超解像技術を用いた実時間超高精細映像符号化システムの開発

Real-time Encoding System for Ultra High-definition Video Using Super-resolution Technique

正会員 松尾 康孝[†], 正会員 岩村 俊輔[†], 正会員 井口 和久[†], 正会員 境田 慎一[†]

Yasutaka Matsuo[†], Shunsuke Iwamura[†], Kazuhisa Iguchi[†] and Shinichi Sakaida[†]

あらまし 膨大な情報量を持つ超高精細映像である 8K スーパーハイビジョン映像や 4K 映像を超高圧縮符号化するために、従来の映像符号化方式に超解像技術を組合せた新しいパラダイムの超解像復元型映像符号化方式を開発し、開発方式を装置実装して実時間映像符号化実験を行った。この超解像復元型映像符号化方式の送信側では、ブロック歪みなどの符号化劣化を抑制するために、入力画像を画像縮小して符号化する。受信側では、鮮鋭な出力画像を得るために、復号画像を元のサイズに超解像復元する。さらに受信側の超解像復元を高精度かつ高確度に行うために、送信側で局部復号画像を元のサイズに超解像復元した後、入力画像を基準に最適な超解像復元パラメータを選択し、これを受信側へ補助情報として送信して復号画像の超解像復元に使用する。本方式を空間方向および時空間方向の処理技術として開発し、これらの装置実装を行い AVC/H.264 および HEVC/H.265 コーデックと組合せて超高精細映像の実時間超高圧縮伝送を実施した。

キーワード：超高精細映像，超高圧縮映像符号化，超解像技術，ウェーブレット，HEVC/H.265

1. ま え が き

日本のテレビジョン放送では、東京オリンピック・パラリンピックが開催される 2020 年に向けて、高い臨場感や実物感を持つ 8K スーパーハイビジョン放送および 4K 放送が開始される予定である。これらの超高精細映像は膨大な情報量を持つため、従来方式である AVC/H.264¹⁾ や HEVC/H.265²⁾ などの映像符号化を用いて超高圧縮映像符号化を行う場合は、絵柄によってはブロック歪みなどの符号化劣化が目立つという課題がある。この課題を解決するために、従来方式の映像符号化に超解像技術を組合せることを特徴とする超解像復元型映像符号化方式を開発し、その実時間映像符号化システムを構築する。

2. 超解像復元型映像符号化方式の開発

超解像技術のテレビジョンへの応用としては、4K テレビに搭載されている超解像がある。この超解像は、2K 解像度を持つ衛星・地上デジタルハイビジョン放送を、4K テレビに高精細に表示するために用いる。このとき、送信側である放送局において 2K 解像度を持つ原画像を符号化して伝送された信号を、受信側である家庭の 4K テレビにおいて受

信後に復号して、4K 解像度に超解像する。この超解像では 2K 解像度を持つ復号画像から超解像高周波成分を推定するため、絵柄によっては超解像画質が大きく劣化する場合がある。また、超解像技術を応用した映像・画像符号化としては、超解像の後処理を伴う符号化方法³⁾、単板カラーイメージセンサのデータに適した符号化方法⁴⁾、Total Variation 正則化法を用いた JPEG 圧縮画像の超解像デコーディング⁵⁾ などがある。

さて、送信側である放送局には、原画像が 4K カメラで撮影されている場合は、元の高解像度な 4K 解像度を持つ原画像が存在する。この原画像を参照できれば、4K テレビに搭載されている超解像を高精度かつ高確度に行うことが可能となる。ここで、もし受信側の超解像方式が明らかでない場合は、送信側である放送局において、4K 解像度を持つ原画像を 2K 解像度に画像縮小後に映像符号化した信号を、局部復号後に元の 4K 解像度に超解像復元することができる。そして、送信側である放送局において 4K 原画像を基準に最適な超解像パラメータを選択することも可能となる。さらにこの超解像パラメータを補助情報として受信側へ伝送すれば、受信側の超解像を高精度かつ高確度に行うことができる。この考え方を基にして、超高精細映像を超高圧縮映像符号化するために、筆者らは従来の映像符号化の前段に画像縮小、後段に超解像復元を用いる新しいパラダイムの超解像復元型映像符号化方式を開発した。図 1

2015年8月3日受付，2015年11月27日再受付，2015年12月14日採録

[†] 日本放送協会 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-3354)

図 1 超解像復元型映像符号化方式の全体図

に、その全体図を示す。以下に、その特徴をまとめる。

- ・ 圧縮率を緩和してブロック歪みなどの符号化劣化を抑制するために、送信側では、原画像を画像縮小して情報量を削減後、従来方式の映像符号化を用いて符号化する。
- ・ ぼやけの少ない鮮鋭な超解像復元画像を得るために、受信側では、復号画像を原画像が持つ解像度に超解像復元する。
- ・ 受信側の超解像復元を高精度かつ高確度に行うために、送信側では符号化信号を局部復号後に超解像復元して、原画像を基準に最適な超解像復元パラメータを選択し、これを補助情報として受信側へ伝送する。

筆者らはこれまでに、画像縮小と超解像復元において空間⁶⁾⁷⁾、時間⁸⁾⁹⁾、階調¹⁰⁾¹¹⁾方向の処理を用いる超解像復元型映像符号化方式の研究を行った。そして研究結果を基に空間および時空間方向の方式開発を行い、装置実装¹²⁾¹³⁾して実時間映像符号化実験に成功した¹⁴⁾。以下3章では、空間方向の超解像復元型映像符号化方式の開発、開発方式の装置実装および実時間映像符号化実験について述べる。4章では、3章の開発方式を時空間方向に拡張した超解像復元型映像符号化方式の開発、開発方式の装置実装および実時間映像符号化実験について述べる。

3. 空間方向の超解像復元型映像符号化

空間方向の超解像復元型映像符号化では、画像縮小において原画像を空間画像縮小し、超解像復元において元の解像度に空間超解像復元する。3.1節では空間方向の開発方式、3.2節では開発方式の装置実装および従来の映像符号化方式として AVC/H.264 を用いた実時間映像符号化実験について説明する。

3.1 空間方向の開発方式

空間方向の超解像復元型映像符号化方式について、画像縮小、超解像復元およびその補助情報選択法を説明する。

(1) 画像縮小

空間方向の画像縮小の従来法としては、原画像に十分なタップ長を持つ低域通過型の線形フィルタを適用後、画素間引きを行う方法が広く知られている。ただし超解像復元を行うには縮小画像に適度な折り返し歪みが必要であるため、本開発ではウェーブレット分解を用いた画像縮小を行

い、用いるウェーブレットを可変とすることで折り返し歪み量を制御する。

ウェーブレット分解を用いた画像縮小では、任意の時間位置 t の原画像 $I(t)$ を任意のタップ係数列 W のフィルタを用いて1階ウェーブレット分解後、その空間低周波帯域成分 $LL_W^1(t)$ を整数化して縮小画像とする。ここで上付数字は、原画像 $I(t)$ の解像度を0階層とした時の画像のオクターブ分解階数を表す。そして用いるフィルタのタップ係数列 W を変えれば、縮小画像に含まれる折り返し歪み量を変化させることができる。ここでタップ係数列 W は任意の値をとることができるが、そのタップ係数列長はハードウェアリソースにより制約される。

(2) 超解像復元

空間方向の超解像復元の従来法としては、大きく分けて再構成型と学習型がある¹⁵⁾。さらに再構成型には、ウェーブレット超解像などの線形フィルタを用いる方法¹⁶⁾¹⁷⁾、Total variation や Non-local 超解像などの非線形フィルタを用いる方法¹⁸⁾¹⁹⁾ などがある。ここで学習型は、原画像毎に大規模なデータベースを必要とするなど、不特定多数の映像を扱う放送において高画質に実時間処理を行うのには向かない。また再構成型のうち非線形フィルタを用いる方法では、繰り返し演算が必要であるなどハードウェア化が困難である。そこで本開発では、ハードウェア化も考慮して、ウェーブレット超解像を用いた超解像復元を行うこととした。

図2にウェーブレット超解像復元の詳細を示す。超解像復元では、はじめに復号画像を1階ウェーブレット分解して、水平、垂直、対角方向の空間高周波成分 $HL_W^2(t)$, $LH_W^2(t)$, $HH_W^2(t)$ を得る。次に $HL_W^2(t)$, $LH_W^2(t)$, $HH_W^2(t)$ の各々を空間低周波帯域、同じサイズの0行列を空間高周波帯域に置き換えて1階ウェーブレット再構成して、超解像高周波成分 $HL_W^1(t)$, $LH_W^1(t)$, $HH_W^1(t)$ を得る。そして、これらに分散値を可変とするガウシアンフィルタ G_{HL} , G_{LH} , G_{HH} を適用して波形整形を行い、 $HL_W^1(t)$, $LH_W^1(t)$, $HH_W^1(t)$ を得る。最後に、復号画像を空間低周波帯域、 $HL_W^1(t)$, $LH_W^1(t)$, $HH_W^1(t)$ を空間高周波帯域に置き換えて1階ウェーブレット再構成して、超解像復元画像を出力する。

(3) 補助情報選択

送信側において、ブロック領域 B 毎に超解像復元画像と

図 2 ウェーブレット超解像復元

図 3 ウェーブレット超解像復元装置

原画像の差分が最小となる W と G_{HL} , G_{LH} , G_{HH} を選択し、超解像補助情報として受信側へ送信する。さらに選択された W を用いて原画像を画像縮小して符号化し、受信側へ送信する。

受信側では、補助情報を用いて図 2 と同様の超解像処理を復号画像に対して行い、超解像復元画像を出力する。

3.2 装置実装と実時間映像符号化実験

(1) 装置実装

3.1 節で述べた空間方向の画像縮小および超解像復元方式を各々 PCI Express カード上に実装し、AVC/H.264 コーデックと組合せた実時間映像符号化システムを構築した。

画像縮小装置では、SDI 入力された 4K 画像を 2K 解像度に画像縮小する。ここで画像縮小に用いることができるウェーブレットフィルタは、 17×17 画素の 2 次元畳込からなる 289 タップのデジタルフィルタである。超解像復元装置では、SDI 入力された 2K 映像を 4K 解像度に超解像復元する。図 3 に、開発したウェーブレット超解像復元装置を示す。図 4 に、ウェーブレット超解像復元装置の詳細構成を示す。同図中の 13 個のフィルタは、いずれも 5×5 画素の 2 次元畳込とオフセットからなる 26 タップのデジタルフィルタである。各フィルタには 64 種類のタップ係数列がプリセット可能で、それらの中から 1 つを画素・フレーム単位で選択可能としている。これらの 13 個のフィルタは、本装置における FPGA の論理設計に有利なように、同一フィルタの並・直列構成とした。なお画像縮小装置も、同様のフィルタリングを行う。

同図中①では、復号画像の水平、垂直、対角方向の超解像高周波成分 $HL_W^2(t)$, $LH_W^2(t)$, $HH_W^2(t)$ を得る。②では、これらの波形整形を行う。③では、復号画像を空間低周波

図 4 ウェーブレット超解像復元装置の詳細構成

図 5 実験で用いた超解像復元フィルタのタップ係数列

帯域成分、波形整形された $HL_W^2(t)$, $LH_W^2(t)$, $HH_W^2(t)$ を空間高周波帯域成分としてウェーブレット再構成を行い、超解像復元画像を得る。

(2) 実時間映像符号化実験

4K 60P 原画像を 2K 60P 画像に縮小して AVC/H.264 コーデックで符号化し、元の解像度に超解像復元する実験を行った。実験に用いた画像縮小フィルタは、 12×12 タップの Lanczos-3 フィルタである。また超解像復元フィルタは、図 5 に示す 13 個のフィルタである。実験では、AVC/H.264 による符号化遅延に加え、わずか 1 フレームの低遅延による実時間映像符号化を実現した。

図 6 に、4K 60P 原画像をそのまま AVC/H.264 符号化した場合と提案法の画質比較を示す (映像 24Mbps)。

図 6 画質比較 (24Mbps, 400 × 400 画素領域の切り出し画像)

(a)AVC/H.264 ではブロック歪みにより水面や顔のテクスチャが失われているが、(b) 提案法では精細感や透明感のある画像が得られていることがわかる。

4. 時空間方向の超解像復元型映像符号化

3 章で説明した空間方向の超解像復元型映像符号化を時空間方向に拡張した方式を開発し、装置実装と実時間符号化実験を行った。時空間方向の超解像復元型映像符号化では、画像縮小において原画像を時空間画像縮小し、超解像復元において元の解像度に時空間超解像復元する。4.1 節では時空間方向の方式開発、4.2 節では開発方式の装置実装および従来の映像符号化方式として HEVC/H.265 を用いた実時間映像符号化実験について述べる。

4.1 時空間方向の方式開発

時空間方向の超解像復元型映像符号化方式について、画像縮小、超解像復元およびその補助情報選択法を説明する。

(1) 画像縮小

時空間方向の画像縮小では、時間方向の画像縮小の後、空間方向の画像縮小を行う。時間、空間方向の画像縮小はともに、低域通過型フィルタを適用してから標本点を間引くことで、折り返し歪みを制御する。時間方向の画像縮小では、2 つのフレームの各画素位置に対して時間方向に 2 タップの畳み込みとオフセット付加を行う計 3 タップの低域通過型フィルタを畳み込み、時間方向に 1/2 の間引きを行う。空間方向の画像縮小では、はじめに水平方向に 19 タップの低域通過型フィルタ係数を畳み込み、水平方向に 1/2 の間引きを行う。続いて垂直方向に 19 タップの係数を畳み込み、垂直方向に 1/2 の間引きを行う。

(2) 超解像復元

時間方向の超解像復元の従来法としては、複数フレーム間の位置合わせを用いたレジストレーション超解像がある²⁰⁾。時空間方向の超解像復元では、空間方向の超解像復元として単一フレーム超解像に加えて、複数フレーム間の位置合わせを用いたレジストレーション超解像を行う。また時間方向の超解像復元として、複数フレーム間の位置合わせ情報を用いたフレーム内外挿を行う。

図 7 に、時空間超解像復元の処理図を示す。時空間超解

表 1 動き推定のパターン

インデックス k	推定元 a_k	推定先 b_k	補償元 c_k	補償先 d_k	按分 p_k
0 (超解像)	-4	-8	-8	-4	-
1 (超解像)	-4	-6	-6	-4	-
2 (超解像)	-4	-2	-2	-4	-
3 (超解像)	-4	0	0	-4	-
4 (外挿)	-2	0	-2	-3	-0.5
5 (内挿)	-4	-2	-4	-3	+0.5
6 (内挿)	-2	-4	-2	-3	+0.5
7 (外挿)	-4	-6	-4	-3	-0.5

像復元では、同図に示すように、以下 3 つの超解像復元手法をハイブリッドに適用する構成とする。

- 単一フレーム超解像
- 複数フレーム超解像
- 適応フレーム内外挿

単一フレーム超解像では、3.1 節で説明したウェーブレット超解像を用いる。

複数フレーム超解像および適応フレーム内外挿では、単一フレーム超解像の結果を過去 5 フレーム分用いて動き推定を行う。動き推定では、時空間画像縮小した時刻 a の動き推定元フレーム $M(a, x, y)$ (x, y は水平、垂直画素位置) をブロック領域分割し、ブロック領域 B について時刻 b の動き推定先フレーム $M(b, x, y)$ 内の類似箇所を探索し、動きベクトルを求める。複数フレーム超解像および適応フレーム内外挿において動き推定および動き補償のために参照するフレーム a, b, c, d の組合せを表 1 に示す。

複数フレーム超解像では、まず 4 通り ($k \in \{0, 1, 2, 3\}$) の動き補償画像 J_k およびマスク画像 G_k を生成する。続いて、これらの 4 つの画像の使用／不使用を表す重畳フラグ h_k にしたがって画像重畳を行い、超解像復元画像を得る。

適応フレーム内外挿では、動きベクトルを按分した動き補償により、各ブロック B に対して 4 通り ($k \in \{4, 5, 6, 7\}$) の動き補償画像 F_k およびマスク画像 G_k を得る。そして、これらを重畳フラグ h_k に応じて (1) 式によって重畳することにより内外挿結果 S を得る。なお、動き補償の結果が重ならず穴があいてしまった領域では、時刻 -2 と -4 の単一フレーム超解像結果の画素毎の平均値 (すなわち線形内挿) の結果を挿入する。

$$S(2t-3, x, y) = \sum_{B \in \text{全ブロック}} U(B; x, y) \quad (1)$$

$$U(B; x, y) = \begin{cases} \frac{(M(2t-2, x, y) + M(2t-4, x, y))}{2} & \text{(動き補償結果が重ならない場合)} \\ \frac{\sum_{k=4}^7 h_k(B) F_k(B; x, y)}{\sum_{k=4}^7 h_k(B)} & \text{(それ以外の場合)} \end{cases}$$

図 7 時空間超解像復元

(3) 補助情報選択

送信側の時空間超解像復元において、局部復号画像について表 1 の全パターンの超解像復元を試行し、ブロック B 毎に原画像と比較することで補助情報を生成する。

複数フレーム超解像の補助情報選択では、重畳において動き補償画像 J_k を重畳するか否かの全パターン 16 通りを試行し、得られた超解像結果が高解像映像 $H(2t-4)$ を最も近似する重畳フラグ h_k を求める。

適応フレーム内外挿の最適化は、動き補償画像 F_k ($k \in \{4, 5, 6, 7\}$) と高解像画像 $H(2t-3)$ を比較して、その差分絶対値が閾値 θ 以下であれば重畳ありと判定する。

こうして得られたブロック B 毎の重畳フラグ $h_k(B)$ ($k \in \{0, 1, \dots, 7\}$) は補助情報として送信側から受信側へと伝送される。重畳フラグ $h_k(B)$ は 2 進数の LSB 側から第 k ビットに配置され、ブロック B 毎の補助情報 $s(B)$ は 8 ビット値として 2 式のように表現される。

$$s(B) = \sum_{k=0}^7 2^k h_k(B) \quad (2)$$

4.2 装置実装と実時間映像符号化実験

(1) 装置実装

4.1 節で開発した時空間方向の画像縮小、超解像復元および補助情報選択方式を装置実装し、HEVC/H.265 コーデックと組合せたシステムを構築した。ここで超解像復元型映像符号化では、送信側において局部超解像復元を行うため、送信側には受信側の機能を包含する必要がある。そこで今回開発した装置は、送受信を別々に設計するのではなく、送受信で兼用できる構成とした。

図 8 に、開発した時空間画像縮小・超解像復元装置を示す。表 2 に、開発装置のサポートする時空間解像度を示す。これらの時空間解像度を任意に組合せることで、映像素材とテレビ画面のさまざまな解像度の混在にも対応するマルチフォーマット映像符号化を実現することができる。

時間または空間方向の画像縮小はバイパスすることができるように構成し、時間または空間方向のみの画像縮小も可能とした。なお、送信側において空間方向のみの画像削減（例：4K 60P から 2K 60P）を行った場合は、重畳フラグ $h_k(B)$ のうち $k \in \{0, 1, 2, 3\}$ のみを伝送する。また

図 8 時空間画像縮小・超解像復元装置

表 2 開発装置のサポートする時空間解像度

		出力			
		2K 60P	2K 120P	4K 60P	4K 120P
入力	2K 60P	-	時間復元	空間復元	時空間復元
	2K 120P	時間削減	-	-	-
	4K 60P	空間削減	-	-	時間復元
	4K 120P	時空間削減	-	時間削減	-

時間方向のみの画像削減（例：2K 120P から 2K 60P）を行った場合は、重畳フラグ $h_k(B)$ のうち $k \in \{4, 5, 6, 7\}$ のみを伝送する。そして受信側で重畳フラグ $h_k(B)$ の一部が利用できない場合（送信側で空間または時間方向の画像削減のみを行った場合は、時空間超解像復元の重畳フラグの得られない処理においてデフォルトのパラメータにより時空間復元を行う。

また本開発装置においては、送信側では、原画像と局部復号画像の同期が必要となる。また受信側では、復号画像と超解像補助情報の同期が必要となる。これらの信号同期を実現するため、今回開発した時空間画像縮小・超解像復元装置では、マーカ方式（送受両用）、ハッシュ方式（受信専用）の 2 種類を実装した。

マーカ方式では、画像縮小した画像の左上 32×32 画素に白または黒のべた塗りを 5 秒周期で交互に重畳するとともに、いずれのべた塗りが表示されているかを示すフラグを補助情報として伝送する。縮小した画像に重畳したマーカの切り替えのタイミングと局部復号画像上において観測されたマーカの切り替えのタイミングから映像符号化において生じる遅延量を求める。受信同期用には、復号画像において観測されたマーカ切り替えのタイミングと、補助情報から得たフラグ変化のタイミングに基づき復号画像と補助情報の同期をとる。

ハッシュ方式では、送信側の局部復号画像と、受信側の復号画像が信号レベルで一致することを利用して、映像情報ストリームと補助情報ストリームの同期をとる。送信側で局部復号画像の各フレームを特徴づける数値（ハッシュ値、今回は 16 ビット値）を求め、補助情報に多重化して伝送する。受信側でも、復号映像からハッシュ値を求め、補助情報中のハッシュ値と対応付けを行うことで、同期をとる。本方式は、映像情報には一切の同期情報を付加していないことが最大の特長である。このため、従来の映像符号化コーデックがタイムコード情報を通さない場合でも、信号同期を実現することができる。

(2) 実時間映像符号化実験

4K 120P 原画像を 2K 60P 画像に縮小して HEVC/H.265 符号化し、元の解像度に超解像復元する実験を行った。実験では、HEVC/H.265 による符号化遅延に加え、わずか 0.18 秒程度の低遅延による実時間映像符号化を実現した。

図 9 と図 10 は、4K 120P 原画像を 2K 60P 用 HEVC/H.265 エンコーダ 8 並列 (2Mbps × 8) により符号化した場合 (16Mbps) と提案法の画質比較である (映像 12Mbps, 補助情報 4Mbps)。各図 (a)HEVC/H.265 では特に動きの異なる被写体が重なり合う領域において顕著な劣化 (図 9(a) の○印) が見られたが、(b) 提案法では、図 9(b) の複数フレーム超解像結果、図 10(b) の適応フレーム内外挿の結果ともに画質が改善している。一方で、静止画に近い領域においては (a)HEVC/H.265 の方がやや精細感があった (図 10(a) の□印)。これは提案法は 4 つの動き補償結果を適応的に選択・重畳する仕組みを備え、複数の動きの交錯するシーンに有利なのに対し、静止画に近い領域では画像縮小での損失が超解像復元で完全には回復できなかったことに起因すると思われる。

5. む す び

膨大な情報量を持つ超高精細映像を超高圧縮映像符号化するために、AVC/H.264 や HEVC/H.265 など従来の映像符号化方式の前段で画像縮小、後段で超解像復元を行う新しいパラダイムの超解像復元型映像符号化方式を開発し、装置実装して実時間映像符号化実験を行った。方式開発では、空間方向および時空間方向の処理技術を開発し、これらの装置実装を行い、AVC/H.264 および HEVC/H.265 コーデックと組合せて、超高精細映像の実時間超高圧縮伝送に成功した。

【文 献】

- 1) ISO/IEC 14496-10: "Coding of audio-visual objects - Part 10: Advanced Video Coding" | Recommendation ITU-T H.264: "Advanced Video Coding" (2003)
- 2) ISO/IEC 23008-2: "High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments - Part 2: High Efficiency Video Coding" | Recommendation ITU-T H.265: "High Efficiency Video Coding" (2013)
- 3) S. Kondo and T. Toma: "Video Coding with Super-Resolution Post-Processing", Proceedings of IEEE ICIP, pp. 3141-3144

(a) HEVC/H.265 (b) 提案法 (超解像フレーム)

図 9 画質比較 (偶数フレーム, 16Mbps, 切り出し画像)

(a) HEVC/H.265 (b) 提案法 (内外挿フレーム)

図 10 画質比較 (奇数フレーム, 16Mbps, 切り出し画像)

- (2006)
- 4) 田中 正行, 奥富 正敏: "単板カラーイメージセンサのデータに適した符号化方法の提案", 画像電子学会誌, **36**, 5, pp. 631-640 (2007)
- 5) 小松 隆, 齊藤 隆弘: "TV 正則化法を用いた JPEG 圧縮画像の超解像デコーディング", 電子情報通信学会論文誌 D, **J90-D**, 7, pp. 1671-1674 (2007)
- 6) 松尾 康孝, 三須 俊枝, 境田 慎一, 鹿嶋 善明: "ウェーブレット超解像に基づく超高精細映像符号化の検討", 映像年大, 14-10 (2010)
- 7) Y. Matsuo, T. Misu, S. Sakaida and Y. Shishikui: "Video Coding with Wavelet Image Size Reduction and Wavelet Image Size Restoration", Proceedings of IEEE ICIP, MP.PG6, pp.1181-1184 (2011)
- 8) 三須 俊枝, 松尾 康孝, 岩村 俊輔, 井口 和久, 境田 慎一: "複数フレーム参照によるフレーム内挿法とその映像符号化への応用", 情報科学技術フォーラム (FIT), I-019, pp.289-292 (2012)
- 9) T. Misu, Y. Matsuo, S. Sakaida and Y. Shishikui: "Motion-adaptive Sub-Nyquist Sampling Technique for Multi-Frame Super-Resolution", Proceedings of IEEE PCS, pp.321-324 (2012)
- 10) 松尾 康孝, 三須 俊枝, 岩村 俊輔, 境田 慎一: "空間階調削減と復元を用いた超高精細映像の超解像復元型映像符号化の検討", 情報科学技術フォーラム (FIT), I-024, pp.219-222 (2014)
- 11) Y. Matsuo, T. Misu, S. Iwamura and S. Sakaida: "Video Coding of 8K UHD TV by HEVC/H.265 with Spatio-gradational Reduction and Its Restoration", Proceedings of IEEE PCS, pp.40-44 (2015)
- 12) T. Misu, Y. Matsuo, S. Iwamura and S. Sakaida: "Real-time Implementation of UHD TV Video Coding System with Super-resolution Techniques", Proceedings of IEEE PCS, pp.181-184 (2013)
- 13) T. Misu, Y. Matsuo, S. Iwamura and S. Sakaida: "Real-time Video Coding System for Up to 4K 120P Videos with Spatio-temporal Format Conversion", Proceedings of IEEE ICCE, pp.58-61 (2015)
- 14) 三須 俊枝, 松尾 康孝, 岩村 俊輔, 境田 慎一: "時空間解像度変換による超高精細映像のリアルタイム符号化", 情報科学技術フォーラム (FIT), I-025, pp.223-226 (2014)
- 15) 奥富 正敏, 田中 正行, 竹島 秀則, 松本 信幸: "画像超解像処理技術の最新動向", 信学誌, **61**, 11, pp.693-698 (2010)
- 16) T. Temizel and T. Vlachos: "Image Resolution Upscaling in the Wavelet Domain Using Directional Cycle Spanning", SPIE Journal of Electronics Imaging, **14**, 4 (2005)
- 17) D. Hasan and G. Anbarjafari: "IMAGE Resolution Enhancement by Using Discrete and Stationary Wavelet Decomposition", IEEE Transactions on Image Processing, **20**, 5, pp.1458-1460 (2011)
- 18) S. D. Babacan, R. Molina and A. Katsaggelos: "Variational Bayesian Super Resolution", IEEE Transactions on Image Pro-

cessing, **20**, 4, pp.984-999 (2011)

- 19) S. Villena, M. Vega, D. Babacan, R. Molina and A. Katsaggelos: “Bayesian Combination of Sparse and Non Sparse Priors in Image Superresolution”, Digital Signal Processing, **23**, 2, pp.530-541 (2013)
- 20) S. C. Park, M. K. Park and M. G. Kang: “Super-resolution Image Reconstruction: a technical overview”, IEEE Signal Processing Magazine, **20**, 3, pp.21-36 (2003)

まつ お やすたか
松尾 康孝 2001 年, 奈良先端科学技術大学院大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年, NHK 入局。大阪放送局を経て, 2004 年より放送技術研究所に勤務。主にスーパーハイビジョン映像の方式変換, 超解像処理, 圧縮符号化の研究に従事。2014 年, 早稲田大学大学院基幹理工学研究科博士後期課程修了。現在, 同研究所テレビ方式研究部研究員。2010 年, 本学会鈴木記念奨励賞受賞。博士 (工学)。正会員。

い わ む ら し ゅん す け
岩村 俊輔 2010 年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了。同年, NHK 入局。放送技術局を経て, 2011 年より放送技術研究所に勤務。主にフィルタバンクの設計, ロスレス画像符号化, 映像符号化の研究に従事。現在, 同研究所テレビ方式研究部研究員。博士 (工学)。正会員。

い ぐ ち か ず ひ さ
井口 和久 1993 年, 東京工業大学大学院理工学研究科修了。同年, NHK 入局。放送技術研究所にて, ハイビジョン映像の方式変換, 映像シーン記述, ワンセグおよびスーパーハイビジョンの映像圧縮符号化の研究に従事。現在, 同研究所テレビ方式研究部主任研究員。正会員。

さ か い し ん い ち
境田 慎一 1991 年, 早稲田大学大学院理工学研究科修了。同年, NHK 入局。放送技術研究所にて映像符号化, 映像処理の研究に従事。現在, 同研究所テレビ方式研究部上級研究員。博士 (工学)。正会員。