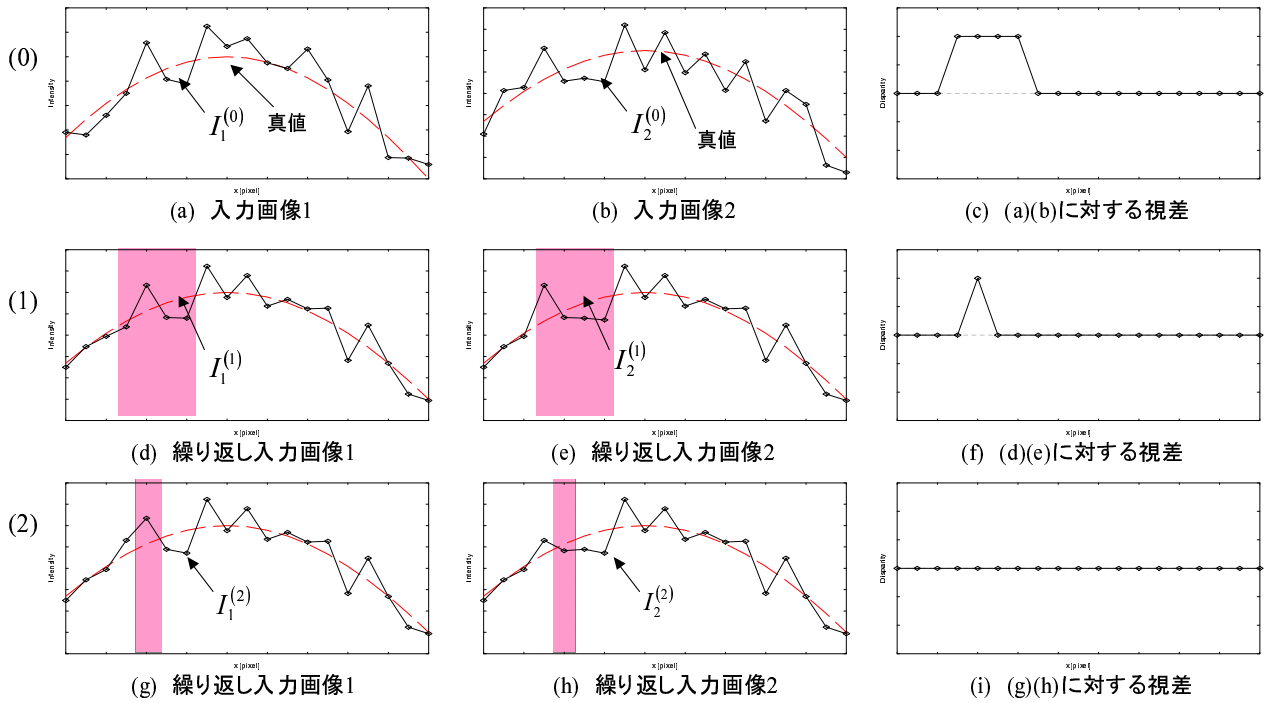


図 3. シミュレーション結果. 各行が処理の繰り返し回数を表している. 各画素に対応する視差の真値は 0 で一定である.

連の処理を行い, これによって視差を改善し, また平均化処理も同様に繰り返し行う.

対応点探索とそれに基づく処理を繰り返し適用していくことで, 画像品質と奥行き推定精度の同時改善が実現される.

## 2.4 多眼画像を用いる方法

前節まででは 2 眼の画像に対する処理を述べたが, この処理は多眼画像に拡張することができる. 多眼化によるステレオ計測の精度向上 [3] と, 多数枚の画像の平均化処理による大きなノイズ低減効果が期待できる. 図 2 に示すように, 25 台のカメラを利用する場合には, 中央のカメラ (図中で色の異なるカメラ) を基準とすれば, 他の 24 台カメラを全て参照として扱うことができる.

また, 多眼画像を用いると情報が密に得られるため, 画像の高解像度化処理を行なうことも可能である. 2 眼に対する処理では単純な平均化処理を行っていたが, 十分な枚数の入力画像がある場合には, 基準となる画像に対してそのサブピクセルを埋めるような形で画素値を射影することで, 元の画像よりも高い解像度の画像を得ることができる.

## 3 同時改善処理の効果の考察

### 3.1 ノイズの低減

図 3 に, 1 次元信号に対するシミュレーション結果を示す. 相関のないノイズを含む 1 次元のステレオ画像ペア  $I_1^{(0)}, I_2^{(0)}$  (図 3(a)(b)) を入力とするとき, 提案方

法を適用して得られる新しい画像 1, 2 がそれぞれ  $I_1^{(1)}, I_2^{(1)}$  (図 3(d)(e)) であり, 視差が図 3(c) である.  $I_1^{(1)}, I_2^{(1)}$  は入力画像  $I_1^{(0)}, I_2^{(0)}$  から求められた視差をもとに平均化を行った画像であり, 視差が正しく得られた部分 (網掛け部分以外) では画像が平均化される影響によって,  $I_1^{(0)}, I_2^{(0)}$  と比べてノイズが軽減され, 画質が改善している.

これは良く知られているように, 無相関なガウス性ノイズを含む 2 つの信号を平均することで, ノイズの分散が  $1/2$  になることに相当する.

さらに  $I_1^{(1)}, I_2^{(1)}$  を入力として繰り返し処理を行うことを考えると,  $I_1^{(2)}, I_2^{(2)}$  が出力として得られる. ところが, 視差が正しく得られた部分では, 視差によって対応する  $I_1^{(1)}$  と  $I_2^{(1)}$  が全く同じ画素値になっている. このため,  $I_1^{(2)} = I_1^{(1)}, I_2^{(2)} = I_2^{(1)}$  になり, 以降の繰り返しでは出力に変化がなくなる.

しかし, 図 3(g)(h) に示すように, 繰り返し処理によって出力が変化している. この原因は図 3(c)(f)(i) に示すように, 繰り返し処理によって視差が改善しているためである.

### 3.2 視差の改善

図 4(a)(b) は 1 回目の処理で得られた画像  $I_1^{(1)}$  と  $I_2^{(1)}$ , 図 4(c) は視差である.  $I_1^{(1)}$  と  $I_2^{(1)}$  は, 視差が正しく得られていれば一致するが, 2.2 節で述べたとおり, 視差に対するバックマッチングで視差の信頼性を評価し, 誤っている範囲に対しては平均化を行わないため, 一致しない. 図 4 では,  $x = [3, 6]$  の範囲で視差が正しく求めら

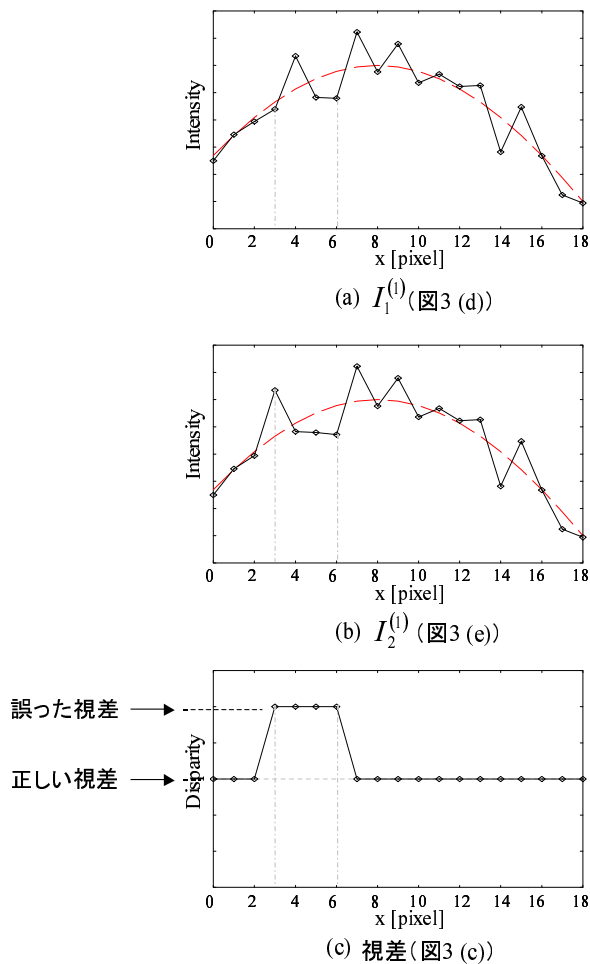


図 4. (a)(b)1 回目の処理で得られた画像, (c) 視差.

れておらず,  $I_1^{(1)}$  と  $I_2^{(1)}$  もその範囲では一致しない.  
 このとき,  $I_1^{(1)}$  と  $I_2^{(1)}$  の SSD を計算することを考える. なお, ウィンドウサイズは 3 である.  
 まず,  $x = [7, 9]$  の範囲の SSD は, この範囲では  $I_1^{(1)} = I_2^{(1)}$  であるので, 明らかに 0 である.  
 次に,  $x = [6, 8]$  の範囲では,  $x = [7, 8]$  で  $I_1^{(1)} = I_2^{(1)}$  であり,  $x = 6$  のみ  $I_1^{(1)} \neq I_2^{(1)}$  なので, SSD はより小さな値をとりやすい.

さらに,  $x = [5, 7]$  の範囲でも同様に, SSD は  $x = [5, 6]$  のみで求めればよく, より低い値をとりやすい. この位置の SSD は  $x = 6$  の対応度に相当し, 低い値をとるほどに対応度が高い. 繰り返す前の視差に誤りがあるが, 繰り返し処理によって SSD が低い値をとり, 正しい視差を求めやすくなる.

以降同様に, 視差が誤って求められた範囲の外側から, 正しい対応が求めやすくなるため, 図 3 の (c)(f)(i) では, 視差が誤った範囲が減少していく様子を見ることができる.

なお, この方法はオフセットフィルタを適用することで効果が高くなりやすい. 理由としては, オフセットフィルタの適用により, SSD は常にフィルタの取りうる範囲でもっとも低い値を得るため, 平均化が行われた領

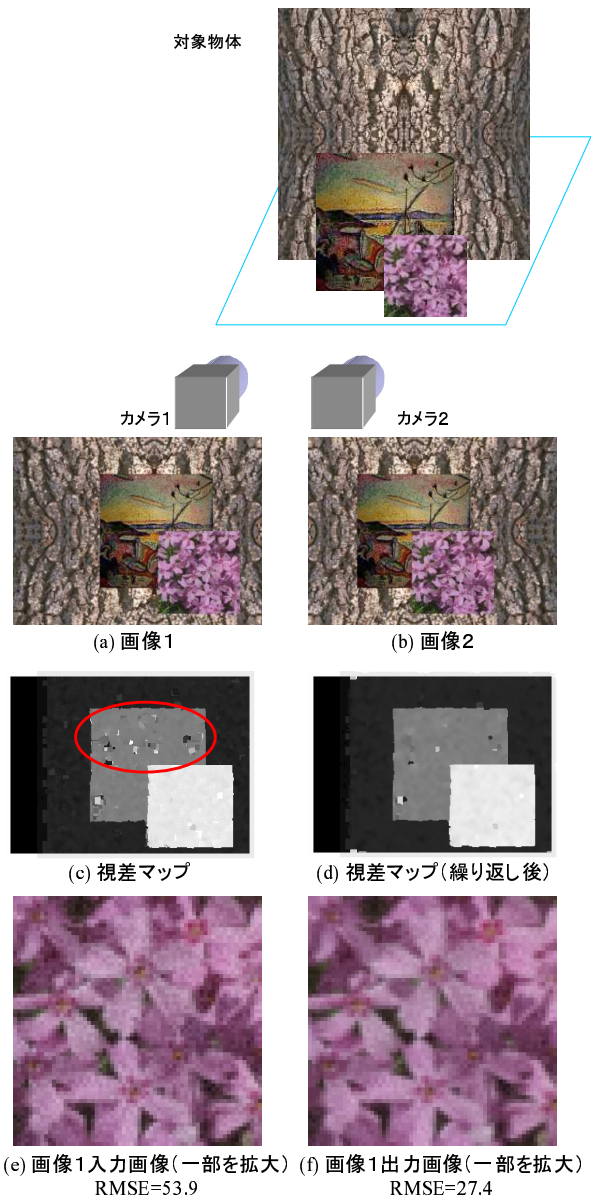


図 5. 実験結果 (合成画像).

域の影響を最大限に受ける形でフィルタが変化するためである.

## 4 実験結果

### 4.1 2 眼カメラを用いた結果

図 5 は白色雑音を意図的に混入させた合成画像を用いた実験結果である. この合成画像は, 図 5 に示すように, 撮像面に平行な 3 枚の平板を平行 2 眼カメラで撮影したものを想定しており, 視差が正しく求められた場合には視差マップが 3 段階で表現される. しかし実際の視差マップは, ノイズの影響で正しく求められず, 図 5(c) の円で囲った領域のように, エラーが生じている. 提案方法を 2 回繰り返した結果得た視差マップが図 5(d) であり, 誤対応領域が大幅に減少していることがわかる.

図 5(e)(f) に, 一部を拡大した入力画像と出力画像を



入力画像(中央カメラ位置)

出力画像

図 6. 実験結果(多眼・実画像). 上: 基準入力画像  
左: 入力画像拡大 右: 出力画像拡大.

示す. ノイズを含まない画像に対する RMSE は, それぞれ 53.9, 27.4 となり, 2 回繰り返し処理によってノイズが低減されていることがわかる.

#### 4.2 多眼カメラを用いた結果

多眼ステレオ画像を入力画像として用いた実験結果を図 6 に示す. 入力多眼ステレオ画像は, 平行移動ステージを使って 1 台のカメラを移動しながら撮影し, 図 2 の 25 眼カメラ配置で撮影した(カメラ間隔は 1cm). また, 画像はカメラのゲインを上げて撮影されているために, 比較的大きなノイズを含んでいる. 図 6 に示された画像は図 2 の基準カメラから撮影された基準入力画像と出力画像の一部(黒枠で囲われた部分)を拡大したものである. 2 枚の画像を比較すると, ノイズが減少しているので, 提案方法が実画像および多眼ステレオ画像でも効果をあげることが確認できる.

また, 図 7 には図 6 と同じカメラ配置で撮影した多眼ステレオ画像を入力とし,  $2 \times 2$  倍の高解像度画像を得た結果を示す. 図 7(a) はニアレストネイバー法, 図 7(b) はバイキュービック法を使った 1 枚の入力画像からの拡大画像であり, 図 7(c) は提案方法による複数画像からの高解像度画像を得たものである. 提案方法によると, トランプの文字『K』の部分や直線部分がなめらかになっていることがわかる.

## 5 おわりに

本論文では, ステレオ画像を入力として用い, ステレオによる奥行き探索の精度を向上させつつ, 原画像の

品質を同時に向上させるための方法について述べた. この方法は画像間の対応点を探索し, その対応点同士の視差を求めつつ, 視差によって決定される対応点同士を平均化することで, 画素に加わったノイズを平均化してノイズを低減させることができる. そして, この結果を処理系に再入力することで前回よりも正しい対応関係が求められるため, 繰り返しを続けて行くことで徐々に対応と画質が同時に改善されていくこととなる.

同時に, 多眼画像を用いた際には複数の画像を統合することにより, 2 眼画像よりも高いノイズ低減の効果を持つことを述べた. また, 多眼画像とその視差関係を用いて画素間を補完するように埋めることで, 原画像に対して高解像度の画像を得ることができることについても同様に述べた.

これら上記の方法の有効性について, いくつかの合成画像と実画像を用いて検討し, 実際に方法が効果をあげることについて確認した.

なお, 現在はステレオカメラ配置について特に考慮をしておらず, また特に多眼カメラを用いた高解像度化においても, 複雑な推定などを含まない単純な画素値の置き換えと補間のみを行っている. これらに関しては, これから検討すべき点であると考えられる.

## 参考文献

- [1] A. Luo and H. Burkhardt. An intensity-based cooperative bidirectional stereo matching with simultaneous detection of discontinuities and occlusions. *IJCV*, Vol. 15, pp. 171–188, 1995.
- [2] M. Kivanc Mihcak, I. Kozintsev, K. Ramchandran, and P. Moulin. Low-complexity image denoising based on statistical modeling of wavelet coefficients. *IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS*, Vol. 6, No. 20, pp. 300–303, Dec. 1999.
- [3] Masatoshi Okutomi and Takeo Kanade. A multiple-baseline stereo. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.
- [4] Masatoshi Okutomi, Yasuhiro Katayama, and Setsuko Oka. A simple stereo algorithm to recover precise object boundaries and smooth surfaces. In *IJCV*, Vol. 47, pp. 261–273, 2002.
- [5] Sung Cheol Park, Min Kyu Park, and Moon Gi Kang. Super-resolution image reconstruction: a technical overview. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 20, No. 3, pp. 21–36, May. 2003.
- [6] A.N. Rajagopalan, S. Chaudhuri, and Uma Mudenagudi. Depth estimation and image restoration using defocused stereo pairs. *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 26, No. 11, pp. 1521–1525, Nov. 2004.

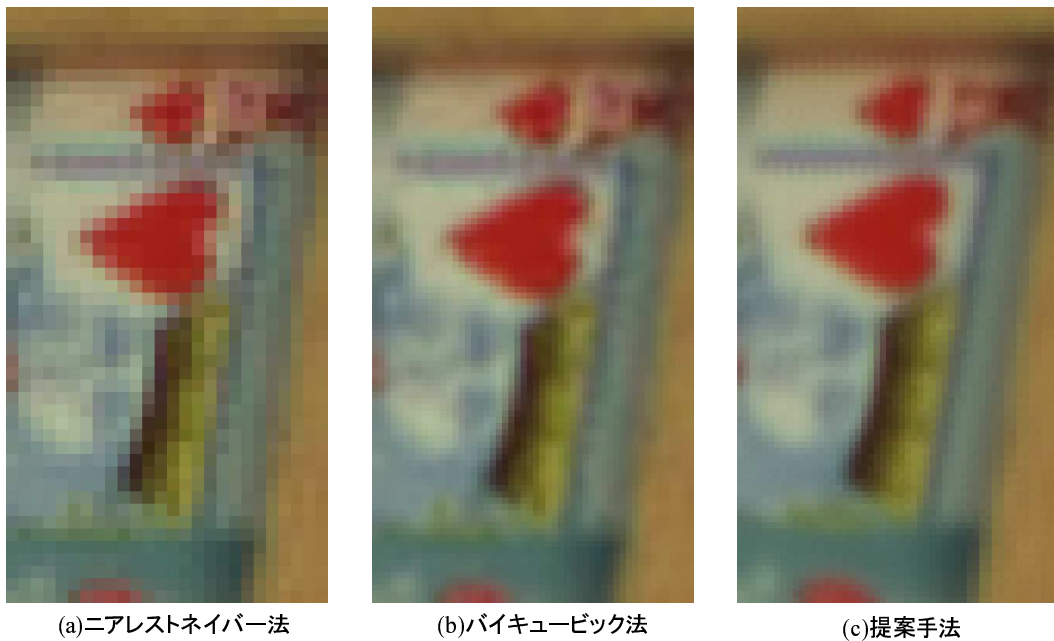


図 7. 実験結果（多眼・実画像高解像度化処理）. (a) (b) は原画像 1 枚を拡大. (c) は多眼画像を統合.

- [7] C. Strecha, R. Fransens, and L. Van Gool. Wide-baseline stereo from multiple views: A probabilistic account. *CVPR*, Vol. 1, pp. I-552-I-559, Jul. 2004.
- [8] 清水雅夫, 奥富正敏. 画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 7, pp. 1409-1418, 2001.
- [9] 奥富正敏, 片山保宏, 横山敦. 物体境界と滑らかな表面形状を共に復元するステレオビジョン. 画像電子学会誌, Vol. 29, No. 5, pp. 445-451, 2000.