

ウェーブレット領域での動き補償と画像統合による 高解像度高フレームレート動画の生成

渡 邊 清 高[†] 岩 井 儀 雄[†] 長 原 一[†]
谷 内 田 正 彦[†] 鈴 木 俊 哉^{††}

本論文では2種類の動画(高解像度・低フレームレート動画, 低解像度・高フレームレート動画)から高解像度・高フレームレート動画を得るためのアルゴリズムを提案する. このために, これら2種類の動画を同一視野で同時に撮影できる複合センサカメラを想定する. 提案手法は, 高フレームレート動画から動きの情報を抽出し, 高解像度動画に対して動き補償を行う. さらに, 動き補償された画像と低解像度画像の統合をウェーブレット領域で行う. MPEGテストシーケンスを用いたシミュレーション実験および実画像を用いた評価実験によって, 提案手法に最も適合するウェーブレット関数を調べた. また, 実画像を提案手法に適用した結果を示す.

Video Synthesis with High Spatio-temporal Resolution Using Motion Compensation and Image Fusion in Wavelet Domain

KIYOTAKA WATANABE,[†] YOSHIO IWAI,[†] HAJIME NAGAHARA,[†]
MASAHIKO YACHIDA[†] and TOSHIYA SUZUKI^{††}

This paper presents a novel algorithm to obtain a high spatio-temporal resolution video. To this end, we introduce a dual sensor camera that can capture two video sequences with the same field of view simultaneously. These sequences are high resolution with low frame rate and low resolution with high frame rate. The proposed method estimates motion information through the video with high frame rate, and conducts motion compensation for the high resolution sequence. Moreover, the method fuses a low resolution image with the motion-compensated image in the wavelet domain. We conducted simulation experiments using MPEG test sequences as input videos and evaluative experiments using real images captured by the dual sensor camera. We investigated the optimum selection of wavelet functions through these experiments. We also show the synthesized images from real images.

1. はじめに

デジタルビデオカメラの撮像素子として広く利用されている CCD (電荷結合素子) は, 作製技術の発達とともに高解像度化が進んできた. しかし, カメラの画像掃き出し速度には制限があるため, 一般にカメラの解像度が高くなるとフレームレートが低下する. すなわち, 高解像度と高フレームレートは両立しない. もちろん, デジタルシネマなどの特殊用途に

対しては高解像度・高フレームレートのカメラが存在するが, 非常に高価であり, 汎用性に欠ける. そこで, 一般的なカメラから得られる低解像度動画あるいは低フレームレート動画を用いて, 画像処理によって高解像度動画あるいは高フレームレート動画を生成する手法の研究が昔から行われている.

画像処理によって高解像度の画像を得る単純な方法として補間法(内挿法)がある. 補間法の処理は単純であるが, ぼけた画像が生成されるため画質は良くない. 一方, 信号処理の立場からのアプローチによって高解像度画像を得る手法に超解像があり, 古くから研究されている. 超解像では一般に, 同一のシーンから複数の低解像度画像が得られるという仮定を設ける. そして, これらの低解像度画像の間にサブピクセルレベルの微小なずれが存在すれば, 超解像による画像復元が可能となる. 超解像の処理は, まず低解像度画像

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究所

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{††} 株式会社映蔵

Eizoh Co. LTD.

現在, 三菱電機株式会社先端技術総合研究所

Presently with Advanced Technology R&D Center,
Mitsubishi Electric Corporation

と高解像度画像の関係を表す画像劣化過程をモデル化し、その後モデルに従って複数の低解像度画像から高解像度画像を推定するという流れとなる。劣化モデルは静止画像に対するもの¹⁾と動画像に対するもの^{2),3)}に大別される。

一方、動画像のフレーム数を向上させる処理はフレームレート変換を行うことに相当する。フレームレート変換はテレビ信号規格の相互変換やスローモーション映像生成などの目的で昔から研究されている。また、ハードウェアによるフレームレート変換器も実用化されている⁴⁾。フレームレートを向上させるための単純な手法として、フレーム反復、時間方向フィルタリングによる線形補間があるが、フレーム反復により生成された動画像は動きが滑らかでない。また、線形補間によって生成された動画像は、シーン中に含まれる動物体がぼけてしまう。これらの問題を解決するために動き補償付きフレームレート変換⁵⁾⁻⁷⁾が提案されている。

これらの従来のアプローチのほとんどは、空間または時間分解能の一方を向上させるにとどまっていた。本研究では、高解像度・高フレームレートの動画像を得るために、まったく同一の視野を持つ2種類の動画像（高解像度・低フレームレート動画像、低解像度・高フレームレート動画像）を同時に撮影できる複合センサカメラ⁸⁾を考える。本論文では、図1のように複合センサカメラから得られる2種類の動画像から高解像度・高フレームレート動画像を生成する画像処理アルゴリズムを提案する。複合センサカメラは解像度やフレームレートが制限された既存のカメラを組み合わせることにより、低コストで構成できる。また、撮像された動画像を蓄積する場合、本手法ではそのデータ量を小さくできるという利点もある。超解像やフレームレート変換といった従来のアプローチでは、空間ま

たは時間のいずれか一方のみをアップサンプリングする。これに対し、本手法は時間的かつ空間的に同時にアップサンプリングを行う点が特徴である。

本論文と同様の問題を取り扱っている従来研究として、モーフィングを利用した手法⁹⁾およびDCT（離散コサイン変換）スペクトルを合成する手法¹⁰⁾がある。文献9)はモーフィングによって高解像度・高フレームレート動画像を生成する手法であるが、生成画像の画質を決定する特徴点検出と追跡の精度に課題が残っている。一方、文献10)の手法は、画像空間で高解像度画像の動き補償を行い、この画像と時間的に対応する低解像度画像のDCTスペクトルをDCT領域で合成することにより高解像度画像を生成する。つまり、動き補償とスペクトル合成を異なる領域で行う必要があり、処理が複雑になる欠点がある。さらに、 $N \times N$ 点の2次元DCTを実行するための時間計算量が $O(N^2 \log N)$ であることから、画像全体に対してDCTを実行するよりも、画像を適当なサイズの小ブロックに分割し各ブロックに対してDCTを実行する方が計算効率が良い。しかしながら、画像をブロックに分割すると、ブロックの境界部分でブロックひずみが発生する可能性がある。

従来手法のこれらの問題点を解決するため、本論文ではウェーブレット変換を利用して高解像度・高フレームレート動画像を生成する手法を提案する。提案手法は、動き補償および2種類の動画像の統合の両方をウェーブレット領域で行うため、画像生成処理はDCTスペクトル合成法¹⁰⁾に比べて単純である。提案手法では、離散ウェーブレット変換（DWT; discrete wavelet transform）を拡張した変換である冗長ウェーブレット変換（RDWT; redundant DWT）¹¹⁾を利用する。RDWTはshift-invariantであるため、ウェーブレット領域での動き補償が可能となる。さらに、 $N \times N$ 点の2次元RDWTの時間計算量は $O(N^2)$ であることから、DCTのように画像を小ブロックに分割しても計算量は変わらない。したがって、画像をブロックに分割する必要がなくなるため、これに起因するブロックひずみは発生しない。また、動き補償は高解像度画像中のすべての画素に対して同様に処理される。すなわち、本手法はモーフィング法⁹⁾のように画像中から特徴点を抽出したり、それを追跡したりするといった処理を含まないため、これらの問題を回避できる。

以降、2章では本研究で想定する複合センサカメラについて説明する。次に、3章ではDWTとRDWTの性質を述べる。4章では、本論文で提案する高解像度画像生成手法アルゴリズムを説明する。5章ではMPEG

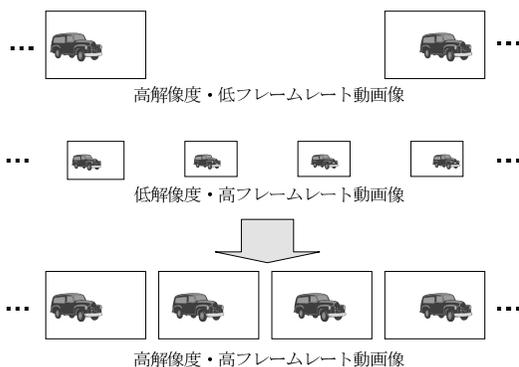


図1 問題設定

Fig. 1 Problem formulation.

テストシーケンスを用いたシミュレーション実験および複合センサカメラから得られた実画像を用いた評価実験の結果を示し、提案手法に最も適合するウェーブレット関数を明らかにする。その後、実画像を用いて画像生成を行った結果を示す。最後に、6章で本論文をまとめる。

2. 複合センサカメラ

本研究で想定する複合センサカメラの概念図を図2に示す。複合センサカメラは、高解像度・低フレームレートの動画を撮影できるカメラと、低解像度・高フレームレートの動画を撮影できるカメラから構成され、解像度の異なる同一視野の動画を同時に撮像することができる。カメラに入射する光はハーフミラーにより分光され、各 CCD に到達する。また、パルスジェネレータから2つのセンサにパルスを入力することにより、時間的に同期の取れた画像の組を得ることができる。本論文ではこのような同期フレームの組をキーフレームと呼ぶこととする。

ここで、複合センサカメラの高解像度 CCD と低解像度 CCD の解像度比を $2^\alpha : 1$ ($\alpha \in \mathbb{N}$)、フレームレート比を $1 : \rho$ ($\rho \in \mathbb{N}$) とする。また、 $\kappa = 2^\alpha$ とおく。複合センサカメラの試作機⁸⁾により撮像される2種類の動画像に対してキャリブレーションを行うことにより、 $\alpha = 2$ 、 $\rho = 7$ を満たす2種類の動画像が得られる。

3. 離散ウェーブレット変換

離散ウェーブレット変換 (DWT) は周波数変換の一種であるが、離散 Fourier 変換や DCT などの他の多くの周波数変換とは異なり、周波数領域においても画像空間情報を保持しているという特徴がある。提案手法ではこの性質を利用し、動き補償と画像統合の両方の処理をウェーブレット領域で行う。

はじめに、変換の shift-invariance (シフト不変性) と呼ばれる性質について述べる。ある2次元信号の変換 $\mathcal{T}\{\cdot\}$ を考える。入力信号 f_i について

$$\mathcal{T}\{f_i(x, y)\} = f_o(x, y) \quad (1)$$

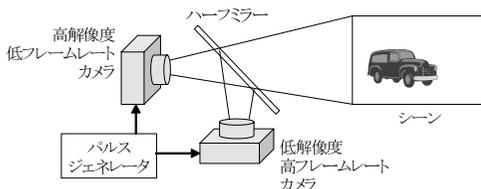


図2 複合センサカメラの概念図

Fig. 2 Concept of dual sensor camera.

の関係があるとき、任意のシフト (x_0, y_0) に対して

$$\begin{aligned} \mathcal{T}\{f_i(x - x_0, y - y_0)\} \\ = f_o(x - x_0, y - y_0) \end{aligned} \quad (2)$$

が成り立つならば、 $\mathcal{T}\{\cdot\}$ は shift-invariant な変換であるという。

DWT は shift-invariance が成り立たない変換、すなわち shift-variant であることが知られている¹²⁾。たとえば、画像 $I(x, y)$ と、 I を1ピクセルだけシフトさせた画像 $I_s(x, y) = I(x - 1, y)$ のそれぞれの DWT 係数は、通常互いに大きく異なる。このため、DWT 領域で動き補償を行うと誤差を生じる場合がある。

DWT が shift-variant となるのは、変換の過程で係数がダウンサンプリングされることに起因する。そこで、データが冗長になることを許して、ダウンサンプリングしない DWT を考える。このような DWT は冗長ウェーブレット変換 (RDWT) と呼ばれている。RDWT は連続ウェーブレット変換を近似したものになっており、shift-invariant である¹¹⁾。RDWT の shift-invariance により、画像空間におけるシフトは RDWT の各サブバンドにおいても同様のシフトとなって現れる。すなわち、RDWT 領域で各サブバンドに対して動き補償を行っても、画像空間での動き補償とまったく同様の効果が得られる。提案手法では、動き補償と画像統合の両方の処理をウェーブレット領域で行うことにより、画像生成アルゴリズムの単純化を実現しているところに特徴がある。

本論文では、信号 f に対するレベル j の低周波 DWT 係数と高周波 DWT 係数をそれぞれ $Lf^{(j)}$ 、 $Hf^{(j)}$ と表すこととする。また、信号 f に対するレベル j の低周波 RDWT 係数と高周波 RDWT 係数をそれぞれ $\hat{L}f^{(j)}$ 、 $\hat{H}f^{(j)}$ と表記する。ここで、記号 $\hat{\cdot}$ は RDWT 係数であることを表す。

RDWT 係数が持っている冗長な情報をダウンサンプリングによって取り除くと DWT 係数が得られる。すなわち、RDWT 係数と DWT 係数の間には次の関係がある。

$$Lf^{(j)} = \hat{L}f^{(j)} \downarrow 2^j, \quad Hf^{(j)} = \hat{H}f^{(j)} \downarrow 2^j \quad (3)$$

ここで $\downarrow \alpha$ はダウンサンプリングを表し、 $y(n) = x(n) \downarrow \alpha$ ならば $y(n) = x(\alpha n)$ である。すなわち、式 (3) の関係を用いることにより、RDWT 合成を DWT 合成 (逆離散ウェーブレット変換; IDWT) として処理することができる。

4. 高解像度画像生成アルゴリズム

RDWT を用いた高解像度画像生成処理の流れを図3

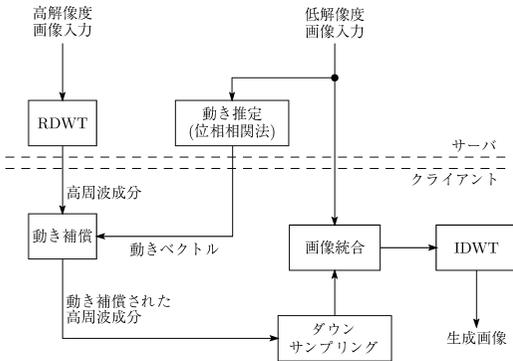


図3 高解像度画像生成処理の流れ
Fig. 3 Block diagram of proposed algorithm.

に示す．提案手法では，高解像度動画の各フレームを RDWT によりサブバンド分解する．また，低解像度動画中の動きを位相相関法^{(13),(14)}により推定する．推定した動きの情報を用いて，RDWT 係数の高周波成分の動き補償を RDWT 領域で行った後，これらの係数をダウンサンプリングする．その後，ダウンサンプリングされた高周波成分と，時間的に対応する低解像度画像をウェーブレット領域で統合する．最後に，統合した係数に対して IDWT を実行することにより，高解像度画像を得る．画像統合を行うことにより，キーフレーム間でのシーンの変化（画像全体の明るさの変化など）を生成画像に反映させることができるようになる．

提案手法において，RDWT に使用するウェーブレット関数は任意である．画像統合によって解像度を向上させるという目的に最も適合するウェーブレット関数は，実験を通して明らかにする．

なお，提案するアルゴリズムは，高解像度動画配信システムの将来の実用化を想定し，動画のインターネット配信を前提としたものとしている．動画のネットワーク配信を考える場合は，RDWT 分解と動き推定がサーバ側の処理，その他がクライアント側の処理となる．

4.1 動き推定の用語

図4に示すように，動画に含まれる動きの情報を計算する処理を動き推定と呼び，動きの変位を表すベクトルを動きベクトルという．このとき，時刻 t のフレームをアンカーフレーム，時刻 $t + \Delta t$ のフレームをターゲットフレームという．特に， $\Delta t > 0$ のときの動き推定は前方動き推定（forward motion estimation）， $\Delta t < 0$ のときの動き推定は後方動き推定（backward motion estimation）と呼ばれる⁽¹⁵⁾．図4のように，アンカーフレームの座標 (x, y) の動きベ

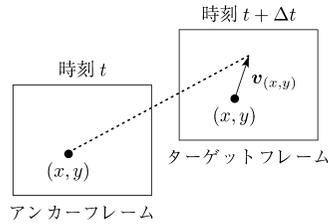


図4 動き推定の用語
Fig. 4 Terminology of motion estimation.

クトルを $v_{(x,y)} = (v_{(x,y)}^x, v_{(x,y)}^y)^T$ と表記することとする．

4.2 高解像度画像生成の手順

図5のように，2組のキーフレーム (I_0, \tilde{I}_0) ，および (I_ρ, \tilde{I}_ρ) が得られており，さらにそれらの中間の低解像度画像 $I_1, \dots, I_{\rho-1}$ が存在するとする．ここで， I の添字はフレーム番号を表す．このとき，高解像度画像 $\tilde{I}_1, \dots, \tilde{I}_{\rho-1}$ を生成する手順を説明する．以下の例では，高解像度画像は $\tilde{I}_1, \tilde{I}_{\rho-1}, \tilde{I}_2, \tilde{I}_{\rho-2}, \dots$ の順に生成される．

- Step 1 最初，図5に示すように $bk = 1, fw = \rho - 1$ とする．
- Step 2 $s = bk, r = bk - 1, c = fw + 1$ とする．
- Step 3 (RDWT 分解) 高解像度画像 \tilde{I}_r はすでに得られているので，これを RDWT 分解し，高周波成分のサブバンド

$$\widehat{LH}\tilde{I}_r^{(j)}, \widehat{HL}\tilde{I}_r^{(j)}, \widehat{HH}\tilde{I}_r^{(j)} \quad (j = 1, 2, \dots, \alpha)$$

を求める．通常の RDWT 分解では，上の各サブバンドのほかに低周波成分 $\widehat{LL}\tilde{I}_r^{(\alpha)}$ が得られるが，提案手法ではこれを用いないため求める必要はない．

- Step 4 (動き推定) 位相相関法により，低解像度画像 I_s をアンカーフレーム， I_r をターゲットフレームとした動き推定を行い， I_s のすべての画素について動きベクトルを求める．動きベクトルは $1/\kappa$ 画素精度で推定する． $s < r$ の場合は前方動き推定， $r < s$ の場合は後方動き推定となる．

- Step 5 (動き補償) \tilde{I}_r の各高周波サブバンドに対して動き補償を行い， \tilde{I}_s の各サブバンドを求める．今，低解像度画像 I_s の座標 (x, y) に割り当てられた動きベクトルを $v_{(x,y)} = (v_{(x,y)}^x, v_{(x,y)}^y)^T$ と表すとする．低解像度画像 I_s の1つの画素は，高解像度画像 \tilde{I}_s においてはサイズ $\kappa \times \kappa$ のブロックに対応すると考えることができる． I_s の座標 (x, y) に対応する \tilde{I}_s 内のブロックを B とおくと，レベル $j = 1, 2, \dots, \alpha$ の高周波成分それぞれに対して， B 内の各点 $(p_x, p_y) \in B$

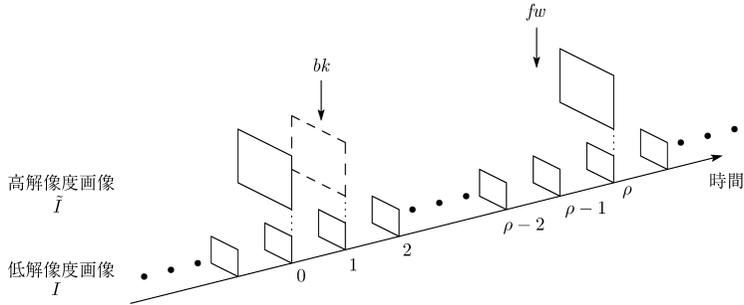


図 5 初期設定

Fig. 5 Initial settings of proposed method.

の動き補償を次式のように行う．

$$\widehat{LH}\tilde{I}_s^{(j)}(p_x, p_y) = \widehat{LH}\tilde{I}_r^{(j)}(p_x + \kappa v_{(x,y)}^x, p_y + \kappa v_{(x,y)}^y) \quad (4)$$

$$\widehat{HL}\tilde{I}_s^{(j)}(p_x, p_y) = \widehat{HL}\tilde{I}_r^{(j)}(p_x + \kappa v_{(x,y)}^x, p_y + \kappa v_{(x,y)}^y) \quad (5)$$

$$\widehat{HH}\tilde{I}_s^{(j)}(p_x, p_y) = \widehat{HH}\tilde{I}_r^{(j)}(p_x + \kappa v_{(x,y)}^x, p_y + \kappa v_{(x,y)}^y) \quad (6)$$

$v_{(x,y)}$ は Step 4 において $1/\kappa$ 画素精度で推定されるため，上の動き補償は整数画素単位で行われる．

動きベクトルが求められなかった画素については， I_s をアンカーフレームとして I_s と I_c の間で動き推定を行い， \tilde{I}_c の RDWT 係数値から動き補償を行う．すなわち，上式 (4)～(6) の右辺の \tilde{I}_r を \tilde{I}_c に置き換えて動き補償を行う．

I_s をアンカーフレームとした動き推定で，上述のいずれの手順でも動きベクトルが求められなかった座標 (x', y') については，動き補償を行わない． (x', y') に対応する \tilde{I}_s のブロックを B' とおく． B' 内の各点 $(p'_x, p'_y) \in B'$ について，レベル $j = 1, 2, \dots, \alpha$ の高周波成分それぞれに対して次式のように 0 を代入する．

$$\widehat{LH}\tilde{I}_s^{(j)}(p'_x, p'_y) = 0 \quad (7)$$

$$\widehat{HL}\tilde{I}_s^{(j)}(p'_x, p'_y) = 0 \quad (8)$$

$$\widehat{HH}\tilde{I}_s^{(j)}(p'_x, p'_y) = 0 \quad (9)$$

Step 6 (ダウンサンプリング) 式 (3) の関係を利用して \tilde{I}_s の各サブバンドをダウンサンプリングし，RDWT 係数を DWT 係数

$$LH\tilde{I}_s^{(j)}, HL\tilde{I}_s^{(j)}, HH\tilde{I}_s^{(j)} \quad (j = 1, 2, \dots, \alpha)$$

に変換する．

Step 7 (画像統合) Step 6 で得た高周波成分の DWT 係数と，対応する低解像度画像 I_s を次式の

ように統合する．

$$LL\tilde{I}_s^{(\alpha)} = I_s \quad (10)$$

Step 8 (IDWT) 統合された \tilde{I}_s の各サブバンドに対して IDWT を実行し，高解像度画像 \tilde{I}_s を求める．

Step 9 bk に 1 を加える．

Step 10 ここで $bk = fw$ ならば終了する．そうでなければ Step 11 に進む．

Step 11 $s = fw, r = fw + 1, c = bk - 1$ とし，上の Step 3 から Step 8 までを実行する．

Step 12 fw から 1 を引く．

Step 13 $bk = fw$ になるまで Step 2 から Step 12 の処理を繰り返す．

5. 実験

5.1 MPEG テストシーケンスによるシミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するため，MPEG テストシーケンスを用いたシミュレーション実験を行った．実験には，表 1 に示す MPEG テストシーケンスを使用した．

はじめに，複合センサカメラのモデル化を行う．図 6 に示すように未知の ground truth 画像の存在を仮定する．そして，複合センサカメラから得られる高解像度・低解像度画像は，それぞれ点広がり関数 g_h, g_ℓ により劣化したものとする．ここで点広がり関数としてガウシアンを仮定すると，ガウシアンどうしの畳み込みはガウシアンとなることから，

$$g_\ell = g_b * g_h \quad (11)$$

を満たすようなガウシアン g_b が存在する．すなわち， g_b は 2 種類の入力動画を関係づけていることになる．画像の点広がり関数を推定することは一般に困難であるため，ここでは g_b の標準偏差 σ を，複合センサカメラの試作機の解像度比 $\kappa = 4$ の半分 (2.0) と

表 1 実験に使用した MPEG テストシーケンス
Table 1 Description of test sequences.

シーケンス名称	画像サイズ	使用フレーム
Coast guard	352 × 288	No.0 ~ No.294
Football	352 × 240	No.1 ~ No.120
Foreman	352 × 288	No.0 ~ No.294
Hall monitor	352 × 288	No.0 ~ No.294

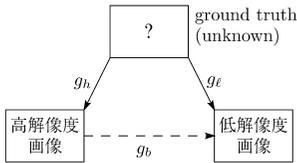


図 6 2 種類の入力動画の関係

Fig. 6 Relation between two input sequences.

においてシミュレーション実験を行った。

複合センサカメラから得られる動画をシミュレートする 2 種類の動画を次のような手順に従って作成した。サイズ $M \times N$ 、30 [fps] のテストシーケンスの各フレームに対して、 $\sigma = 2.0$ のガウシアンによりぼかし処理をかける。その後、サイズを 25% に縮小し、サイズ $M/4 \times N/4$ 、フレームレート 30 [fps] の低解像度動画を作成する。ここで、サイズ縮小にあたり、2 種類の動画の間のサンプル点の位置が図 7 のように関係づけられると仮定する。図 7 中の低解像度画像のサンプル点 X の画素値は、ガウシアンによってぼかされた、サイズ $M \times N$ の高解像度画像の点 A, B, C, D の画素値の平均値とする。また、元のテスト画像列から 7 枚ごとに 1 枚フレームを取り出し、サイズ $M \times N$ 、フレームレート 4.29 [fps] の高解像度動画を作成する。これら 2 種類の動画を提案手法に適用し、サイズ $M \times N$ 、フレームレート 30 [fps] の高解像度動画を生成する実験を行った。

本実験で使用したウェーブレット関数は Haar ウェーブレット, Daubechies 4-tap フィルタ ($D4$)¹⁶⁾, 整数 5/3 ウェーブレット ($I5/3$)¹⁷⁾ および整数 2/6 ウェーブレット ($I2/6$)¹⁸⁾ である。ここで、整数ウェーブレットの x/y の表記は、DWT 分解のローパスフィルタとハイパスフィルタのタップ長がそれぞれ x, y であることを示している。使用するウェーブレットによる生成画像の画質の違いを比較評価した。

図 8 にテストシーケンス “Foreman” フレーム No.45 の生成画像を示す。比較のため、原画像を (a) に、および最近傍法により拡大した低解像度画像を (b) に示す。(c), (g), (h), (i) はウェーブレット関数としてそれぞれ Haar ウェーブレット、整数 5/3 ウェーブレット、整数 2/6 ウェーブレットおよび Daubechies

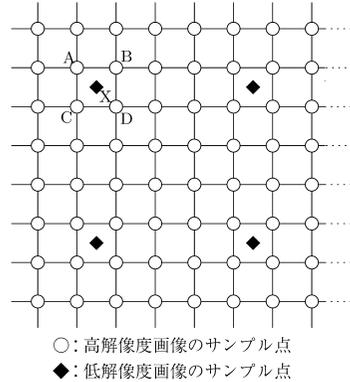


図 7 2 種類の画像のサンプル点

Fig. 7 Position of sampling point.

4-tap フィルタを用いた場合の生成画像である。(d) から (f) および (j) から (l) はそれぞれ、(a) から (c) および (g) から (i) の画像の一部を 4 倍に拡大した画像である。

図 8 の中で提案手法により生成した画像を比較すると、Haar ウェーブレットにより生成した (c), (f) の画像ではヘルメットの縁の部分などでブロックひずみが現れている。これは、動きベクトルが推定できなかったために RDWT の高周波サブバンドに 0 を代入した部分である。ブロックひずみが発生したのは、サブバンド分解・合成に用いた Haar ウェーブレット関数が不連続であるために、滑らかに補間されないことが原因である。一方、その他のウェーブレット関数を使用して生成した画像を見ると、Haar ウェーブレットを使用した場合に発生したブロックひずみが抑制されている。これは、これらのウェーブレット関数が Haar ウェーブレットと比較して滑らかであるため、補間も滑らかに行われたためである。

各テストシーケンス全体の PSNR を表 2 に示す。すべてのテストシーケンスについて、提案手法において整数 2/6 ウェーブレットを用いた場合の PSNR が最大となった。しかし、テストシーケンス “Hall monitor” においては、提案手法よりも DCT 合成の方が高い PSNR を示した。これは、このテストシーケンスを提案手法に適用したとき、図 9 に示すように斜め方向のエッジ付近で Gibbs 現象のような微小振動が発生し、PSNR を下げたからである。

Daubechies 4-tap フィルタを使用した場合の生成画像 (図 8 (i), (l)) を見ると、生成画像の画質が視覚的には悪くないにもかかわらず、PSNR の結果はすべてのテストシーケンスについて低くなった。これは、Daubechies 4-tap フィルタのインパルス応答 (フィル



図 8 “Foreman” フレーム No.45
Fig. 8 Test sequence “Foreman” 45th frame.

表 2 PSNR の測定結果
Table 2 PSNR results.

シーケンス名	Haar	I5/3	I2/6	D4	DCT 法 ¹⁰⁾	最近傍法
Coast guard	23.95	22.27	24.04	23.47	24.03	22.03
Football	20.53	19.72	20.91	20.51	20.67	20.69
Foreman	26.70	24.78	26.93	25.66	26.54	25.29
Hall monitor	29.51	24.82	29.39	27.12	29.99	22.82

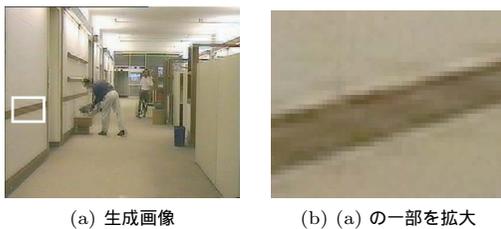


図 9 振動が発生した例

Fig. 9 An example of frames where the oscillation occurs.

タの数値) が対称でないため、直線位相特性を持たないからである。直線位相特性を持たないフィルタによりサブバンド分割を繰り返すと、画像中のエッジがずれていく。したがって、生成画像にひずみが生じ、結果として PSNR が下がったと考えられる。

次に、入力動画画像に光学的誤差が含まれる場合の影響を調べた結果を示す。本実験で使用した低解像度・

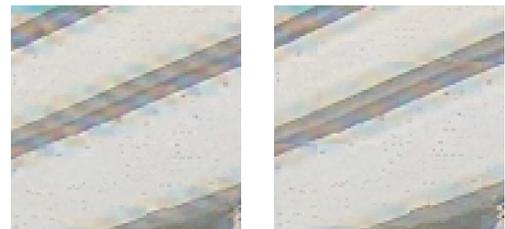


図 10 偽色の影響

Fig. 10 Effect of false color noise.

高フレームレート動画に対して人為的に偽色を発生させ、これを入力として提案手法と DCT スペクトル合成法に適用した。提案手法については、ウェーブレット関数として整数 2/6 ウェーブレットを使用した。図 10 に生成画像の一部を拡大したものを示す。提案手法により生成した画像 (a) は、偽色の影響が生成画

表 3 計算時間の比較

Table 3 Comparison of processing time.

ウェーブレット	Haar	I5/3	I2/6	D4	DCT 法 ¹⁰⁾
計算時間 [sec]	30.45	37.02	39.54	52.11	35.75

像に強く現れている．しかし，DCT 法による生成画像 (b) に見られるようなブロックひずみは発生していないことが見てとれる．

テストシーケンス “Foreman” (No.0~294) を用いて画像生成を行ったときの，各手法の計算時間を表 3 に示す．表 3 は，CPU: Intel Xeon 2.8 [GHz]，RAM: 2 [GB]，OS: Fedora Core 3 の Linux PC 上で各手法を実行した場合の計算時間である．提案手法については，使用するウェーブレット関数のタップ長によって計算時間は異なることが分かる．特に，Haar ウェーブレットを使用した場合は，DCT 法よりも高速に画像を生成できる．ウェーブレット変換を整数演算として実装することにより，画像生成の高速化が可能であるが，現状では整数ウェーブレットの変換を整数演算として実装できていない．

5.2 ウェーブレット関数の評価

提案手法では，画像統合に使用するウェーブレット関数は任意としている．そこで，複合センサカメラから得られる実画像を用いて，画像統合や動き推定誤差に対する各ウェーブレット関数の性能を評価した．実験は以下の手順で行った．

- (1) キャリブレーション済みの 2 種類の動画画像から，キーフレームをなす画像の組 (\tilde{I}, I) を取り出す． \tilde{I} と I の画像の大きさはそれぞれ $4,000 \times 2,600$ ， $1,000 \times 650$ にリサイズする．
- (2) 高解像度画像 \tilde{I} に対して，レベル 2 の RDWT 分解を行う．これにより，高周波成分 $\widehat{LH}\tilde{I}^{(j)}$ ， $\widehat{HL}\tilde{I}^{(j)}$ ， $\widehat{HH}\tilde{I}^{(j)}$ ($j = 1, 2$) が得られる．なお，低周波成分 $\widehat{LL}\tilde{I}^{(2)}$ は求めない．
- (3) I の全画素のうち，ある割合（ここではこの割合を面積ノイズ比と呼ぶこととする）の画素について，標準偏差 σ のガウシアンに従う動きベクトル $v = (v_x, v_y)^\top$ ， $v_x, v_y \sim N(0, \sigma^2)$ を割り当てる．その他の画素に対しては，動きベクトル $v = 0$ を割り当てる．
- (4) (2) で求めた \tilde{I} の高周波成分に対して，(3) で作成した動きベクトルによって動き補償を行う．
- (5) (4) で動き補償された \tilde{I} の RDWT 高周波成分をダウンサンプリングし，DWT 係数に変換する．
- (6) (5) で求めた \tilde{I} の DWT 係数と，低解像度画像 I の画像統合を行う．すなわち，低周波成分 $LL\tilde{I}^{(2)}$

表 4 ウェーブレット関数

Table 4 Wavelet functions.

略記号	説明
Haar	Haar ウェーブレット
D4	Daubechies 4-tap フィルタ ¹⁶⁾
D6	Daubechies 6-tap フィルタ ¹⁶⁾
D8	Daubechies 8-tap フィルタ ¹⁶⁾
D10	Daubechies 10-tap フィルタ ¹⁶⁾
D9/7	Daubechies 9/7-tap フィルタ ¹⁹⁾
I5/3	整数 5/3 ウェーブレット ¹⁷⁾
I2/6	整数 2/6 ウェーブレット ¹⁸⁾
I9/7-M	整数 9/7 ウェーブレット ²⁰⁾
I2/10	整数 2/10 ウェーブレット ²¹⁾
I5/11-C	整数 5/11 ウェーブレット (式 (4.6) ²²⁾)
I5/11-A	整数 5/11 ウェーブレット ²³⁾
I6/14	整数 6/14 ウェーブレット ²⁴⁾
I13/7-T	整数 13/7 ウェーブレット (式 (4.5) ²²⁾)
I13/7-C	整数 13/7 ウェーブレット ²⁴⁾

を I に置き換える．

- (7) 画像統合した \tilde{I} に対して IDWT を実行し，高解像度画像 \tilde{I}' を生成する．
- (8) 原画像 \tilde{I} と画像統合された \tilde{I}' の間の PSNR を測定する．

この実験を，ウェーブレット変換に使用するウェーブレット関数を変えながら行った．なお，上の手順 (3) において，面積ノイズ比を 0%，20%，40%，60%，動きベクトルに混入させるガウシアンノイズの標準偏差を 5.0，10.0 とした．面積ノイズ比が 0% の場合は，動き補償を行わずに画像統合だけを行った場合に相当する．本実験で使用したウェーブレット関数を表 4 に示す．表 4 中の各ウェーブレット関数のうち，Haar ウェーブレットおよび整数ウェーブレットを用いた場合，DWT を整数演算として実行できる．それぞれの整数ウェーブレットの特性の詳細は文献 25) を参照されたい．

入力画像として，複合センサカメラの試作機によって屋外で撮影した 4 つの動画画像シーケンス A，B，C，D から計 12 組のキーフレームを取り出し，これらを用いた．入力画像の例を図 11 に示す．4 つの動画画像はすべてシーン中に動物体を含んでおり，かつカメラを固定して撮影したものである．

PSNR の測定結果を表 5 に示す．表 5 の値は，本実験において入力として与えた 12 組のキーフレーム

表 5 ウェーブレット関数の評価結果

Table 5 Evaluative results of wavelet functions.

標準偏差 面積ノイズ比	—	$\sigma = 5.0$			$\sigma = 10.0$		
	0%	20%	40%	60%	20%	40%	60%
Haar	26.36	25.97	25.62	25.28	25.94	25.55	25.19
D4	25.97	25.74	25.52	25.31	25.70	25.45	25.21
D6	25.54	25.37	25.20	25.03	25.33	25.12	24.92
D8	25.11	24.96	24.82	24.68	24.92	24.73	24.55
D10	24.67	24.54	24.41	24.29	24.50	24.33	24.17
D9/7	26.20	26.05	25.91	25.76	26.05	25.89	25.74
I5/3	26.36	26.18	25.99	25.80	26.17	25.98	25.79
I2/6	26.19	25.97	25.76	25.56	25.96	25.75	25.54
I9/7-M	26.22	26.08	25.94	25.78	26.07	25.92	25.77
I2/10	26.09	25.90	25.73	25.55	25.89	25.71	25.53
I5/11-C	26.20	26.06	25.91	25.76	26.05	25.90	25.75
I5/11-A	26.28	26.12	25.96	25.78	26.11	25.94	25.77
I6/14	26.03	25.86	25.69	25.53	25.85	25.68	25.51
I13/7-T	26.19	26.05	25.92	25.77	26.05	25.90	25.75
I13/7-C	26.15	26.02	25.89	25.75	26.02	25.88	25.74

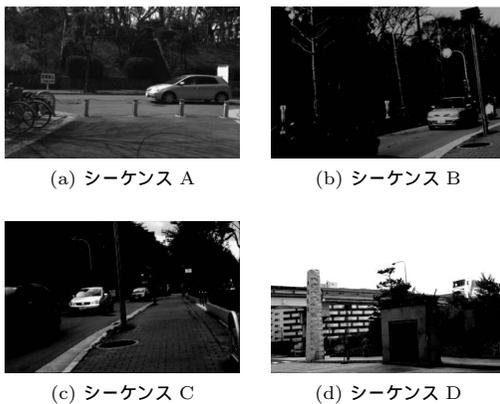


図 11 入力画像の例

Fig. 11 Examples of input images.

に対する PSNR である．同一の標準偏差・面積ノイズ比の条件下で 1 番目と 2 番目に PSNR が高かったものをそれぞれ太字と斜体字で示している．

Haar ウェーブレットを用いた場合、動きベクトルにノイズが含まれない場合は最高の PSNR を示したが、ノイズが増加するにつれて PSNR が急激に低下している．すなわち、Haar ウェーブレットは動き推定誤差に対するロバスト性が低いということになる．また、本実験で使用したウェーブレット関数の中では、標準偏差・面積ノイズ比の設定がいずれの場合でも、整数 5/3 ウェーブレットを用いた場合の PSNR が最高の値を示した．これは、前節のシミュレーション実験の結果とは異なるものである．この点についての検証と考察は次節で詳しく述べる．

5.3 実験結果の考察

これまでに見てきたように、シミュレーション実験

(5.1 節)と実画像による評価実験(5.2 節)では、最適なウェーブレット関数が異なるという実験結果が得られた．本節ではこれに関する検証と考察を行う．

複合センサカメラの実機から得られる 2 種類の動画像の間には、幾何学的誤差と光学的誤差が存在する．これらの誤差は、2 種類の動画像のキャリブレーションを行っても、完全に取り除くことはできない⁽⁸⁾．そこで、これらの誤差の影響を検証するため、シミュレーション実験で用いた動画像に対して幾何学的誤差・光学的誤差を人為的に加え、これらを入力として提案手法に適用した．

5.3.1 幾何学的誤差の影響

まず、幾何学的誤差の影響を調べるため、テストシーケンス“Foreman”(No.0~294)を使用して次のような実験を行った．サイズ $M \times N$, 30 [fps] のテストシーケンスの各フレームを (d_x, d_y) 画素分シフトさせる．シフトされた画像に対して、5.1 節の実験と同様の処理を行い、サイズ $M/4 \times N/4$, フレームレート 30 [fps] の低解像度動画像を作成する．また、高解像度動画像は、5.1 節の実験と同様の手順により作成する．これら 2 種類の動画像を提案手法に適用し、生成画像の PSNR を測定した．ここでは、ウェーブレット関数として Haar, 整数 2/6, 整数 5/3 ウェーブレットを用いた．

表 6 に PSNR の測定結果を示す．表 6 を見ると、Haar および整数 2/6 ウェーブレットを使用したときには、一般にずれ量が大きくなると PSNR も下がる傾向が見られる．しかし、整数 5/3 ウェーブレットを使用した場合、ある特定の方向 (x, y とともに負の方向)のずれを含むときに PSNR が上がるという結果

表 7 ウェーブレットの係数
Table 7 Wavelet coefficients.

n		-2	-1	0	1	2	3
Haar	h_n	0	0	1/2	1/2	0	0
	g_n	0	0	1/2	-1/2	0	0
12/6	h_n	0	0	1/2	1/2	0	0
	g_n	-1/16	-1/16	1/2	-1/2	1/16	1/16
15/3	h_n	-1/8	1/4	3/4	1/4	-1/8	0
	g_n	1/4	-1/2	1/4	0	0	0

表 6 幾何学的誤差の影響
Table 6 Effect of geometrical error.

ずれ (d_x, d_y)	距離 [pixels]	Haar	12/6	15/3
(0, 0)	0	26.70	26.93	24.78
(0.5, 0.5)	0.71	26.23	26.44	24.03
(0.5, -0.5)	0.71	26.03	26.24	24.58
(-0.5, 0.5)	0.71	26.21	26.38	24.54
(-0.5, -0.5)	0.71	26.20	26.40	25.34
(-1, -1)	1.41	25.31	25.50	25.70

が得られた。特に、ずれが $(-1, -1)$ のときには、整数 5/3 ウェーブレットを使用した場合の PSNR が最大となった。このような結果が現れたのは、解像度の異なる 2 種類の画像をウェーブレット領域で統合する処理（画像統合）が原因である。

画像統合とは、4.2 節のアルゴリズムの Step 5 において、時刻 s の高解像度画像 \tilde{I}_s の低周波成分 $LL\tilde{I}_s^{(\alpha)}$ を動き補償によって求める代わりに、時刻 s の低解像度画像 I_s で置き換える処理（Step 7）である。ここで簡単のため、シーンの変化がまったく存在しない場合（つまり、動き補償が行われない場合）を考える。今、高周波成分と同様の方法により低周波成分 $LL\tilde{I}_s^{(\alpha)}$ も推定するとする。このとき、 $LL\tilde{I}_s^{(\alpha)}$ と I_s の間の誤差が小さいほど、画像統合による劣化も小さくなる。すなわち、入力となる高解像度画像と低解像度画像の間の関係が、DWT により高解像度画像の低周波成分を求める過程（ローパスフィルタリングとダウンサンプリング）としてモデル化できれば、画像統合による劣化は発生しない。

ここで、本節の実験で使用したウェーブレットの係数を表 7 に示す。DWT をデジタルフィルタによるフィルタリングと考えると、これらの係数はフィルタの単位インパルス応答に相当する。Haar と整数 2/6 ウェーブレットの応答は、 $n = 0$ と 1 の間を中心として対称に広がっている。一方、整数 5/3 ウェーブレットは、前の 2 つのウェーブレットと比較して応答がわずかにずれており、ローパスフィルタ h_n が $n = 0$ 、ハイパスフィルタ g_n が $n = -1$ を中心として対称に広がっている。このような応答のずれは、画像の場合には位置ずれ（シフト）となって現れる。

よって、以下のことがいえる。シミュレーション実験では、5.1 節のはじめで述べたように、図 7 のサンプル点の位置関係を仮定し、これに基づいて高解像度画像から低解像度画像を作成した。この仮定が Haar および整数 2/6 ウェーブレットによる DWT の過程に適合していたため、これらのウェーブレット関数を用いたときに高い PSNR が得られた。一方、実画像の高解像度画像と低解像度画像は、図 7 のサンプル点の位置関係が満たされていなかった。実際、文献 8) で報告されているように、複合センサカメラの 2 種類の動画像に対してキャリブレーションを行っても、それらの間には平均してサブピクセル単位の幾何学的誤差が残る。この誤差により、図 7 のサンプル点の位置関係の仮定が満たされなくなった。整数 5/3 ウェーブレットは他の 2 つのウェーブレットと比較すると応答にずれがあるため、実画像のように幾何学的誤差（位置ずれ）を含む画像を用いた場合に対して高い PSNR を示した。

したがって、実画像に幾何学的誤差が含まれていることを前提にすれば、整数 5/3 ウェーブレットが提案手法に最適であるといえる。しかしながら、もしキャリブレーションによって幾何学的誤差を取り除くことができれば、整数 2/6 ウェーブレットが最適であるということになる。

5.3.2 光学的誤差の影響

次に、光学的誤差の影響を実験により調べた。5.1 節のシミュレーション実験と同様にして、テストシーケンス “Foreman” (No.0 ~ 294) から 2 種類の動画像を作成する。その後、本実験では低解像度画像の一部の画素に対し、ガウシアン $N(0, \sigma^2)$ に従う光学的ノイズを加える。ここで、全画素に占めるノイズ入り画素の割合を面積ノイズ比と呼ぶこととする。ガウシアンの標準偏差を $\sigma = 5.0, 10.0$ 、面積ノイズ比を 20%、40%としたときの生成画像の PSNR を測定した。使用したウェーブレット関数は前節の実験と同じである。

低解像度画像にノイズを加えたときの生成画像の PSNR を表 8 に示す。3 種類のウェーブレット関数に共通しているのは、ノイズの振幅（ガウシアンの

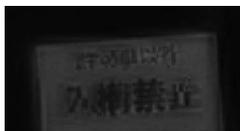
表 8 光学的誤差の影響

Table 8 Effect of optical error.

標準偏差	面積ノイズ比	Haar	I2/6	I5/3
—	0%	26.70	26.93	24.78
5.0	20%	26.48	26.70	24.68
5.0	40%	26.23	26.45	24.55
10.0	20%	26.06	26.27	24.49
10.0	40%	25.45	25.65	24.18



(a) 生成画像 (整数 5/3 使用)



(b) (a) を拡大した画像



(c) 整数 2/6



(d) DCT スペクトル合成法



(e) 対応する低解像度画像

図 12 実画像より生成された高解像度画像

Fig. 12 Synthesized high resolution image from real images.

標準偏差)が大きくなったとき、あるいはノイズの量(面積ノイズ比)が増加したとき、PSNRが下がるということである。つまり、シミュレーション実験と実画像実験の結果が異なっていたのは、光学的誤差の影響ではないといえる。

5.4 実画像を用いた高解像度画像生成

複合センサカメラの試作機から得られた2種類の動画をキャリブレーションし、2種類の動画を

- サイズ $4,000 \times 2,600$ [pixels], 4.29 [fps]
- サイズ $1,000 \times 650$ [pixels], 30 [fps]

を生成した。そして、これらの動画を提案手法に適用し、サイズ $4,000 \times 2,600$ [pixels]、フレームレート 30 [fps] の動画を生成した。整数 5/3 ウェーブレットを用いて生成された画像の例を図 12 (a) に示す。これ

は、4.2 節で示したアルゴリズムの Step 2 から Step 13 のループにおいて、3 回目の反復で生成されたフレームである。(b) は、生成画像 (a) のうち静止領域の一部を拡大したものである。比較のため、同様の実験条件で整数 2/6 ウェーブレットを用いて生成した画像を (c) に、DCT スペクトル合成法を用いて生成した画像を (d) に示す。また、(a) から (d) の画像に時間的に対応する低解像度入力画像を (e) に示す。

図 12 の (b), (c) と (e) を比較すると、(b) の画像では文字が明確に判読できるため、提案手法により解像度の向上が実現できたといえる。この結果から、実画像においてもシミュレーション同様に高解像度・高フレームレート動画が提案手法によって生成できることが示された。

6. おわりに

本論文では、時空間分解能の異なる2種類の動画から、ウェーブレット領域で動き補償と画像統合を行うことにより高解像度・高フレームレート動画を生成するアルゴリズムを提案した。提案手法の有効性と最適なウェーブレット関数を検証するために、MPEG テストシーケンスを用いたシミュレーション実験、およびウェーブレット関数の評価実験を行った。さらに、複合センサカメラから得られた画像を用いた画像生成実験を行い、シミュレーション同様、実画像においても高解像度・高フレームレート動画が生成できることを確認した。

謝辞 本研究は独立行政法人情報通信研究機構「民間基盤技術研究促進制度」の援助を受けた。

参考文献

- 1) Park, S.C., Kang, M.K. and Kang, M.G.: Super-resolution image reconstruction: A technical overview, *IEEE Signal Processing Mag.*, Vol.20, No.3, pp.21-36 (2003).
- 2) Shekarforoush, H. and Chellappa, R.: Data-driven multi-channel super-resolution with application to video sequences, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol.16, No.3, pp.481-492 (1999).
- 3) Tom, B.C. and Katsaggelos, A.K.: Resolution enhancement of monochrome and color video using motion compensation, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.10, No.2, pp.278-287 (2001).
- 4) Watkinson, J.: *The Engineer's Guide to Motion Compensation*, Snell & Wilcox, Hampshire (1994).
- 5) Chen, Y.K., Vetro, A., Sun, H. and Kung,

- S.Y.: Frame-rate up-conversion using transmitted true motion vectors, *Proc. IEEE 2nd Workshop on Multimedia Signal Processing*, pp.622–627 (1998).
- 6) Choi, B.T., Lee, S.H. and Ko, S.J.: New frame rate up-conversion using bi-directional motion estimation, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, Vol.46, No.3, pp.603–609 (2000).
- 7) Ha, T., Lee, S. and Kim, J.: Motion compensated frame interpolation by new block-based motion estimation algorithm, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, Vol.50, No.2, pp.752–759 (2004).
- 8) 重本倫宏, 星川 章, 長原 一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 田中紘幸: 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, 情報処理学会研究報告, No.CVIM-147-11 (2005).
- 9) 松延 徹, 長原 一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 田中紘幸: モーフィングによる高解像度高フレームレート動画の生成, 信学技報, No.PRMU2004-178 (2005).
- 10) 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の合成, 情報科学技術レターズ, Vol.3, No.LI-004, pp.169–172 (2004).
- 11) Shensa, M.J.: The discrete wavelet transform: wedding the à trous and Mallat algorithms, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.40, No.10, pp.2464–2482 (1992).
- 12) Park, H.W. and Kim, H.S.: Motion estimation using low-band-shift method for wavelet-based moving-picture coding, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.9, No.4, pp.577–587 (2000).
- 13) Thomas, G.A.: Television motion measurement for DATV and other applications, *BBC Research Department Report*, No.1987/11 (1987).
- 14) Girod, B.: Motion-compensating prediction with fractional-pel accuracy, *IEEE Trans. Communications*, Vol.41, No.4, pp.604–612 (1993).
- 15) Wang, Y., Ostermann, J. and Zhang, Y.Q.: *Video Processing and Communications*, Prentice Hall, New Jersey (2001).
- 16) Daubechies, I.: *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics (1992).
- 17) Le Gall, D. and Tabatabai, A.: Sub-band coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques, *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing*, pp.761–764 (1988).
- 18) Zandi, A., Allen, J.D., Schwartz, E.L. and Boliek, M.: CREW: Compression with reversible embedded wavelets, *Proc. IEEE Data Compression Conf.*, pp.212–221 (1995).
- 19) Antonini, M., Barlaud, M., Mathieu, P. and Daubechies, I.: Image coding using the wavelet transform, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.1, No.2, pp.205–220 (1992).
- 20) Strang, G. and Nguyen, T.: *Wavelets and Filter Banks*, Wellesley-Cambridge Press (1996).
- 21) Gormish, M.J., Schwartz, E.L., Keith, A.F., Boliek, M.P. and Zandi, A.: Lossless and nearly lossless compression of high-quality images, *Proc. SPIE*, pp.62–70 (1997).
- 22) Calderbank, A.R., Daubechies, I., Sweldens, W. and Yeo, B.: Wavelet transforms that map integers to integers, *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, Vol.5, pp.332–369 (1998).
- 23) Adams, M.D. and Kossentini, F.: Low-complexity reversible integer-to-integer wavelet transforms for image coding, *Proc. IEEE Pacific Rim Conf. Communications, Computers, Signal Processing*, Victoria, B.C., Canada, pp.177–180 (1999).
- 24) Adams, M.D., Kharitonenko, I. and Kossentini, F.: Report on core experiment CodEff4: Performance evaluation of several reversible integer-to-integer wavelet transforms in the JPEG-2000 verification model (version 2.1), ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N1015 (1998).
- 25) Adams, M.D. and Kossentini, F.: Reversible integer-to-integer wavelet transforms for image compression: Performance evaluation and analysis, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.9, No.6, pp.1010–1024 (2000).

(平成 17 年 9 月 16 日受付)

(平成 18 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 佐藤 真一)



渡邊 清高

平成 16 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。平成 18 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年より三菱電機(株)先端技術総合研究所に勤務, 現在に至る。画像処理に関する研究に従事。



岩井 儀雄 (正会員)

平成 4 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。平成 6 年同大学大学院基礎工学研究科修士課程修了。平成 9 年同大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年同大学院基礎工学研究科助手。平成 15 年同大学院助教授。平成 16~17 年英国ケンブリッジ大学にて客員研究員。コンピュータビジョン, パターン認識に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。工学博士。



長原 一 (正会員)

平成 8 年山口大学工学部電気電子工学科卒業。平成 10 年同大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。平成 13 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年より日本学術振興会研究員として同研究科に所属。平成 15 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手。平成 17 年フランスピカルディ大学客員助教授。画像処理, コンピュータビジョン, 仮想現実感の研究に従事。2003 年 ACM VRST2003 Honorable Mention Award. 電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。工学博士。



谷内田正彦 (正会員)

昭和 46 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学基礎工学部制御工学科助手。同助教授を経て同学部情報工学科教授。平成 6 年同学部システム工学科教授。昭和 42~43 年デンマーク原子力研究所留学。昭和 47~48 年米イリノイ大学にて Research Associate。昭和 55~56 年西独ハンブルグ大学 Research Fellow。昭和 57 年米ミネソタ大学 CDC Professor。ロボット学会, 人工知能学会等会員。著書:『ロボットビジョン』(昭晃堂, 大川出版賞受賞),『コンピュータビジョン』(丸善, 編著)等。コンピュータ・ビジョン, 画像処理, 人工知能, 移動ロボット等の研究を行っている。工学博士。



鈴木 俊哉

昭和 58 年岩手大学大学院工学研究科修士課程修了。昭和 59 年三菱電線工業(株)入社。平成 15 年(株)映蔵入社, 現在に至る。