

単板 CCD からの高解像度カラー画像の生成

後藤知将 奥富正敏

東京工業大学大学院理工学研究科

CCD を用いた画像センサーの分解能の限界を背景として、物理的分解能を超える高精細画像を生成する方法が研究されてきた。従来の、複数画像から高解像度の画像を合成する超解像法は、主にモノクロ画像を対象としており、近年の急速な普及をみる単板カラーカメラから高解像度画像を生成する直接的な方法はなかった。そこで、本論文では、単板 CCD の色モザイク出力を直接利用し、高解像度カラー画像を生成する手法を提案する。本手法は単板カメラのカラー化処理 (demosaicking) を内包する一般化されたカラー超解像問題の定式化を特徴とする。さらに、提案手法に基づく画像処理の有効性を合成画像と実画像を用いて検証する。

High Resolution Color Image Reconstruction from a Single CCD

Tomomasa Gotoh and Masatoshi Okutomi

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Limitation in the physical resolution of CCD image sensors has provided motivation to enhance the resolution of images. Super-resolution has been applied mainly to grayscale images, and producing a high resolution color image from a single CCD sensor has not been discussed thoroughly.

This work aims at producing a high resolution color image directly from "color mosaic" images obtained by a single-CCD with a color filter array. This method is based on a generalized formulation of super-resolution which performs both resolution enhancement and demosaicking simultaneously. Verification of the proposed method is conducted through experiments using synthetic and real images.

1 はじめに

単板カラーカメラにおいて、CCD の各要素には色フィルタがかけられている。そのため色フィルタの配列 (CFA : Color Filter Array) を通して得られるデータは色モザイク状の画像であり、フルカラー画像の表現としては不完全なものとなる。

完全なカラー画像を生成するには、欠けている色チャンネルを色モザイク状の生データから推定する必要がある。一般に、この色復元の処理を demosaicking と呼ぶ。

最も簡単な demosaicking は、各色チャンネルごとに線形補間を行うことである。より複雑な

demosaicking 手法 [1,2] も報告されており、線形補間と比較して画像復元の精度が高い。一般に、demosaicking において、処理結果の画像に偽色が発生することが主な問題となる。光学ローパスフィルタに通すことにより偽色を低減させることはできるが、その結果帯域の制限を受けることになる。特に、画像を高解像度の画面に表示する場合、帯域制限による画質の低下が顕著となる。

そこで、本研究では複数の入力画像を合成して高解像度画像を生成する超解像 [3,4,5,6,7] の理論に基づき、単板 CCD の色モザイク出力から高精細カラー画像を生成する手法を提案する。これまでに超解像はグレースケール画像や 3 CCD の出力画像などのカラー画像に適用されてきた。一方、単板 CCD の色モザイク出力に対しては、まず demosaicking 処理を施した後、得られたカラー画像に超解像を適用する方法も考えられるが、本研究ではこのような 2 段階の処理とは異なる直接的な手法 (図 1 参照) を提案し、その有効性を検証する。

本稿の構成は次のとおりである。第 2 節では、単板 CCD カメラによる複数画像の撮像モデルを導出し、そのモデルに基づき第 3 節では高解像度カラー画像の復元問題を定式化する。第 4 節では合成画像と実画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を検証する。第 5 節では、本研究を総括する。

2 観測モデル

グレースケール画像の撮像モデルは、次の連続-離散モデル

$$u(i_1, i_2) = \iint p(i_1 - x, i_2 - y) I(x, y) dx dy \quad (1)$$

で与えられる。\$u(i_1, i_2)\$ は CCD で撮像された画像を表し、\$I(x, y)\$ は撮像装置の入力となる連続画像を表す。\$p(x, y)\$ は点広がり関数である。点広がり関数は、光学系と CCD 開口からなる光学的伝達特性から導出されるが、実用上はガウス関数で近似できる。

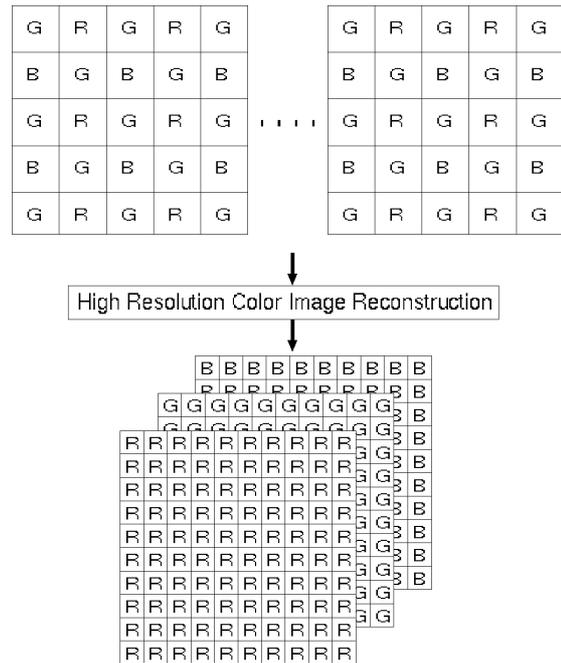


図 1 単板 CCD から的高解像度カラー画像の生成

図 2 に示す入力画像座標系と復元の対象となる高解像度画像座標系の変換

$$(x, y) = s(\xi, \eta) \quad (2)$$

を考えると、(1)式は

$$u(i_1, i_2) = \iint p((i_1, i_2) - s(\xi, \eta)) I(x, y) \left| \frac{\partial s}{\partial(\xi, \eta)} \right| d\xi d\eta \quad (3)$$

となる。変換 \$s\$ は射影変換等の一般的な幾何学的変換を考える。

ここで、座標系 \$(\xi, \eta)\$ の格子点 \$(j_1, j_2)\$ に位置する高解像度画素を覆う領域全体で \$I(x, y)\$ が一定値 \$z(j_1, j_2)\$ をとると仮定すると、(3)式は

$$u(i_1, i_2) = \sum_{j_1} \sum_{j_2} z(j_1, j_2) h(i_1, i_2, j_1, j_2; s) \quad (4)$$

となる。ここで、

$$h(i_1, i_2, j_1, j_2; s) = \int_{j_1-1/2}^{j_1+1/2} \int_{j_2-1/2}^{j_2+1/2} p((i_1, i_2) - s(\xi, \eta)) \left| \frac{\partial s}{\partial(\xi, \eta)} \right| d\xi d\eta \quad (5)$$

である。

次に、カラー画像の色チャンネル \$c \in \{R, G, B\}\$ の撮像モデルを考えると、チャンネル \$c\$ の撮像モデルは(4)式と同様にモデル化でき、

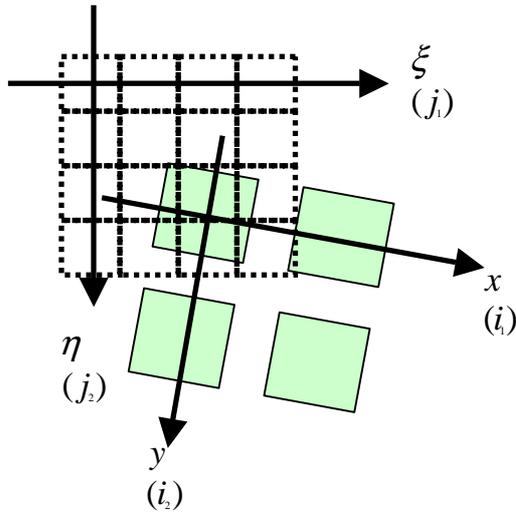


図2 入力画像と復元画像の座標系の定義

$$u_c(i_1, i_2) = \sum_{j_1} \sum_{j_2} z_c(j_1, j_2) h(i_1, i_2, j_1, j_2; \mathbf{s}) \quad (6)$$

となる。ここで、各色チャネルの点広がり関数が同一であるという条件を仮定したが、これは実用上妥当な仮定であると考えられる。

上記撮像モデルは3 CCD カメラモデルに相当するが、単板カメラではさらに色フィルタの影響も考慮する必要がある。CCD に色フィルタがかけられた結果、ある画素 (i_1, i_2) において、一つのチャネル c のみに対し感度を持つ色モザイク画像 $y_c(i_1, i_2)$ が生成される。

$$y_c(i_1, i_2) = m_c(i_1, i_2) u_c(i_1, i_2) \quad (7)$$

ここで、 $m_c(i_1, i_2)$ は感度配列であり、画素 (i_1, i_2) においてチャネル c に感度を持つとき、

$m_c(i_1, i_2) = 1$ であり、その他の画素では $m_c(i_1, i_2) = 0$ である。

次に、複数画像の生成モデルを考える。 M 枚の画像がそれぞれ異なる変換 \mathbf{s}_k , $k=1, \dots, M$ を持つとすると、次の画像列生成モデルが得られる。

$$y_{c,k}(i_1, i_2) = m_c(i_1, i_2) \sum_{j_1} \sum_{j_2} z_c(j_1, j_2) h(i_1, i_2, j_1, j_2; \mathbf{s}_k) \quad (8)$$

上記モデルは以下のマトリクス表記で表現できる。

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{z} \quad (9)$$

ここで \mathbf{y}_k は $y_{R,k}(i_1, i_2)$, $y_{G,k}(i_1, i_2)$, $y_{B,k}(i_1, i_2)$ の

全画素値を含むベクトルであり、 \mathbf{z} は $z_R(j_1, j_2)$, $z_G(j_1, j_2)$, $z_B(j_1, j_2)$ の全画素値を含むベクトルである。 \mathbf{A} は $h(i_1, i_2, j_1, j_2; \mathbf{s}_k)$ と $m_c(i_1, i_2)$ で定まる行列である。

3 高解像度カラー画像の合成

3.1 問題の定式化

前節の順方向観測モデルを元に、逆問題解析を行うことにより高解像度画像を推定する。正則化の項を付加した目的関数の最適化手法を用いると、推定画像は次式により与えられる。

$$\hat{\mathbf{z}} = \arg \min_{\mathbf{z}} \{f_1(\mathbf{z}) + \lambda f_p(\mathbf{z})\} \quad (10)$$

ここで、目的関数の第一項

$$f_1(\mathbf{z}) = \sum_{k=1}^M \|\mathbf{y}_k - \mathbf{A}_k \mathbf{z}\|^2 \quad (11)$$

は測定データへの適合度を表す。第二項は正則化項を表し、 λ は第一項と第二項の重みを制御するパラメータである。

正則化項は更に二つの項に分けられ、

$$f_p(\mathbf{z}) = f_2(\mathbf{z}) + \mu f_3(\mathbf{z}) \quad (12)$$

上式右辺の第一項は信号の空間的相関に関する項(空間エネルギー関数)であり、第二項はチャネル間の相関に関する項(スペクトルエネルギー関数)である。 μ はこれらの項の相対的な重みを制御するパラメータである。

3.2 空間エネルギー関数

$f_2(\mathbf{z})$ はグレースケールの超解像で用いられてきた局所的な信号の平滑性を評価する項をカラー信号に拡張した項と考えることができる。すなわち、ラプラス演算子の差分近似を各色チャネルに作用させて得られる信号のエネルギーとして定義される。

$$f_2(\mathbf{z}) = \|\mathbf{Pz}\|^2 \quad (13)$$

ここで、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \|\mathbf{Pz}\|^2 = & \sum_{c \in \{R, G, B\}} \sum_{j_1=1}^{N_1} \sum_{j_2=1}^{N_2} \\ & \left(\sum_{l_1=-L_1}^{L_1} \sum_{l_2=-L_2}^{L_2} z_c(j_1-l_1, j_2-l_2) w(l_1, l_2) \right)^2 \quad (14) \\ w(l_1, l_2) = & \begin{pmatrix} -1/4 & & \\ -1/4 & 1 & -1/4 \\ & -1/4 & \end{pmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

上記 $f_2(\mathbf{z})$ の定義を採用した場合、画像の復元結果が過度に平滑化されるため、次のようなエッジ保存型のエネルギー関数を考えることもできる。すなわち、上述のエネルギー関数ではラプラス演算子を用いたのに対し、画像のエッジ方向の2階微分を考える。画素 (j_1, j_2) におけるエッジ方向 $\hat{\theta}_{j_1, j_2}$ は次式により決定される。

$$\hat{\theta}_{j_1, j_2} = \arg \min_{\theta_{j_1, j_2}} \sum_{l_1=-L_1}^{L_1} \sum_{l_2=-L_2}^{L_2} z_L(j_1-l_1, j_2-l_2) \tilde{w}(l_1, l_2; \theta_{j_1, j_2}) \quad (16)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{w}(l_1, l_2; \theta) &= \kappa d(l_1 \cos \theta + l_2 \sin \theta, l_1 - \sin \theta + l_2 \cos \theta) \\ d(x, y) &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} \text{gauss}(x, y) \end{aligned} \quad (17)$$

である。 κ は正規化係数、 $\text{gauss}(x, y)$ はガウス関数である。エッジ保存型のエネルギー関数は $\hat{\theta}_{j_1, j_2}$ を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} \|\tilde{\mathbf{Pz}}\|^2 = & \sum_{c \in \{R, G, B\}} \sum_{j_1=1}^{N_1} \sum_{j_2=1}^{N_2} \left(\sum_{l_1=-L_1}^{L_1} \sum_{l_2=-L_2}^{L_2} z_c(j_1-l_1, j_2-l_2) \tilde{w}(l_1, l_2; \hat{\theta}_{j_1, j_2}) \right)^2 \quad (18) \end{aligned}$$

3.3 スペクトルエネルギー関数

一般に、各色チャンネル間のエッジは互いに位置が揃っており、高い正の相関を示す。この性質を正則化項 $f_3(\mathbf{z})$ に取り込むことにより、demosaicking 処理結果に見られるような偽色の抑制を図ることができる。

ここでは、チャンネル間の正の相関を色差を用いて表現できることを示す。RGB 信号は輝度と色差に分解することができ、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_R \\ \mathbf{z}_G \\ \mathbf{z}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{z}_L + \begin{bmatrix} \mathbf{z}_p \\ \mathbf{z}_q \\ \mathbf{z}_r \end{bmatrix} \quad (19)$$

となる。ここで、輝度は光の強度を表すように定義され、RGB 信号の線形結合として表すことができる。

$$\mathbf{z}_L = \alpha \mathbf{z}_R + \beta \mathbf{z}_G + \gamma \mathbf{z}_B \quad (20)$$

ここで、次の条件が成り立つ。

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (21)$$

式(19)と式(20)より、色差は次式により得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_p \\ \mathbf{z}_q \\ \mathbf{z}_r \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \mathbf{z}_R \\ \mathbf{z}_G \\ \mathbf{z}_B \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで、

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\mathbf{I} & -\beta\mathbf{I} & -\gamma\mathbf{I} \\ -\alpha\mathbf{I} & (1-\beta)\mathbf{I} & -\gamma\mathbf{I} \\ -\alpha\mathbf{I} & -\beta\mathbf{I} & (1-\gamma)\mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (23)$$

は RGB から色差への変換行列である。

上記変換を用い、 $f_3(\mathbf{z})$ を次式で定義する。

$$f_3(\mathbf{z}) = \|\mathbf{QTz}\|^2 \quad (24)$$

$$\|\mathbf{QTz}\|^2 =$$

$$\sum_{d \in \{p, q, r\}} \sum_{j_1=1}^{N_1} \sum_{j_2=1}^{N_2} \left(\sum_{l_1=-L_1}^{L_1} \sum_{l_2=-L_2}^{L_2} z_d(j_1-l_1, j_2-l_2) w'(l_1, l_2) \right)^2 \quad (25)$$

ここで、 $w'(l_1, l_2)$ はハイパス特性を持つコンボリューションカーネルである。

上述のスペクトルエネルギー関数がチャンネル間の相関エッジを検出することは、次の実験により確かめられる。図3のようなエッジモデルを考える。図3において、変数 D は二つのエッジ信号間の相対的変位を表す。図4から、エッジの位置が完全に一致したときに $f_3(\mathbf{z})$ の評価が極値をとることがわかる。一方空間エネルギーはチャンネル間の相関を検出しないことも確認される。

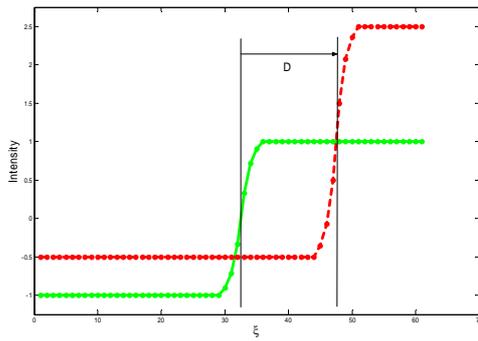


図3 エッジ画像のモデル(実線:G信号、破線:R信号)

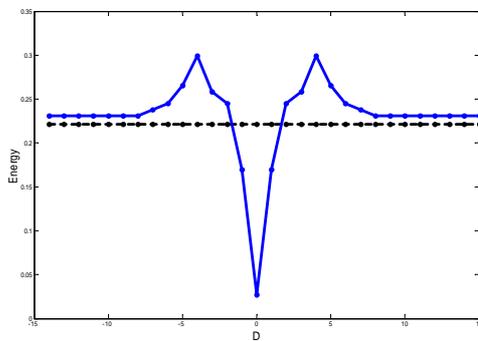


図4 エネルギー関数(実線:スペクトルエネルギー、破線:空間エネルギー)

3.3.1 カーネルサイズに関する考察

与えられた入力画像の枚数が少ない場合、 $w'(l_1, l_2)$ として前節のラプラス演算子と同様のカーネルを用いると画像の推定結果に偽色が発生するため、このような場合はカーネルの大きさを調節することで偽色の発生を抑制する必要がある。カーネルの大きさは、カーネルが定義されるウィンドウ内に各色チャンネルのデータが2点以上含まれるように定めるのが望ましい。例えば、入力画像が1枚の場合、カーネルの大きさを

$$2L_1' + 1 (= 2L_2' + 1) \approx 3f \quad (26)$$

とすることで、良好な推定画像を得る。ここで、 f は入力画像に対する復元画像の解像度倍率である。図5は、 $M = 2$ の場合のカーネルの大きさを示す。

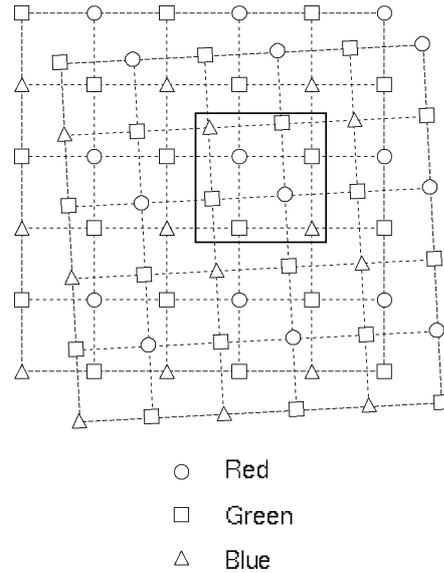


図5 カーネルの大きさの選択

4 実験結果

ここでは、最急降下法による目的関数(10)の最適化を行い、提案手法の有効性の検証を行った。

4.1 画像のマッチング

目的関数において、複数の入力画像間の運動を表す変換 s_k , $k = 1, \dots, M$ を推定する必要がある。ここでは、垂直・水平方向の併進運動と回転運動を考慮した3パラメータのマッチングを[8]の手法により行った。すなわち、変換

$$s_k(\xi, \eta) = \frac{1}{f} \begin{bmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_{xk} \\ \delta_{yk} \end{bmatrix} \quad (27)$$

において、パラメータ

$$\mathbf{r} = [\delta_{xk}, \delta_{yk}, \theta_k] \quad (28)$$

を推定した。

4.2 シミュレーションによる評価

図6(a)はシミュレーションで用いた基準画像であり、図6(b)は基準画像から単板CCDによる撮像モデルを用いて合成した画像である。なお、撮像モデルにおいて s_k は既知とした。

図6(c)(d)(e)(f)は既存の代表的手法による処

理結果を示す。図 6(g)(h)(i)(j)に種々の条件での提案手法による画像復元結果を示す。提案手法では、高い空間周波数成分も忠実に復元されており、更に偽色の発生も抑制されていることが確認される。

本シミュレーション実験では、提案手法の定量的評価として、基準画像と復元画像の誤差を RMS 値により算出した。図 7 は提案手法において、入力画像の枚数と RMS 値の関係を示す。同図において、既存の手法の RMS 値も示されており、提案手法の有効性が確認される。

4.3 実画像による実験

ここでは、実際に単板カメラを用いて、動画像から高解像度画像を復元する実験を行った。取得した動画像に対し、連続する 64 フレームのマッチングを行った結果を図 8 に示す。図 9(a)は入力画像の 1 枚目である。復元する高解像度画像は CCD の物理的解像度に対し、水平方向、垂直方向それぞれ 4 倍の解像度を持つ。図 9(b)(c)は既存の手法、図(d)は提案手法による処理結果を示す。提案手法が格段に優れた復元画像をもたらすことがわかる。

5 おわりに

本研究では、単板 CCD の出力データを利用した直接的な画像復元問題の定式化を提案し、その有効性を検証した。提案手法は入力画像の枚数や解像度拡大率が任意に設定できる。また、適用可能な CFA パターンが Bayer パターン等に特化したものではないという点でも一般性のある手法である。

今後は計算処理の効率化や具体的なアプリケーションへの応用を試みる予定である。

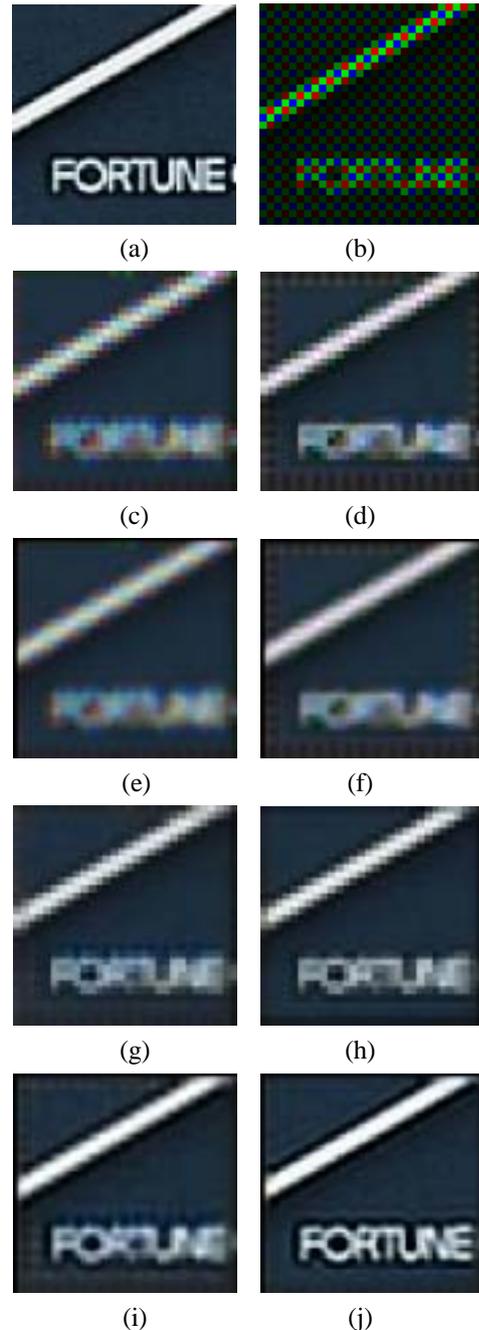


図 6 シミュレーション実験

(a)基準画像(b)シミュレーション画像(c)線形補間(d)demosaicking[2](e)線形補間(解像度倍率 2 倍)(f) demosaicking[2] + バイキュービック補間(解像度倍率 2 倍)(g)提案手法(M=1, f=1)(h)提案手法(M=8, f=1)(i)提案手法(M=1, f=2)(j)提案手法(M=8, f=2)

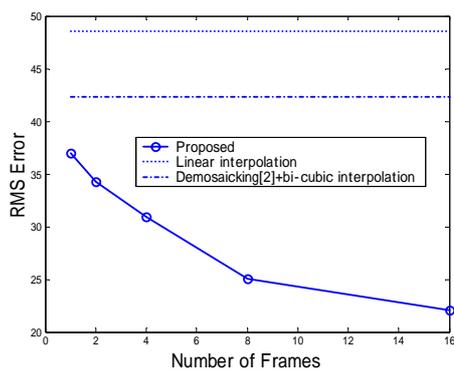


図7 定量的評価

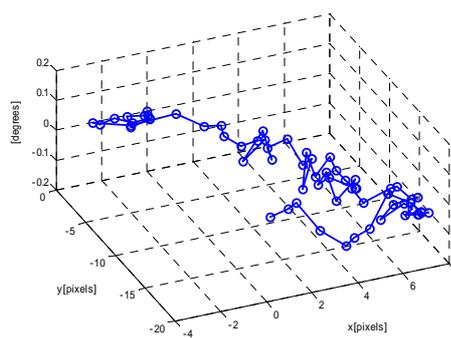
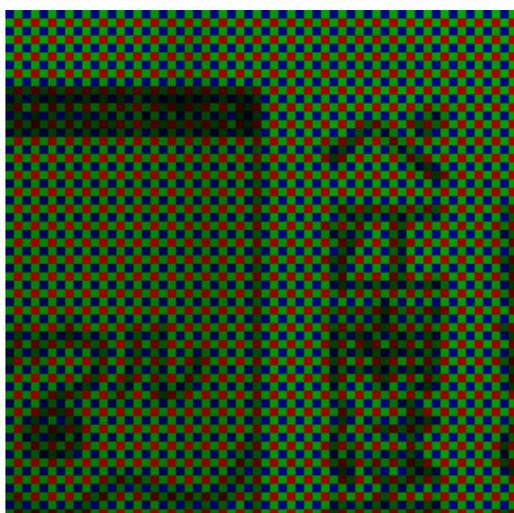


図8 運動パラメータの推定結果



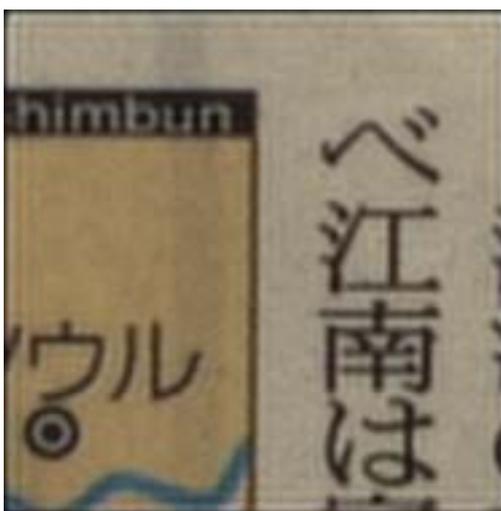
(a)



(b)



(c)



(d)

図9 実画像による実験結果

(a)入力画像(b)線形補間(c)demosaicking[2]+バイキュービック補間(d)提案手法

参考文献

- [1] Cok, D.R., "Signal processing method and apparatus for producing interpolated chrominance values in a sampled color image signal", United States Patent 4,642,678, 1987
- [2] Laroche, C.A, M.A., Prescott, "Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients", United States Patent 5,373,322, 1994
- [3] T. S. Huang and R. Y. Tsai, "Multiple frame image restoration and registration," in *Advances in Computer Vision and Image Processing*, vol. 1, T. S. Huang, Ed. Greenwich, JAI Press Inc, pp. 317--339, 1984.
- [4] M. Irani and S. Peleg, "Improving resolution by Image Registration," *CVGIP: Graph. Models Image Process.*, vol. 53, pp. 231--239, Mar. 1991.
- [5] R. C. Hardie, K. J. Barnard and E. E. Amstron, "Joint MAP Registration and High-Resolution Image Estimation using a Sequence of Undersampled Images", *IEEE Trans. on Image Processing*, vol. 6, pp. 1621--1633, 1997
- [6] A. M. Tekalp, M. K. Ozkan, and M. I. Sezan, "High-resolution image reconstruction from lower-resolution image sequences and space varying image restoration," *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, San Francisco, CA., vol. III, pp. 169--172, Mar. 1992.
- [7] R. R. Schultz and R. L. Stevenson, "Improved definition video frame enhancement," *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, Detroit, MI., vol. IV., pp. 2169-2172, May 1995..
- [8] Jhy-Yeong Chang, Wen-Feng Hu, Mu-Huo Cheng, and Bo-Sen Chang, "Digital image translational and rotational motion stabilization using optical flow technique," *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, vol.48, pp.108-115, Feb 2002.