

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 —再構成型超解像の利用—

今川 太郎 吾妻 健夫 登 一生 本村 秀人

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

あらまし 光量不足の条件下におけるカラー動画撮影において、RGBの色チャンネル毎に解像度・フレームレートおよび露出時間を変えて露光量を増した画像から、高解像度高フレームレートのカラー動画画像を生成する手法を提案する。提案手法では3種類の色チャンネルの入力画像に対し、色チャンネル間の時空間的拘束条件を設け、正則化の枠組みによって画像を生成する。拘束条件に基づいて、時空間周波数特性の異なる各色チャンネルの情報を相互に補完し、高時空間解像度カラー画像を得る。実験では、低解像度画像の補間拡大画像に比べ、PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)が2.2dB向上することを確認した。

Image reconstruction from color-separated image sequences of different spatio-temporal resolutions and exposures

Taro IMAGAWA Takeo AZUMA Kunio NOBORI and Hideto MOTOMURA

Advanced Technology Research Laboratories, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

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

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

Abstract As for video imaging in dark conditions, we propose a high-resolution and high-framerate video reconstruction method from an RGB-separated image of a long-term exposed green and high-framerate red and blue image sequences. Motion blurs caused by space-variant motions in the green image are significantly reduced by color and motion constraints among RGB image sequences. In this paper we show the advantages of our method using simulation results and a prototype camera system.

1. まえがき

撮影画像の高精細化を目的とし、撮像素子の画素数が増加傾向にある。特に静止画像用カメラでは1000万画素を超える撮像素子が普及してきている。同時にカメラの小型化を目的として、撮像素子の小型化も進んでいる。これらの結果、撮像素子を構成する個々の画素の面積は縮小し、各画素の受光量の減少による画質低下(感度不足)が撮像素子の微細化に伴う重要な課題となってきた。本稿では、この課題を解決するために、長時間露出により受光量を確保すると同時に、高解像度のカラー動画撮影を可能にする手法を提案する。

画素の受光量を増す方法としては、露出時間を長くすることが考えられる。しかしながら長時間の露出は、

被写体が静止している場合には適用できるものの、被写体が画像内で移動する場合には、動きぶれの発生が問題となる。このような動きぶれを除去する場合、Point Spread Function (PSF)の推定が困難な課題となる。また、PSFが推定できた場合においても、時間的に矩形型の露出では、周波数空間でのゼロ点に起因する情報欠損が課題となる。

前者のPSF推定の課題については、空間的に一様な動きに対し、単一の画像からPSFの推定を行う手法が提案されている[1][2][3]。また、複数の画像を利用する手法として、Bascleらは動きぶれを含む画像シーケンスから、単一の動きから成る領域を切り出し、動きぶれの除去を行っている[4]。異なる露出時間の画像を組み合わせる手法としては、Yuanらは同一の被写体に対

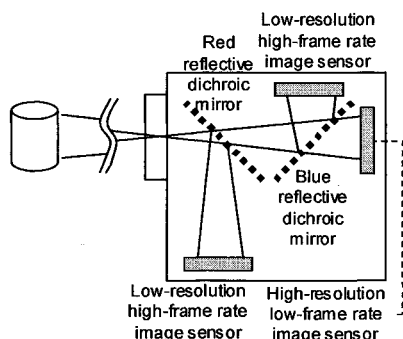


図1 想定する撮影システムの構成

し、動きぶれを含む画像と動きぶれを含まないノイズを含んだ画像を併用した画像復元手法[5]を提案している。また、Ben-Ezraらはスチルカメラとビデオカメラから成るハイブリッドシステムを用い、ビデオカメラの映像を分析して大域的なPSFを推定し、スチルカメラの映像に含まれる動きぶれの除去を行っている[6]。これらの手法では、手ぶれのように空間的に一様なPSFに対し、複数の画像を組み合わせることで、長時間の動きぶれ除去を可能にしている。

しかしながら、一般の被写体を想定した場合、被写体の動きに起因するぶれ除去が必要になる。このような空間的に非一様なPSFの推定に対し、Levinは画像の統計量に基づいて、単一の画像を同じ動きを持つ領域ごとに分割し、ぶれ除去を行っている[7]。動きぶれを含む画像シーケンスを用いて、同じ動きの領域を切り出してぶれ除去を行う手法も提案されている[8][9][10][11]。これらの手法では、動きぶれを含んだ画像をもとにして領域選択を行うため、複雑な動きを持つ領域や、動き境界においてPSFの推定が困難となる。

次に、後者のゼロ点の課題に対しては、Raskarらは時間変調をかけた露出によって動きぶれのPSFの周波数特性改善を図っている[12]。この手法で、動きぶれ除去後の復元画像の周波数特性は改善するが、変調露出を行うために、露光量を犠牲にする必要がある。

本稿では、長時間露出により露光量を確保しつつ、空間的に非一様なPSFの推定やゼロ点の課題の影響を、低減する手法を提案する。提案手法では、同一視点・同一視野でRGB毎に、時空間解像度の異なる入力画像を用いる。輝度画像に対しては、筆者らは動きぶれを含む画像と同一視点・同一視野で撮影した動画画像を併用し、ぶれ除去を行っている[13]が、[13]では色情報を考慮した画像生成は行っていない。本稿の提案手法では、G画像は、高解像度で低フレームレートかつ長時間露出により露光量を増す。RとBは高フレームレ

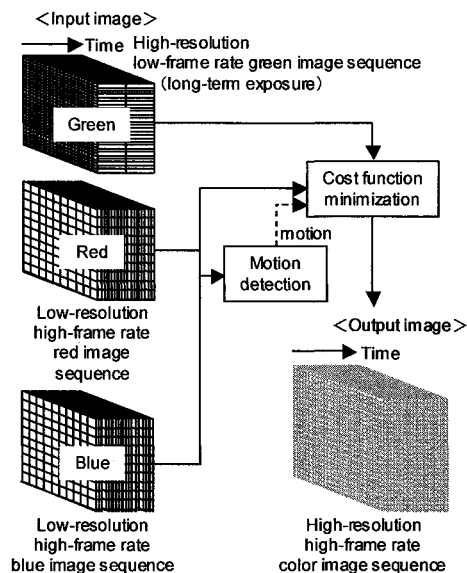


図2 提案手法の概要

ートで低解像度の画像を撮影し、画素サイズを大きくして露光量を増している。空間的な色変化の滑らかさと、動きを用いた時間方向の拘束条件を仮定し、拘束条件を満たす画像を生成することで、異なる色間で時空間情報を相互に補完する。これにより、R・B画像がG画像に対するぶれ除去後の粗い解として働き、複雑な動きの場合にでも、PSFの明な推定を行わずにぶれの抑制を行っている。

提案手法の有効性を検証するため、シミュレーションおよび、検証用の試作カメラシステムを用いて画像生成実験を行った。実験の結果、動きぶれが抑制され、入力画像に対して解像度が向上したカラー画像が得られることを確認した。

以降、2章で提案手法の詳細について、3章では提案手法に基づく撮影を行う試作カメラシステムについて説明する。4章ではシミュレーションによる画質の定量評価結果、および試作カメラシステムを用いた生成画像を示す。

2. 高時空間解像度カラー動画画像の生成

赤緑青(RGB)の3色間で、画像の解像度・フレームレート・露出時間が異なる入力画像から、カラー動画画像を生成する方法について説明する。撮影システムの構成を図1に示す。提案手法では、ダイクロイックミラー等を用いて、同一視点かつ同一視野で同期撮影したRGB画像を入力とし、高解像度高フレームレートのカラー動画画像(HH動画画像)を生成する。

処理の概要を図2に示す。提案手法では、入力となる3色の動画像のうち、緑(G)動画像は高解像度低フレームレート動画像(G-HL 動画像)、赤(R)動画像および青(B)動画像は低解像度高フレームレート動画像(R-LH, B-LH 動画像)である。また、各動画像の各フレームの露出時間はフレーム間隔に一致させている。

ここで、自然画像において RGB それぞれの値は独立に変化するのではなく、時空間的に関係を持って変換することが期待できる。提案手法では、この関係として、色変化の空間的滑らかさと、動きに沿った色の維持を仮定する。これら生成画像が満たすべき仮定を、拘束条件として含む評価関数を設定し、正則化問題の枠組みで、高解像度高フレームレートカラー画像を得る。

2.1. 評価関数

カラー動画像生成に用いる評価関数は、誤差項、色滑らかさ拘束項、動き拘束項から成る。評価関数 J を式(1)に示す。

$$J = \|\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_R\mathbf{f} - \mathbf{g}_R\|^2 + \|\mathbf{H}_{HL}\mathbf{H}_G\mathbf{f} - \mathbf{g}_G\|^2 + \|\mathbf{H}_{LH}\mathbf{H}_B\mathbf{f} - \mathbf{g}_B\|^2 + \lambda_{C1} \|\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C1}\mathbf{f}\|^2 + \lambda_{C2} \|\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C2}\mathbf{f}\|^2 + \lambda_{C3} \|\mathbf{Q}_S\mathbf{H}_{C3}\mathbf{f}\|^2 + \lambda_m (\|\mathbf{Q}_m\mathbf{f}\|^2 + \|\mathbf{Q}_{mb}\mathbf{f}\|^2) \quad (1)$$

ここで $\mathbf{f}$, $\mathbf{g}_R$, $\mathbf{g}_G$, $\mathbf{g}_B$ はそれぞれ生成画像, R-LH 動画像, G-HL 動画像, B-LH 動画像の各輝度値をベクトル表記したものである。 $\mathbf{H}_{HL}$ と $\mathbf{H}_{LH}$ は、それぞれ HH 動画像から HL 動画像と LH 動画像への劣化過程を表す変換である。 $\mathbf{Q}_S$, $\mathbf{Q}_{mf}$, $\mathbf{Q}_{mb}$ は、生成画像に対する評価作用素で、正則化の条件を表現する。 λ_{C1} , λ_{C2} , λ_{C3} , λ_m は正則化項の重み定数である。以下、 J の各項について説明する。

誤差項

評価関数式(1)の第1～3項は、生成画像の劣化動画像と入力動画像との画素値の差を表す誤差項である。各項はそれぞれ RGB の各色画像の評価に対応し、撮影過程を介して生成画像と入力画像との整合性を評価している。第1項と第3項は、それぞれ式(2), (3)に示すように、生成画像の劣化動画像と R-LH, B-LH 動画像との画素値の誤差を表す。

$$\sum_{(x_{LH}, y_{LH}, t) \in LH} \{\mathbf{g}_{R-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) - \mathbf{g}_R(x_{LH}, y_{LH}, t)\}^2 \quad (2)$$

$$\sum_{(x_{LH}, y_{LH}, t) \in LH} \{\mathbf{g}_{B-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) - \mathbf{g}_B(x_{LH}, y_{LH}, t)\}^2 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{g}_{R-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$, $\mathbf{g}_{B-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$ はそれ

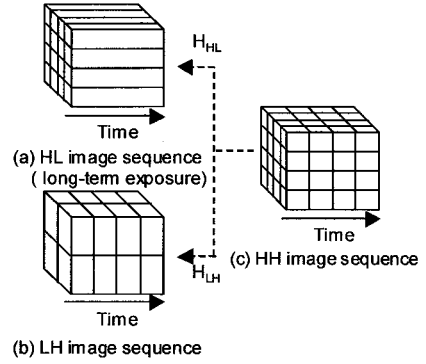


図3 劣化過程

ぞれ、 $\mathbf{f}$ の R 成分と B 成分画像の劣化動画像における、位置 (x_{LH}, y_{LH}) ・ フレーム t の画素値を表す。 $(x_{LH}, y_{LH}, t) \in LH$ は LH 画像に含まれる (x_{LH}, y_{LH}, t) の範囲を示す。生成画像 $\mathbf{f}$ から劣化動画像 $\mathbf{g}_{R-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$, $\mathbf{g}_{B-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t)$ への変換は、それぞれ式(4), (5)のように空間的な画素値の加算で表される。

$$\mathbf{g}_{R-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) = \sum_{x=N_S \cdot x_{LH}}^{N_S \cdot (x_{LH}+1)-1} \sum_{y=N_S \cdot y_{LH}}^{N_S \cdot (y_{LH}+1)-1} \mathbf{f}_R(x, y, t) \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_{B-LH}^d(x_{LH}, y_{LH}, t) = \sum_{x=N_S \cdot x_{LH}}^{N_S \cdot (x_{LH}+1)-1} \sum_{y=N_S \cdot y_{LH}}^{N_S \cdot (y_{LH}+1)-1} \mathbf{f}_B(x, y, t) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{f}_R(x, y, t) (= \mathbf{H}_R \mathbf{f})$ と $\mathbf{f}_B(x, y, t) (= \mathbf{H}_B \mathbf{f})$ は、生成画像の位置 (x, y) ・ フレーム t における R の画素値と B の画素値とをそれぞれ示している。 N_S は LH 動画像から生成画像への空間拡大比率を表す係数である。

式(4), (5)は撮像素子の撮影過程を表現している。この場合、開口率 100%で、ローパスフィルタなどの前置光学フィルタの無い撮影過程を想定している。

$N_S=2$ の場合について、LH 動画像の画素と HH 動画像の画素との関係を図3(b), (c) に模式的に示す。図3の各小ブロックは1画素1フレームの占める時空間領域を示している。この例では、HH 動画像の空間近傍4画素ずつの加算画像として LH 動画像が得られる。

次に、式(1)の第2項は、式(6)に示すように、生成画像の劣化動画像と G-HL 動画像との画素値の誤差を表す。

$$\sum_{(x, y, t_{HL}) \in HL} \{\mathbf{g}_{G-HL}^d(x, y, t_{HL}) - \mathbf{g}_G(x, y, t_{HL})\}^2 \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{g}_{G-HL}^d(x, y, t_{HL})$ は $\mathbf{f}$ の G 成分の劣化動画像における、位置 (x, y) ・ フレーム t_{HL} の画素値を表す。 $(x, y, t_{HL}) \in HL$ は HL 画像に含まれる (x, y, t_{HL}) の範囲を示している。生成画像 $\mathbf{f}$ から劣化動画像 $\mathbf{g}_{G-HL}^d(x, y, t_{HL})$

への変換は、式(7)のように時間的な画素値の加算で表される。

$$\mathbf{g}_{G-HL}^d(x, y, t_{HL}) = \sum_{t=N_T, HL}^{t=N_T, (HL+1)-1} \mathbf{f}_G(x, y, t) \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{f}_G(x, y, t) (= \mathbf{H}_G \mathbf{f})$ は、生成画像の位置 (x, y) ・フレーム t における G の画素値を示している。 N_T はHL動画画像から生成画像へのフレーム数拡大比率を表す係数である。式(7)は G 画像の長時間露出の撮影過程を表現している。 $N_T=4$ の場合について、HL動画画像の画素とHH動画画像の画素との関係を図3に模式的に示す。この例では、HH動画画像の4フレームの加算画像としてHL動画画像が得られる。

色滑らかさ拘束

評価関数式(1)の第4～6項は、生成画像における色の空間的变化の滑らかさを評価する項である。提案手法では、RGBの色毎に異なる時空間解像度の情報を、相互に補完させることで高時空間画像を生成する。ここで、各色間の関係として、色の空間的变化の滑らかさを仮定している。滑らかさを定義する色座標系は、自然画像の画素値のRGB空間における主成分分析(PCA)で得た基底を用いた。PCA基底を用いることで、正規化重みの設定をRGB空間中で分散の異なる軸毎に設定できるようにしている。PCA基底軸ごとの画像と生成画像との関係を式(8)に示す。

$$\mathbf{f}_{Ci} = \mathbf{H}_{Ci} \mathbf{f} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (8)$$

$\mathbf{f}_{C1}$, $\mathbf{f}_{C2}$, $\mathbf{f}_{C3}$ は、それぞれRGB空間における第1, 第2, 第3主成分の軸に沿った画素値の画像(PCA色画像)のベクトル表記で、 $\mathbf{H}_{C1}$, $\mathbf{H}_{C2}$, $\mathbf{H}_{C3}$ は $\mathbf{f}$ から各PCA色画像への射影変換を示している。各PCA色画像の空間的な滑らかさを、式(9)に示すラプラシアン作用素 $\mathbf{Q}_S$ で求めている。

$$|\mathbf{Q}_i \mathbf{f}_{Ci}|^2 = \sum_{(x, y, t) \in HH} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{f}_{Ci}(x, y, t) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{f}_{Ci}(x, y, t) \right\} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (9)$$

実験では、式(9)の計算を差分表現した式(10)を用い、生成画像全体の2乗和を評価している。式(9), (10)において $(x, y, t) \in HH$ はHH動画画像に含まれる (x, y, t) の範囲を表している。

$$|\mathbf{Q}_i \mathbf{f}_{Ci}|^2 = \sum_{(x, y, t) \in HH} \{ 4 \cdot \mathbf{f}_{Ci}(x, y, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x-1, y, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x+1, y, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x, y-1, t) - \mathbf{f}_{Ci}(x, y+1, t) \}^2 \quad (10)$$

動き拘束

評価関数式(1)の最後の2項は画像中の動きに基づいた入出力画像間の整合性を評価する項である。これら

の項では、RGB各色毎に異なる時空間解像度の情報を相互に補完させる目的で、画像中の動き情報を用いて、時間方向の拘束条件を表現している。ここでは、フレーム間の輝度変化は動きにのみより生じ、RGB各画像の動きは同一であることを仮定している。動き検出により得た動きベクトルと、生成画像との整合性は作用素 $\mathbf{Q}_m$ によって評価している。

動きの整合性評価は、以下の手順で行う。最初に、ブロックマッチングに基づく手法[14]を用い、フレームレートの高いLH動画画像の各画素位置に対してサブピクセル精度の動き検出を時間的に双方向に行う。実験では、同じ解像度を持つR-LH画像とB-LH画像とを、同じ画素位置で加算した加算LH画像を求め、加算LH画像から動き検出を行っている。次に、LH動画画像で求めた動きベクトルを、HH動画画像上の動きベクトルに写像する。ここで、LH動画画像上の時間的に前向きと後ろ向きの動きベクトル分布 $\mathbf{v}_f(x_{LH}, y_{LH}, t)$, $\mathbf{v}_b(x_{LH}, y_{LH}, t)$ を空間的に N_S 倍補間拡大したものを、HH動画画像上の前向きと後ろ向きの動きベクトル分布 $\mathbf{v}_f(x, y, t)$, $\mathbf{v}_b(x, y, t)$ とする。算出された動きベクトルと生成画像との整合性は、生成画像上の動きに沿った画素値差分の画像全体での2乗和で評価する。整合性が高いほど評価値は小さくなる。前向きと後ろ向きの動きを用いた項をそれぞれ式(11), (12)に示す。

$$|\mathbf{Q}_{mf}|^2 = \sum_{(x, y, t) \in HH} \{ \mathbf{f}_R(x, y, t) - \mathbf{f}_R(x + \mathbf{v}_{fx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{fy}(x, y, t), t+1) \}^2 + \{ \mathbf{f}_G(x, y, t) - \mathbf{f}_G(x + \mathbf{v}_{gx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{gy}(x, y, t), t+1) \}^2 + \{ \mathbf{f}_B(x, y, t) - \mathbf{f}_B(x + \mathbf{v}_{bx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{by}(x, y, t), t+1) \}^2 \} \quad (11)$$

$$|\mathbf{Q}_{mb}|^2 = \sum_{(x, y, t) \in HH} \{ \mathbf{f}_R(x, y, t) - \mathbf{f}_R(x + \mathbf{v}_{bx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{by}(x, y, t), t-1) \}^2 + \{ \mathbf{f}_G(x, y, t) - \mathbf{f}_G(x + \mathbf{v}_{gx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{gy}(x, y, t), t-1) \}^2 + \{ \mathbf{f}_B(x, y, t) - \mathbf{f}_B(x + \mathbf{v}_{bx}(x, y, t), y + \mathbf{v}_{by}(x, y, t), t-1) \}^2 \} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{fx}$, $\mathbf{v}_{fy}$ と $\mathbf{v}_{bx}$, $\mathbf{v}_{by}$ はそれぞれ $\mathbf{v}_f$ と $\mathbf{v}_b$ の x 成分、 y 成分を表している。

2.2. 評価関数の極小化

評価関数 J の極小解として生成画像を求めた。極小化には変分法を用い、 $\mathbf{f}$ の各要素による J の偏微分が0となる条件式(13)を満たす解として生成画像 $\mathbf{f}$ を求めた。

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{f}} = 0 \quad (13)$$

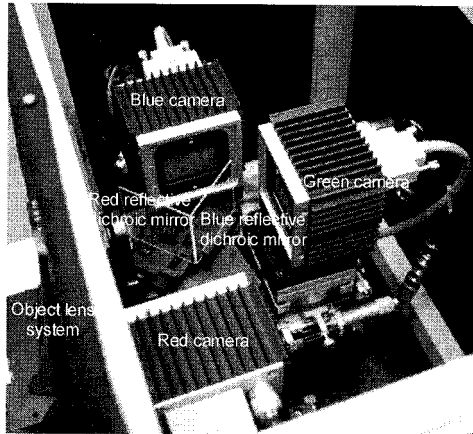


図4 カメラシステムの構成

表 1 カメラシステムの撮影条件設定

	画素数 (横x縦)	フレーム レート (fps)	露出時間 (ms)
Rカメラ	2000x1000	8	125
Gカメラ	4000x2000	2	500
Bカメラ	2000x1000	8	125

ここで、式(1)の H_{HL} , H_{LH} , H_R , H_G , H_B , H_{C1} , H_{C2} , H_{C3} , Q_S , Q_{mf} , Q_{mb} 全てを線型表現することにより、式(13)を連立1次元方程式にする。方程式の元数は総画素数(1フレームの画素数×総フレーム数×3)となる。連立方程式の解法には、共役勾配法を用い、入力動画像を正解画像の大きさに時空間的に補間拡大した画像を解の初期値とした。正則化重み λ_{C1} , λ_{C2} , λ_{C3} , λ_m の値は、画質評価実験において PSNR が最良となる値を求めて使用した。

3. 試作カメラシステム

提案手法の撮影を実現するため、以下の条件を満たす撮影システムを構築した。

- RGB 毎に異なる解像度、フレームレート、露出時間の画像を撮影する。
- RGB の各画像を同じ視点・視野で撮影する。
- RGB 各画像を同期して取得する。

上記条件を満たすために、オンチップビニングが可能な同一のモノクロデジタルカメラ3台を用意した。単一の対物レンズ系を通した光を赤と青を反射するダイクロミックミラーを用いて色分離後、3つのカメラでそれぞれRGB画像を撮影している(図4)。各カメラは外部同期信号により同期撮影を行い、camera linkで接続した画像キャプチャボードにより画像を取得して

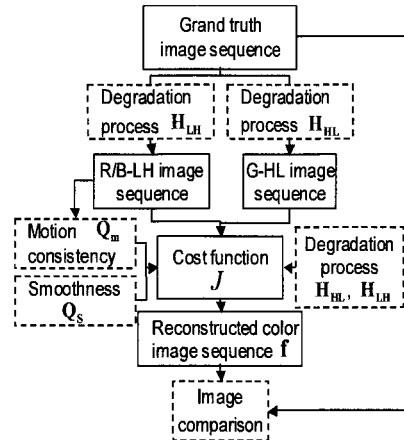


図5 評価実験の手順

いる。実験に用いたカメラの撮影条件を表1に示す。フレーム数拡大比率 N_T および空間拡大比率 N_S は、それぞれ4と2に設定している。

4. 実験

シミュレーションによる画質評価結果と、検証用に構築した試作カメラシステムの画像を用いた生成画像について以下に示す。

4.1. シミュレーションによる提案手法の評価

提案手法で生成した画像の画質評価を、シミュレーション実験により行った。実験手順は図5に示すように、最初に本来は得られない真の高解像度高フレームレートのカラー画像(正解画像)を用意し、2種類の劣化過程 H_{HL} , H_{LH} を用いて G-HL 動画像と R-LH, B-LH 動画像を生成した。次に、劣化過程を用いて生成した HL 動画像と LH 動画像を入力画像とし、提案手法により生成した HH 動画像と正解画像とを比較して画質評価を行った。

ここで、拡大比率 N_T と N_S は独立して設定し得るが、RGB 各色の入力動画像の総画素数が等しくなる組み合わせ(4通り)について評価を行った($N_T=4 \cdot N_S=2$, $N_T=6 \cdot N_S=3$ (垂直), 2 (水平), $N_T=9 \cdot N_S=3$, $N_T=16 \cdot N_S=4$)。

正解画像は、(社)映像情報メディア学会監修の標準動画像集(720×480 p, 60fps)の画像を用いた。画像中に複数の動きが存在する14種類の動画像を画像集より選択し、評価画像とした。実験に使用した正解画像のフレーム数は、 N_T の倍数となるように拡大比率ごとに設定し、開始フレーム番号は拡大比率によらず動画像ごとに同一とした。 $N_T=4 \cdot N_S=2$, $N_T=6 \cdot N_S=3$ (垂直), 2 (水平), $N_T=9 \cdot N_S=3$, $N_T=16 \cdot N_S=4$ のそれぞれ組み合わせの場合について、使用したフレーム数は12, 18,

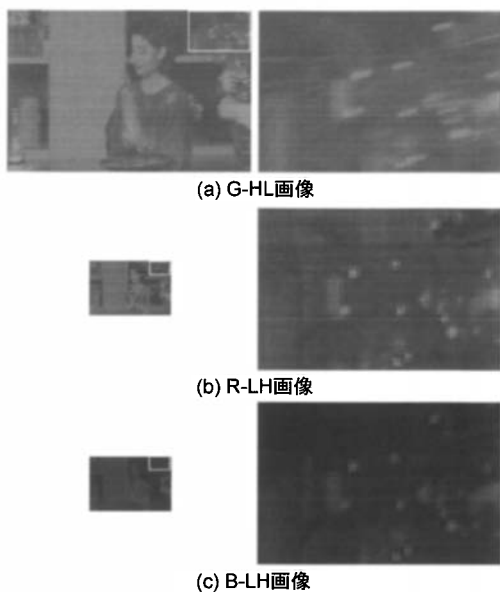


図 6 入力画像の例

18, 16 とした。

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。PSNR の算出において, 平均二乗誤差は RGB の 3 色を均等に扱っている。

4.2. シミュレーション実験結果

拡大比率 $N_T=9$, $N_S=3$ の場合についての画像生成結果を以下に示す。図 6 に評価画像(Cognac and Fruit)に対する入力画像の例を示す。図 6 は, 左下方向へのパン・チルト動作中に女性がボトルをテーブルに移動させている画像である。図 6(a)が G-HL 動画像, (b)が R-LH 動画像, (c)が B-LH 動画像のフレーム画像である。左列の画像中の, 白線で囲んだ領域の拡大画像を右列に示している。G-HL 動画像は, 露出時間が長い場合動きぶれを含んでおり, R-LH および B-LH 動画像は空間解像度が低い。

生成画像の例を図 7 に示す。図 7(a)は図 6 の画像を入力画像として提案手法で生成した画像。(b)は G 画像を R-LH, B-LH 画像と同じ低解像度高フレームレートの条件で撮影した画像, すなわち総画素数の等しい低解像度画像を補間拡大した画像。(c)は図 6 の入力画像を, 色ごとに正解画像の画素数とフレーム数まで時空間的に補間拡大した画像を示す。入力画像をそのまま補間拡大した場合(図 7(c))に比べ, 提案手法では動きぶれが低減している(図 7(a))。また, 低解像度画像の補間拡大画像(図 7(b))と比べて提案手法では解像度も向上している。

図 8 に, 生成画像と補間拡大画像それぞれの PSNR

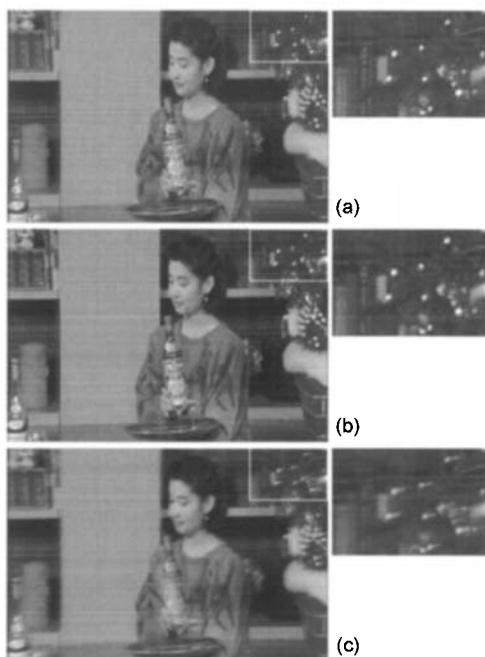


図 7 生成画像の例。(a) 提案手法による生成画像, (b) 低解像度画像の補間拡大画像, (c) 提案手法の入力画像の補間拡大画像。右側は白線領域の拡大画像。

を評価画像毎に示す。3 種類のグラフの様子は評価対象の違いを表している。白色は提案手法の生成画像, 黒色は低解像度画像の補間拡大画像, 斜線は入力画像の補間拡大画像を評価した結果である。図 8 において提案手法は 2 種類の補間拡大画像の場合に比べ, 全ての場合で PSNR が高い。評価画像全体の総合 PSNR(全評価画像を連続した 1 つの動画像と見なして求めた PSNR)で比較した場合, 生成画像は入力画像の補間拡大に比べて PSNR が 3.5dB 向上している。同じ入力に対する PSNR の差は, 提案手法において異なる時空間解像度の RGB 画像が持つ情報を, 色の滑らかさおよび動きの拘束を用いて相互に補完した効果によると考えられる。また, 低解像度画像の補間拡大と比べた場合, 提案手法では総合 PSNR が 2.2dB 高く, より実用性のある画質を実現している。

図 9 に 4 通りの拡大比率 $N_T \cdot N_S$ の組み合わせに対応する 14 画像の総合 PSNR を示す。図 9 において●印は提案手法, ○印は提案手法において動き拘束を除いた場合, ▲印は低解像度画像の補間拡大, ■印は入力画像の補間拡大の結果を示す。全ての場合において, 時空間拡大比率が増すと, 総合 PSNR は低下している。これは, 同じ画素数の HH 動画像の生成に用いる HL

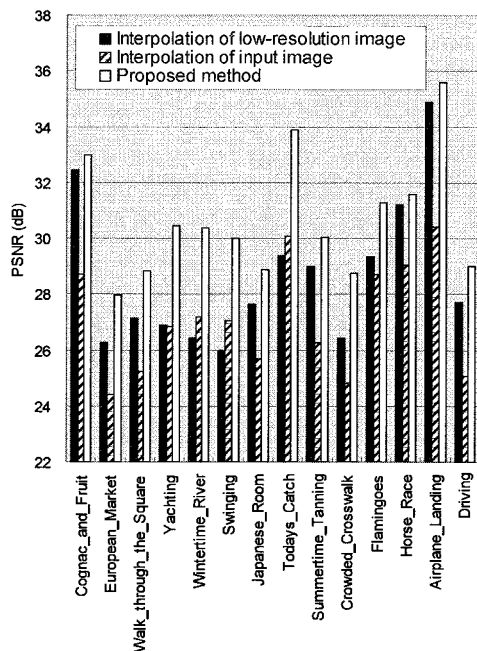


図8 評価画像毎のPSNR

動画と LH 動画の総画素数が減少することによる。全ての拡大比率において、提案手法は補間拡大よりも PSNR が高い。また、提案手法で動き拘束を除いた場合(O)が、入力画像の補間拡大(■)と提案手法(●)との中間付近の PSNR を持つことから、2 種類の拘束条件のそれぞれが、ほぼ同程度に PSNR の向上に貢献していると考えられる。

なお、以上の実験は PC(Core 2 Quad Q6600 2.4GHz) 上のソフトウェア処理で行い、拡大比率を $N_T=4$, $N_S=2$ として画像生成した場合(720×480 画素×12 フレーム)において、処理時間は 14~19 分であった。

4.3. 検証用カメラシステム画像からの画像生成

図 4 に示すカメラシステムを用いて撮影した画像の例を図 10 に示す。図 10(a)は G-HL 画像で動きぶれを含んでいる。図 10(b)は R-LH 画像、(c)は B-LH 画像で、G-HL に対し、オンチップピニングにより 1/2 の低解像度画像となっている。図 4 の撮影システムは 4000×2000 画素の撮影が可能であるが、ここでは標準解像度ディスプレイでの表示を想定し、720×480 画素の領域(G-HL 画像)を切り出して使用している。

図 11 は、図 10 の入力画像を用いて提案手法により生成した画像である。生成画像では入力 G-HL 画像に比べて動きぶれが低減しており、R-LH・B-LH 画像に比べて解像度が向上している。

図 12 に従来方式の撮影画像を示す。図 12(a)は RGB 全て G-HL と同じ解像度で、R-LH、B-LH 画像と同じ露

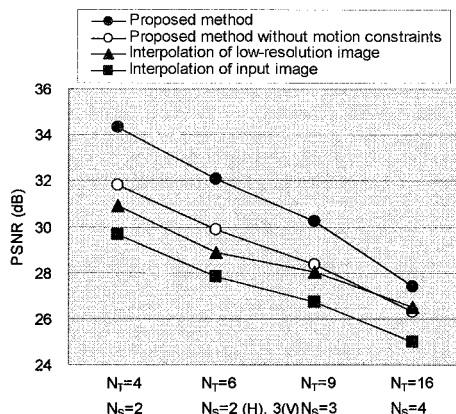


図9 拡大比率毎のPSNR

出時間で撮影した画像である。図 12(b)は(a)と同じ解像度で、露出時間を G-HL に一致させた画像である。高解像度で露出時間を短くした場合、動きぶれは少ないものの光量不足で暗い画像となる。一方、露出時間を長くすると光量は確保できるものの、被写体の動きによる動きぶれが生じている。提案手法では、G-HL 画像が時間方向に、R-LH、B-LH 画像が空間方向に光量を確保し、拘束条件を介して欠けた時空間解像度の情報を色間で補完することで生成画像の解像度を得ている。

5. まとめ

本報告では、光量不足の条件下での撮影を想定し、RGB それぞれが異なる時空間解像度を持つ入力画像を用いて、高時空間解像度のカラー画像を生成する手法を提案した。提案手法では、光量を得るために、露出時間を長くした G 画像と、低解像度高フレームレートの R・B 画像を用いた。時空間周波数の異なる RGB 画像に対して、RGB 間での拘束条件を設け、各色間で情報の補完を行うことで、動きぶれを抑制した高解像度高フレームレートのカラー画像を生成した。色間の情報の補完により、複雑な動きを含む場合においても PSF の明な推定を行わずに動きぶれの抑制を行っている。シミュレーション実験および試作カメラシステムの撮影画像を用い、動きぶれを抑え、時空間解像度が向上した画像が得られることを確認した。今後は、入力画像に基づいた拘束条件の動的制御や、実用化に向けた演算の高速化を検討する。

文 献

- [1] D. Kunder and D. Hatzinakos, "Blind image deconvolution", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 13, No. 3, pp. 43-64, May 1996
- [2] L. Bar, N. Sochen, and N. Kiryati, "Variational Pairing of



(a) G-HL画像



(b) R-LH画像

(c) B-LH画像

図 10 試作カメラシステムの撮影画像の例



図 11 試作カメラシステムの画像から生成した画像の例

- Image Segmentation and Blind Restoration", Proc. European Conf. Computer Vision, Vol. 2, pp. 166-177, May 2004
- [3] M. Tanaka, K. Yoneji, and M. Okutomi, "Motion Blur Parameter Identification from a Linearly Blurred Image", Proc. of Int'l Conf. on Consumer Electronics, pp. 1-2, 2007
- [4] B. Basile, A. Blake, and A. Zisserman, "Motion Deblurring and Super-resolution from an Image Sequence", Proc. of the 4th European Conf. on Computer Vision, Vol. 2, pp. 573-581, Apr. 1996
- [5] L. Yuan, J. Sun, and L. Quan, and H.Y. Shum, "Image Deblurring with Blurred/Noisy Image Pairs", ACM Trans. on Graphics, Vol. 26, No. 3, Jul. 2007
- [6] M. Ben-Ezra, A. Zomet, and S.K. Nayar, "Video Super-Resolution Using Controlled Subpixel Detector Shifts", IEEE Trans. on PAMI, Vol. 27, No. 6, pp. 977-987, Jun. 2005.
- [7] A. Levin, "Blind Motion Deblurring Using Image Statistics", Advances in Neural Information Processing Systems, 2006



(a)



(b)

図 12 従来方式の撮影画像の例. (a) 高解像度短時間露出の画像, (b) 高解像度長時間露出の画像.

- [8] P. Favaro, and S. Soatto, "A Variational Approach to Scene Reconstruction and Image Segmentation from Motion-Blur Cues", Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 1, pp. 631-637, Jul. 2004
- [9] J. Bardsley, S. Jefferies, J. Nagy, and R. Plemmons, "Blind Iterative restoration of images with spatially-varying blur", Optics Express, Vol. 14, pp. 1767-1782, 2006
- [10] L. Bar, B. Berkels, M. Rumpf, and G. Sapiro, "A Variational Framework for Simultaneous Motion Estimation and Restoration of Motion-Blurred Video", 11th IEEE Int'l Conf. on Computer Vision, pp. 1-8, Oct. 2007
- [11] S. Cho, Y. Matsushita, and S. Lee, "Removing Non-Uniform Motion Blur from Images", 11th IEEE Int'l Conf. on Computer Vision, Oct. 2007
- [12] R. Raskar, A. Agrawal, and J. Tubmlin, "Coded exposure photography: Motion deblurring using flutterd shutter", ACM Trans. on Graphics, Vol. 25, Issue 3, pp. 795-804, Jul. 2006
- [13] 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", Proc. on ACCV'07 Satellite Workshop on Multi-dimensional and Multi-view Image Processing, pp. 32-38, Nov. 2007
- [14] P. Anandan, "A Computational Framework and an Algorithm for the Measurement of Visual Motion", Int'l J. of Computer Vision, Vol. 2 No. 3, pp. 283-310, Jan. 1989.