

時空間解像度の異なる3板撮像画像からの高時空間解像度カラー画像生成 — 動きと生成画像の同時推定 —

登一生, 今川太郎, 本村秀人, 吾妻健夫

松下電器産業(株) 先端技術研究所 〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台3-4
E-mail: {kunio.nobori, imagawa.taro, motomura.hideto, azuma.takeo}@jp.panasonic.com

あらまし 本報告では、高時空間解像度のカラー動画画像を生成する方法について提案する。提案法ではフレーム間の動きの推定と生成画像の推定を同時に行うことで、動きの高精度化と時空間解像度の向上を図る。そのために、色成分(RGB)ごとに解像度(空間解像度)とフレームレート(時間解像度)の異なる動画画像を撮影可能な3板撮像センサカメラを想定する。このカメラで得られる3板撮像画像を入力画像として、色画像間の局所的なテクスチャの相関を利用して空間解像度を向上させる処理と、フレーム間の動きを利用して時間解像度を向上させる処理を同時に行う。標準動画画像を用いたシミュレーション実験により、動きと生成画像の同時推定が高時空間解像度カラー画像の生成に有効であることを示す。

Video Super-Resolution of Color-Separated Images with Multiple Spatio-temporal Resolutions

Kunio NOBORI, Taro IMAGAWA, Hideto MOTOMURA, Takeo AZUMA
Advanced Technology Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

3-4 Hikaridai, Seika, Soraku, Kyoto, 619-0237 Japan

E-mail: {kunio.nobori, imagawa.taro, motomura.hideto, azuma.takeo}@jp.panasonic.com

Abstract : We propose a video super-resolution method of multiple spatio-temporal color image. Our method generates a high-resolution, high-frame-rate color image sequence using RGB three color-channel images, taken with different spatio-temporal resolution. Motion errors caused of aliasing noise of low-resolution images are significant reduced by estimating motion and reconstructed images simultaneously. In this paper we show the advantages of our method using simulation results.

1. はじめに

近年、デジタルビデオカメラの高精細化が進み、家庭にもハイビジョンビデオカメラが普及している。さらに高精細な映像に対するニーズも高まっており、業務用では約4000×2000画素の解像度をもつデジタルシネマ用のカメラ[1]や、約8000×4000画素の解像度をもつ超高精細放送用のカメラ[2]の開発が行われている。

今後高精細化が進んだ場合、次の2つの課題が重要になる。

- 撮像素子の画素読み出し速度には上限があり、上限を越える解像度とフレームレ

ートの動画画像を撮影できない。

- 1画素あたりの面積が小さくなることで入射光量が低下し、画質が低下する。

このような課題に対し、同一視野を撮影した解像度とフレームレートの異なる複数の動画画像を入力画像として、超解像処理により高解像度高フレームレートの動画画像を生成する手法が提案されている[3]-[7]。

渡邊らは、低解像度高フレームレートと高解像度低フレームレートの2種類の動画画像を入力画像として、低解像度高フレームレート画像から動きを算出し、動き補償によって高解像度

低フレームレート画像に含まれる高周波成分を重畳することで、高解像度高フレームレートの動画像を生成する手法を提案している[3].

Imagawaらは、低解像度高フレームレート画像から動きを算出し、長時間露光した高解像度低フレームレート画像を分解する手法を提案している[5].

これら従来の方法は、撮像素子の読み出し速度の上限を超える解像度とフレームレートの動画像を生成することが可能であるが、2つの課題がある。ひとつは、ハーフミラーによって入射光を2分割して2種類の動画像を撮影するため、各動画像の光量が半減し、特に低光量時に画質が低下する。もうひとつは、低解像度の動画像からフレーム間の動きを推定するため、特に画像に折り返し成分が含まれる場合に、動きの推定精度が低下する。後者の課題について、複数画像のレジストレーションによる超解像において、位置と生成画像を同時に推定する手法が提案されているが[8][9]、時空間解像度の異なる動画像への適用例はなかった。

これに対し、本報告では入射光を色分解プリズムによって分解し、色成分(RGB)ごとに解像度とフレームレートの異なる動画像を撮影する3板撮像センサカメラを想定する。そして、得られた3板撮像画像を入力画像として、色画像間の局所的なテクスチャの相関を用いて空間解像度を向上させる処理と、フレーム間の動きを用いて時間解像度を向上させる処理を行うことで、高時空間解像度のカラー動画像を生成する。

提案法は、各色の入射光を半減することなく撮像することで、ひとつ目の課題を解決し、動きと生成画像の同時推定を適用することで、ふたつ目の課題を解決する。

以降、2章で提案法の詳細を説明し、3章でシミュレーションによる定量画質の比較結果を示す。

2. 高時空間解像度カラー画像生成

本章では、提案法で想定する3板撮像センサカメラと、色成分(RGB)ごとに、解像度とフレームレートが異なる入力画像から、高時空間解像度のカラー動画像を生成する提案法の詳細について説明する。

2.1. 提案法の概要

提案法で想定する3板撮像センサカメラの

構成と処理の概要を図1に示す。入射光は色分解プリズムによって赤緑青(RGB)の3色に分解され、3つの撮像センサに投影される。各撮像センサでは、以下の様に3つの動画像(3板撮像画像)を撮影する。

- ・ 緑色(G)動画像は高解像度低フレームレートで、赤色(R)動画像および青色(B)動画像は低解像度高フレームレートで撮影する。それぞれ G_{HL} , R_{LH} , B_{LH} で表す。
- ・ R_{LH} , B_{LH} の1フレームの画素数に対する G_{HL} の1フレームの画素数の比率を空間拡大率 N_p 、 G_{HL} のフレームレートに対する R_{LH} , B_{LH} のフレームレートの比率を時間拡大率 N_t と表す(図1の例では $N_t=4$)。
- ・ 低フレームレートの G_{HL} の各フレームは、高フレームレートの R_{LH} , B_{LH} と N_t フレーム間隔で同期している。 G_{HL} , R_{LH} , B_{LH} の同期したフレームをキーフレーム、それ以外を中間フレームと呼ぶ。
- ・ 低解像度の R_{LH} , B_{LH} の各画素値は、対応する高解像度の生成画像 R_{HH} , B_{HH} の $N_x \times N_y$ 画素の平均値である。ここで N_x, N_y は、低解像度画像に対する高解像度画像のX, Y方向の拡大率であり、 $N_p=N_x N_y$ である。
- ・ 同一視点かつ同一視野である。
- ・ 1フレームの露出時間は同一である。

提案法は、3板撮像画像を入力画像として、低解像度の R_{LH} , B_{LH} の解像度を向上させる処理と、低フレームレートの G_{HL} のフレームレートを向上させる処理を行うことで、高解像度高フレームレートのカラー動画像 R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} を生成する。

2.2. 提案法で用いる仮定とモデル

入力画像 R_{LH} , G_{HL} , B_{LH} には、R, B画像の空間的な高域成分の情報や、G画像の時間的な変化の情報は、明には含まれていない。そのため高解像度高フレームレートのカラー動画像 R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} を生成するためには、何らかの仮定が必要である。

自然画像において、RGBの画素値は独立に変化するのではなく、空間的・時間的にあるモデルに従うことが期待できる。提案法では、色画像間の空間的なモデルとして、局所領域においてテクスチャの低域成分の相関が強い場合、高域成分の相関も強い、という仮定(局所色相関モデル)を導入する。また、画像の時間的な変化のモデルとして、あるフレーム画像は別の

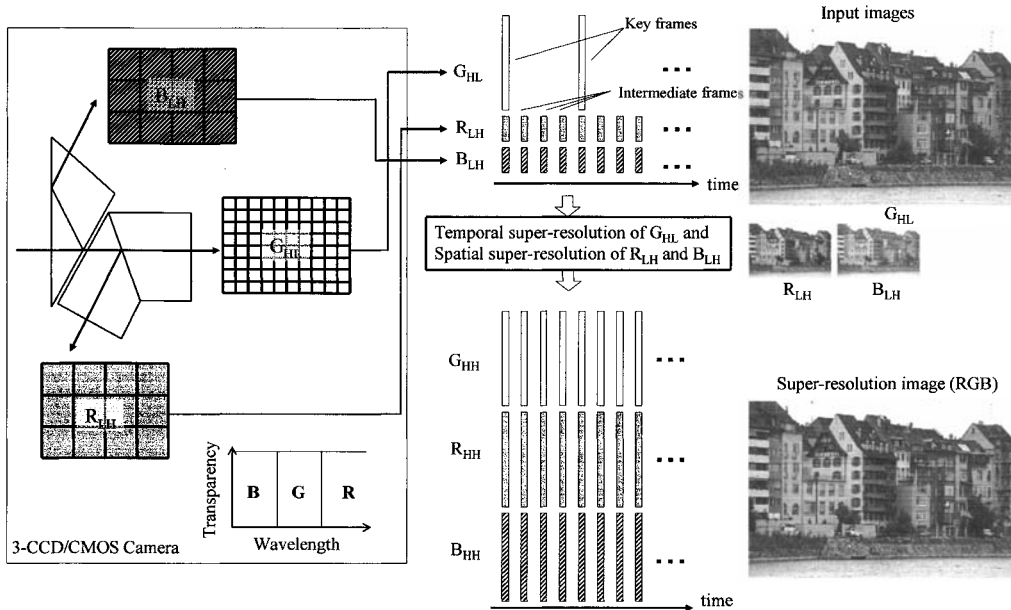


図1 3板撮像センサカメラと提案法の概要

時刻に撮影されたフレームの矩形領域の並進運動によって近似できる、という仮定(並進動きモデル)を用いる。

以降の節では、提案法で用いる2つのモデルについて定式化し、処理手順の詳細を示す。

2.3. 局所色相関モデルによるアップサンプリング

本節では、入力となる低解像度の R_{LH} , B_{LH} と生成する高解像度の R_{HH} , B_{HH} との関係を実定式化する。

提案法では、色画像間の空間的な拘束として、局所領域においてテクスチャの低域成分の相関が強い場合、高域成分の相関も強い、という局所色相関モデルを、式(1)(2)の形で導入する。

$$R_{HH}(x, y) = (1 + w_R(x_L, y_L)w_G(x, y))R_{LH}(x_L, y_L) \quad (1)$$

$$B_{HH}(x, y) = (1 + w_B(x_L, y_L)w_G(x, y))B_{LH}(x_L, y_L) \quad (2)$$

$$w_G(x, y) = \frac{G_{HH}(x, y) - G_{LH}(x_L, y_L)}{G_{LH}(x_L, y_L)}$$

$$w_R(x_L, y_L)$$

$$= \frac{\sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (G_{LH}(u, v) - \bar{G}_{LH})(R_{LH}(u, v) - \bar{R}_{LH})}{\sqrt{\sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (G_{LH}(u, v) - \bar{G}_{LH})^2 \sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (R_{LH}(u, v) - \bar{R}_{LH})^2}}$$

$$w_B(x_L, y_L)$$

$$= \frac{\sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (G_{LH}(u, v) - \bar{G}_{LH})(B_{LH}(u, v) - \bar{B}_{LH})}{\sqrt{\sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (G_{LH}(u, v) - \bar{G}_{LH})^2 \sum_{v=y_L-1}^{y_L+1} \sum_{u=x_L-1}^{x_L+1} (B_{LH}(u, v) - \bar{B}_{LH})^2}}$$

ここで $R_{HH}(x, y)$, $B_{HH}(x, y, t)$ は、生成する R_{HH} , B_{HH} の位置 (x, y) の画素値である。 (x_L, y_L) は (x, y) に対応する低解像度画像の位置であり $(x_L, y_L) = (x/N_x, y/N_y)$, $N_p = N_x N_y$ となる。 \bar{G}_{LH} , \bar{R}_{LH} は低解像度画像の局所領域での平均値であり、低解像度画像の画素を基準に 3×3 画素を局所領域とする。低解像度の G_{LH} は、 G_{HH} の $N_x \times N_y$ 画素の平均値によって算出することができる。ここでは同一フレームの画像のみを扱うため、時間項は省略した。

式(1)において、 w_R は低解像度の R_{LH} と G_{LH} 画像の局所領域での相関係数を表す。また w_G は、 G_{HH} の高域成分 (G_{LH} との差分) を表す。式(1)によって生成される R_{HH} は、 R_{LH} と G_{LH} の相関が高いと、 G_{HH} の高域成分が R_{LH} に重畳されることになり、高域成分の相関も強くなる。

式(1)(2)には、推定すべき高解像度高フレームレートの G_{HH} が含まれる。 G_{HH} は、キーフレームは $G_{HH} = G_{HL}$ で既知であるが、中間フレームは未知である。そのため、このままでは

R_{HH} , B_{HH} の中間フレームを求めることができない。次節では、 G_{HL} と G_{HH} の並進動きモデルを用いることで、 R_{HH} , B_{HH} および G_{HH} を求める方法を示す。

2.4. 並進動きモデルによる中間フレーム生成

本節では、入力となる低フレームレートの G_{HL} と生成する高フレームレートの G_{HH} との関係を設定化する。

提案法では、画像の時間的な変化のモデルとして、あるフレーム画像は別の時刻に撮影されたフレームの矩形領域の並進運動によって近似できる、という並進動きモデルを用いる。

$$G_{HH}(x, y, t) = \begin{cases} G_{HL}(x, y, tk) & \text{if } t = tk \\ G_{HL}(x+u, y+v, tk) & \text{if } t \neq tk \end{cases} \quad (3)$$

ここで $G_{HH}(x, y, t)$ は、生成する G_{HH} のフレーム t 、座標値 (x, y) の画素値である。 tk はフレーム t 近傍のキーフレームの番号である。 (u, v) は、キーフレームに対する中間フレームの動きであり、以降 $m(x, y, t)$ として表す。

式(3)に含まれるフレーム間の動き $m(x, y, t)$ は、RGB 画像に共通と考える。しかし、動きを低解像度の R_{LH} , B_{LH} から求めると、折り返し成分が含まれる場合に、精度が低下する。そこで提案法では、高解像度の生成画像 R_{HH} のフレーム間において、SSD(Sum of Squared Differences)を評価値としたブロックマッチングを行い、これを最小化する動きとして $m(x, y, t)$ を算出する。

$$m(x, y, t) = \arg \min(\varepsilon_{x, y, t}(\Delta x, \Delta y)) \quad (4)$$

$$\varepsilon_{x, y, t}(\Delta x, \Delta y) = \sum (R_{HH}(x, y, t) - R_{HH}(x + \Delta x, y + \Delta y, tk))^2 \quad (5)$$

ここで ε は SSD の評価値であり、 $(\Delta x, \Delta y)$ は、フレーム間の動きの探索候補を表す。

2.5. 動きと生成画像の同時推定

本節では、フレーム間の動き $m(x, y, t)$ と生成画像の同時推定によって、高時空間解像度の R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} の中間フレームを生成する方法について述べる。

式(5)に式(1),(3)を代入すると ε の算出は $(\Delta x, \Delta y)$ のみが未知パラメタとなる。提案法では、以下の処理によって、フレーム t 、座標値 (x, y) におけるキーフレームに対する動き $m(x, y, t)$ と、 R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} の画素値を同時に

算出する。

- ・ 探索範囲内で $(\Delta x, \Delta y)$ を変化させながら、式(5)の極小値を探索し、これを動き $m(x, y, t)$ とする (式(4))。
- ・ 動きと式(1), (3)より $R_{HH}(x, y, t)$, $G_{HH}(x, y, t)$ を得る。
- ・ 動きと式(2)より $B_{HH}(x, y, t)$ を得る。

提案法では、フレーム間の動きの導出式(5)を、生成画像 R_{HH} で定義し、この動きと生成画像 R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} を同時推定によって求める。そのため入力画像 R_{LH} に折り返し成分が含まれる場合であっても、生成される R_{HH} では折り返しが低減されることで、動きの推定精度が向上する効果が期待できる。

3. 評価実験

本章では、シミュレーションによる評価実験の結果について述べる。

3.1. シミュレーションによる提案手法の評価

生成画像の定量的画質を検証するため、シミュレーション実験を行った。まず、高解像度高フレームレートのカラー画像(正解画像) R_{true} , G_{true} , B_{true} を用意する。次に、この正解画像を用いて、 G_{true} から N_t フレーム間隔で抜き出すことで G_{HL} 動画を生成し、 R_{true} , B_{true} を N_p 画素ごとに平均化してダウンサンプルすることで R_{LH} , B_{LH} 動画を生成する。そして、生成した3板撮像画像を入力画像として、各手法の生成画像と正解画像との比較により画質評価を行う (図2)。

なお、時間拡大率 N_t と空間拡大率 N_p は、独立に設定し得るが、ここではRGB各色の入力動画の総画素数が等しくなるように設定した。

実験には、(社)映像情報メディア学会監修の標準動画集(720×480 p, 60fps)の画像をRGB色空間に変換したものを正解画像として用いた。実験に使用した正解画像のフレーム数は、90フレーム前後で時間拡大率 N_t の整数倍+1となるように設定した。

評価指標

生成した画像の評価指標にはPSNR(Peak Signal to Noise Ratio)、単位: dBを用いた(式(6), (7))。式(7)で $R_{true}(x, y, t)$, $G_{true}(x, y, t)$,

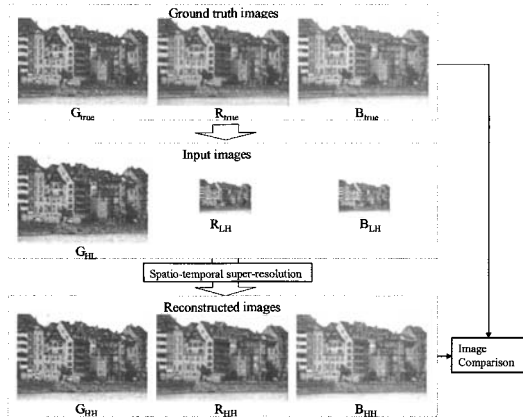


図2 評価実験の手順

$B_{true}(x, y, t)$ は、それぞれ正解画像のフレーム t ・位置 (x, y) の RGB の画素値、 N は全フレームの総画素数(1 フレームの画素数×フレーム数)を表す。ここで、 S_p は画素値の取り得る最大値(8bit 階調の場合 255)である。

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{S_p^2}{MSE} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{3N} \cdot \sum_{x,y,t} [\{R_{HH}(x,y,t) - R_{true}(x,y,t)\}^2 + \{G_{HH}(x,y,t) - G_{true}(x,y,t)\}^2 + \{B_{HH}(x,y,t) - B_{true}(x,y,t)\}^2] \quad (7)$$

3.2. 局所色相関モデルの基礎評価

動き推定の影響を切り離して局所色相関モデルの効果を調べる。RLH, GHL, BLH の1つのキーフレームを入力として、式(1)(2)によって RHH, BHH を算出し、GHL と組み合わせて1フレームの高解像度カラー画像を生成した。

比較対象として、RLH, BLH をそれぞれ最近傍法と、Bicubic 法の2種類の補間拡大により生成した画像についても評価を行った。空間拡大率 16 倍 ($N_p=16$) の評価結果を図3に示す。

図3に示すように、局所色相関モデル (Proposed Method) は、最近傍法 (Nearest Neighbor) と、Bicubic 法 (Bicubic) の両者に対し、全ての評価画像において PSNR が高い。全評価画像の PSNR で、局所色相関モデルは最近傍法に対して 9.4[dB]、Bicubic 法に対して 8.6[dB]、生成画像の画質を向上している。

同様に、Circular Zone Plate を正解画像として、局所色相関モデルを適用した結果を図4に示す。局所色相関モデルは、図4(b)のように強い折り返しを含む入力画像に対しても、相

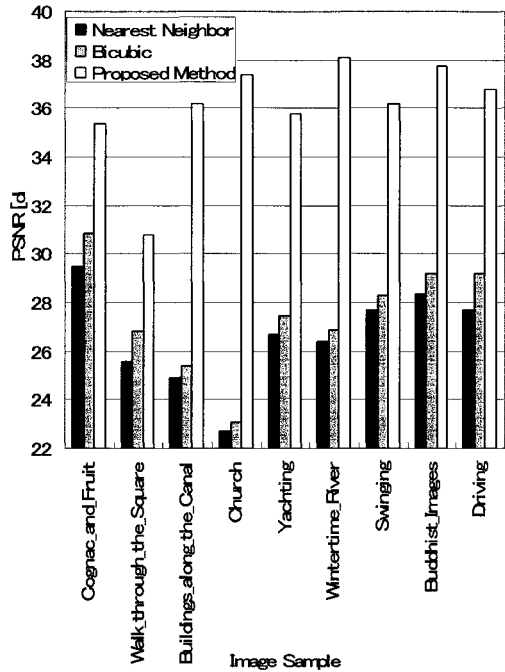


図3 R, B をアップサンプリングした画像の PSNR

関に応じて G 画像に含まれる高域成分を重畳することで、図4(c)のような折り返しを低減した生成画像を得ることが出来る。

以上のことから、提案法における局所色相関モデルは、最近傍法や Bicubic 法と比べて、空間解像度の向上の効果が高いといえる。

3.3. 動きと画像の同時推定の基礎評価

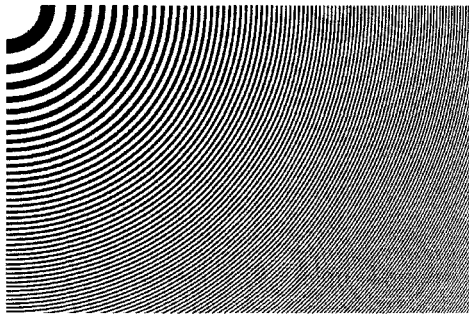
本節では、提案法による動きの推定精度向上の効果を示す。

動きが既知の正解画像として、標準画像の1フレーム(原画像)と、これを X, Y 方向にそれぞれ 0-3 画素平行移動した 16 フレームの合成画像を用いる。原画像をキーフレーム、残りを中間フレームとして生成した 17 フレームを入力画像として用いる。空間拡大率は 16 倍 ($N_p=16, N_x=4, N_y=4$) とした。

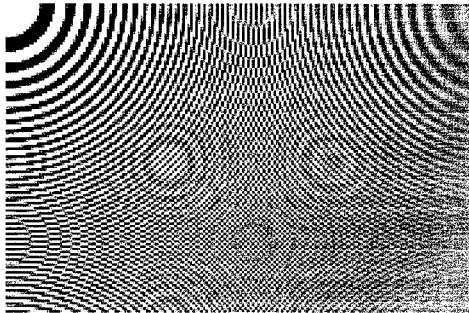
比較対象となる従来の動き推定法として、次の2つの方法を用いる。

動き推定 1 (ME1 RLH): 低解像度の RLH を用いてフレーム間の動きを求める。

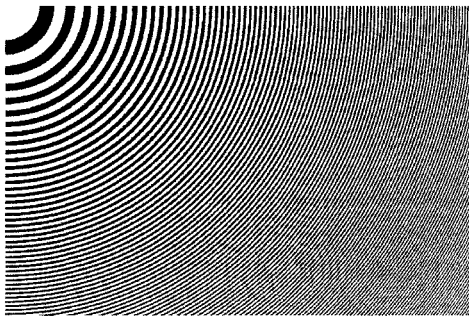
動き推定 2 (ME2 Bicubic RLH): 低解像度の RLH を Bicubic 法で補間拡大した画像を用いて



(a) Ground truth : R_{true}



(b) Input Image : R_{LH} ($N_p=16$)



(c) Reconstructed Image : R_{HH}

図4 局所色相関によるアップサンプリング結果の例 (a)正解画像, (b)入力画像, (c)生成画像 いずれも R 画像

フレーム間の動きを求める。

実験では, 中間フレーム上に等間隔で設定した約 400 点を基準に, キーフレームとの動きを各手法で推定し, 正解動きとの RMSE を算出した。

各手法とも共通して, 探索範囲は X,Y 方向にそれぞれ ± 16 画素, ブロックサイズは 12×12 画素 (いずれも高解像度画像基準) とした。推定の精度は, パラボラフィッティングによって実数精度で算出した。

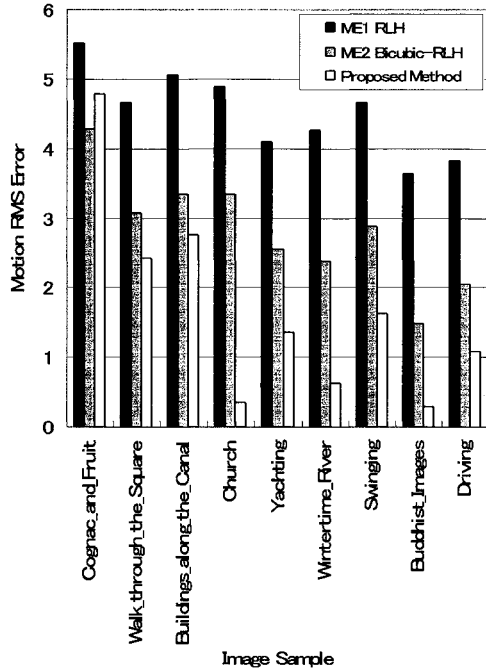


図5 合成画像に対する動きの推定誤差 (RMSE)

評価結果を図5に示す。従来手法 (ME1 R-LH, ME2 Bicubic-RLH) に対して, 提案法 (Proposed Method) は, 1 画像を除いて動き推定の誤差が小さい。この結果を図3と比較すると, PSNR の向上効果の高い画像ほど, 動き精度向上の効果が高い傾向がある。

以上のことから, 低解像度画像から動きを推定する従来法に対し, 動きと生成画像の同時推定を行う提案法は, 動きの推定精度が高いといえる。

3.4. 標準動画像を用いた評価

本節では, 提案法による高時空間解像度のカラー動画像生成の効果を示す。

比較対象として, 以下の2つの方法を用いる。

動き推定 1 (ME1 RLH): 低解像度の R_{LH} を用いてフレーム間の動きを推定し, この動きを用いて式(1)(2)(3)により画像を生成する。

動き推定 2 (ME2 Bicubic RLH): 低解像度の R_{LH} を Bicubic 補間拡大した画像を用いてフレーム間の動きを推定し, この動きを用いて式(1)(2)(3)により画像を生成する。

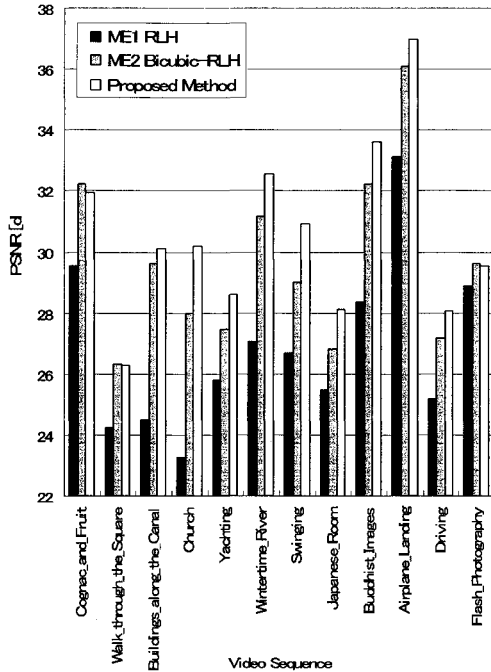


図 6 標準動画像に対する生成画像の PSNR

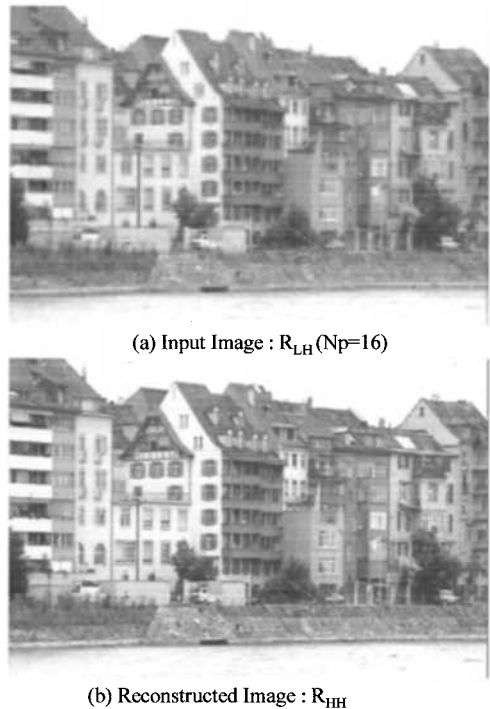
上記の 2 手法において、提案法と異なるのは動きの推定方法のみで、画像生成に用いる式は同じである。

実験は、12 シーンの標準動画像を正解画像として入力画像を生成し、これを用いて各手法によって生成した R_{HH} , G_{HH} , B_{HH} の PSNR を算出した。入力画像の空間拡大率は 16 倍 ($N_p=16$, $N_x=4$, $N_y=4$), 時間拡大率は 16 倍 ($N_t=16$)とした。

評価結果を図 6 に示す。低解像度の R_{LH} を用いる動き推定 1 (ME1 RLH) と比較して、提案法(Proposed Method)は、全てのシーンで PSNR が高い。また、 R_{LH} を Bicubic 補間拡大した画像を用いる動き推定 2 (ME2 Bicubic RLH) と比較すると、提案法は 3 シーンで PSNR がわずかに低くなっているが、残りの 9 シーンでは PSNR が高い。

図 7 に、提案法による中間フレームの生成画像 R_{HH} と、入力画像 R_{LH} を示す。

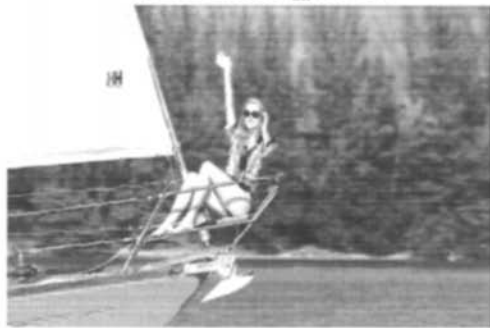
図 8 に、空間拡大率を変えた場合の PSNR を示す。1 シーン(Church)に対し、4 通りの空間拡大率 $N_p=(4,6,9,16)$ の PSNR を算出した。い



(b) Reconstructed Image : R_{HH}



(c) Input Image : R_{LH} ($N_p=16$)



(d) Reconstructed Image : R_{HH}

図 7 提案法における入力画像と生成画像の例

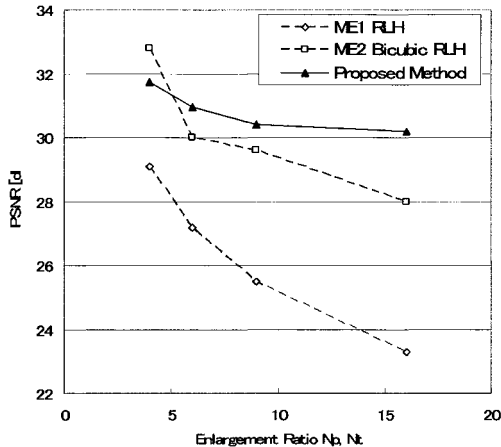


図8 拡大率ごとのPSNR

ずれの手法も拡大率が小さくなるに従いPSNRが高くなる。また拡大率が小さくなるに従い、提案法(Proposed Method)と、動き推定2 (ME2 Bicubic RLH)の差が、小さくなる傾向がある。これは拡大率が小さくなると、 R_{HH} と R_{HL} の差が小さくなるためと考えられる。

4. まとめ

本報告では、光量が半減していた従来法の課題を解決するために、RGB色成分ごとに時空間解像度の異なる3板撮像画像を入力画像として用いて、高時空間解像度のカラー動画画像を生成する手法を提案した。また、従来法の課題であった、低解像度の入力画像に対する動き推定の精度低下を改善するために、位置と生成画像の同時推定手法を適用した。

高解像度低フレームレートのG画像と、低解像度高フレームレートのR、B画像を組み合わせ、色画像間の局所的なテクスチャの相関を用いて、R、B画像の空間解像度を向上する処理と、R画像のフレーム間の動きを用いてG画像の時間解像度を向上する処理によって、高時空間解像度のカラー動画画像が得られることをシミュレーション実験で示した。

さらに、時空間解像度の異なる3板撮像画像の超解像において、位置と生成画像の同時推定を行う提案法が、動きの高精度化と生成画像の画質の点で有効であることをシミュレーション実験で示した。

今後は、RGBごとの適切な時空間解像度の選択や、処理時間の短縮化を検討する予定であ

る。

参考文献

- [1] Soneoka, T., Digital cinema today and the future business development, 2006, *NTT Technical Review*, vol. 4, No. 7.
- [2] 山下蒼行, 三谷公二, 菅原正幸, 島本洋, 岡野文男: “走査線 4000 本級 4 板式超高精細動画カメラ”, 映像情報メディア学会誌, Vol.58, No.3, pp.383-391, 2004.
- [3] 渡邊清高, 岩井儀雄, 長原一, 谷内田正彦: “時空間周波数の異なる画像列からの高解像度動画画像の合成”, 情報科学技術レターズ(FIT2004), Vol.3, No.L1-004, pp.169-172, 2004.
- [4] 重本 倫宏, 星川 章, 長原一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 鈴木俊哉, “時間的・空間的分解能の異なる複合センサカメラシステム”, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 47, No. SIG5(CVIM13), pp. 35-44, Mar, 2006
- [5] T. Imagawa, T. Azuma, T. Sato, and N. Yokoya: "High-spatio-temporal-resolution image-sequence reconstruction from two image sequences with different resolutions and exposure times", ACCV'07 Satellite Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing, pp. 32-38, Nov. 2007.
- [6] E. Shechtman, Y. Capsi, and M. Irani, "Increasing Space-Time Resolution in Video," Proc. European Conf. Computer Vision, vol. 1, pp. 753-768, 2002.
- [7] Moshe Ben-Ezra and Shree K. Nayar: "Motion-Based Motion Deblurring", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 26, No. 6, June 2004
- [8] R.C.Hardie, K.J.Barnard, and E.E.Amstrong, "Joint MAP registration and high-resolution image estimation using a sequence of undersampled images," IEEE Trans. Image Process. Vol.6, no.12, pp.1621-1633, 1997.
- [9] 後藤知将, 奥富正敏, “画像復元とレジストレーションの同時最適化の実験的検証”, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J-90-D, N0.6, pp.1632-1635, 2007