

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博 士 論 文

論 文 題 目

超高精細映像の映像方式変換とその応用に関する
研究

Video Conversion Methods and Their Application for
Ultra High-definition Television

松尾 康孝

Yasutaka MATSUO

情報理工学専攻 画像情報研究

2014 年 2 月

目次

第1章	序論	7
1.1	背景	7
1.2	デジタルシネマとスーパーハイビジョン	7
1.3	概論と課題	9
1.4	本論文の構成および概要	10
第2章	時間方向の映像方式変換	11
2.1	時間方向の映像方式変換の全体概要	14
2.2	時間軸双方向動き補正内挿法	16
2.2.1	従来方法	17
2.2.2	提案方法	18
2.2.3	評価	19
	PSNR測定評価	23
	主観評価	23
2.3	Bayer型画素構造を考慮した動き補正内挿法	28
2.3.1	原理	28
2.3.2	方法	31
2.3.3	評価	33
	主観評価	33
2.3.4	考察	38
2.4	むすび	39
第3章	空間周波数スペクトル解析と空間方向の映像方式変換	41

3.1	画像信号とその雑音成分の空間周波数スペクトル解析	42
3.2	Wavelet を用いた空間超解像法	46
3.2.1	信号雑音分離	46
3.2.2	信号成分超解像	49
3.2.3	雑音成分超解像と超解像信号成分との合成	52
3.2.4	評価	53
3.2.5	むすび	54
3.3	Wavelet 多重解像度成分間のレジストレーションを用いた空間超 解像法	55
3.3.1	信号成分超解像	56
3.3.2	評価	58
3.3.3	むすび	61
第4章	空間方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化	65
4.1	方法	65
4.2	評価	68
4.2.1	予備評価実験	68
4.2.2	本評価実験	70
4.3	むすび	71
第5章	階調方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化	74
5.1	提案法	75
5.1.1	階調削減	77
5.1.2	階調復元・最適化	78
5.1.3	評価	79
5.2	むすび	81
第6章	結論	83
	参考文献	89

表目次

1.1	デジタルシネマとスーパーハイビジョンの映像方式規格	8
2.1	動き検出範囲を時間軸双方向に拡張した動き検出法の動きベクトル検出条件	20
2.2	方式変換法の説明	21
2.3	画像の持つ動きの説明 (全画面画像)	23
2.4	PSNR 測定結果 (全画面画像の場合、[dB])	23
2.5	画像の持つ動きの説明 (動領域画像)	24
2.6	PSNR 測定結果 (動領域画像の場合、[dB])	25
2.7	5段階比較尺度評価用語	25
2.8	実験条件	26
2.9	方式変換法の説明	37
2.10	評価画像の持つ動きの説明	37
2.11	実験条件	37
3.1	超解像法	53
3.2	PSNR 測定結果 ([dB])	54
3.3	超解像法	61
3.4	PSNR 測定結果 ([dB])	62
4.1	実験条件	69
4.2	符号化／復号を行わない提案法における N 毎の PSNR 測定結果 ([dB])	69
4.3	PSNR 値 (15 フレーム平均値) ([dB])	70

5.1	階調削減・階調復元法	80
-----	----------------------	----

目次

2.1	フレーム間動き量と空間高周波パワーの関係	13
2.2	60 から 24 フレーム / 秒へのフレーム数変換の概要図	14
2.3	線形内挿	15
2.4	動き補正内挿	16
2.5	従来方法	17
2.6	提案方法	19
2.7	評価画像 (全画面画像)	22
2.8	評価画像 (動領域画像)	24
2.9	評価結果 (全画面画像の場合、修正 EBU 法に準じた方法による ヤードスティック算出結果)	27
2.10	評価結果 (動領域画像の場合、修正 EBU 法に準じた方法による ヤードスティック算出結果)	27
2.11	Bayer 型画素配列構造動画像	29
2.12	3 次元周波数スペクトル	30
2.13	Y,G 信号生成方法	31
2.14	評価画像 (全画面画像)	34
2.15	評価画像 (動領域画像)	35
2.16	評価結果 (動領域画像の場合、シェッフェの対比較法による ヤードスティック算出結果)	36
2.17	評価結果 (全画面画像の場合、シェッフェの対比較法による ヤードスティック算出結果)	39
3.1	評価画像	44

3.2	空間周波数解析結果	45
3.3	図 3.1(a)、(c)、(e)、(g) 内の信号成分がほぼ平坦な画像と、その空間周波数解析結果（直流 DC 成分は除く）	47
3.4	提案法全体図	48
3.5	信号雑音分離ユニットの詳細図	48
3.6	信号成分超解像ユニットの詳細図（Wavelet 超解像サブユニット）	50
3.7	信号成分超解像ユニットの詳細図（最適化サブユニット）	51
3.8	雑音成分超解像の詳細図	52
3.9	3.1 の超解像画像における切り出し画像	55
3.10	信号成分超解像の詳細図（レジストレーション超解像）	59
3.11	信号成分超解像の詳細図（最適化）	60
3.12	図 3.1 の (a) Nebuta, (b) children, (c) aerial 画像の超解像画像における切り出し画像	63
3.13	図 3.1 の (d) marathon, (e) Kumano, (f) fire 画像の超解像画像における切り出し画像	64
4.1	提案法全体図	66
4.2	提案法の符号化側処理	67
4.3	「Wavelet 超解像」サブユニットの詳細図	68
4.4	評価画像	72
4.5	従来法（MPEG-4 AVC/H.264 でそのまま符号化）と提案法の主観画質比較	73
5.1	提案法全体図	76
5.2	階調削減の詳細図	77
5.3	階調復元の詳細図	78
5.4	評価画像	79
5.5	図 5.2 内の「雑音分離画像抽出」サブユニットにおける雑音分離後の雑音除去画像」	80
5.6	疑似輪郭抑制効果	81
5.7	PSNR 測定結果	82

第1章

序論

1.1 背景

近年、カメラ、モニタ、通信技術など周辺技術の進歩により、映像の高精細化が進んでいる。映画では最大4Kの水平解像度を持つ高精細映像として、デジタルシネマ [1, 2] が実用化された。またテレビジョンでは8Kの水平解像度を持つスーパーハイビジョン [3, 4, 5, 6, 7, 8] が研究開発されている。スーパーハイビジョンでデジタルシネマ映像を放送する場合や、デジタルシネマでスーパーハイビジョン素材を使用する場合などでは、デジタルシネマとスーパーハイビジョンの映像方式変換が必要である。このため、本稿ではこれらの映像方式変換を目的とした研究を行う。

研究では、空間解像度、フレームレート、ビット深度、色などの方式変換の検討が必要である。表 1.1 にデジタルシネマとスーパーハイビジョンの方式規格を簡単に示す。1.2 節では、デジタルシネマとスーパーハイビジョンについて簡単に説明する。

1.2 デジタルシネマとスーパーハイビジョン

デジタルシネマは、従来のフィルム撮影に変わって固体撮像素子を持つカメラを用いて撮影し、編集、配信、上映にわたって全てデジタルで処理する映画システムである。またスーパーハイビジョンは従来のハイビジョン [9, 10] の16倍の空間解像度及び4倍のフレームレートを持つテレビジョンシステムで

ある。

近年、映画ではコンピューターグラフィックスの発達により、コンピューターグラフィックスを用いて従来の特撮等では実現が難しい高度な映像や特殊効果を作品中に導入することが、当たり前のように行われている。しかし従来のフィルム撮影映像では、映像フィルムを一旦デジタルデータに変換したのちデジタル加工処理を行い、再びフィルムに戻す作業が必要である。このため、手間および画質劣化が避けられない。また映像配信では、マスターフィルムからのフィルムコピー作業やその配達、フィルムの損傷への対応などの時間とコストが膨大である。これに対してデジタルシネマでは、撮影から編集、配信、上映を全てデジタルデータ上で行うことが可能なため、従来必要であったあらゆる無駄やコストを削減できる。デジタルシネマ規格は、2005年7月に Digital Cinema Initiatives (DCI), LLC[2] においてバージョン 1.0 が策定されており、最大 4K 解像度 (4,096 × 2,160 画素、アスペクト比 2.39:1 では 4,096 × 1,716 画素、アスペクト比 1.85:1 では 3,840 × 2,160 画素)、最大 24 フレーム/秒、最大 12 ビット/画素、CIE XYZ カラースペースなどとなっている。また最近では 60 フレーム/秒、120 フレーム/秒などの High frame rate digital cinema 規格も追加されている。

また近年、テレビジョンでは従来のアナログハイビジョン放送に変わって、デジタルハイビジョン放送が衛星放送にて 2000 年 12 月に開始され、地上放送でも 2003 年 12 月には東京、大阪、名古屋にて開始された。さらにはスーパー

表 1.1 デジタルシネマとスーパーハイビジョンの映像方式規格

パラメータ	デジタルシネマ	スーパーハイビジョン
解像度	最大 4,096×2,160 画素 (例: 3,840×2,160 画素)	7,680×4,320 画素
フレームレート	最大 120 フレーム/秒 (例: 24, 60, 120 フレーム/秒)	最大 120 フレーム/秒 (例: 60, 120 フレーム/秒)
ビット深度	最大 12 ビット/画素 (例: 8, 10, 12 ビット/画素)	最大 12 ビット/画素 (例: 8, 10, 12 ビット/画素)

ハイビジョン試験放送が2016年に開始される予定である。超高精細映像であるスーパーハイビジョンは、画面高さの0.75倍程度の視距離でも視覚特性上画素構造が判別できないため、将来の70インチを超える大型モニタや新聞・図鑑のようなタブレット・折り曲げ可能な端末において、映像に包み込まれるような臨場感の高い映像を楽しむことも可能である。また画面上に多くの情報を表示することが可能であるため、ハイブリッドキャスト [11] と組み合わせたサービスなど、多くの可能性を秘めている。スーパーハイビジョン規格は、2013年8月に International Telecommunication Union Radiocommunications Sector (ITU-R) BT. 2020[8] にて国際規格として策定されており、8K 解像度 (7,680×4,320 画素)、最大 120 フレーム／秒、最大 12 ビット／画素、ITU-R BT. 2020 カラースペースなどとなっている。

1.3 概論と課題

映像方式変換は、古くから NTSC、PAL、SECAM 方式などの各国間で異なるテレビジョン映像方式を変換する目的で研究開発されてきた。例えば PAL 方式の映像を NTSC 方式に変換するには、走査線数やフレームレート変換が必要である。他にも映画をテレビジョンで放送するために、フレームレート変換法として 2-3 プルダウン方式などが開発された。また近年では、ハイビジョンテレビでの DVD 映像の視聴、さらには 4K テレビでのハイビジョン放送の視聴のために、「超解像技術」が盛んに研究開発されている。

さてスーパーハイビジョン映像の特徴として、高解像度、高フレームレート、高ビット深度という点があげられる。さらに高精細映像は、同一フレーム内に多くのオブジェクトが含まれるなどの映像特徴を持つ。そしてデジタル映像では、単板撮像素子にカラーフィルタを用いた Bayer 型画素構造が用いられる場合があるなど、画素構造も変化している。これより高精細映像の映像方式変換では、上記を考慮した変換法の検討が有効である。

また映像方式変換においては、空間方向と時間方向の処理が特に重要である。これは単純な線形フィルタ処理だけでは、特にアップサンプリングにおいて、ぼやけ等の画質劣化が生じるためである。また時間方向のフレームレート変換処理では、フレームレート変換数が整数倍でない場合は、ジャーキネスの

発生により動きの滑らかさが失われるという課題もある。

階調方向の処理では、通常の明るさの照明下で現行の輝度、コントラスト比のモニタで画像を見る条件下では8ビット／色の階調があれば、特殊なグラデーション画像など以外で疑似輪郭等の階調不足を知覚することは少ない。また11～12ビット／色の階調があれば、 $0.1\sim 100\text{ cd/m}^2$ の輝度値にわたってほぼ疑似輪郭を知覚することはない[12]。しかし暗部のグラデーション領域などでは、より多くの階調がある事が望ましく、将来11ビット以上の階調が表現でき低輝度な黒がきちんと再現できる高コントラストなカラーモニタが開発されれば、さらに多くの階調数が必要になる可能性もある。

1.4 本論文の構成および概要

前記課題に対応するため、第2章と第3章では時間方向と空間方向の映像方式変換法を提案する。第2章では、時間方向の映像方式変換法を提案する。第3章では、デジタルシネマやスーパーハイビジョン画像の周波数スペクトル解析を行い、その結果を基に空間方向の映像方式変換法を提案する。

第4章と第5章ではこれまでに行った映像方式変換の応用として、将来のスーパーハイビジョン放送における超高圧縮符号化を目指した、映像方式変換を用いる映像符号化法を提案する。第4章では、空間方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化法を提案する。第5章では、階調方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化法を提案する。

最後に第6章では、本論文をまとめる。

第2章

時間方向の映像方式変換

時間方向の映像方式変換に関しては、フレームレート変換で変換元と変換先のフレームレートが整数倍にならない場合、変換先の映像において動領域の解像度や動きの滑らかさに課題が残る場合が多い。

そこで第2章では、60フレーム/秒のスーパーハイビジョンからフレームレートが整数倍にならない24フレーム/秒のデジタルシネマへの方式変換法の開発を行った。開発では現行のスーパーハイビジョンやハイビジョンシステムを考慮して、デジタルシネマ規格に入る水平3840画素×垂直2160ライン(アスペクト比1.778:1(16:9))、24フレーム/秒の順次走査映像をデジタルシネマへ応用が可能な映像フォーマットとし、変換先のフォーマットとした。また、カラリメトリや1画素のビット深さは、スーパーハイビジョンシステムのうち従来のハイビジョンシステムと同じBT.709[10]に準拠のものとした。

従来の方式変換研究[13, 14, 15, 16, 17]では、1950年代後半頃まで映像の再撮像方式による変換が主流であったが、1960年代に入ると全電子式の時代となり、NHKではNTSC-PAL方式変換装置を開発しローマオリンピックに使用した。1967年には遅延線切り替え方式による白黒テレビ用NTSC-PAL方式変換装置が開発された。1980年代に入るとハイビジョン方式が開発され、1986年にはNHKでハイビジョン→PAL方式変換装置が開発された[18, 19]。また1992年には、動き補正技術[20]を用いたハイビジョンと走査線1250本、50Hzの欧州の高品位テレビ方式との方式変換装置が開発された[21, 22]。さらに2006年には、英国BBCで動き補正内挿技術を用いた方式変換器がFIFAワールドカップに使用

された。近年の研究では、MPEG-4 AVC/H.264 や MPEG-2 など符号化の世界で広く動き検出が使われている。

- (1) 線形フィルタ処理による線形内挿法
- (2) 動きベクトルを用いる動き補正内挿法

(1) の線形内挿法は演算および装置は比較的単純であるが、動き画像の輪郭部のぼやけなどにより変換画質は十分なものであるとは言えない。また、(2) の動き補正内挿法によるフレーム数変換は演算および装置は複雑になるが、動きベクトルが正しく検出されれば線形内挿法のような動き画像の輪郭部のぼやけは発生せず、良好な画質が得られる。

動き補正内挿法は、従来方法でハイビジョンの方式変換に用いられている。しかし面積比でハイビジョンの16倍高精細なスーパーハイビジョンにおいては、より高精度な動き補正内挿法の導入が求められる。また動きベクトルの検出や動き補償技術 [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39] は、方式変換以外にも MPEG-2[40] や MPEG-4 AVC/H.264[41] 等の高能率符号化で導入されており一定の画質が得られているが、検出精度がそのまま変換画質に影響する方式変換への適用においては、高能率符号化の場合と比較して、より高精度かつ高確度に動きベクトル検出を行う必要がある。さらに [42] より、デジタルシネマやスーパーハイビジョンは高精細映像のため、100画素/フレームを超えるような大きな大きな動きが存在し、そのような箇所ではフレーム間相関が低く動き補正内挿が難しいことが分かる。しかし図 2.1 に示すように、このような大きな動きでは動きぼやけにより空間高周波成分が失われているため、線形フィルタを用いたフレーム内挿で十分である場合が多い。一方でオブジェクトの微小な動き、またはカメラぶれなどで1から数画素/フレームの小さな動きも多く存在するため、このような動きを高精度かつ高確度に検出する動き補正内挿法が求められる。そこで本論文では、動きベクトル検出の精度と確度を高めるため、従来方法に対して動き検出範囲を時間軸双方向に拡張し、かつ連続するフレーム間の同一物体の動きベクトルの等速度性を仮定した動きベクトル確度判定法による動き補正内挿法を導入する。さらにスーパーハイビジョンには赤、緑、青色信号全てが8Kの水平解像度を持つフル解像度スー

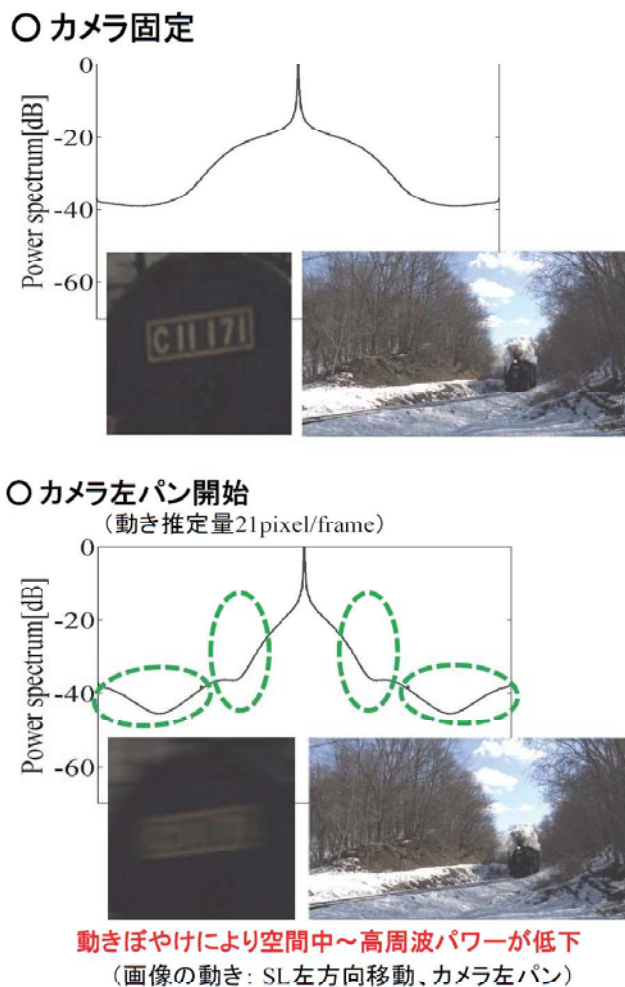


図 2.1 フレーム間動き量と空間高周波パワーの関係

パーハイビジョンや、赤、青、緑色信号が Bayer 型画素構造で 8K の水平解像度を持つデュアルグリーンスーパーハイビジョン [43] などがあるが、この Bayer 型画素配列に着目して緑色信号が持つ高い空間周波数を生かした動き補正内挿法を導入する。

以上より本章では、はじめに 2.1 節にてスーパーハイビジョンからデジタルシネマへの時間方向の映像方式変換法の全体概要を説明する。そして 2.2 節にて従来方法に対して動き検出範囲を時間軸双方向に拡張し、かつ連続するフレーム間の同一物体の動きベクトルの等速度性を仮定した動きベクトル確度判定法による動き補正内挿法を説明し、主観評価実験によりその有効性を検証する。さらに 2.3 節にて Bayer 型画素構造が持つ緑色信号の高い空間周波数を生か

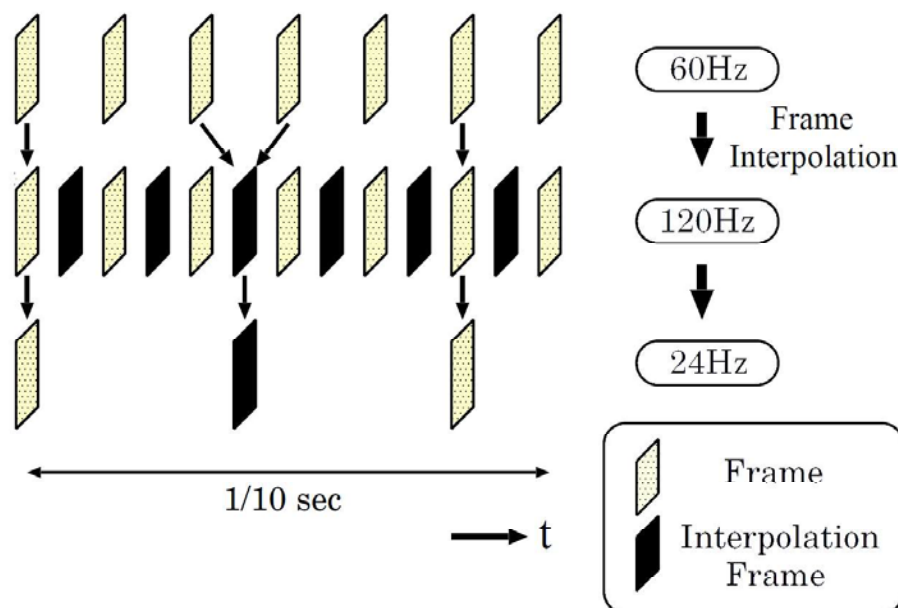


図 2.2 60 から 24 フレーム/秒へのフレーム数変換の概要図

した動き補正内挿法について説明し、2.2と2.3を用いたスーパーハイビジョンからデジタルシネマへの方式変換法について全体を説明する。そして、主観評価実験によりその有効性を検証する。最後に2.4節で本論文の内容を統括し、今後の課題について述べる。

2.1 時間方向の映像方式変換の全体概要

スーパーハイビジョンからデジタルシネマへの映像方式変換では、動き補正内挿に用いる動きベクトルを高精度に検出するため、フレーム数を60から24フレーム/秒に変換後、水平・垂直標本化周波数を各々1/2とする。以下に概要を示す。

図2.2に示すスーパーハイビジョンの60フレーム/秒からデジタルシネマの24フレーム/秒へのフレーム数変換では、60フレーム/秒の動画像をフレーム内挿処理により60と120の最小公倍数である120フレーム/秒の動画像に変換し、5:1の間隔でフレーム間引きを行うことで24フレーム/秒へ変換する。

フレーム内挿処理では、図2.3に示す「線形内挿」と図2.4に示す「動き補正内挿」を組み合わせて用いる。ここで内挿フレーム上の任意画素位置において、

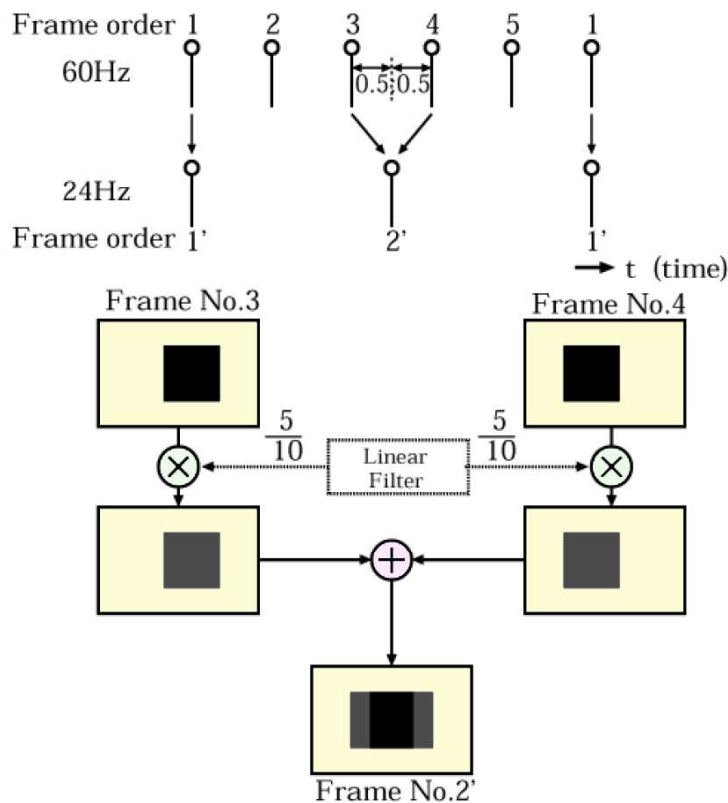


図 2.3 線形内挿

内挿フレームの前後フレームから求めた動きベクトルが正しく検出されれば動き補正内挿、誤検出されれば線形内挿を用い、スーパーハイビジョンの60フレーム/秒のフレーム間の内挿比0.5の時間位置に内挿フレームを作成する。このため動きベクトルが誤検出された場合、内挿フレーム画像にブロック状の孤立点誤りや線形内挿による動き画像の輪郭部ぼやけなどによる画質劣化が生じ、これが本方式変換における画質劣化の最大要因となる。

そこで提案法では、2.2節と2.3節の方法を導入し、動きベクトル検出精度と確度の向上を図る。

また空間標本化周波数変換では、スーパーハイビジョンの水平7,680画素×垂直4,320画素の水平・垂直標本化周波数を各々1/2する低域通過フィルタを適用後に2:1画素間引きを行い、デジタルシネマの水平3,840画素×垂直2,160画素へ変換する。低域通過フィルタは遮断周波数0.55、51タップの1次元デジタルフィルタを設計し、水平、垂直各方向に適用する。

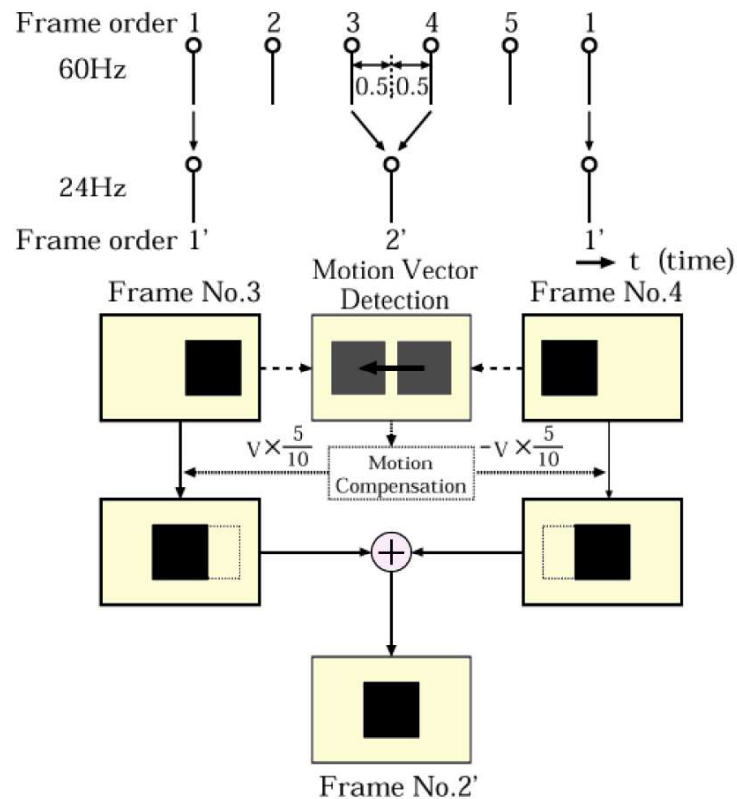


図 2.4 動き補正内挿

2.2 時間軸双方向動き補正内挿法

時間方向の映像方式変換の従来方法では、動き補正内挿における動きベクトル検出について、主に内挿フレーム位置の前後フレームを用いて時間軸片方向に動きベクトルを求めている。これに対し [44] は、動き物体が他の物体に隠れたりフレームアウトする場合でも正確に内挿フレームを得るために、内挿フレーム位置の前後フレームを用いて時間軸双方向に動きベクトルを求める提案を行っている。提案法ではさらに、動画像における前景や背景の同一物体の動きベクトルは連続するフレーム間で等速度性が高い事を利用して、内挿フレーム位置の前後フレーム位置の前後± m フレームを用いて時間軸双方向に動きベクトルを求める事で動き検出確度を高めた動き補正内挿法を導入する。

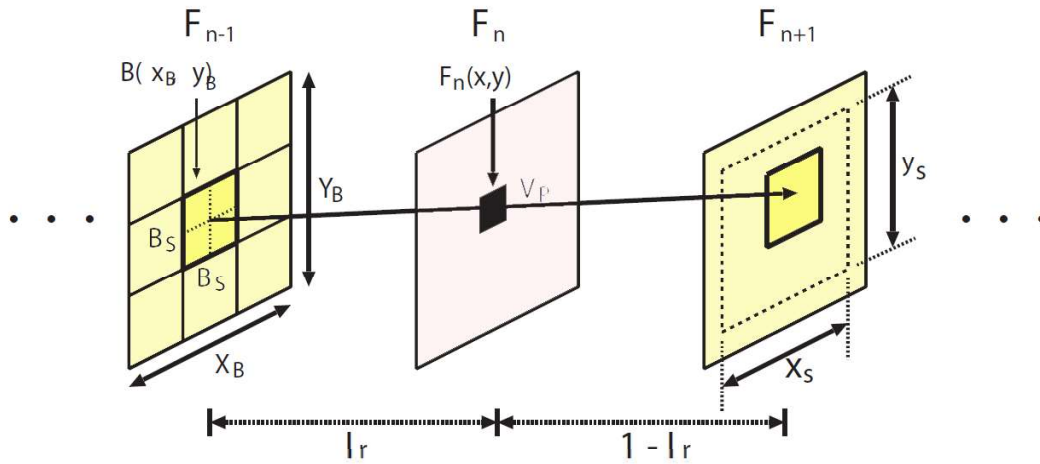


図 2.5 従来方法

2.2.1 従来方法

図 2.5 に従来方法を示す。同図に示すように、任意時間位置を $N = \{\dots, n-1, n+1, \dots\}$ 、時間位置 N のフレームを F_N とし、フレーム F_N 上の水平 x 画素、垂直 y ライン位置を $(x, y) \in F_N$ 、その画素値を $(x, y) \in P_N$ とする。ここで画素値 P_N は、モノクロ動画像では輝度値 Y 、カラー動画像では色信号 R, G, B (あるいは輝度色差信号 Y, P_b, P_r) である。

今、 F_{n-1} と F_{n+1} 間の内挿比 $I_r (0 < I_r < 1)$ の時間位置に内挿フレーム F_n を想定する。この際、動き補正内挿による内挿フレーム F_n 上の画素値 $P_n(x, y)$ は、 $F_n(x, y)$ を通る F_{n-1} と F_{n+1} 間で求めた動きベクトル値を水平 x_v 画素、垂直 y_v ライン $(x_v, y_v) \in \vec{V}_P$ とすると、式 (2.1) で算出される。

$$P_n(x, y) = (P_{n-1}(x - x_v/I_r, y - y_v/I_r) + P_{n+1}(x + x_v/I_r, y + y_v/I_r))/2 \quad (2.1)$$

また式 (2.2) に動きベクトル \vec{V}_P の算出式を示す。式 (2.2) 中の F_C, F_R は動きベクトル検出時の参照元フレーム F_C と参照先フレーム F_R で、ここでは $F_C = \{F_{n-1}\}, F_R = \{F_{n+1}\}$ となる。関数 C は参照元フレーム F_C 上のブロック x_B, y_B を求める処理である。 $\min(C)$ は評価関数 C の最小値を求める関数で

ある。

$$\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) = \{(x_v, y_v) | \min(C(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R))\} \quad (2.2)$$

動きベクトル \vec{V}_P は、まずフレーム F_{n-1} 上で水平 B_s 画素 \times 垂直 B_s ラインの方形領域を水平 B_s 画素、垂直 B_s ラインずつシフトして $X_B \times Y_B$ 個のブロック $B(x_B, y_B)$ ($0 \leq x_B < X_B, 0 \leq y_B < Y_B$) に分割し、任意の $B(x_B, y_B)$ についてフレーム F_{n+1} 上の同じ位置を中心とした水平 $\pm x_s$ 画素、垂直 $\pm y_s$ ラインの範囲を式 (2.3) を用いて探索する。そして、一致度評価関数 C を最小にする x_v, y_v を $B(x_B, y_B)$ の動きベクトル値として採用する。

$$\begin{aligned} C(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) = & \\ & \sum_{i=0}^{B_s-1} \sum_{j=0}^{B_s-1} |F_C(x_v \cdot B_s + i, y_v \cdot B_s + j) \\ & - F_R(x_v \cdot B_s + i + x, y_v \cdot B_s + j + y)| \quad (2.3) \\ & (\text{但し、} F_C = \{F_{n-1}\}, F_R = \{F_{n+1}\}) \end{aligned}$$

2.2.2 提案方法

図 2.6 に提案方法を示す。同図に示すように、動きベクトル検出を F_n を基準に時間軸正・負両方向へ $\pm M$ ($m = \{2, 3, \dots, M\}$) フレームで行った結果を用いて、従来方法で求めた $F_n(x, y)$ に存在する \vec{V}_P の動きベクトル確度判定を行い、内挿フレームを作成する。

具体的には、まず F_n から見て時間軸正方向では、式 (2.2) において $F_C = \{F_{n-1}\}, F_R = \{F_{n+m}\}$ の動きベクトルを算出する。また時間軸負方向では、式 (2.2) において $F_C = \{F_{n+1}\}, F_R = \{F_{n-m}\}$ の動きベクトルを算出する。

次に、算出した動きベクトルの確度判定を行う。いまフレームインデックス k を $k = \{m+1, m+2, \dots, M\}$ とすると、 F_n を基準として時間軸正方向では $F_n(x, y)$ に存在する全ての \vec{V}_P が式 (2.4) を満足するか否かを判定する。また F_n から見て時間軸負方向では、 $F_n(x, y)$ に存在する全ての \vec{V}_P が式 (2.5) を満足するか否かを判定する。なお式 (2.4)、(2.5) 中の $(\alpha, \beta) \in A_r$ は、 $\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_{n-1}, F_{n+1})$ に対する $\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R)$ のずれの許容範囲であり、水平 α 画素、垂直

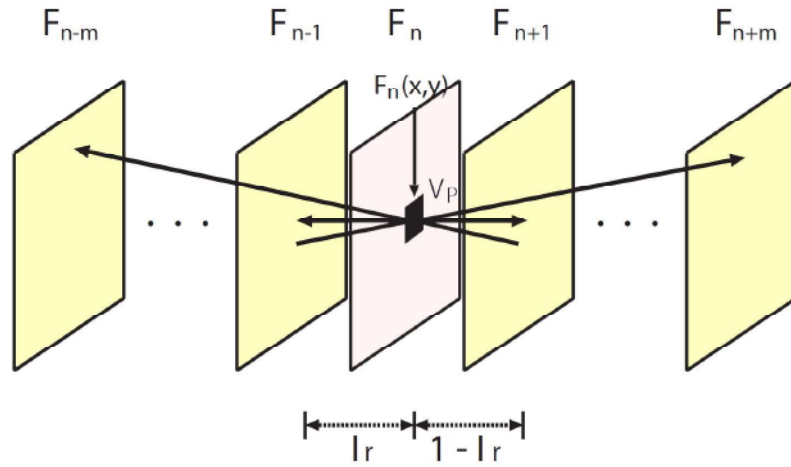


図 2.6 提案方法

β ラインとする。

$$\begin{aligned} & |\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_{n-1}, F_{n+1}) \cdot I_r - \\ & \vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) \cdot (I_r/k)| \leq |A_r| \end{aligned} \quad (2.4)$$

(但し, $F_C = \{F_{n-1}\}, F_R = \{F_{n+m}\}$)

$$\begin{aligned} & |\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_{n+1}, F_{n-1}) \cdot (1 - I_r) - \\ & \vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) \cdot ((1 - I_r)/k)| \leq |A_r| \end{aligned} \quad (2.5)$$

(但し, $F_C = \{F_{n+1}\}, F_R = \{F_{n-m}\}$)

$F_n(x, y)$ に存在する全ての \vec{V}_P において式 (2.4)、(2.5) が成り立つ場合、 $\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_{n-1}, F_{n+1})$ は動きベクトル検出確度が高いとして採用し、 $P_n(x, y)$ は式 (2.1) により動き補正内挿で求める。

また成り立たない場合は、 $\vec{V}_P(x_v, y_v, x_B, y_B, F_{n-1}, F_{n+1})$ は動きベクトル検出確度が低いとして不採用とし、 $P_n(x, y)$ は線形内挿で求める。

2.2.3 評価

2.2.2 節で説明した方法を計算機シミュレーションで実装し、60 から 24 フレーム/秒へフレーム数変換した画像の評価実験を行った。表 2.1 に、実装に用いた各種パラメータを示す。

表 2.1 の動き検出精度については、本論文はスーパーハイビジョンから縦横

表 2.1 動き検出範囲を時間軸双方向に拡張した動き検出法の動きベクトル検出条件

ブロックサイズ B_s	水平 16 画素 × 垂直 16 ライン
動き検出精度	整数画素精度
探索範囲	$x_s = \pm 32$ 画素、 $y_s = \pm 32$ ライン (ブロック中心位置より)
内挿比 I_r	0.5

とも 1/2 倍の解像度となるデジタルシネマへの方式変換をターゲットとしており、スーパーハイビジョン空間解像度で整数画素精度の動き検出を行うことはデジタルシネマ空間解像度から見ると半画素精度で動き検出を行う事となるため、ここでは動き検出精度を整数画素精度とした。

社団法人映像情報メディア学会のハイビジョン・システム評価用標準動画像(以下、ITE 標準動画像)60 シーケンス内のほとんどの水平方向動きベクトル値は、60 画素/フレーム以下である事が測定されている [45]。この値は、毎秒 30 フレームのハイビジョンにおいて、1 秒間にほぼ画面の端から端へ横切る速さである。この結果を参考にして、本実装の探索範囲は水平 $x_s = \pm 32$ 画素、垂直 $y_s = \pm 32$ ラインと設定した。

また時間軸方向の動きベクトル検出範囲 m の最適値を、計算量も含めて考慮する必要がある。2.2.2 で説明した方法は、動画像における前景や背景の同一物体の動きベクトルは連続するフレーム間で等速度性が高いことを利用しているため、一般の動画像が持つ前景や背景の同一物体の動きベクトルの等速度性を吟味する必要がある。ITE 標準動画像の画像シーケンス “Mobile & Calender” と “Flower garden” を対象として、背景や前景の同一の物体を小領域で抜き出した画像において連続する 1,3,5,7,9 フレーム間の動き量の標準偏差を求めた結果が報告されている [46]。この結果は、標準偏差が小さいほど、背景や前景の同一物体の動きベクトルは等速度性が高く、動き検出範囲を時間方向に拡張した際の検出確度が向上することを示している。従って、両画像内のほぼ全ての小領域においてフレーム数の増加につれて動き量の標準偏差が小さくなるが、その値はフレーム数 3 以上においてほぼ同一値となる。以上より、実際の計算時間も

表 2.2 方式変換法の説明

変換法名称	変換方法
A:24Hz 間引法	120Hz 動画像を時間方向に 5:1 の割合で間引いた 24Hz 画像
B:提案方法	120Hz 動画像を時間方向に 2:1 の割合で間引いた 60Hz 画像を, 2.2.2 節の提案方法により変換した 24Hz 画像
C:従来方法 (双方向動き検出)	120Hz 動画像を時間方向に 2:1 の割合で間引いた 60Hz 画像を, 文献 [44] の動き検出法を用いて変換した 24Hz 画像
D:従来方法 (片方向動き検出)	120Hz 動画像を時間方向に 2:1 の割合で間引いた 60Hz 画像を, 2.2.1 節の従来方法により変換した 24Hz 画像
E:線形内挿法	120Hz 動画像を時間方向に 2:1 の割合で間引いた 60Hz 画像を, 線形内挿法により変換した 24Hz 画像
F:2-3 間引法	120Hz 動画像を時間方向に 2:1 の割合で間引いた 60Hz 画像を, 2-3-2-3... のフレーム間隔で間引いた 24Hz 画像

考慮し $m = 2$ として実装した。また、式 2.4、2.5 における A_r は 2 とした。これは [45] において動きの多い代表画像「No.20 サッカー」を参考に、同一軸方向の動きについて $m = 2$ の条件下で 4 画素/フレームまでの等加速度運動を許すもので、この場合、静止状態から 15 フレーム間で 60 画素/フレーム近くに加速する。

評価用画像は、ハイビジョンハイスピードカメラで撮影した水平 1920 画素 × 垂直 1080 ライン、120 フレーム/秒順次走査、1/120[sec] シャッタの 3 種類のモノクロ画像 “Train”、“Metronome”、“Rotationdisk” 各画像 300 フレームを用い、表 2.2 に示す 6 種類の方式変換法で 24Hz へ変換した動画像を用いる。図 2.7 に評価画像を示す。表 2.3 に評価画像の持つ動きについて説明する。



(a) Train



(b) Metronome



(c) Rotationdisk

図 2.7 評価画像 (全画面画像)

表 2.3 画像の持つ動きの説明 (全画面画像)

画像名	動きの説明
Train	写真貼付列車が水平方向に等速運動
Metronome	バーコード貼付メトロノーム針が振子運動
Rotationdisk	写真吊下の円盤が時計方向に回転

(※ 3 画像ともカメラ固定)

表 2.4 PSNR 測定結果 (全画面画像の場合、[dB])

	画像名		
	Train	Metro.	R.disk
B:提案方法	34.8	34.3	33.8
C:従来方法 (双方向)	33.8	34.1	33.2
D:従来方法 (片方向)	33.6	34.1	32.9
E:線形内挿法	33.1	33.7	31.8
F:2-3 間引法	32.6	33.4	32.3

PSNR 測定評価

表 2.2 の **A** を基準画像として、**B,C,D,E,F** の PSNR 値の 120 フレーム (5 秒) 間の平均値を求めた。表 2.4 に結果を示す。結果、**B** は 3 種類の画像間で性能差が少なく、**C,D,E,F** と比較して良好な結果を得た。

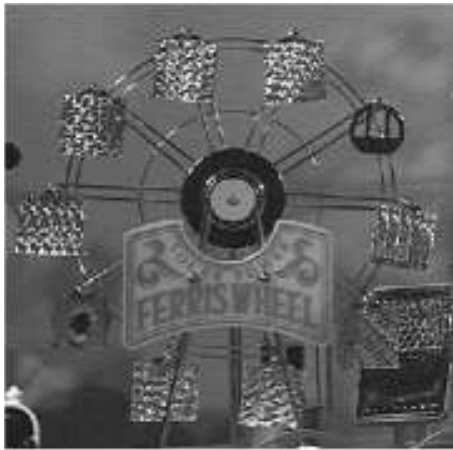
また、**A** に対する **B,C,D,E,F** の画質劣化は画像フレーム内の動領域に現れるため、画面内の動領域画像についても PSNR 値を調べた。図 2.8 に用いた動領域画像を示す。表 2.5 に動領域画像の持つ動きについて説明する。表 2.6 に結果を示す。結果より、**B** は **C,D,E,F** と比較して良好な値を得ている。以上より、**B** は **C,D,E,F** に対して画質が良好である可能性が高い事を示した。

主観評価

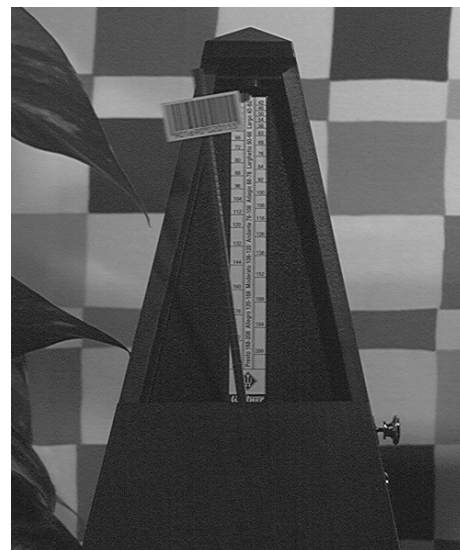
表 2.2 に示す **B,C,D,E,F** の画質劣化要因について考察する。**B** は動き検出精度と確度が高い場合、**A** と遜色ない評価が得られる事が推測される。また **B** に



(a) Train(Only)



(b) Ferris Wheel



(c) Metronome(Only)

図 2.8 評価画像 (動領域画像)

表 2.5 画像の持つ動きの説明 (動領域画像)

画像名	動きの説明
Train(Only)	写真貼付した列車が水平方向に等速運動
Ferris Wheel	写真貼付した観覧車が回転運動
Metro.(Only)	バーコード貼付したメトロノームが振子運動

(※ 3 画像ともカメラ固定、動き部位のみ切出)

対する **C,D** の画質劣化は、**C,D** の動き検出確度が **B** より低い事に起因する動き内挿エラーであり、注目する動き領域に 1 箇所でも目立つ内挿エラーが存在

表 2.6 PSNR 測定結果 (動領域画像の場合、[dB])

	画像名		
	T.only	F.Wheel	M.only
B:提案方法	31.1	35.6	31.8
C:従来方法 (双方向)	30.7	35.3	31.6
D:従来方法 (片方向)	30.6	34.8	31.1
E:線形内挿法	30.1	32.7	29.0
F:2-3 間引法	28.8	32.8	29.2

表 2.7 5 段階比較尺度評価用語

尺度値	品質尺度	Quality Scale
+2	良い	Better
+1	やや良い	Slightly better
0	同じ	The same
-1	やや悪い	Slightly worse
-2	悪い	Worse

する場合、PSNR 値が **B** とほぼ同じ場合でも主観評価値を大きく下げる事が予想される。また **B,C,D** において動き検出確度が低い内挿フレーム内画素位置では線形内挿を行うため、**E** は **B,C,D** における全ての内挿画素位置において線形内挿を行った場合と同等となる。**F** は内挿フレームとして時間位置が 1/120 秒ずれているフレームを用いているため、動きの不連続性による画質劣化が生じる。

以上より、従来方法 **C,D** に対する提案方法 **B** の優位性を示すため、総合画質について **A** を基準画像とし、**B,C,D,E,F** を評価画像として評価を行った。評価は図 2.7 と図 2.8 に示す全画面画像と動領域画像各 3 画像を用いて画像の専門家 6 名により修正 EBU 法 (ITU-R:勧告 500-10[47] の EBU 法 Variant II)[48] に準じた方法で行い、結果を分散分析法で解析した。評価尺度は、表 2.7 の 5 段階品質尺度を用いる。実験条件は表 2.8 の通りである。

表 2.8 実験条件

視聴条件	標準視聴条件 (CCIR Rec.500-10) に準ずる
モニタ	直視型 CRT SONY BVM-F24
画面サイズ	24 インチ
視距離	3.0H (H は画面高)
その他	水平 1920 画素×垂直 1080 ライン、24Hz 画像を零次補間 48Hz で表示

図 2.9 に全画面画像を用いた場合の結果を示す。同図は横軸の右側ほど評点が高い。また同図において信頼区間 95% のヤードスティック値を用いて検定した結果、有意差が認められる変換法間を **X** 印で示す。結果、**B** と **C,D,E,F** 間に有意差は存在しなかった。また画像によっては **D** は **E** より低い評価を得る結果となった。

図 2.10 に動領域画像を用いた場合の結果を示す。同図の見方は図 2.9 と同じである。結果、**B** と **C,D,E,F** 間には 3 画像中 2 画像において有意差が存在した。

以上の結果より、本節提案方法となる動きベクトル検出範囲を内挿フレームの前後 ± 2 フレーム間に拡張し双方向に動きベクトル検出を行うフレーム数変換法は、内挿フレームの前後フレームより片方向に動きベクトル検出を行う従来法より画質が優れている事を示し、本節提案方法の有効性が確かめられた。さらに提案法は、線形内挿法や 2-3 間引法よりも画質が優れており、24Hz 間引法に最も近い画像が得られている事を示した。

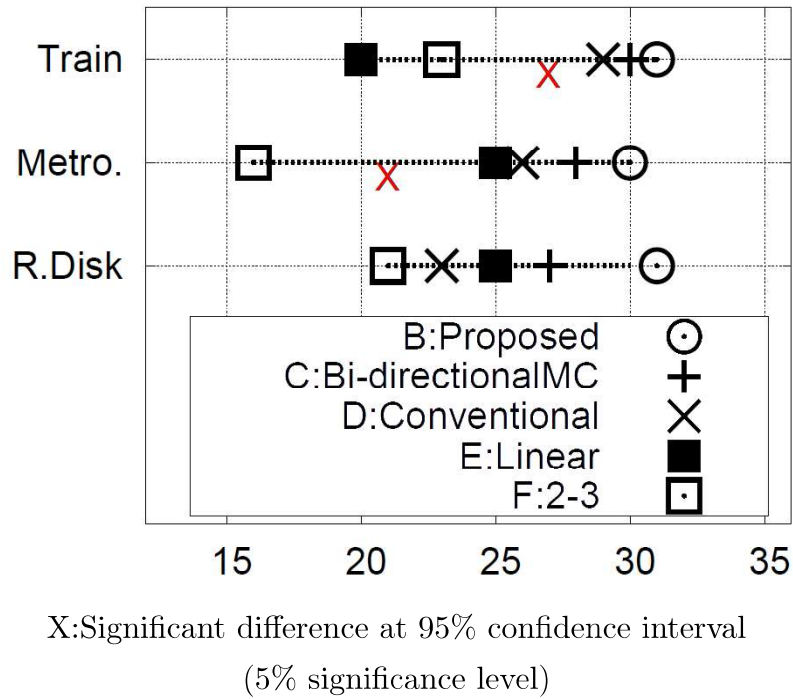


図 2.9 評価結果 (全画面画像の場合、修正 EBU 法に準じた方法によるヤードスティック算出結果)

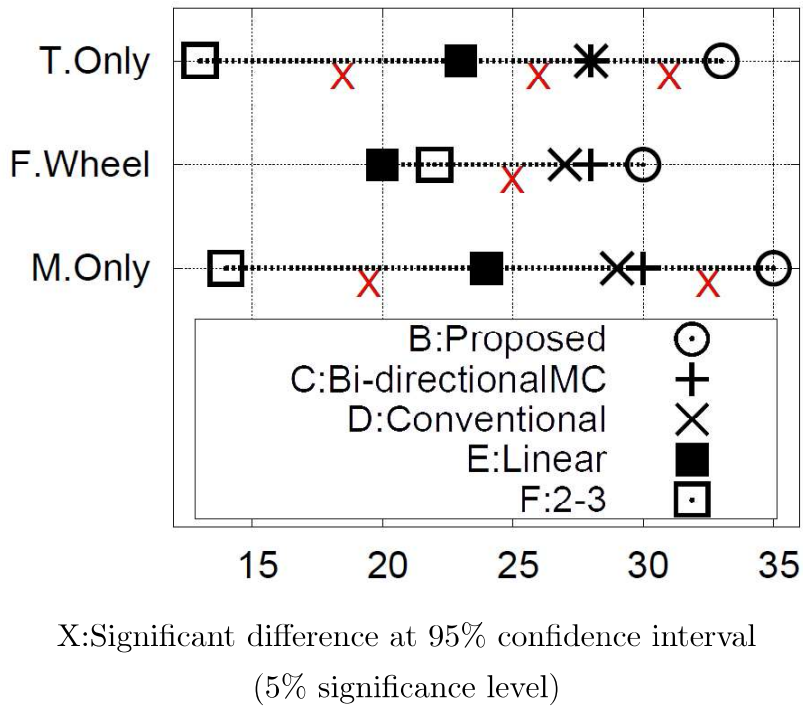


図 2.10 評価結果 (動領域画像の場合、修正 EBU 法に準じた方法によるヤードスティック算出結果)

2.3 Bayer 型画素構造を考慮した動き補正内挿法

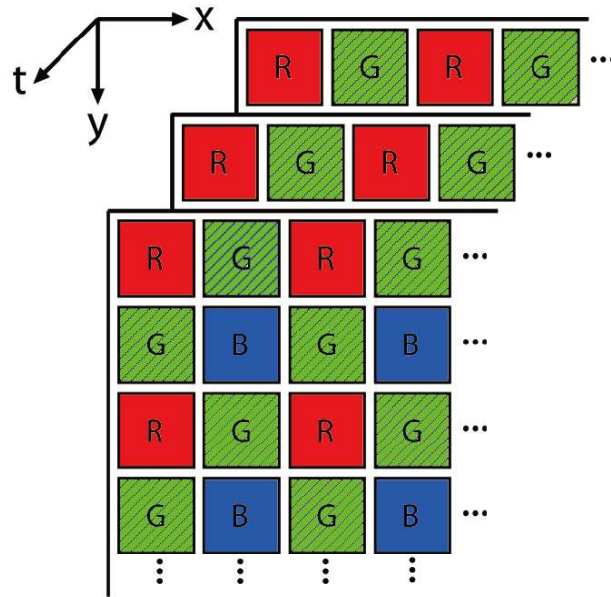
2.2では、動き補正内挿従来方法に対して動き検出範囲を時間軸双方向に拡張し、かつ連続するフレーム間の同一物体の動きベクトルの等速度性を仮定した動きベクトル確度判定法による動き補正内挿法の導入により高画質なフレーム数変換が可能である事を示したが、2.2の方法は赤、緑、青色信号が同じ標本位置に存在する正方格子型画素構造を想定している。このため、これを現行の Bayer 型画素構造を持つスーパーハイビジョンに適用する際は、以下に説明する Bayer 型画素構造に着目した高精度動きベクトル検出法を組み合わせ導入する。

2.3.1 原理

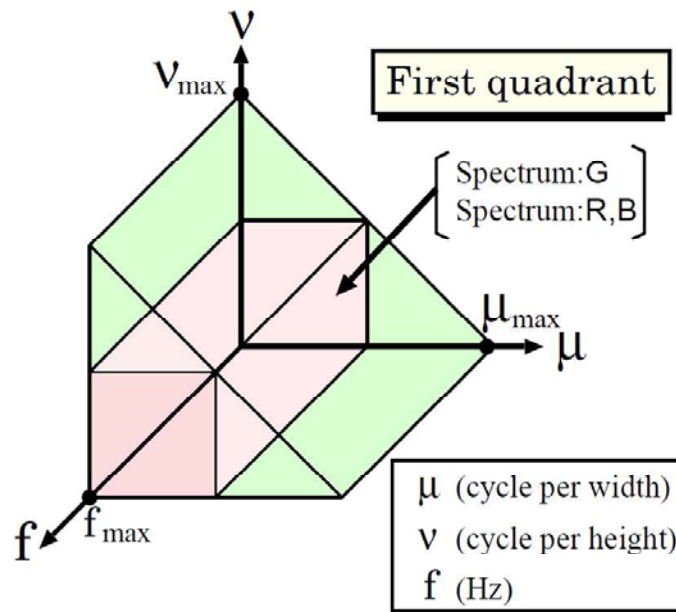
図 2.11(a) に示す Bayer 型画素配列 [49, 50, 51] 動画像は、緑色（以下、G）信号は quincunx(5 の目) 型、赤、青色（以下、R,B）信号は正方格子型の標本化構造であり、R,B は G の半分の水平・垂直標本化周波数である。故に、G 信号は R,B 信号より高い空間周波数表現が可能であり、高い空間周波数を持つ画像が微小な動きを行う場合、G 信号はその動きを高精度に検出可能である。

さて、図 2.11(b) の Bayer 型画素配列動画像の 3 次元周波数スペクトルにおいて、フレーム内の画像 $g(x, y)$ がフレーム間で速度 (x_v, y_v) で移動する場合の周波数スペクトルが存在する平面は、[52, 53, 54, 55] より原点を通る平面 $x_v\mu + y_v\nu + f = 0$ のみに存在する。図 2.12(a) 中斜線部に $x_v = 1, y_v = 1$ 、図 2.12(b) 中斜線部に $x_v = 2, y_v = 2$ の場合を示す。なお、速度 x_v, y_v により同図中 θ_x, θ_y が変化する。

さて、図 2.12 中の●印に示すような、水平方向に $\mu_{max}/2$ (cycle per width)、あるいは垂直方向に $\nu_{max}/2$ (cycle per height) 以上の空間周波数成分を持つ画像のフレーム間での $x_v = 1, y_v = 1$ の動きをカメラで撮影した場合、同図から理解されるように G 信号では●印のような周波数成分を持つフレーム内画像 g の動きベクトル検出精度は高い。一方、R,B 信号では動きベクトル検出精度は低い。また、カメラ等の前置フィルタの不完全さによる折り返し成分は、動きベクト



(a) Bayer 型標本化構造



(b) 3次元周波数スペクトル

図 2.11 Bayer 型画素配列構造動画像

ル検出時において R や B の動きベクトル検出精度を低下させる原因となる可能性がある。ただし、フレーム間で $x_v \geq 2, y_v \geq 2$ の動きがあった場合は R, B および G とともに解像度は十分であり、このような課題は発生しない。

故に、 $|x_v| < 2$ または $|y_v| < 2$ の場合は G 信号を用いて動きベクトル検出を行

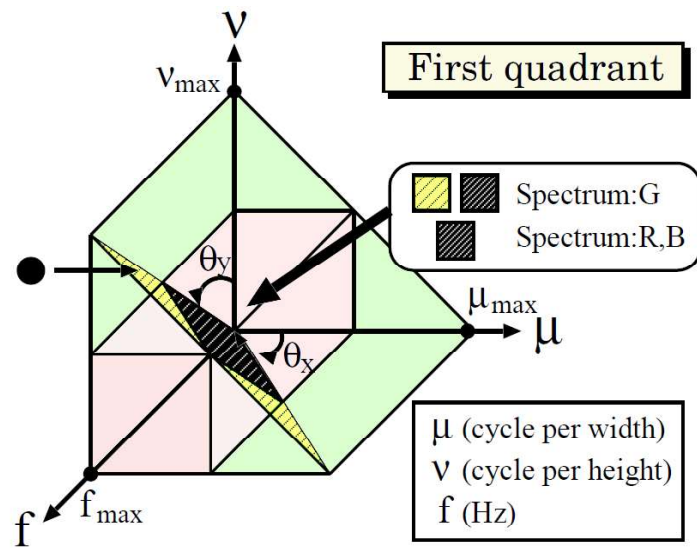
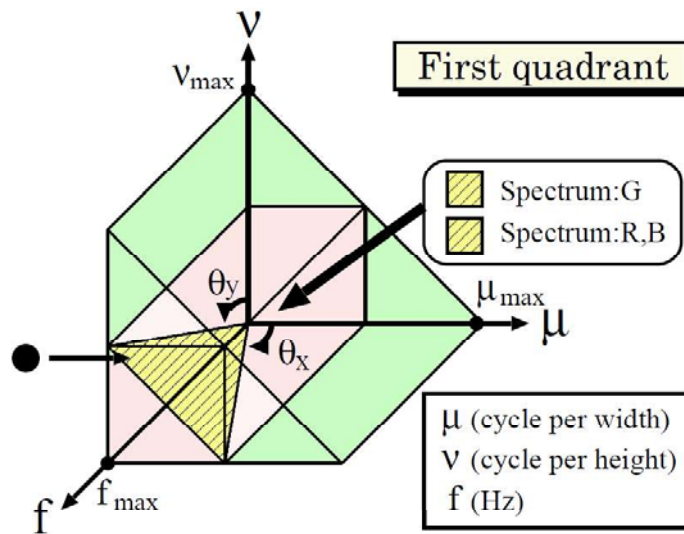
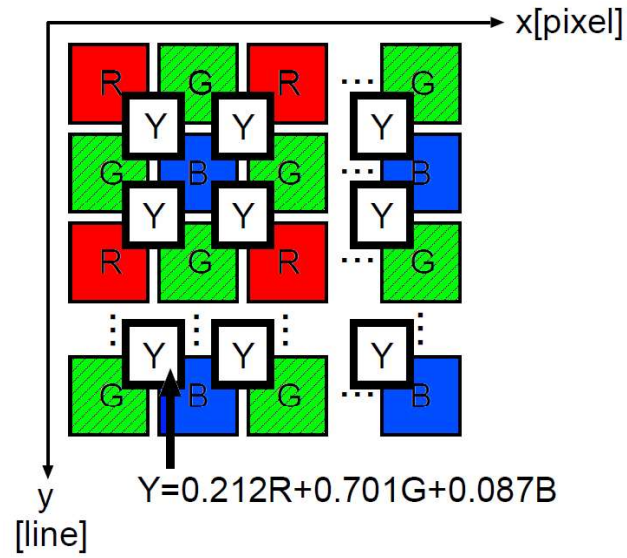
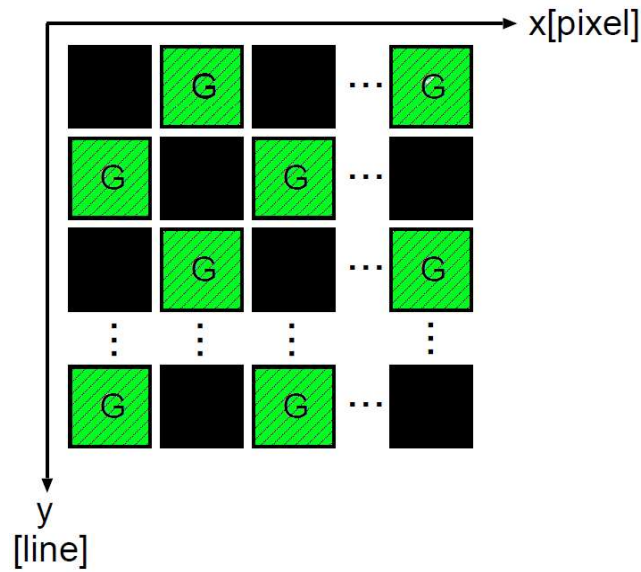
(a) フレーム間動き量 $x_v=1, y_v=1$ の場合(b) フレーム間動き量 $x_v=2, y_v=2$ の場合

図 2.12 3次元周波数スペクトル

い、結果を R,G,B の動き補正内挿に適用する。また $|x_v| \geq 2$ かつ $|y_v| \geq 2$ の場合は R,G,B 信号から Y 信号を作成し、Y 信号を用いて動きベクトル検出を行い、結果を R,G,B の動き補正内挿に適用する。2.3.2 節では、本原理と 2.2.2 節の方法を用いた Bayer 型画素構造を考慮した動き補正内挿方法について説明する。



(a) Y 信号



(b) G 信号

図 2.13 Y,G 信号生成方法

2.3.2 方法

最初に、図 2.13 に示す方法で Bayer 型画素構造動画像から Y,G 信号を生成する。次に、式 (2.1) の P を R,G,B と置くと、 $R_n(x_v, y_v)$ 、 $G_n(x_v, y_v)$ 、 $B_n(x_v, y_v)$ は式 (2.6)、(2.7)、(2.8) となる。

$$R_n(x, y) = (R_{n-1}(x - x_v/I_r, y - y_v/I_r) + R_{n+1}(x + x_v/I_r, y + y_v/I_r))/2 \quad (2.6)$$

$$G_n(x, y) = (G_{n-1}(x - x_v/I_r, y - y_v/I_r) + G_{n+1}(x + x_v/I_r, y + y_v/I_r))/2 \quad (2.7)$$

$$B_n(x, y) = (B_{n-1}(x - x_v/I_r, y - y_v/I_r) + B_{n+1}(x + x_v/I_r, y + y_v/I_r))/2 \quad (2.8)$$

また、動きベクトルはY,G信号により算出する。式(2.2)のPをY,Gとすると、

$$\vec{V}_Y(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) = \{(x_v, y_v) | \min(C(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R))\} \quad (2.9)$$

$$\vec{V}_G(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R) = \{(x_v, y_v) | \min(C(x_v, y_v, x_B, y_B, F_C, F_R))\} \quad (2.10)$$

更に、式(2.9)、(2.10)の \vec{V}_Y, \vec{V}_G は、2.2.2節の処理を用いて動きベクトル確度判定を行う。

以上の処理により、 $F_n(x, y)$ に存在する動きベクトル \vec{V}_Y と \vec{V}_G の算出後、 \vec{V}_G が $|x_v| \leq 2$ または $|y_v| \leq 2$ の場合は、2.3.1節で述べたように $|x_v| < 2$ または $|y_v| < 2$ のような微小動きは \vec{V}_G でしか高精度に検出できないため、 $\vec{V}_G(x_v, y_v)$ を式(2.6)、(2.7)、(2.8)に適用し、動き補正内挿により $R_n(x, y)$ 、 $G_n(x, y)$ 、 $B_n(x, y)$ を求める。

それ以外の場合は \vec{V}_Y を用いて動き補正内挿を行うが、 \vec{V}_Y の方向性の確度を高めるため \vec{V}_Y と \vec{V}_G の内積を正規化し、その閾値が Th 以上 $((\vec{V}_Y \cdot \vec{V}_G)/(|\vec{V}_Y||\vec{V}_G|) > Th)$ の場合は \vec{V}_Y と \vec{V}_G が概ね同一の方向を向いており \vec{V}_Y の方向の確度は高いと判定されるため、 \vec{V}_Y を式(2.6)、(2.7)、(2.8)に適用し、動き補正内挿により $R_n(x, y)$ 、 $G_n(x, y)$ 、 $B_n(x, y)$ を求める。

それ以外の場合は、 \vec{V}_Y の方向性に対する確度が低く、動き補正内挿箇所での内挿誤りによる大幅な画質劣化が想定されるため、線形内挿により $R_n(x, y)$ 、 $G_n(x, y)$ 、 $B_n(x, y)$ を求める。

以上の処理により、スーパーハイビジョンの60フレーム/秒の動画像においてフレーム内挿処理を行い120フレーム/秒の動画像に変換後、5:1の間隔でフレーム間引を行って24フレーム/秒へ変換する。その後、51タップの線形フィ

ルタによる水平・垂直標本化周波数変換により、水平 3840 画素 × 垂直 2160 画素、24 フレーム／秒順次走査のデジタルシネマ規格に準拠した動画像へ変換する。

2.3.3 評価

2.3.2 節で説明した方法を計算機シミュレーションで実装し、スーパーハイビジョンからデジタルシネマへの方式変換を行った動画像の画質について評価実験を行った。

評価画像は、図 2.14 に示すスーパーハイビジョンカメラ [43] を用いて撮影した水平 7680 画素 × 垂直 4320 ライン、60 フレーム／秒順次走査の 3 種類のスーパーハイビジョン画像 “Marathon”、“Chorus”、“Oldwomen”、各画像 300 フレームを用いる。なお、本節では Bayer 型画素配列、60 フレーム／秒順次走査のスーパーハイビジョンカメラを用いて評価画像を撮像しており、2.2.3 節の A:24Hz 間引法に相当する変換画像が無い場合、PSNR 評価を行う事ができない。

主観評価

主観評価では、最初に 2.3.2 節で導入した Bayer 型画素構造を考慮した \vec{V}_G, \vec{V}_Y の切り替えの効果を検証する。Bayer 型画素構造を考慮した動き補正内挿を用いたフレーム数変換法の従来方法は存在しないが、正方格子型画素構造で行われる \vec{V}_Y のみを用いて動き検出を行う方法を従来法と見なし、これと 2.3.2 節の \vec{V}_G, \vec{V}_Y を用いて動き検出を行う方法を比較する。 \vec{V}_G, \vec{V}_Y の動き検出法としては、2.2.3 節において有効性が確かめられている B:提案方法を用いる。

また、2.3.2 節の T_h は $2/\sqrt{5}$ とした。通常、撮影動画像は緑、赤、青全ての色成分を含んでいる為、Y と G の動きベクトル \vec{V}_Y と \vec{V}_G は概ね同一方向を向く事が想定される。但し、図 2.13(a) より Y と G の標本化位置は 1/2 位相が異なるため、動きボケが少なく Y で高精度に検出可能な微小動きを想定した場合、例えば $\vec{V}_Y(x_v, y_v)$ が (2, 0) の場合、 $\vec{V}_G(x_v, y_v)$ が (2, 1) を許す値を基準とした。

評価は、微小な差の評価となるため、図 2.14 の 2 画像について A 方式として 2.3.2 節の方法、B 方式として 2.3.2 節において \vec{V}_Y のみを用いる方法でデジタルシネマ方式に変換し、その動き部位を切り出した画像に対して評価を行っ



(a) Marathon



(b) Chorus



(c) Oldwomen

図 2.14 評価画像 (全画面画像)



(a) Marathon (動領域画像)



(b) Chorus (動領域画像)



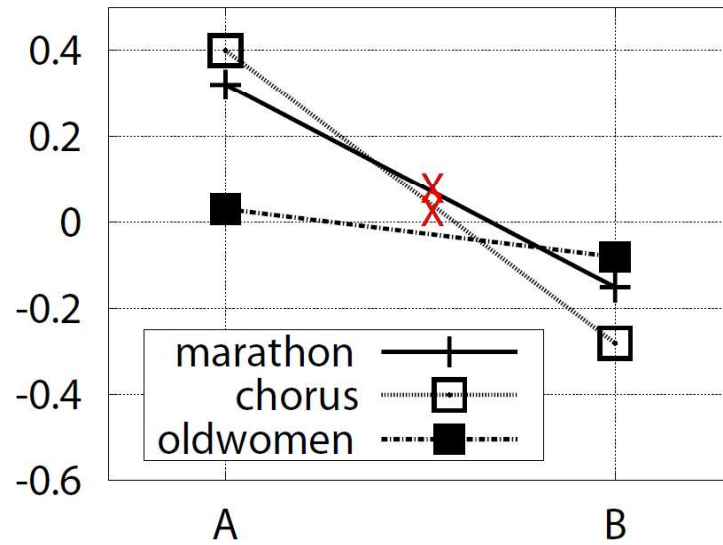
(c) Oldwomen (動領域画像)

図 2.15 評価画像 (動領域画像)

た。評価は専門家 10 名、非専門家 10 名により行い、評価方法はシェッフェの一対比較法を用いる。また評価尺度は、表 2.7 の 5 段階評価尺度を用いる。表 2.8 に実験条件、図 2.15 に評価画像を示す。

図 2.16(a) に専門家 6 名による評価結果を示す。同図は、横軸の上側ほど評点が高い。また同図中において信頼区間 95 % のヤードスティック値を用いて検定した結果、有意差が認められる方式間を X 印で示す。結果、3 画像中 2 画像において、2.3.2 節の方法は V_Y のみを用いる方法に比べて画質が優れている可能性が高いと判定された。以上より、2.3.2 節の方法は従来方法に比べて高い画質が得られている可能性が高い事を示した。

次に、全画面で評価を行った。本評価実験では、図 2.14 の評価画像を、表 2.9



X: Significant difference at 95% confidence interval.

(5% significance level)

(a) 動領域画像の場合 (専門家)

図 2.16 評価結果 (動領域画像の場合、シェッフェの一対比較法によるヤードスティック算出結果)

に示す **A**~**C** の方法でデジタルシネマ方式に変換した画像を変換画像として用いる。図 2.14 に評価画像を示す。表 2.10 に評価画像の持つ動きについて説明する。なお、評価画像“Marathon”は大勢のランナーが画面奥から手前に走る動きと多くのオクルージョンを含む画像、評価画像“Chorus”はカメラパン動作を含む大きな動きと字幕を持つ画像、評価画像“Oldwomen”は水玉パターンの服や手の動きを含む画像であり、動き補正内挿にクリティカルな画像として選定した。

評価は専門家と非専門家各 10 名により行い、評価方法はシェッフェの一対比較法を用いる。また評価尺度は、表 2.7 の 5 段階品質尺度を用いる。実験条件は表 2.11 の通り。なお、表 2.11 の視距離は、標準視力 (1.0) で走査線構造が弁別可能な最小の大きさ (視角 1.0 分)[56, 57] を考慮して $1.5H$ (H は画面高) とする。この際、画面を見込む角度は水平 60 度、垂直 40 度となる。なお本実験では、実験前に各評価画像における **A**~**C** の方式変換画像を、評価者に画像処理に関する情報なしで繰り返し提示した。

表 2.9 方式変換法の説明

変換法名称	変換方法
A:提案方法	4.2 節の手法で、デジタルシネマ方式へ変換
B:線形内挿法	4.2 節の手法に依るが、動き補正内挿を OFF にしてデジタルシネマ方式へ変換
C:2-3 間引法	SHV 動画像を 2-3-2-3... の間隔で間引き、水平・垂直標本化周波数を各 1/2 としてデジタルシネマ方式へ変換

表 2.10 評価画像の持つ動きの説明

画像名	動きの説明
Marathon	大勢のランナーが画面奥から手前へ走る、カメラ固定
Chorus	大勢の子供が大きく手を振りながら歌う、カメラパン
Oldwomen	水玉パターン模様の服を着た老婆が手拍子、カメラ固定

表 2.11 実験条件

視聴条件	標準視聴条件 (CCIR Rec.500-10) に準ずる
プロジェクタ	液晶プロジェクタ SONY SRX-R105 (5000ANSI ルーメン)
画面サイズ	250 インチ
視距離	1.5H (H は画面高)
その他	水平 3840 画素×垂直 2160 ライン、24Hz 画像を零次補間 72Hz で表示 (機器仕様)

図 2.17(a) に専門家 10 名、(b) に非専門家 10 名による実験結果を示す。同図の見方は図と同じである。結果、専門家において評価画像“Marathon”と

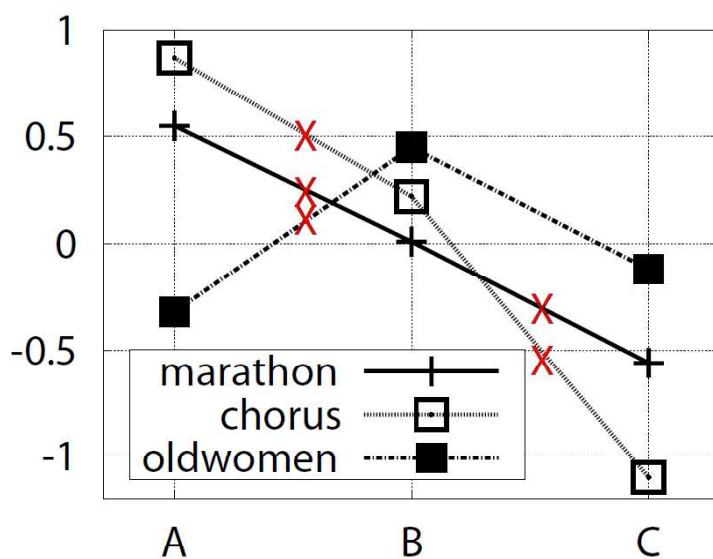
“Chorus”の**A**は、**B**と**C**に比べ画質が優れていると判定された。また評価画像“Oldwomen”は、老婆の服の水玉パターン模様が動く箇所が、動き補正内挿時の動きベクトル検出においてクリティカルな部位であり、その**A**は専門家においてフレーム内挿誤りが知覚され、評価を下げた。

2.3.4 考察

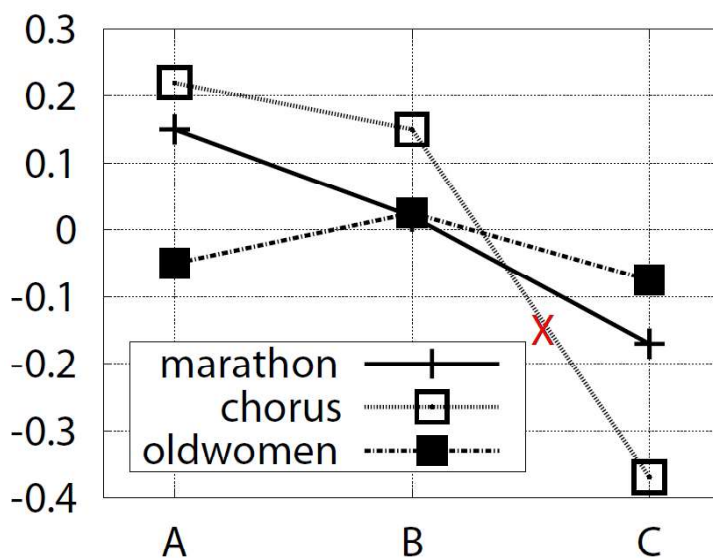
2.3.3節の全画面での評価より、**A**:提案方法は評価画像“Marathon”のように多くの動きがある動画像、また評価画像“Chorus”のような大きな動きやカメラパン動作を含む動画像においても良好な画質が得られた。しかし、評価画像“Oldwomen”のようにパターン模様の服の腕部が動くような動き補正内挿においてクリティカルな部位を含むシーンでは、動きベクトル検出エラーによる内挿誤りの存在が専門家において知覚され、評価を下げた。このため、該当シーンにおける内挿フレームでは、他の方式変換法を適用する。

ここで図2.17(a),(b)より、**C**:2-3間引法は評価画像“Chorus”の専門家と非専門家、評価画像“Marathon”の専門家において、**B**:線形内挿法に比べ画質が劣っていると判定された。これは**C**:2-3間引法のフレーム間隔が一定ではないため、人物やカメラパンの動きに違和感を生じるものである。以上より、**A**:提案方法により方式変換時に良好な画質が得られない場合、**B**:線形内挿法の適用が妥当である。なお実装では、**A**:提案方法の動き補正内挿時において、任意のブロックのブロックマッチング時における最小の差分絶対値和 (Sum of Absolute Difference, SAD) が基準値以上の場合、その内挿フレームの全内挿画素位置には線形内挿法を適用する。以上の処理により、図2.17の(a)Expertにおける評価画像“Oldwomen”の**A**:提案方法の画質評価値は、**B**:線形内挿法に近づくと考えられる。

また一般に、液晶プロジェクタは動解像度が低いため、**A**:提案方法画像に動きボケを生じ画質が悪化する可能性がある。上記の検証のため、正弦波を用いる方法 [58, 59] によりプロジェクタの動解像度特性を測定した。測定データより、プロジェクタの動解像度特性により**A**:提案方法画像に動きボケを生じ、画質評価結果に影響を与える可能性を確認した。



(a) 全画面画像の場合（専門家）



(b) 全画面画像の場合（非専門家）

X: Significant difference at 95% confidence interval.
(5% significance level)

図 2.17 評価結果 (全画面画像の場合、シェッフェの一対比較法によるヤードスティック算出結果)

2.4 むすび

本章では、スーパーハイビジョンからデジタルシネマへの方式変換において、動き補正内挿従来方法と比較し動き検出範囲を時間軸双方向に拡張した

動き補正内挿法を導入し、ハイビジョンハイスピードカメラで撮影した120フレーム／秒の動画像を時間方向に1/5に間引いた画像を基準画像としてPSNR値測定と主観評価実験を行い、動き補正内挿従来方法より画質が優れている事を示した。さらに、現行のスーパーハイビジョンが採用しているBayer型画素構造に着目しG信号が持つ高い空間標本化周波数を生かした動き補正内挿法を導入し、主観評価実験により線形内挿法や2-3間引法より画質が優れていることを示した。また、本方式変換法により良好な画質が得られないような特定のクリティカルなシーンにおいては、その内挿フレーム上の全ての内挿画素位置において線形内挿法を適用する事が妥当である事を示した。

第3章

空間周波数スペクトル解析と空間方向の映像方式変換

第3章では、はじめに3.1節でデジタルシネマやスーパーハイビジョン画像とこれらの画像の雑音成分の空間周波数スペクトル解析を行い、その結果を基に3.2節と3.3節にて空間方向の映像方式変換法を提案する。

提案法の検討では、空間解像度の縮小法と超解像法が必要となる。このうち空間縮小は、一般に十分なタップ数と周波数特性を持つ線形フィルタを用いて、高画質に行うことが可能である。このため検討では、デジタルシネマのような高精細映像に適した空間超解像法の開発が課題となる。課題においては、デジタルシネマ映像が持つフィルムの粒状性雑音や固体撮像素子の熱雑音が問題となる。問題となる雑音は、一般に超解像に悪影響を及ぼす。しかし映像表現として重要であるため[60]、単純に除去すれば良いものではない。

空間超解像法には、大きく分けて「再構成型」と「学習型」がある。このうち「学習型」は、一般に大量の繰り返し演算を必要とするため、性能は高いがハードウェア化が難しいという欠点がある。このため本論文では、「再構成型」に焦点を当てた空間超解像法を検討する。

「再構成型」の空間超解像法には、大きく分けて「周波数再構成型」と「レジストレーション型」がある。このうち「周波数再構成型」は、線形あるいは非線形フィルタ処理により標本化周波数を超える超解像空間高周波成分を生成する。この「周波数再構成型」はハードウェア化が容易であり遅延量の少ない処理が可能であるという利点があるが、原理的に真の値に近い超解像空間高周波

成分を生成することが困難であるという欠点がある。一方「レジストレーション型」は、複数フレーム間のレジストレーションにより標本数を高める方法である。この「レジストレーション型」はレジストレーション処理による遅延量が「周波数再構成型」よりも大きい、レジストレーション精度と確度が高い場合は真の値に近い超解像空間高周波成分を生成可能である。

「周波数再構成型」の従来法としては、線形フィルタ処理である Wavelet 超解像法 [61, 62, 63, 64]、非線形フィルタ処理である total variation 超解像法 [65] などが知られている。また「レジストレーション型」の従来法としては、複数フレーム間のレジストレーションを用いた超解像法 [66, 67] などが知られている。このうち Wavelet や total variation 超解像法は、線形／非線形フィルタ処理により空間高周波成分を推定して生成するため、必ずしも真の空間高周波成分を生成できないという課題がある。一方レジストレーションを用いた超解像法は、撮像位置が異なるフレーム間オブジェクトの位置合わせを行って画素密度を高めるため、レジストレーション精度と確度が高い領域では真に近い空間高周波成分を生成できる。しかし雑音等の影響によりレジストレーション精度と確度が低い領域では、超解像画質が大きく劣化するという課題がある。また従来のデジタルシネマ映像は、4K の水平解像度に対してフレームレートが 24 フレーム／秒と低いため、動きぼやけなどによりフレーム間相関が低く、複数フレーム間のレジストレーションが難しいという課題もある。

以上より本章では、はじめに 3.1 節にてデジタルシネマやスーパーハイビジョン画像の空間周波数スペクトル解析とその雑音成分の空間周波数スペクトル解析を行う。そしてその結果を基に、3.2 節にて「周波数再構成型」である Wavelet を用いた空間超解像法を提案する。さらに 3.3 節にて「レジストレーション型」である Wavelet 多重解像度成分間のレジストレーションを用いた空間超解像法を提案する。

3.1 画像信号とその雑音成分の空間周波数スペクトル解析

3.1 節では、諸条件で撮影された 4K、8K の水平解像度を持つモノクロ評価画像の周波数解析結果を示す。さらに実験画像に含まれる雑音成分の周波数解析のため、評価画像内の信号成分がほぼ平坦な領域における周波数解析結果を

示す。

図 3.1 に評価画像を示す。同図 (a)、(b) は、4K の水平解像度を持つ CMOS 素子カメラで撮像された画像である。同図 (c)、(d) は、65mm フィルムに撮像された画像を 4K の水平解像度でデジタル化した画像である。同図 (e)、(f) は、65mm 高感度フィルムに撮像された画像を 4K の水平解像度でデジタル化した画像である。同図 (g)、(h) は、8K の水平解像度を持つ CMOS 素子カメラで撮像された画像である。なお同図 (a)–(h) は、いずれもガンマ補正や局所的な感度補正が行われていないか、これらの補正を逆補正した画像である。

周波数解析では、1次元離散フーリエ変換 (1D DFT) を、実験画像の水平、垂直方向に適用する。1D DFT では、Hamming 窓を用いて 256 points の DFT フィルタ処理を行い、これを 128 画素ずつ水平、垂直方向にシフトして解析した結果の平均値を出力する。図 3.2 に実験画像の周波数解析結果を示す。同図 (a) は夜間に感度を上げて撮影を行ったため、雑音成分が大きく重畳されていると考えられる。同図 (b) は岩場や水しぶきのような高周波成分が多く含まれる画像である。同図 (c)、(d) はカメラの動きによるぼやけのため、信号成分の高周波帯域のパワーが失われている。同図 (e)、(f) は高感度フィルムの粒状性が粗いため、信号、雑音成分ともに高周波帯域にはほぼ存在しないと考えられる。同図 (g)、(h) は 8K CMOS 素子カメラで撮影を行ったが、被写界深度を得るために F 値を 8~11 程度とする必要があり、レンズの回折効果により被写界深度内の高周波成分が多少犠牲になっていると考えられる。

次に図 3.3 に、図 3.1(a)、(c)、(e)、(g) 内の信号成分がほぼ平坦な領域と、その周波数解析結果を示す。図 3.3(a) より、4K CMOS 素子カメラ撮像画像の雑音成分は、ほぼ白色雑音である。また同図 (d) より、超解像目標となる 8K CMOS 素子カメラ撮像画像であるスーパーハイビジョン画像の雑音成分も、ほぼ白色雑音である。CMOS 撮像素子の画素毎のアンプにおける熱雑音は時間的な白色であり空間的な白色とは限らないが、図 3.3(a)、(d) より画素毎のアンプ間における熱雑音は、ある程度の独立性と一様性が認められることが分かる。さらに同図 (b) よりフィルム撮像画像の雑音成分も、ほぼ白色雑音である。これはフィルムの粒状性雑音はランダムであり、ほぼ白色雑音に近いと考察される。

一方、同図 (c) より高感度フィルムで撮像された画像の雑音成分は白色雑音で



(a) Nebuta festival
(4K CMOS night-shot)



(b) children (4K CMOS)



(c) aerial (4K film)



(d) marathon (4K film)



(e) Kumano shrine
(4K high-sensitivity film)



(f) fire festival
(4K high-sensitivity film)

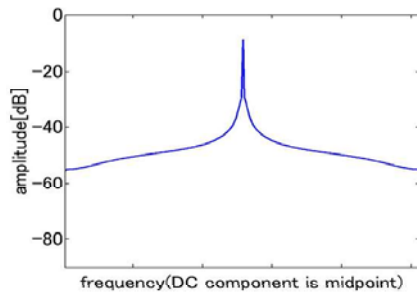


(g) fountain (8K CMOS)

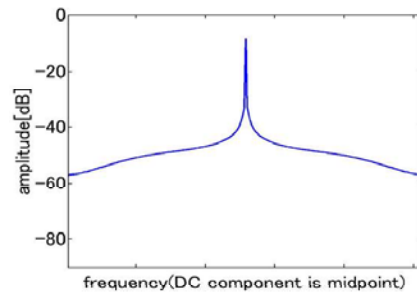


(h) skateboard (8K CMOS)

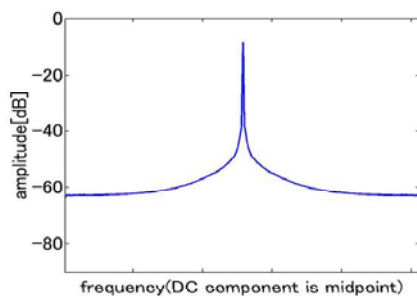
図 3.1 評価画像



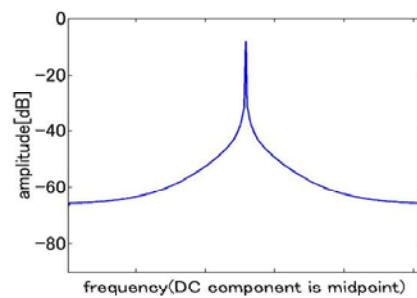
(a) Nebuta festival
(4K CMOS night-shot)



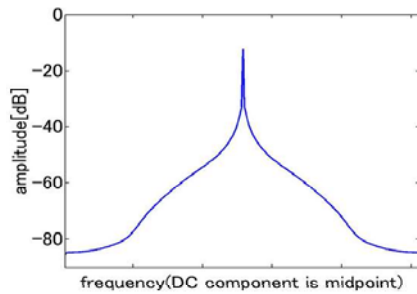
(b) children (4K CMOS)



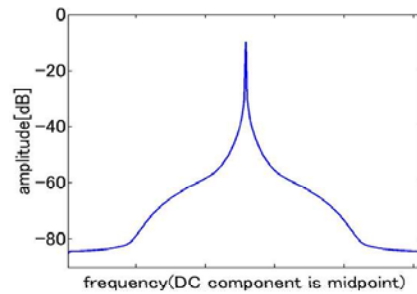
(c) aerial (4K film)



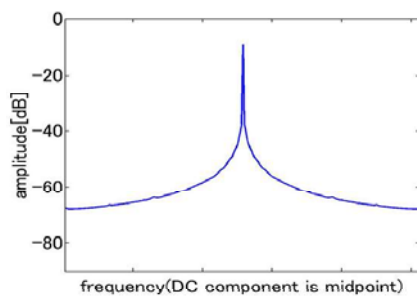
(d) marathon (4K film)



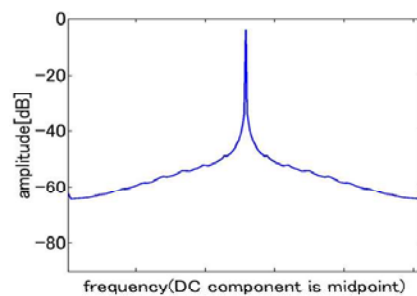
(e) Kumano shrine
(4K high-sensitivity film)



(f) fire festival
(4K high-sensitivity film)



(g) fountain (8K CMOS)



(h) skateboard (8K CMOS)

図 3.2 空間周波数解析結果

はない。これは高感度フィルムの粒状性が粗いため、空間高周波帯域のパワーが低いことが原因と考察される。

一般的に雑音成分は、超解像に悪影響を及ぼす。特に一般画像は空間低周波帯域に多くのパワーを持つため、空間高周波帯域では信号対雑音比が低い。そしてこの空間高周波帯域の雑音成分が、超解像画質に悪影響を及ぼす可能性が高い。ここで図 3.3(a)、(b)、(d) の雑音成分はほぼ白色雑音であるため、空間高周波帯域の信号対雑音比が低く従来超解像法では超解像画質が劣化しやすい。また同図 (c) の雑音成分は白色雑音ではないため、空間高周波帯域の信号対雑音比が高く、従来超解像法でも超解像画質が劣化しにくいと考察される。

3.2 節と 3.3 節では、以上の解析結果を踏まえた超解像法を提案する。

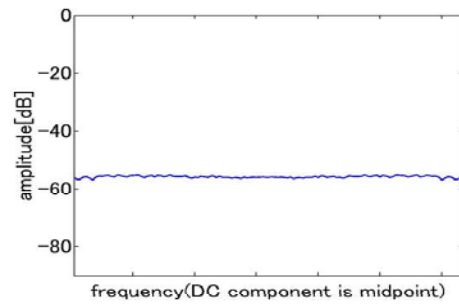
3.2 Wavelet を用いた空間超解像法

3.1 節の結果を基に、3.2 節では原画像を信号成分と雑音成分に分離後、各々を超解像して合成することを特徴とする Wavelet を用いた「周波数再構成型」の画像超解像法を提案する。図 3.4 に提案法の全体図を示す。以下では、同図の各ユニット内の処理の詳細について説明する。

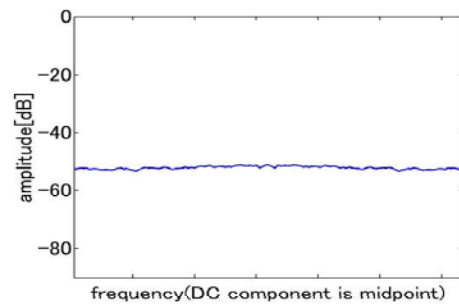
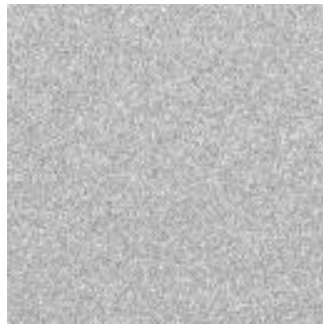
3.2.1 信号雑音分離

図 3.4 内の「信号雑音分離」ユニットでは、原画像 O を信号成分 S と雑音成分 N に分離する。ここで N は、図 3.3(a)、(b)、(d) のような白色雑音とする。この白色雑音の除去には、Wavelet hard shrinkage[68, 69, 70, 71] を基本とする方法を用いる。ここで Wavelet hard shrinkage では、雑音を除去する際の shrinkage 閾値について、原画像の各画素レベルの分散値を雑音レベルとみなして shrinkage 閾値とする。これに対して提案法では、雑音レベルの検出精度を高めるため、空間相関が低い白色雑音成分を Wavelet 分解により抽出して、その非零成分の RMS (Root Mean Square) 値を雑音レベルとして shrinkage 閾値とすることを特徴とする。

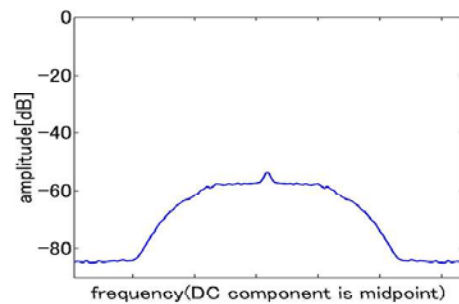
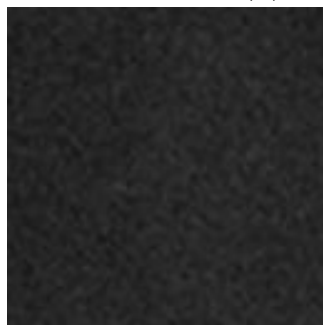
図 3.5 に「信号雑音分離」ユニット内の詳細サブユニット図を示す。以下では同図を基に詳細を説明する。



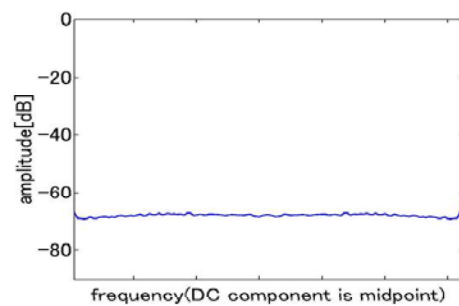
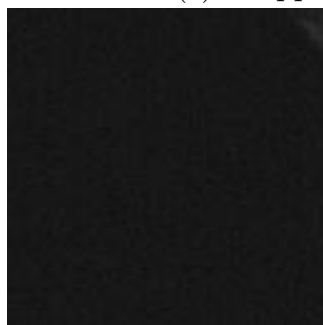
(a) Cropped image of Nebuta festival



(b) Cropped image of aerial



(c) Cropped image of Kumano shrine



(d) Cropped image of fountain

図 3.3 図 3.1(a)、(c)、(e)、(g) 内の信号成分がほぼ平坦な画像と、その空間周波数解析結果（直流 DC 成分は除く）

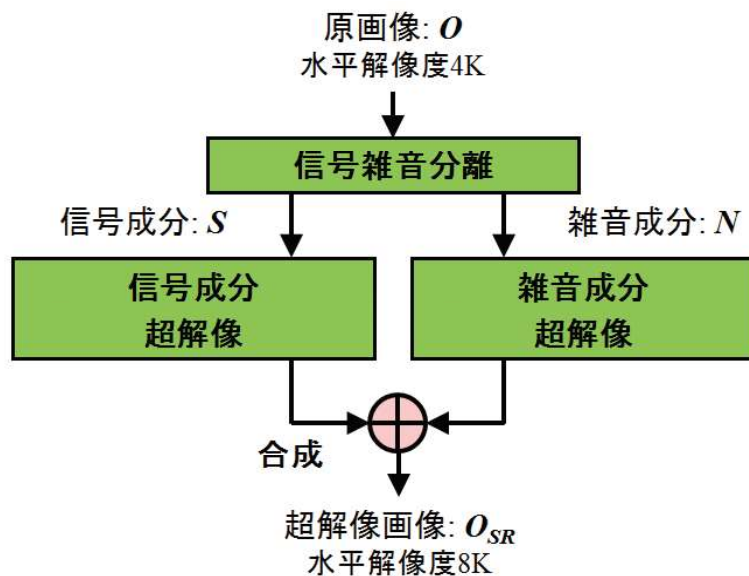


図 3.4 提案法全体図

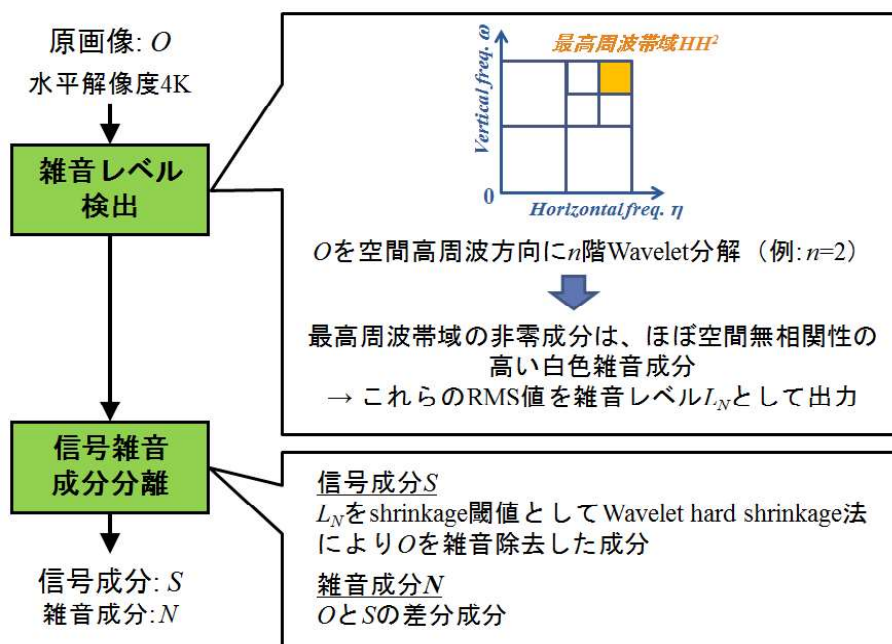


図 3.5 信号雑音分離ユニットの詳細図

“雑音レベル検出”サブユニットでは、 O に含まれる白色雑音の雑音レベルを検出する。ここで白色雑音は、空間無相関性が高いランダム成分であるため空間相関が低く、すべての空間周波数帯域において同一のパワーを持つ。そこで図 3.5 のように O を空間高周波方向に n 階 Wavelet 分解する。ここで提案法の

Wavelet 分解および再構成は、雑音レベル検出や超解像処理に用いるため、画像パワーの積分が周波数パワーの積分と等しくなるようにノルムの補正を行うことに留意する。そして、その水平垂直高周波帯域 HH^n 成分の非零成分は空間無相関性の高い白色雑音成分である可能性が高いため、これらの RMS 値を雑音レベル L_N とする。

“信号雑音成分分離”サブユニットでは、 L_N を shrinkage 閾値として Wavelet hard shrinkage 法により O の雑音除去を行った成分を、 S として出力する。そして O と S の差分を N として出力する。

3.2.2 信号成分超解像

図 3.4 内の「信号成分超解像」ユニットでは、信号成分 S の超解像を行う。図 3.6 と図 3.7 内に「信号成分超解像」ユニット内の詳細サブユニット図を示す。以下では同図を基に詳細を説明する。

“Wavelet 超解像”サブユニットでは、 S の超解像として、以下の 1~2 の処理を行う。

1. S をデシメーション無しで 1 階 Wavelet 分解して、その水平、垂直、斜め高周波成分を S の標本化周波数を超える LH_S, HL_S, HH_S 帯域にコピー
2. LH_S, HL_S, HH_S 内を小ブロック分割して、波形整形の為の bilateral フィルタ [77] を適用後、 S, LH_S, HL_S, HH_S を Wavelet 再構成

“最適化”サブユニットでは、超解像パラメータの最適化を行う。ここで 8K の水平解像度を持つ超解像画像 O_{SR} の正解は不明であるため、DI PSNR 最大化による超解像パラメータ σ_{LH} 、 σ_{HL} 、 σ_{HH} の最適化を行う。ここで DI PSNR は、もし画像縮小と超解像が理想的に行えるならば、原画像とその超解像画像を水平、垂直、斜め方向に 1 画素ずつ位相位置をずらして縮小した 4 枚の画像を各々超解像して位相を原画像に合わせて縮小した 4 枚の画像の差分は最小になることより、原画像を基準とする 4 枚の縮小画像の PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 値を計算し、それらの和を平均して求める。ゆえに DI PSNR が大きいほど、超解像手法として有効であることが見込まれる。本サブユニットでは、以下の 1~7 の処理を行う。

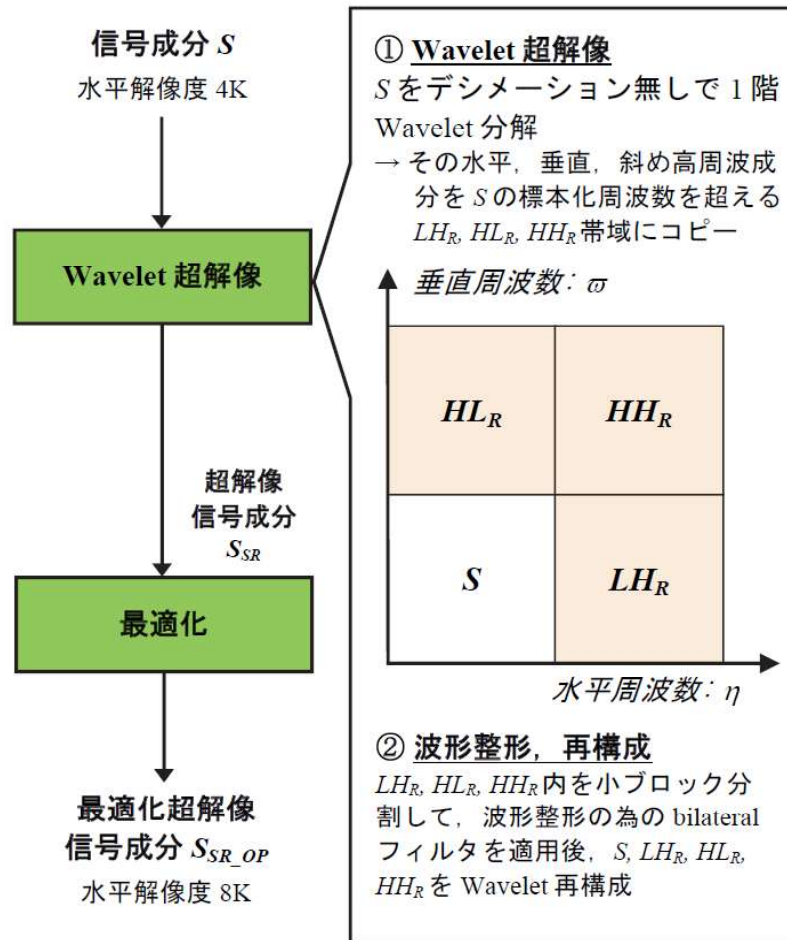


図 3.6 信号成分超解像ユニットの詳細図 (Wavelet 超解像サブユニット)

1. S_{SR} の周波数分解のため、 S_{SR} をデシメーション無しで 1 階 Wavelet 分解
2. 1 の空間低周波成分を水平、垂直、斜め方向に 1 画素ずつ位相位置をずらして 2:1 画素間引きを行って 4 枚の縮小画像を生成
3. 2 の 4 枚の縮小画像を“レジストレーション超解像”サブユニットの方法で超解像して 4 枚の超解像画像を生成
4. 3 の 4 枚の超解像画像の周波数分解のため、これらをデシメーション無しで 1 階 Wavelet 分解
5. 4 の空間低周波成分を S と同じ位相位置の画素を残すように 2:1 間引きを行って 4 枚の縮小画像を生成
6. 5 の 4 枚の縮小画像について、各々 S を基準とする PSNR 値を計算し、それらの和を平均して DI PSNR を計算

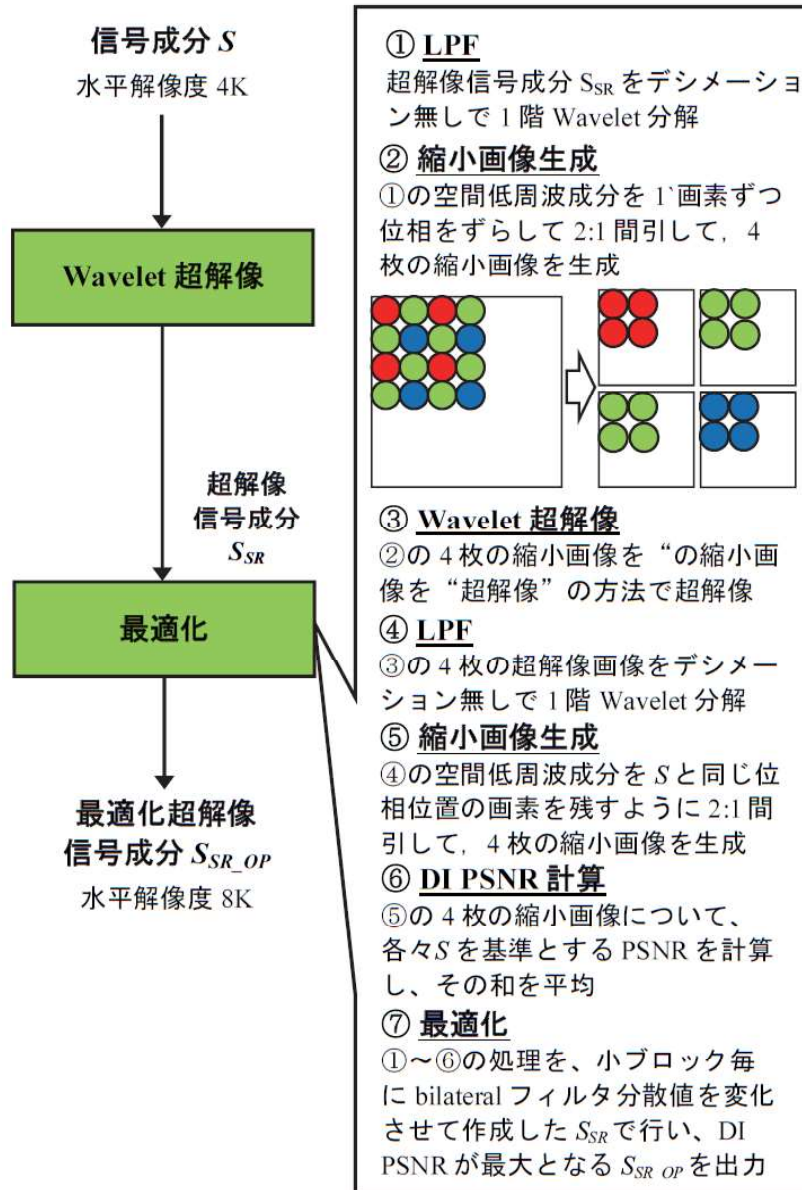


図 3.7 信号成分超解像ユニットの詳細図（最適化サブユニット）

7. 1~6 の処理を”レジストレーション超解像”サブユニット内で σ_{LH} 、 σ_{HL} 、 σ_{HH} を各々変化させて作成した S_{SR} で行い、DI PSNR が最大となる最適化超解像信号成分 S_{SR_OP} を出力

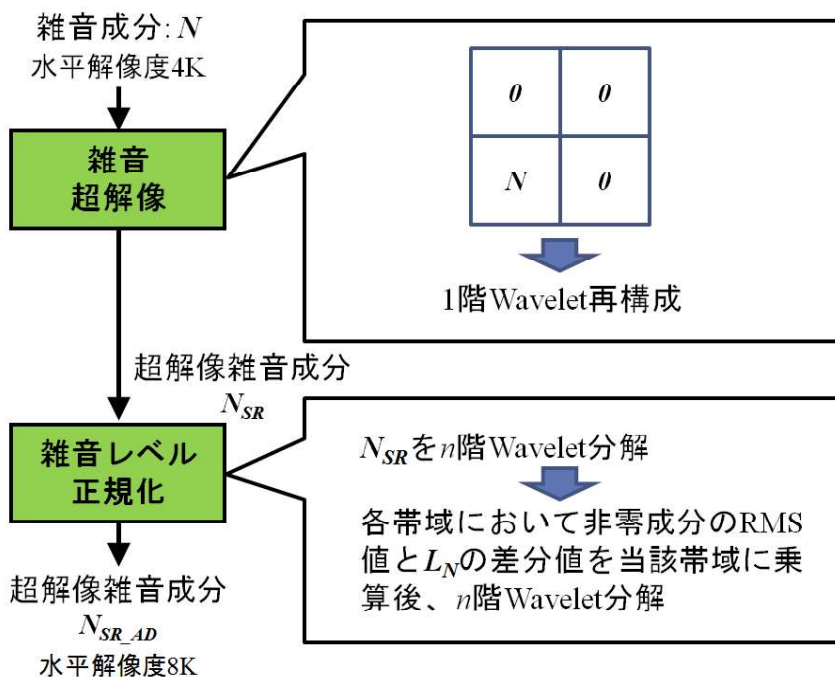


図 3.8 雑音成分超解像の詳細図

3.2.3 雑音成分超解像と超解像信号成分との合成

図 3.4 内の「雑音成分超解像」ユニットでは、雑音成分 N の超解像を行う。ここでは、3.2.1 節で求めた雑音レベル L_N を用いて超解像雑音成分のレベル補正を行うことを特徴とする。

図 3.8 に「雑音成分超解像」内の詳細サブユニット図を示す。以下では本ユニット内の処理の詳細を説明する。

“雑音超解像”サブユニットでは、雑音成分 N を空間低周波帯域成分、 0 を空間高周波帯域成分として 1 階 Wavelet 再構成することで超解像雑音成分 N_{SR} を出力する。

“雑音レベル正規化”サブユニットでは、 N_{SR} の各帯域のレベルを、雑音レベル L_N を基に正規化する。正規化処理では、 N_{SR} を n 階 Wavelet 分解して、分解した各帯域において非零成分の RMS 値と L_N の差分値を当該帯域に乗算後、 n 階 Wavelet 再構成して正規化超解像雑音成分 N_{SR_AD} を出力する。

最後に S_{SR_OP} に N_{SR_AD} を加えることで、超解像画像 O_{SR} を出力する。

表 3.1 超解像法

(A) Bi-cubic filtering interpolation	(Bi-cubic)
(B) Lanczos-3 filtering interpolation	(Lanczos-3)
(C) Total variation interpolation[65]	(TVI)
(D) Multi-frame registration[67]	(Registration)
(E) Wavelet domain zero padding	(WZP)
(F) WZP, cycle-spanning, and edge rectification[64]	(WZP-CS-ER)
(G) Proposed method	(Proposed)

3.2.4 評価

評価画像は客観画質量である PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) を CMOS、フィルム、高感度フィルム各々で同じ解像度で測るために、図 3.1(a) の “Nebuta festival (Nebuta)”、同 (c) の “Aerial photo (Aerial)”、同 (e) の “Kumano shrine (Kumano)” を水平、垂直各 1/2 に縮小して作成した。評価実験では、これを 7 種類の方法で超解像復元する。画像縮小時の low pass filtering 処理では、フィルタ係数が $[22\ 0\ -52\ 0\ 158\ 256\ 158\ 0\ -52\ 0\ 22]$ の各要素を 512 で割った値の線形フィルタを水平、垂直方向に適用する。表 3.1 に比較する超解像法を示す。

実験条件を以下に示す。(E)–(G) では、人間の視覚特性における周波数チャンネル理論 [72] より、空間 4 階、時間 1 階の Wavelet 分解を用いる。使用する Wavelet フィルタとしては、Cohen-Daubechies-Feauveau[74] (CDF) の 5/3 を用いた。複数フレームレジストレーション法 (D) では、レジストレーション法として、前後 n フレームから水平 32、垂直 32 画素サイズのブロック、水平 $64 \times n$ 、垂直 $64 \times n$ 画素サイズの探索範囲で、sum of squared difference を評価関数とするパラボラフィッティングブロックマッチングを用いた。また予備実験より、bilateral フィルタのタップ数は 5、これに用いるガウシアンフィルタの分散値の範囲は 0.1~5.1 で 1.0 刻み、ゲインは 0.1~2.1 で 0.5 刻みとした。なおガウシアンフィルタの係数値は、分散値が 5.1 以上でほぼ平坦な係数値となるため、分散値の上限値を 5.1 とした。

表 3.2 PSNR 測定結果 ([dB])

Sequences	Methods						
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
(a) Nebuta	20.97	21.01	20.51	20.43	21.06	20.68	21.02
(c) aerial	31.58	31.58	31.68	31.59	31.56	31.57	31.78
(e) Kumano	37.55	37.58	37.48	37.86	37.32	37.58	37.99

表 3.2 に PSNR 測定結果を示す。結果より、提案法 (G) は CMOS 素子撮像画像、フィルム撮像画像、高感度フィルム撮像画像のいずれにおいても、他の超解像法よりも高い PSNR 値が得られた。なお図 3.6 の“最適化”を行う事で、行わない場合と比べて 0.3[dB] 以上の PSNR 改善が得られた。

また図 3.9 に、図 3.1 における bi-cubic(A)、WZP(D)、提案法 (G) の切り出し画像を示す。同図に示すように提案法 (G) は、他の超解像法よりも高い主観画質が得られた。特に、ぼやけや過強調の少ない自然な信号超解像成分と、デジタルシネマ映像が持っている雑音成分に近い雑音超解像成分が得られていることが分かる。ただし場所によっては、斜め方向のエッジ部分にギザギザとしたアーティファクトが見られた。

3.2.5 むすび

3.2 では、超解像時の雑音の影響を排除するため、原画像を信号成分と雑音成分に分離することを特徴とする画像超解像法を提案した。提案法の超解像成分は、デシメーション無しの Wavelet 超解像法を用いて超解像される。そして超解像パラメータは、DI PSNR 値を最大化するように最適化される。実験により、提案法は従来法より約 0.3~0.4[dB] の PSNR 改善が得られた。このうち DI PSNR を用いた最適化により、0.3[dB] 以上の PSNR 改善が得られた。さらに提案法の主観画質は、従来の超解像法よりもぼやけや過強調の少ない自然な信号超解像成分と、デジタルシネマ映像が持っている雑音成分に近い雑音超解像成分が得られた。ただし場所によっては、超解像が弱かったり、斜め方向のエッジ等は多少ギザギザとしたアーティファクトが見られた。

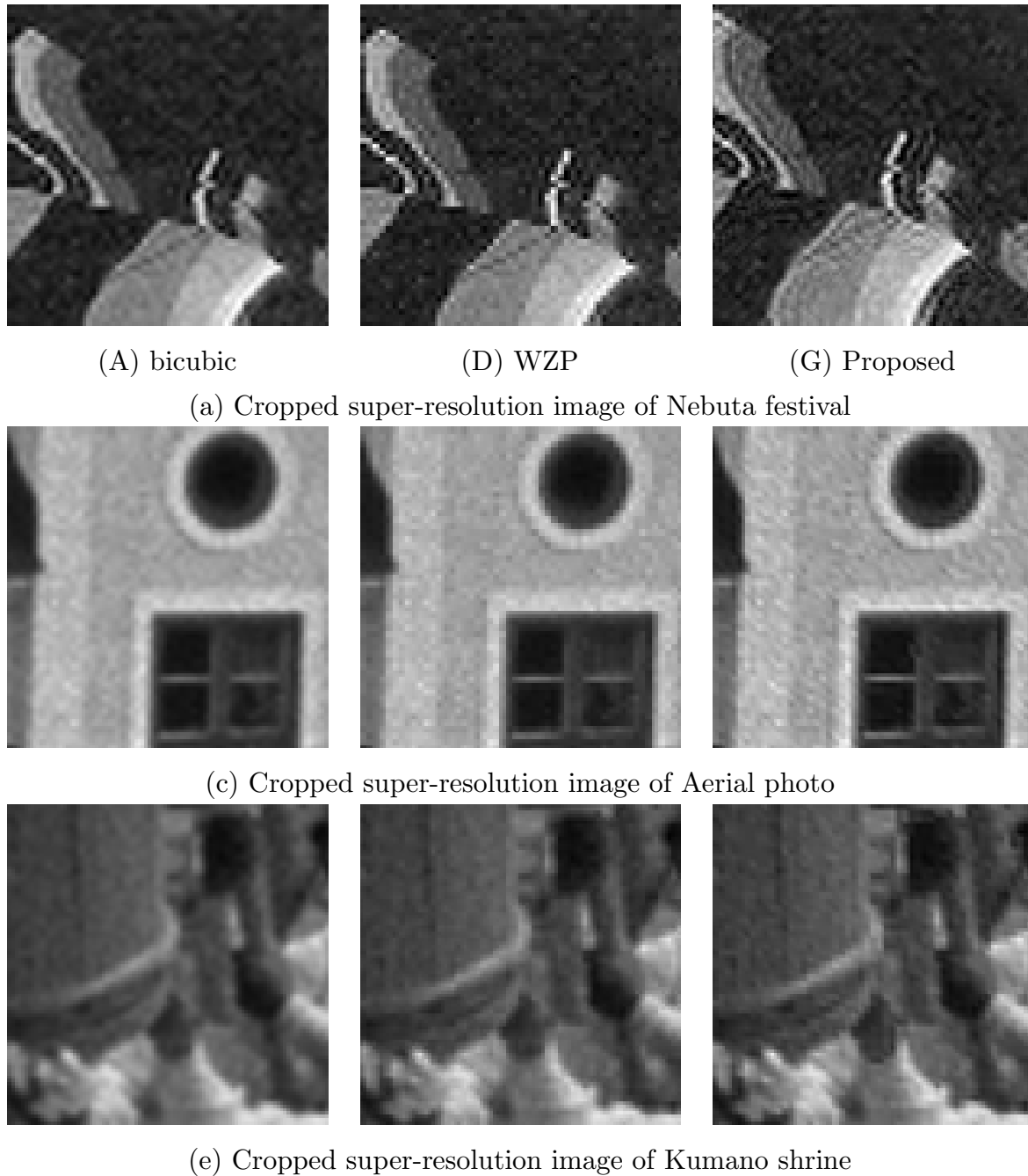


図 3.9 3.1 の超解像画像における切り出し画像

3.3 Wavelet 多重解像度成分間のレジストレーションを用いた空間超解像法

3.2 節で提案した Wavelet を用いた「周波数再構成型」超解像は、比較的処理が軽くハードウェア化も容易である。しかし、「周波数再構成型」では真の超解

像高周波成分を得ることが困難であるという課題がある。

そこで3.3節では、原画像を信号成分と雑音成分に分離後、各々を超解像して合成することを特徴とする「レジストレーション型」の画像超解像法を提案する。ここで従来のレジストレーション法の多くは、フレーム間の同一オブジェクト間で位置合わせを行い、解像度を高めるものである。しかし24フレーム/秒のフレームレートのデジタルシネマ映像はフレーム間相関が低いため、レジストレーション精度が低くなるという欠点がある。また空間解像度も高くなっているため、動きぼやけ等によりレジストレーション精度や確度が低くなるという欠点もある。そこで本提案法では、同一フレーム内で原画像とそのWavelet多重解像度成分の空間低周波成分間のレジストレーションを行い、位置合わせされた箇所ではその空間高周波成分も似ているとして原画像の標本化周波数を超える超解像空間高周波成分を生成する。

提案法は、3.2節の方法に比べて、図3.4内の信号成分超解像ユニットのみが異なる。以下に処理詳細を示す。

3.3.1 信号成分超解像

図3.4内の「信号成分超解像」ユニットでは、信号成分 S の超解像を行う。ここでデジタルシネマのような高精細映像では、空間解像度が高く同一フレーム内に多くのオブジェクトが含まれるため、自己合同性や相似性の高さを利用した超解像[73]が有効である。例えば、向日葵畑やビル街などの映像では、同一オブジェクトや相似オブジェクト内に自己合同性や相似性の高い箇所が存在する可能性が高い。そこで提案法では、信号成分 S を n 階Wavelet分解した空間低周波成分 LL_n^s をブロック領域分割して、 S への位置合わせを行う。そして位置合わせされたブロック領域では、その空間高周波成分も似ていると仮定して、当該ブロック領域の空間高周波成分を S の標本化周波数を超える空間高周波帯域に割当ててことを特徴とするレジストレーション超解像を行う。

図3.10と図3.11に「信号成分超解像」ユニット内の詳細サブユニット図を示す。以下では、同図を基に詳細を説明する。

“レジストレーション超解像”サブユニットでは、 S とその多重解像度分解成分間のレジストレーションとして、以下の1~6の処理を行う。

1. 超解像高周波成分の初期値生成のため、 S をデシメーションなしで1階 Wavelet 分解して、その水平、垂直、斜め高周波帯域の全成分を S の標本化周波数を超える水平、垂直、斜め高周波帯域 LH_R 、 HL_R 、 HH_R にコピー
2. 多重解像度成分の生成のため、 S を空間高周波方向に n 階 Wavelet 分解して、 n 階空間低周波成分 LL_C^n 、および水平、垂直、斜め高周波成分 LH_C^n 、 HL_C^n 、 HH_C^n を出力
3. 多重解像度成分から S への位置合わせのため、 LL_C^n を 4×4 画素の小ブロックに分割して、その全ブロックにおいて LL_C^n を基準フレーム、 S を参照フレームとして SSD (Sum of Square Difference) を評価関数とする全探索パラボラフィッティングブロックマッチング [75] を実施
4. 超解像高周波成分の生成のため、3 の位置合わせ情報を用いて、当該ブロックの LH_C^n 、 HL_C^n 、 HH_C^n 成分を LH_R 、 HL_R 、 HH_R 上に割り当て
5. 4 の割り当て後の LH_R 、 HL_R 、 HH_R において、点広がり関数としてガウシアンを用いた MAP (Maximum A Posteriori) 再構成 [76] を実施
6. 5 の LH_R 、 HL_R 、 HH_R を $B_s \times B_s$ 画素のブロックに分割して、その各ブロックにおいて波形整形のため分散値 σ_{LH} 、 σ_{HL} 、 σ_{HH} のガウシアンによる bilateral フィルタ [77] を適用後、 S 、 LH_R 、 HL_R 、 HH_R を Wavelet 再構成して超解像信号成分 S_{SR} を出力

“最適化” サブユニットでは、超解像パラメータの最適化を行う。ここで 8K の水平解像度を持つ超解像画像 O_{SR} の正解は不明であるため、DI PSNR 最大化による超解像パラメータ σ_{LH} 、 σ_{HL} 、 σ_{HH} の最適化を行う。ここで DI PSNR は、もし画像縮小と超解像が理想的に行えるならば、原画像とその超解像画像を水平、垂直、斜め方向に1画素ずつ位相位置をずらして縮小した4枚の画像を各々超解像して位相を原画像に合わせて縮小した4枚の画像の差分は最小になることより、原画像を基準とする4枚の縮小画像の PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 値を計算し、それらの和を平均して求める。ゆえに DI PSNR が大きいほど、超解像手法として有効であることが見込まれる。本サブユニットでは、以下の1~7の処理を行う。

1. S_{SR} の周波数分解のため、 S_{SR} をデシメーション無しで1階 Wavelet 分解

2. 1の空間低周波成分を水平、垂直、斜め方向に1画素ずつ位相位置をずらして2:1画素間引きを行って4枚の縮小画像を生成
3. 2の4枚の縮小画像を“レジストレーション超解像”サブユニットの方法で超解像して4枚の超解像画像を生成
4. 3の4枚の超解像画像の周波数分解のため、これらをデシメーションなしで1階 Wavelet 分解
5. 4の空間低周波成分をSと同じ位相位置の画素を残すように2:1間引きを行って4枚の縮小画像を生成
6. 5の4枚の縮小画像について、各々Sを基準とするPSNR値を計算し、それらの和を平均してDI PSNRを計算
7. 1~6の処理を”レジストレーション超解像”サブユニット内で σ_{LH} 、 σ_{HL} 、 σ_{HH} を各々変化させて作成した S_{SR} で行い、DI PSNRが最大となる最適化超解像信号成分 $S_{SR,OP}$ を出力

3.3.2 評価

評価画像は客観画質量であるPSNR (Peak Signal to Noise Ratio) をCMOS、フィルム、高感度フィルム各々で同じ解像度で測るために、図3.1(a)-(f)を水平、垂直各1/2に縮小して作成した。評価実験では、これを7種類の方法で超解像復元する。画像縮小時のlow pass filtering処理では、フィルタ係数が[22 0 - 52 0 158 256 158 0 - 52 0 22]の各要素を512で割った値の線形フィルタを水平、垂直方向に適用する。表3.3に比較する超解像法を示す。

実験条件を以下に示す。WZP法(D)では、使用するWaveletフィルタとしてCohen-Daubechies-Feauveau[74] (CDF)の5/3を用いた。複数フレームレジストレーション法(F)では、レジストレーション法として、前後 n フレームから水平32、垂直32画素サイズのブロック、水平 $64 \times n$ 、垂直 $64 \times n$ 画素サイズの探索範囲で、SSDを評価関数とするパラボラフィッティングブロックマッチングを用いた。提案法(G)では、はじめに予備実験としてタップ長の異なるWaveletフィルタを用いて、用いるWaveletフィルタを選定した。その結果、原画像に含まれる高周波成分に応じて最適なフィルタは異なるが、超解像には折り返し

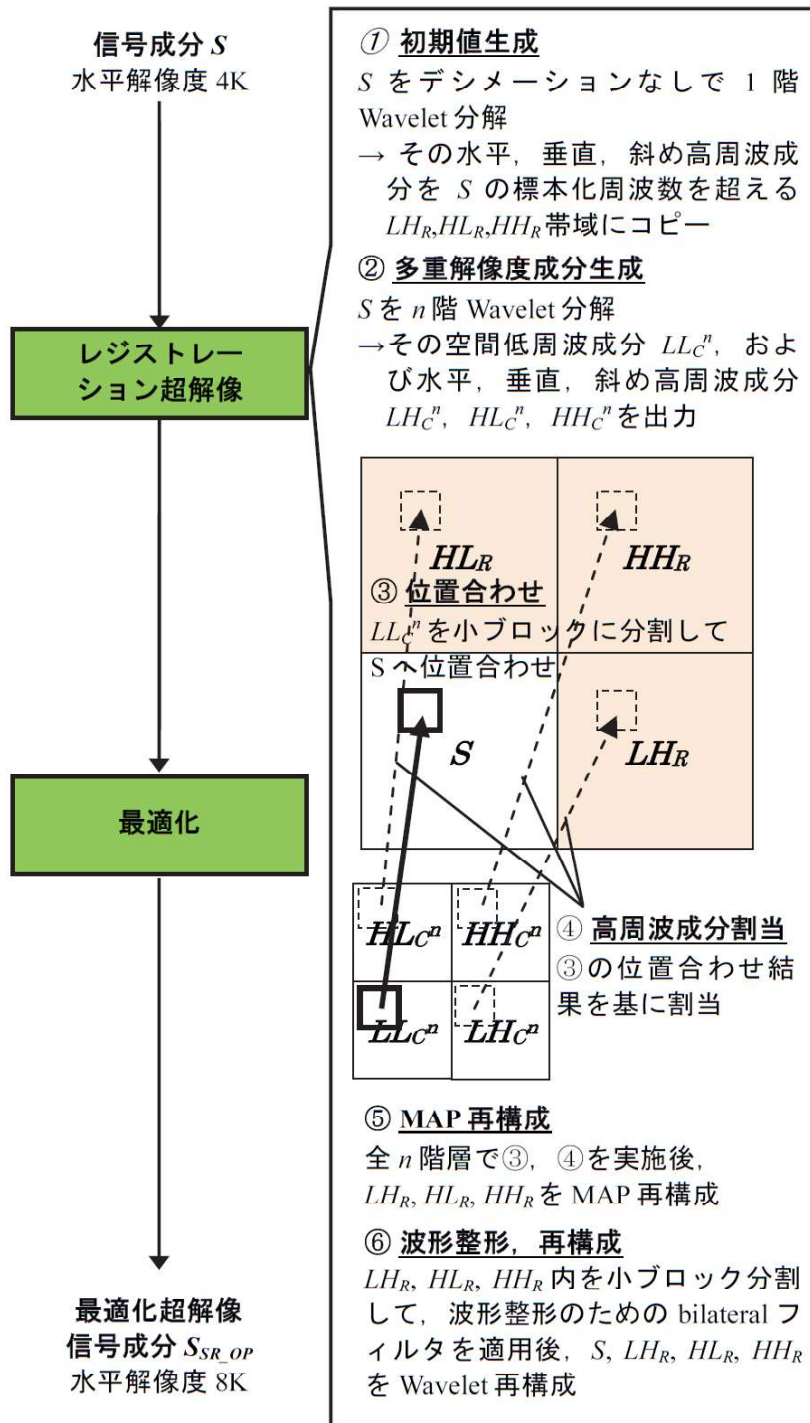


図 3.10 信号成分超解像の詳細図 (レジストレーション超解像)

成分が必要であり急峻な遮断特性を持つ長いタップ長のフィルタでは逆に画質が劣化してしまうことがわかった。以上より使用する Wavelet フィルタは、Daubechies の 1~4 次 (2~8 タップ)、CDF の 5/3、9/7 とした。これらの Wavelet

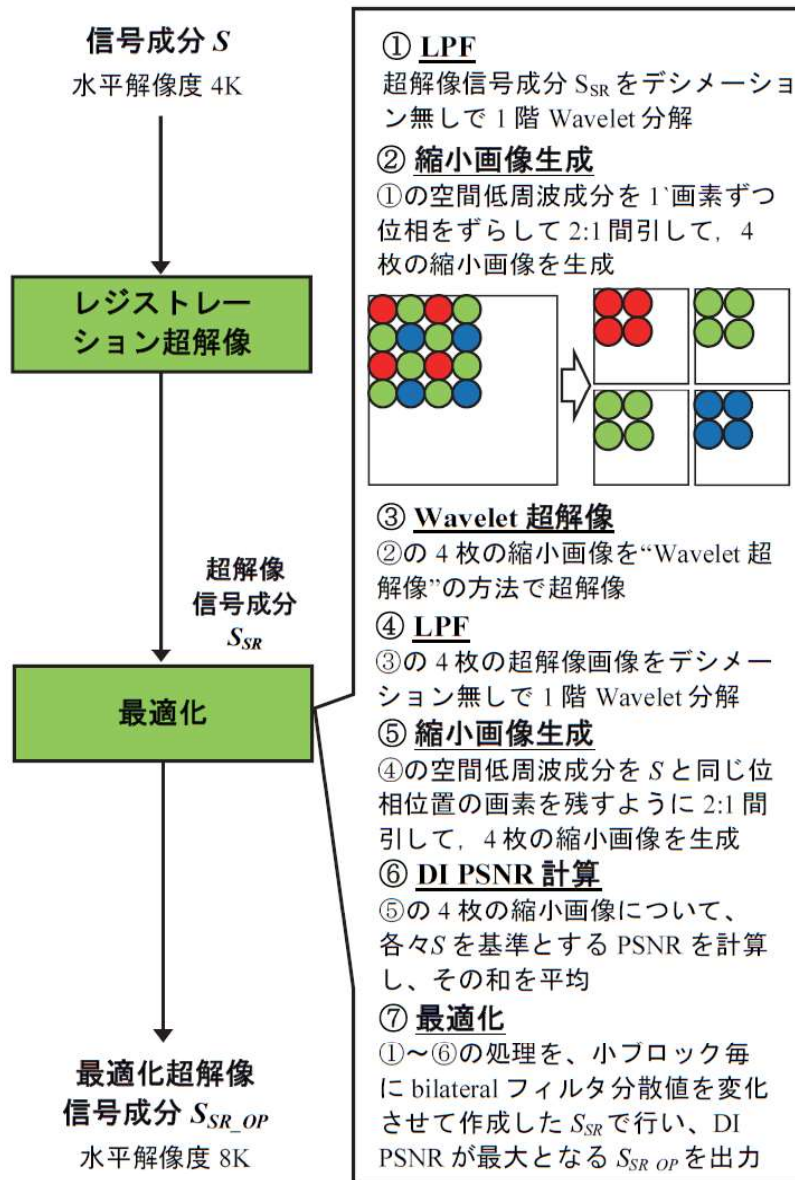


図 3.11 信号成分超解像の詳細図（最適化）

フィルタは、“最適化”サブユニットにおいて DI PSNR が最大となるフィルタがブロック毎に選択される。そして分解階数 n は、視覚の周波数チャネル特性 [72] より $n = 4$ とした。また bilateral フィルタのタップ数は 9、これに用いるガウシアンフィルタの分散値の範囲は 0.1~5.1 で 1.0 刻み、ゲインは 0.1, 0.4, 0.8, 1.0, 1.2 とした。なおガウシアンフィルタの係数値は、分散値が 5.1 以上でほぼ平坦な係数値となるため、分散値の上限値を 5.1 とした。またゲインは、Wavelet 分解するためレジストレーションが理想的に行われれば 1.0 で良いが、実際には

表 3.3 超解像法

(A) Bi-cubic
(B) Lanczos-3
(C) Total variation interpolation[65]
(D) Wavelet domain zero padding (WZP)
(E) WZP and cycle-spanning and edge rectification[63]
(F) Multi-frame registration[67]
(G) Proposed method

レジストレーション誤り等によるエッジ付近の疑似高周波や過強調を抑制するため、低い方の値に多くの候補値を与えている。

表 3.4 に PSNR 測定結果を示す。結果より、提案法 (G) は、CMOS 素子撮像画像、フィルム撮像画像、高感度フィルム撮像画像のいずれにおいても、他の超解像法よりも高い PSNR 値が得られた。特に画像に含まれる白色雑音が超解像画質に影響を与える表 3.1(a)–(d) について、約 1[dB] の改善が見られた。なお図 6 の“最適化”を行うことで、行わない場合と比べて 0.3[dB] 以上の PSNR 改善が得られた。

また図 3.12、図 3.13 に、図 3.1 における bi-cubic(A)、WZP(C)、提案法 (G) の切り出し画像を示す。同図のように提案法 (G) は、他の超解像法よりも高い主観画質が得られた。特に、ぼやけや過強調の少ない自然な信号超解像成分と、デジタルシネマ映像が持っている雑音成分に近い雑音超解像成分が得られていることがわかる。

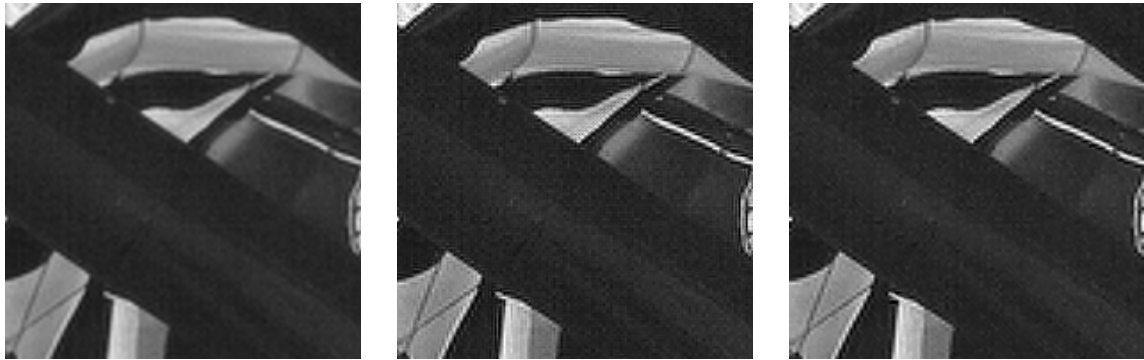
3.3.3 むすび

超解像時の雑音の影響を排除するため、原画像を信号成分と雑音成分に分離することを特徴とする画像超解像法を提案した。提案法の信号成分は、信号成分とその多重解像度分解成分間のレジストレーションにより超解像される。そして超解像パラメータは、DI PSNR 値を最大化するように最適化される。実験により、提案法は従来の超解像法よりも約 1[dB] の PSNR 改善が得られた。この

表 3.4 PSNR 測定結果 ([dB])

Sequences	Methods						
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)
(a) Nebuta	20.97	21.01	20.51	21.06	20.68	20.43	22.25
(b) children	21.17	21.23	20.37	21.14	20.72	20.08	22.46
(c) aerial	31.58	31.58	31.68	31.56	31.57	31.59	32.40
(d) marathon	30.41	30.42	29.90	30.63	30.42	30.44	32.04
(e) Kumano	37.55	37.58	37.48	37.32	37.58	37.86	38.35
(f) fire	36.92	36.94	37.02	37.32	36.91	36.02	37.89

うち DI PSNR を用いた最適化により、0.3[dB] 以上の PSNR 改善が得られた。さらに提案法の主観画質は、従来の超解像法よりもぼやけや過強調の少ない自然な信号超解像成分と、デジタルシネマ映像が持っている雑音成分に近い雑音超解像成分が得られることを示した。



(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(a) Cropped super-resolution image of Nebuta festival

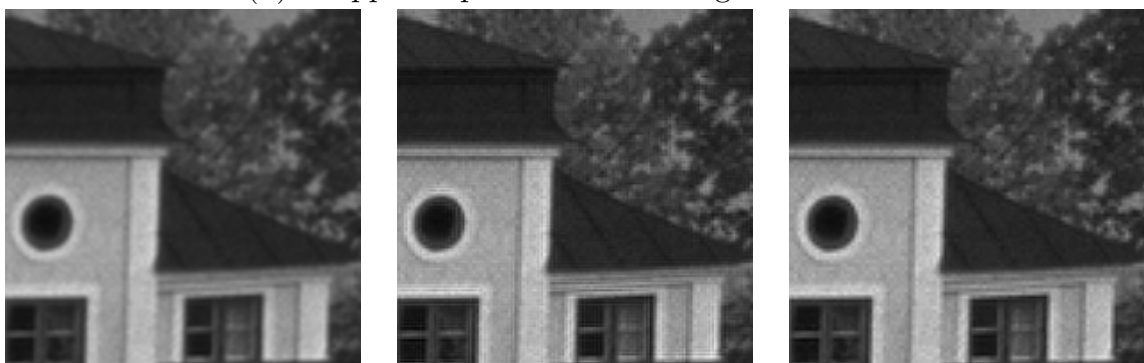


(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(b) Cropped super-resolution image of children



(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(c) Cropped super-resolution image of aerial photo

図 3.12 図 3.1 の (a) Nebuta, (b) children, (c) aerial 画像の超解像画像における切り出し画像



(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(d) Cropped super-resolution image of marathon



(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(e) Cropped super-resolution image of Kumano shrine



(A) bicubic

(D) WZP

(G) Proposed

(f) Cropped super-resolution image of fire festival

図 3.13 図 3.1 の (d) marathon, (e) Kumano, (f) fire 画像の超解像画像における切り出し画像

第4章

空間方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化

第4章では映像方式変換の応用として、現行の映像システムに比べて非常に大きな情報量を持つスーパーハイビジョンの高圧縮符号化のために、空間方向の縮小と超解像を用いた高圧縮符号化法を提案する。

図4.1に提案法全体図を示す。提案法では符号化側において、原画像を画像縮小して符号化・局部復号する。さらに局部復号画像に超解像を行うが、入力画像と超解像画像の差分が最小となるように超解像パラメータの導出を行い、その最適パラメータ値を補助情報として復号側へ伝送する。復号側では縮小符号化信号を復号後、補助情報を用いて超解像を行う。

4.1 方法

図4.2に提案法の符号化側処理の詳細図を示す。提案法の符号化側では、原画像と超解像画像の差分が最小となるように補助情報を最適化するという特徴を持つ。

同図内の「画像縮小」ユニットでは、原画像は N 次の Daubechies Wavelet $db(N)$ を用いて1階 Wavelet 分解される。これにより原画像 O は、空間低周波帯域成分 $A^{(1)}$ 、水平、垂直、斜め高周波帯域成分 $H^{(1)}, V^{(1)}, D^{(1)}$ に周波数帯域分解される。ここで上付き文字 (1) は1階 Wavelet フィルタバンクであることを示す。そして縮小画像として $A^{(1)}$ を整数化して出力する。ここで $A^{(1)}$ に含まれる折り返

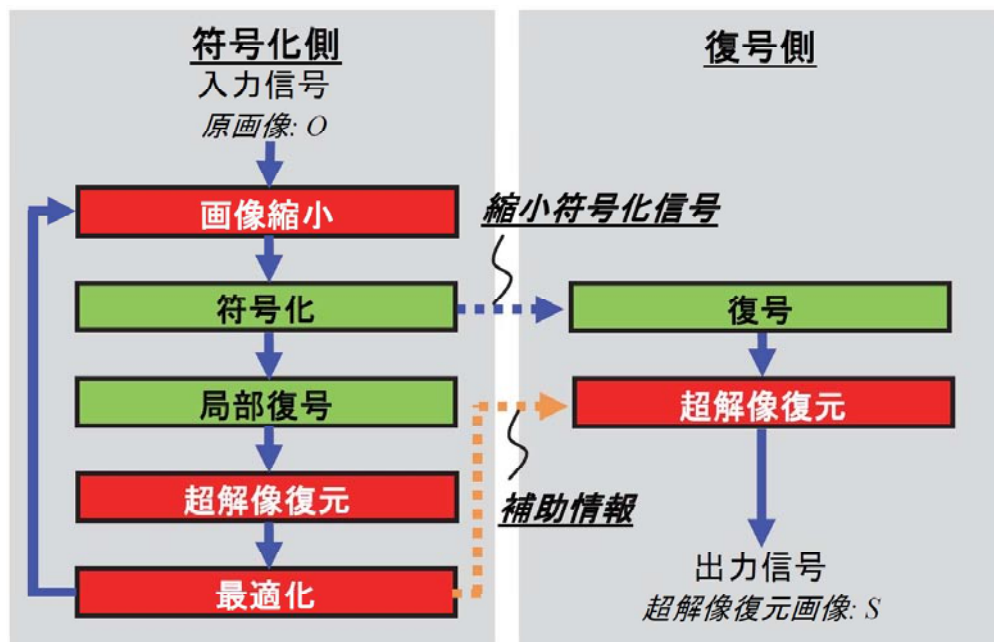


図 4.1 提案法全体図

し歪量は N で変化させることができる。

「符号化」ユニットでは、縮小画像 $A^{(1)}$ を MPEG-4 AVC/H.264 符号化して、符号化画像 $E^{(1)}$ を出力する。

「局部復号」ユニットでは、符号化画像 $E^{(1)}$ を MPEG-4 AVC/H.264 復号して、復号画像 $DE^{(1)}$ を出力する。

「超解像復元」ユニットでは、図 4.3 に示すように、はじめに“Wavelet 分解”サブユニットにて $DE^{(1)}$ を $db(N)$ で 1 階 Wavelet 分解して、 $A^{(2)}, H^{(2)}, V^{(2)}, D^{(2)}$ を得る。次に“空間高周波成分拡大”サブユニットにて $H^{(2)}$ を空間低周波帯域、同じサイズの零行列を空間高周波帯域にセットして 1 階 Wavelet 再構成して、 $H'^{(1)}$ を得る。そして“畳込”サブユニットにて $H'^{(1)}$ に分散値 $\sigma_H^{(1)}$ 、ゲイン $\gamma_H^{(1)}$ のガウシアンで畳込処理を行い、 $H''^{(1)}$ を得る。 $V''^{(1)}, D''^{(1)}$ も同様に処理する。最後に“Wavelet 再構成”サブユニットにて $DE^{(1)}$ を空間低周波帯域、 $H''^{(1)}, V''^{(1)}, D''^{(1)}$ を空間高周波帯域にセットして 1 階 Wavelet 再構成を行い、超解像画像 S を得る。

「最適化」ユニットでは、図 4.2 内の「画像縮小」から「超解像復元」までの処理を $N, \{\sigma_H^{(1)}, \sigma_V^{(1)}, \sigma_D^{(1)}\}, \{\gamma_H^{(1)}, \gamma_V^{(1)}, \gamma_D^{(1)}\}$ を変化させて行い、原画像 O と超解像画

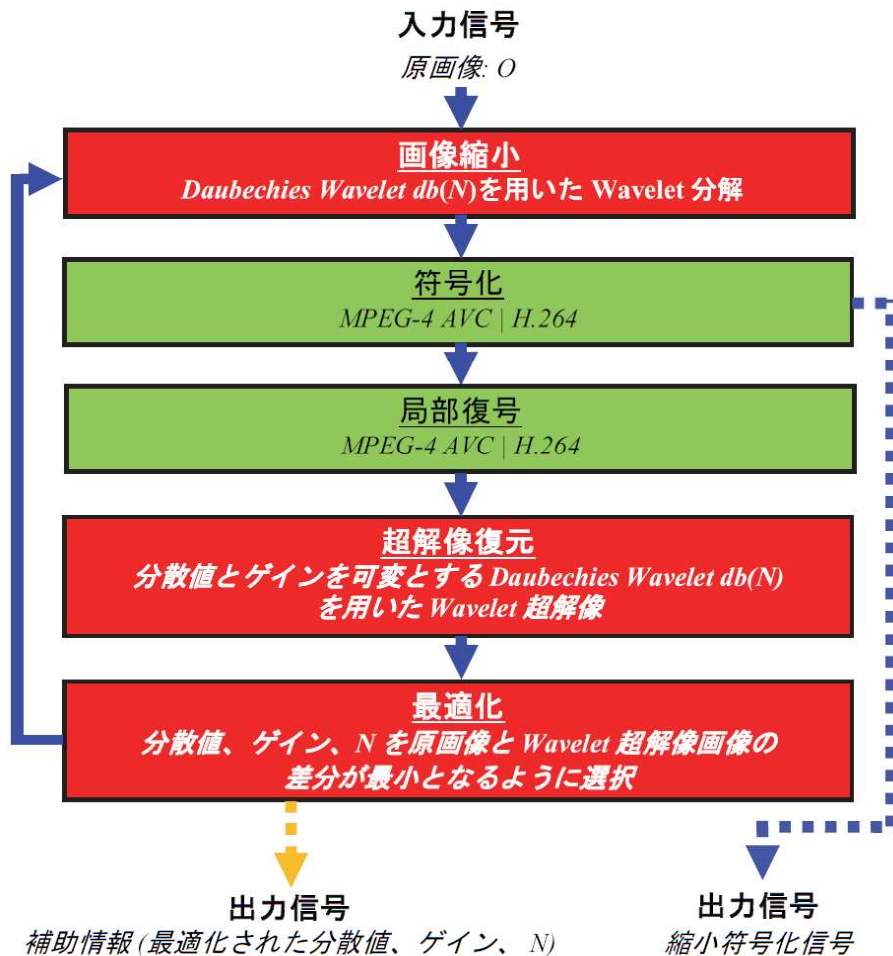


図 4.2 提案法の符号化側処理

像 S の差分が最小となるパラメータを補助情報として出力する。

最終的に提案法の符号化側では、「最適化」ユニットにて選択された N を用いて「画像縮小」と「符号化」を行った縮小符号化信号と補助情報を、復号側へ伝送する。

図 4.1 に示す提案法の復号側では、「復号」ユニットにて符号化信号を復号後、「超解像復元」ユニットにて補助情報を用いて図 4.3 の方法で超解像画像を得ることで、高精度かつ高安定な超解像復元を行うことができる。

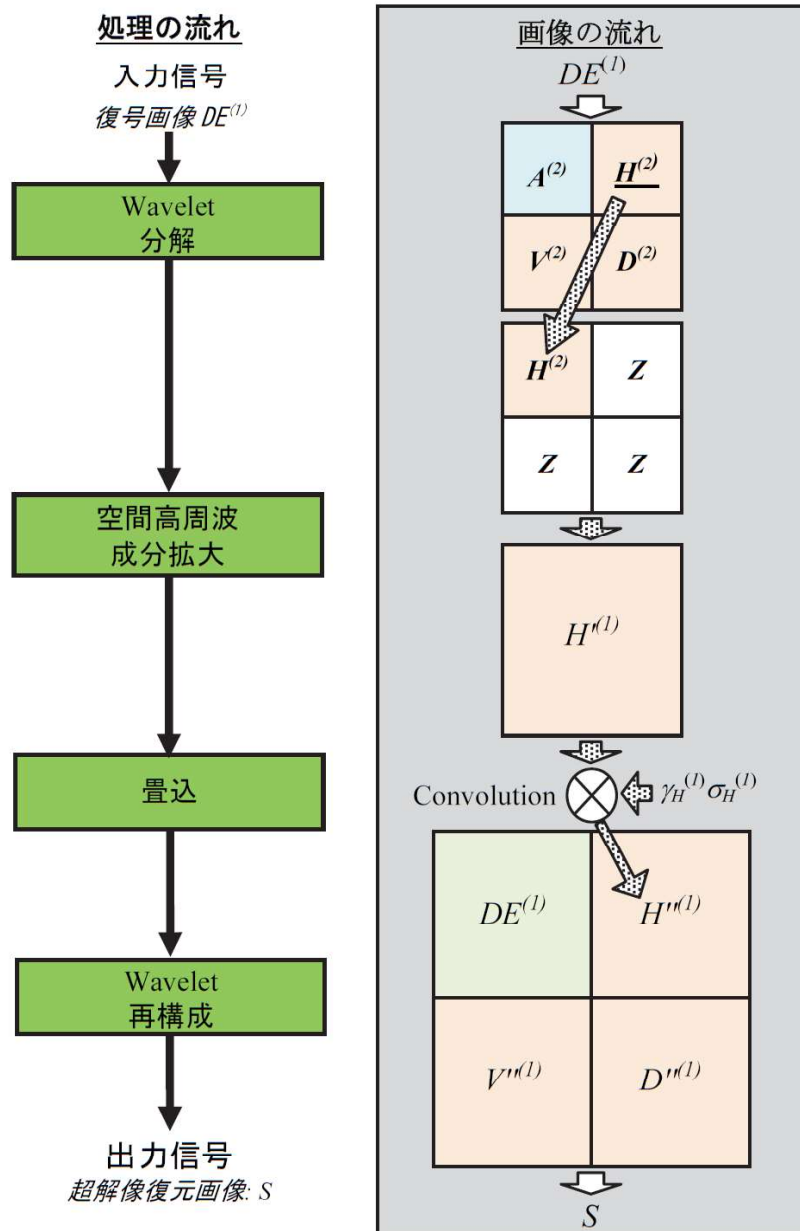


図 4.3 「Wavelet 超解像」サブユニットの詳細図

4.2 評価

4.2.1 予備評価実験

4.1節で述べたように、図4.2内の「画像縮小」ユニットでは、 $db(N)$ の N 値によって縮小画像に含まれる折り返し歪量が変わる。そして画像縮小で失われ

表 4.1 実験条件

符号化／復号	MPEG-4 AVC/H.264 using JM reference software 16.0
実験画像	3,840×2,160 画素、60fps、 8 ビットグレースケール
フレーム数	15 フレーム
GOP 構造	1GOP=15 フレーム (I,B,P,B,P,...)

表 4.2 符号化／復号を行わない提案法における N 毎の PSNR 測定結果 ([dB])

N	Diving	SL	Nebuta
2	27.56	39.21	26.46
4	27.81	39.16	26.62
6	27.63	38.99	26.40
8	27.62	38.96	26.36

N は Daubechies Wavelet の次数

た空間高周波成分は、「超解像復元」ユニットにて分散値やゲインというガウシアンパラメータを伴って縮小画像内の折り返し歪成分から復元される。以上で述べたように、 N は「超解像復元」に重要な要素であるため、 N の最適な範囲をあらかじめ予備評価実験として求める。

図 4.4 に評価画像を示す。表 4.1 に実験条件を示す。表 4.2 に原画像と超解像画像間の PSNR 測定結果 (15 フレーム平均値) を示す。

表 4.2 より、評価画像 (b) の “SL” は $N = 2$ の時にもっとも PSNR 値が高い。これは同画像では SL をドリーするようにカメラが大きく動くため動きぼやけが大きく、画像に含まれる空間中～高周波成分が少ないため、折り返しの大きなタップ数の小さい $N = 2$ のフィルタが有効であるためと考えられる。また同表より、評価画像 (a) の “Diving” と評価画像 (c) の “Nebuta” は $N = 4$ の時にもっとも PSNR 値が高い。これは Daubechies Wavelet は $N = 2$ の時 (Haar Wavelet) のみ線形位相性が満たされるため、画像に含まれる折り返し歪量とフィルタの線

表 4.3 PSNR 値 (15 フレーム平均値) ([dB])

	Diving	SL	Nebuta
A	24.58	36.88	25.97
B	21.98	36.22	24.92
C	21.30	35.48	24.54

形位相性が最も超解像処理に適しているのが $N = 4$ の場合であり、それ以下または以上だと PSNR 値が低くなっていくためだと考察される。

以上の結果より、実験では $N = 2, 4, 6$ を用いることとした。

4.2.2 本評価実験

本評価実験では、図 4.4 に示す評価画像と、表 4.1 の実験条件を用いる。比較方法は、以下の A~C を用いる。

- A. 提案法
- B. 提案法で補助情報を用いない方法
- C. MPEG-4 AVC/H.264 でそのまま符号化する方法

各方法とも、符号化ビットレートは 30Mbps とした。また方法 A では、予備評価実験の結果より $N = 2, 4, 6$ を用いた。ガウシアン分散値 $\{\sigma_H^{(1)}, \sigma_V^{(1)}, \sigma_D^{(1)}\}$ は 0.1 から 5.1 まで 1.0 刻み、ゲイン $\{\gamma_H^{(1)}, \gamma_V^{(1)}, \gamma_D^{(1)}\}$ は 0.1 から 1.6 まで 0.5 刻みとし、 64×64 画素ブロック毎に最適化を行った。補助情報は、総符号化ビットレートに含まれるが、ZIP 圧縮による可逆符号化を行っており、30Mbps からすると十分小さい値 (数百 kbps) である。また方法 B では、 $N = 2, \{\sigma_H^{(1)}, \sigma_V^{(1)}, \sigma_D^{(1)}\} = 1.0, \{\gamma_H^{(1)}, \gamma_V^{(1)}, \gamma_D^{(1)}\} = 1.0$ を用いた。

表 4.3 に原画図を基準とした PSNR 測定結果を示す。結果より方法 A の提案法は、方法 B, C よりも高い PSNR 値が得られた。

また図 4.5 に方法 A~C の主観画質を示す。評価画像 (a) の “Diving” の少年の髪の毛、評価画像 (b) の “SL” のライト、評価画像 (c) の “Nebuta” のねぶたのほほなどでは、方法 A の提案法は、方法 C に比べてぼやけが少なくエッジがしっ

かり超解像できていることが分かる。

4.3 むすび

本章では、将来のスーパーハイビジョン放送のために、MPEG-4 AVC/H.264 符号化／復号の前段に画像縮小、後段に超解像復元を用いた高圧縮映像符号化法を提案した。提案法の特徴は、符号化側で原画像と超解像復元画像の差分が最小となるように超解像復元パラメータを最適化して、これを復号側へ伝送することで、復号側の超解像復元を高精度かつ高安定に行うことである。実験では、提案法は従来法である MPEG-4 AVC/H.264 でそのまま符号化する方法に比べて、高い PSNR 値と客観画質を得た。



(a) Diving in the river (Diving)



(b) Steam locomotive (SL)



(c) Nebuta festival (Nebuta)

図 4.4 評価画像

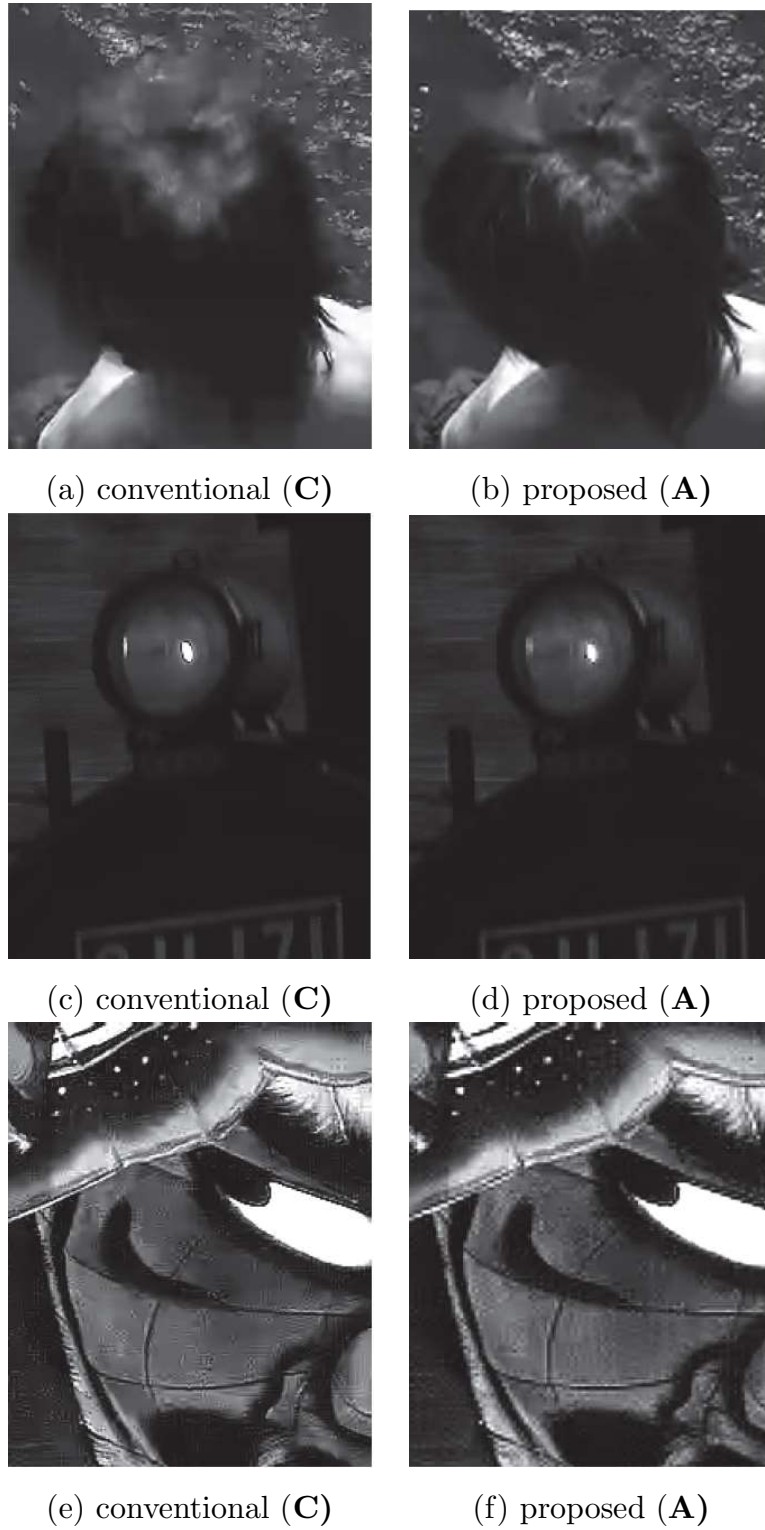


図 4.5 従来法 (MPEG-4 AVC/H.264 でそのまま符号化) と提案法の主観画質比較

第5章

階調方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化

第5章では映像方式変換の応用として、現行の映像システムに比べて非常に大きな情報量を持つスーパーハイビジョンの高圧縮符号化のために、3.1節のデジタルシネマやスーパーハイビジョン画像の空間周波数スペクトル解析とその雑音成分の空間周波数スペクトル解析結果を基に、階調削減と階調復元を用いた高圧縮符号化法を提案する。提案法は以下の特徴を持つ。

- 符号化／復号の前後で階調削減と階調復元
- 符号化効率と主観画質向上のため、階調削減時に雑音除去とグラデーション保存を考慮
- 原画像に忠実な階調削減のため、符号化側で原画像を基準に階調削減と階調復元パラメータの両方を最適化して、復号側へ補助情報として伝送

階調削減法には、階調値の再量子化法として、古くから各画素レベル値を除算して端数を切り捨て処理する「切り捨て法」がある。また端数を四捨五入処理する「四捨五入法」がある。さらにはフレーム画像内で出現頻度が高い画素レベル値付近に多くの量子化階調値を割り付ける「Lloyd-Max法」[79, 80, 81]が広く知られている。他にも「tone mapping法」[82]や「scalable video coding法」[83]が知られている。

このうち「切り捨て法」は、画素レベル値を右シフト処理で除算するため、高速処理が可能でハードウェア化も容易である。しかし端数を切り捨て処理す

るため、量子化誤差が大きくなる。「四捨五入法」は、処理速度やハードウェア化の容易さは「切り捨て法」と大きく変わらないが、端数を四捨五入するぶん量子化誤差は低減する。「Lloyd-Max 法」では、量子化テーブルと逆量子化テーブルは、逆量子化画像とトレーニングセット間の差分を最小化するように最適化される。「Lloyd-Max 法」の出力は、逆量子化テーブルと量子化テーブルを用いた階調削減画像である。ここで逆量子化テーブルを用いた階調削減画像は、「Lloyd-Max 法」が疑似輪郭抑制を考慮していないため、グラデーション領域に疑似輪郭が発生する可能性がある。「tone mapping 法」では、逆量子化テーブルを用いないため、高精度かつ高確度な階調復元画像を得ることが困難である。「scalable video coding 法」では、階層的にビットストリームを伝送するが、高階調画像の低階調側の画像はほぼ雑音画像である。以上より、これらの従来法の主観画質や符号化効率は低くなる可能性が高い。加えてスーパーハイビジョン映像の符号化効率は、CMOS センサの1画素あたりの受光面積が小さく信号対雑音比が低いため、低くなる可能性が高い。

一般に階調削減では、特に階調削減量が多い場合に、輝度変化が少ないグラデーション領域に疑似輪郭が発生しやすいという課題がある。さらに「Lloyd-Max 法」において原画像に雑音成分が多く重畳されている場合は、雑音レベル付近に多くの再量子化値が割り当てられ信号成分の再量子化再現性が低くなるという課題がある。そこで5.1.1節では、雑音を分離してグラデーション領域を保存することを特徴とする「Lloyd-Max 法」を用いた階調削減法を提案する。

また階調復元では、5.1.2節において、階調値は近傍の画素レベル値に対して滑らかに変化するという仮定のもとに、周辺の画素値から階調補間値を決定することを特徴とする階調補間法を提案する。さらに提案法では、原画像に忠実な復元のため、階調補間パラメータを可変とすることを特徴とする。

5.1 提案法

図5.1に提案法の全体図を示す。

提案法の符号化側において、同図内の「階調削減」ユニットでは、12ビット深度のスーパーハイビジョン原画像を8ビット深度に階調削減する。「符号化」ユニットでは、階調削減画像をJM reference software[84]のMPEG-4 AVC/H.264

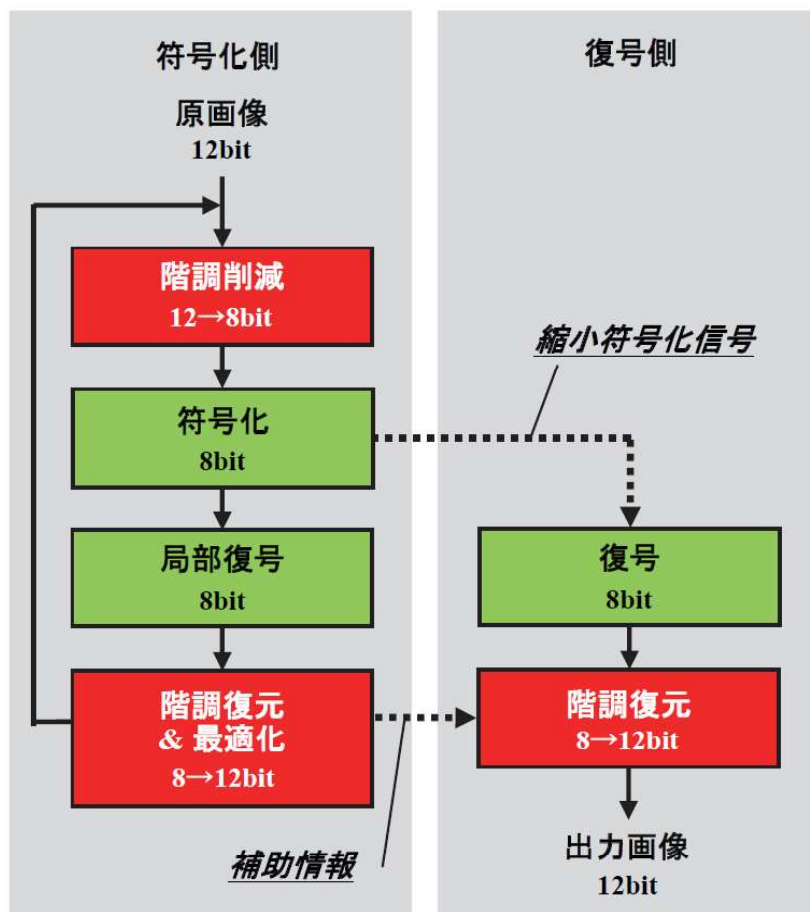


図 5.1 提案法全体図

ソフトウェアコーデックを用いて符号化する。「局部復号」ユニットでは、符号化信号を復号する。「階調復元&最適化」ユニットでは、原画像を基準とするパラメータ最適化を用いて8ビット深度の復号信号を12ビット深度に階調復元する。この最適化パラメータは、符号化信号とともに補助情報として復号側へ伝送する。

提案法の復号側において、「復号」ユニットでは、符号化側から伝送されてきた符号化信号を復号する。「階調復元」ユニットでは、符号化側から伝送されてきた補助情報を用いて、符号化側の「階調復元&最適化」ユニットと同様の方法で8ビットの復号信号と12ビット深度に階調復元する。補助情報を用いて符号化側と同様に階調復元することで、原画像に忠実な出力画像を得ることができる。

以下では、階調削減と階調復元&最適化の詳細について説明する。

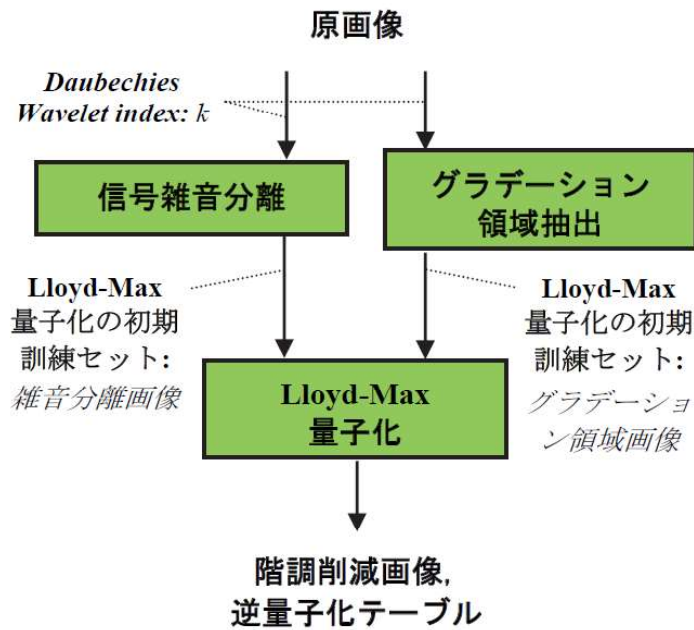


図 5.2 階調削減の詳細図

5.1.1 階調削減

図 5.2 に「階調削減」ユニット内の詳細サブユニット図を示す。

同図内の“信号雑音分離”サブユニットでは、はじめにスーパーハイビジョン原画像を k 次の Daubechies 基底により空間 n_s 階 Wavelet 分解して、空間低周波帯域成分 LL^{n_s} と、水平、垂直、斜め高周波帯域成分 $LH^{n_s}, HL^{n_s}, HH^{n_s}$ を得る。そして符号化効率向上のため、スーパーハイビジョン原画像に重畳された雑音を分離する。ここでスーパーハイビジョン原画像は、3.1 や [78] より撮像素子 1 画素あたりの受光面積が小さく、画素アンプの熱雑音に起因する白色雑音が多い。そして白色雑音は空間相関が低いため、3.2.1 の方法で HH^{n_s} 内の孤立点成分を分離することで雑音分離画像を得る。

“グラデーション領域抽出”サブユニットでは、階調削減による疑似輪郭抑制のため、スーパーハイビジョン原画像の空間低周波パワーの割合が高い位相位置の画像をグラデーション領域画像として抽出する。ここでは、空間周波数帯域全体に対する LL^{n_s} のパワーの割合が閾値 Th 以上の位相位置の画素群をグラデーション領域画像として得る。

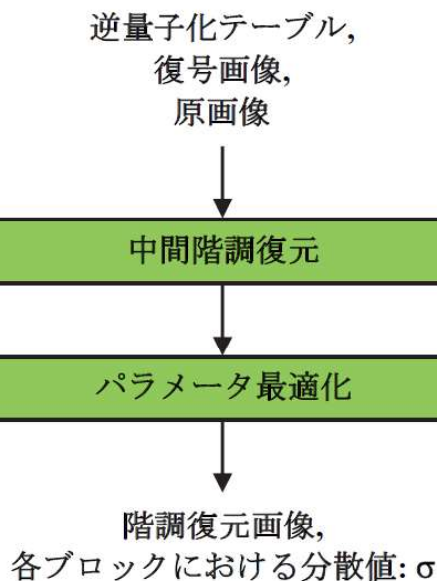


図 5.3 階調復元の詳細図

“Lloyd-Max 量子化” サブユニットでは、スーパーハイビジョン原画像に重畳された雑音成分を分離した雑音分離画像を初期トレーニングセットとすることで、Lloyd-Max 量子化時の信号成分階調値の出現頻度を高くする。さらにグラデーション領域画像も初期トレーニングセットに加えることで、グラデーション領域階調値の出現頻度を高くする。Lloyd-Max 量子化における実装では、雑音分離画像とグラデーション領域画像の影響度を調整するため、雑音分離画像のヒストグラムにグラデーション領域画像のヒストグラムを α 倍したものを初期訓練セットとして用いて、階調削減画像と、その逆量子化テーブルを得る。

5.1.2 階調復元・最適化

図 5.3 に「階調補間&最適化」ユニット内の詳細サブユニット図を示す。

同図内の“中間階調復元”サブユニットでは、階調削減で失われた階調を復元するため、逆量子化テーブルを適用した復元画像に周辺画素との階調値が連続するように中間階調を割り当てる。階調値の連続度合は、分散値 σ の bilateral フィルタ [77] による畳込演算で計算し、この値をもとに畳込値が小さい場合は低く、大きい場合は高い中間階調値を均等に割り当てる。

“パラメータ最適化”サブユニットでは、 $B_S \times B_S$ サイズのブロック毎にスー



(a) lion



(b) children

図 5.4 評価画像

パーハイビジョン動画像と中間階調割当画像の差分が最小となる階調削減の Daubechies 基底 k と、階調復元の分散値 σ を出力する。

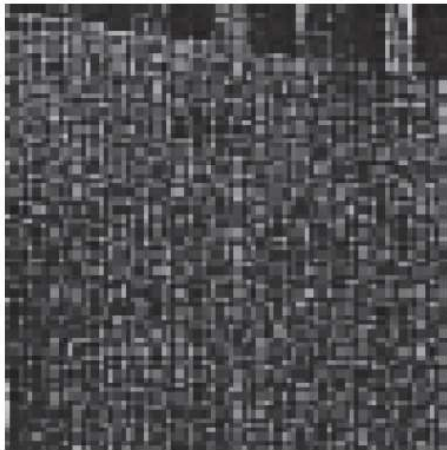
5.1.3 評価

5.1 節で述べた提案法を、表 5.1 に示す 4 種類の階調削減・階調復元法と比較する。図 5.4 に用いる評価画像を示す。

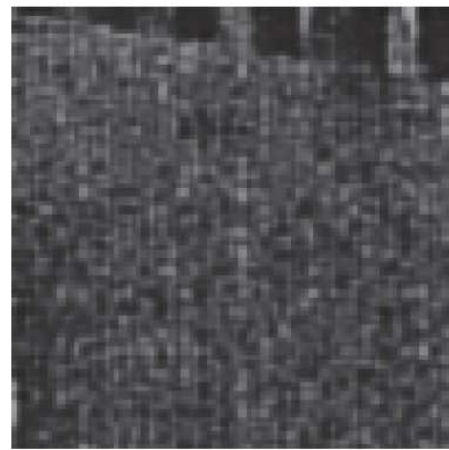
評価画像は、 $3,840 \times 2,160$ 画素、60 フレーム / 秒、12 ビット深度 / 色、

表 5.1 階調削減・階調復元法

	階調削減	階調復元
Conventional	無し (12bit で符号化)	
Round off	16 で除算 (端数四捨五入)	16 で乗算
Lloyd-Max	Lloyd-Max 法	
Proposed without tone reproduction	提案法 (階調復元は逆量子化テーブルのみで実施)	
Proposed	提案法	



(a) 原画像



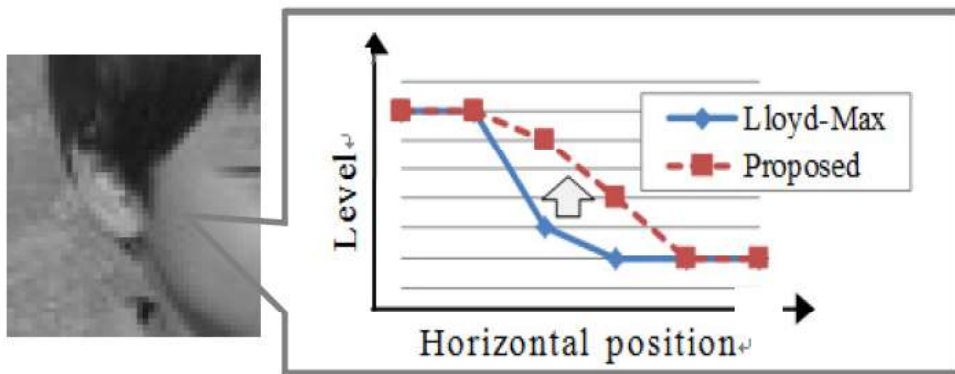
(b) 雑音除去画像

図 5.5 図 5.2 内の「雑音分離画像抽出」サブユニットにおける雑音分離後の雑音除去画像」

YUV4:0:0 モノクロ信号で、各シーケンス 15 フレーム長である。符号化／復号は AVC/H.264 (JM16.0) で、1 GOP は 15 フレーム、B スライス は 1 フレーム毎に挿入 (GOP 構造は I,B,P,B,P,...)、bilateral フィルタは 5×5 タップを用いる。なお 5.1 節内の定数は、実験的に Daubechies Wavelet の index $k = 4, n_s = 4, Th = 0.98, \alpha = 1, P = 1 \sim 4, \sigma = 0.1 \sim 6.1$ (2.0 刻み), $B_s = 32$ とした。

図 5.5 に、図 5.2 内の“雑音分離画像抽出”サブユニットにおける雑音分離効果を示すため、雑音分離後の雑音除去画像を示す。

図 5.6 に提案法の疑似輪郭抑制効果を示す。同図より、提案法は Lloyd-Max 法に比べて疑似輪郭抑制効果を持つことが分かる。



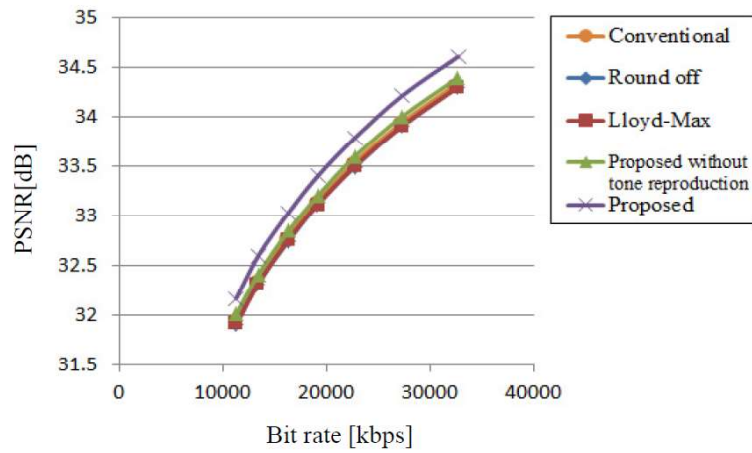
(a) lion

図 5.6 疑似輪郭抑制効果

図 5.7 に原画像を基準とした階調復元画像の PSNR の 15 フレーム平均値を示す。提案法は従来法 (Conventional)、四捨五入法 (Round off)、Lloyd-Max 法に対して約 0.3[dB] の改善が見られた。さらに提案法の階調復元を逆量子化テーブルのみで行う場合は、提案法は従来法 (Conventional)、四捨五入法 (Round off)、Lloyd-Max 法に対して約 0.08[dB] の改善が見られた。これらの結果より、原画像を基準にパラメータ最適化を行ったサイド情報を用いる階調復元は効果的であることが分かる。なお提案法におけるサイド情報は、可逆符号化である ZIP 圧縮されて符号化信号とともに復号側へ伝送されており、その情報量は約 0.4Mbps である。

5.2 むすび

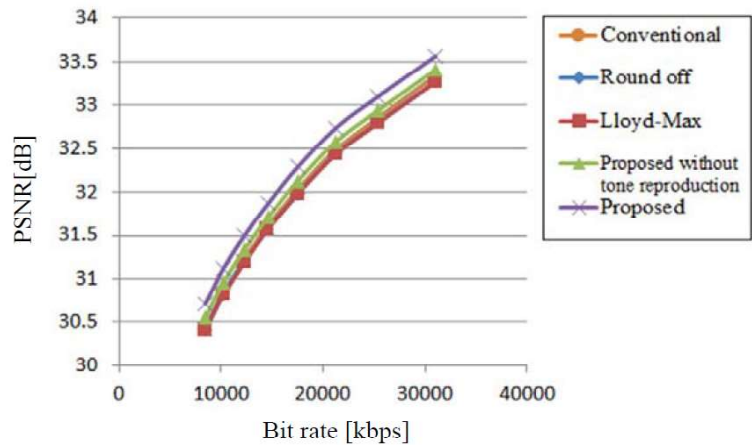
本章では、MPEG-4 AVC/H.264 符号化／復号の前後で階調削減と階調復元を用いる映像符号化法を提案した。階調削減では、雑音除去してグラデーション保存する Lloyd-Max 量子化を行い、符号化効率と主観画質が向上した。階調復元では、符号化側で原画像を基準に階調削減と階調復元パラメータの両方を最適化して、復号側へサイド情報として伝送し、原画像に忠実な階調復元を行った。実験では、提案法は従来法と比べて高い PSNR 値と疑似輪郭抑制効果を得た。



Conventional		Round off		Lloyd-Max		Proposed w/o.		Proposed	
Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR
11220	31.94	11319	31.91	11325	31.91	11304	32.01	11283	32.17
13304	32.33	13358	32.31	13376	32.31	13393	32.40	13411	32.59
16187	32.77	16281	32.74	16271	32.75	16295	32.84	16299	33.03
19046	33.14	19102	33.11	19136	33.11	19190	33.21	19162	33.40
22626	33.53	22689	33.49	22696	33.50	22696	33.59	22721	33.78
27181	33.93	27314	33.91	27281	33.90	27290	34.00	27274	34.21
32321	34.31	32540	34.29	32599	34.30	32633	34.39	32668	34.61

Bit rate [kbps], PSNR [dB]

(a) lion



Conventional		Round off		Lloyd-Max		Proposed w/o.		Proposed	
Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR	Bit rate	PSNR
8426	30.42	8419	30.40	8408	30.40	8449	30.50	8846	30.70
10208	30.84	10259	30.82	10218	30.82	10204	30.92	10199	31.12
12193	31.21	12233	31.19	12297	31.20	12268	31.29	12266	31.49
14465	31.58	14541	31.56	14544	31.57	14578	31.66	14575	31.86
17417	32.01	17527	31.98	17510	31.98	17514	32.08	17509	32.28
21151	32.47	21250	32.43	21274	32.44	21272	32.54	21268	32.74
25098	32.82	25345	32.79	25340	32.79	25334	32.89	25330	33.09
30542	33.29	30968	33.26	30969	33.26	30995	33.36	30991	33.56

Bit rate [kbps], PSNR [dB]

(b) children

図 5.7 PSNR 測定結果

第6章

結論

本論文では、はじめに単純な線形フィルタ処理では画質劣化が大きい、時間方向と空間方向の映像方式変換の研究について述べた。そして映像方式変換の応用として、空間方向の映像方式変換と階調方向の映像方式変換を用いた高圧縮映像符号化の研究について述べた。

第2章では、時間方向の映像方式変換として、スーパーハイビジョンからデジタルシネマへの映像方式変換の研究について述べた。この研究では60から24フレーム/秒へのフレームレート変換が必要だが、通常このように整数倍ではないフレームレート変換では、単純な0次ホールドや線形フィルタ処理によるフレーム内挿では、モーションジャダーや動きぼやけが発生する可能性が高い。このため動き補正フレーム内挿が必要であるが、この動き補正フレーム内挿における動きベクトル検出をいかに高精度かつ高確度に行うかという点が研究の重要なポイントであった。この点においては、現在映像符号化の世界で広く用いられている双方向動きベクトル検出を応用することで、動き検出精度と確度を高めることができた。ただしあまりに遠い時間位置フレームを用いた場合は動き検出精度と確度が低いため、フレーム内挿位置の前後フレームを用いて動きベクトル検出を行った。

さらに8Kの水平解像度を持つ単板撮像素子を用いた小型軽量のスーパーハイビジョンカメラや現行のデジタルカメラなどが持つBayer型画素構造を考慮した動きベクトル検出法を導入することで、動き検出精度と確度をさらに高めることができた。今後のスーパーハイビジョンやデジタルシネマでは120

フレーム／秒のフレームレートを持つ方式が規格化されており、今後両者のフレームレートがともに120フレーム／秒となれば、時間方向の映像方式変換は必要ない。しかしデジタルシネマにおいては旧来の名作コンテンツのほか、撮像や編集、配信のコストや映画館のプロジェクタなどの制約により、今後も24フレーム／秒の映像制作が行われることが予想される。またスーパーハイビジョンにおいてもカメラの感度や符号化伝送ビットレートなどの制約により、今後も60フレーム／秒の映像制作や配信が残る可能性がある。本研究をすすめて映像方式変換器を作ることで、これらのフレームレート変換が可能となり、デジタルシネマ映像をスーパーハイビジョンで放送したり、スーパーハイビジョン素材をデジタルシネマで用いたりすることが可能となると考えられる。なおデジタルシネマからスーパーハイビジョンへの映像方式変換でも本開発方式を用いることができる。

第3章では、空間方向の映像方式変換の研究について述べた。この研究では4Kと8Kの空間解像度間の変換が必要だが、8Kから4Kへの画像縮小においては、十分なタップ数で急峻な遮断周波数特性を持つ線形フィルタを用いれば十分な変換画質が得られる。したがって研究としては、4Kから8Kへの画像超解像をいかに高画質に行うかが重要なポイントであった。この点においては、はじめにデジタルシネマ画像が持つ雑音成分を解析して、その結果を基に原画像を信号成分と雑音成分に分離して各々超解像を行い、最後にこれらを合成することを特徴とする超解像法を用いた。この超解像法ではハードウェア化なども考慮してWaveletを用いた再構成型超解像法を用い、原画像を基準に超解像フィルタを最適化することで超解像画質を高めることができた。さらにデジタルシネマなどの高精細画像はフレームレートが低いためフレーム間の画像相関が低い、高解像度画像であるため単一フレーム内に多くの相似オブジェクトを含むことから、単一フレーム内の多重解像度分解成分間のレジストレーションを用いたレジストレーション型画像超解像法を用いた。そしてこの超解像法でも原画像を基準に超解像フィルタを最適化することで、超解像画質を高めることができた。スーパーハイビジョンでデジタルシネマコンテンツを放送する際には、4Kから8Kへの画像超解像は必須であり、4Kの水平標本化周波数を超える高周波成分をいかに高画質に生成するかが重要である。本提案法で

は、単一フレーム内での畳込処理とレジストレーション処理を行うため、ハードウェア化が容易であると考えられる。なおデジタルシネマ規格のコンテナは空間解像度が最大 $4,096 \times 2,160$ 画素のため、アスペクト比が16:9ではないデジタルシネマ画像（例: $4,096 \times 1,714$ 画素のStEM映像 [85]）などが存在する。このようなデジタルシネマ画像をスーパーハイビジョンに超解像するには、水平解像度が3,840画素になるように左右をクロップして上下に黒を挿入してから超解像するか、水平解像度が3,840画素になるように原画像を縮小して上下に黒を挿入してから超解像することになる。本研究をすすめて映像方式変換器を作ることで、デジタルシネマとスーパーハイビジョン間の空間解像度変換が可能となるばかりでなく、スーパーハイビジョンを頂点としたハイビジョンや4Kテレビ映像間の空間解像度変換が可能となり、将来の映像制作や放送における様々な応用が期待できる。

第4, 5章では、映像方式変換の応用として、映像方式変換を用いた超高圧縮映像符号化の研究について述べた。このうち第4章では従来符号化／復号の前段で空間縮小、後段で超解像復元を用いた映像符号化方式について提案した。提案法では、符号化側で超解像復元パラメータを最適化して、これを復号側へ補助情報として送信し、復号側の超解像復元を高精度かつ高安定に行うことを特徴とする。研究としては、従来符号化において符号化画像が破たんするような空間高周波成分や動きの多い原画像をいかに高圧縮符号化するかという点が研究の重要なポイントであった。提案法を用いることで、符号化時に符号化画像の大きな劣化や破たんが起きることなく、復号側で補助情報を用いて復号することで高画質に超解像復元を行うことができた。また第5章では階調方向のアプローチを導入し、従来符号化／復号の前段で階調削減、後段で階調復元を用いた映像符号化方式について提案した。提案法では符号化側で階調復元パラメータを最適化して、これを復号側へ補助情報として送信し、復号側の階調復元を高精度かつ高安定に行うことを特徴とする。さらに符号化において雑音成分は符号化効率の低下につながるため、階調削減に雑音除去を考慮したLloyd-Max量子化を用いた。また階調削減ではグラデーション領域に疑似輪郭が発生しやすいため、Lloyd-Max量子化においてグラデーション領域保存を考慮した処理を行っている。本研究を進めることで、将来のスーパーハイビジョ

ン放送の多チャンネル化や、補助情報の伝送に通信を用いたモバイル向けスーパーハイビジョン放送などの応用が期待できる。

謝辞

本論文の作成にあたっては、早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 甲藤二郎教授に御指導、御鞭撻を賜った。

また早稲田大学大学院 基幹理工学研究科 石川博教授、早稲田大学大学院 国際情報通信研究科 渡辺裕教授には、有益な御助言、御指導をいただいた。

本論文の主に2章、4章、5章の研究は、日本放送協会 放送技術研究所において2004年から実施したものである。この間、榎並和雅 元所長、谷岡健吉 元所長、久保田啓一 前所長・現技師長、藤沢秀一 現所長には、本研究の機会を与えていただき、有益な御助言をいただいた。さらに、主に3章の研究は、早稲田大学大学院 基幹理工学研究科において2011年から実施してきたものである。

矢野澄男 元主任研究員、三谷公二 元主任研究員、岡野文男 元テレビ方式研究部長、金澤勝 元研究主幹、野尻裕司 元テレビ方式研究部長には、主に2章の研究について熱心な御指導と御助言をいただいた。

甲藤二郎教授、甲藤研究室学生の坂本静生さん、竹内健さん、山村勇太さん、岩崎真也さん、高田涼生さんには、主に3章の研究について多大な御助言、御協力をいただき、さらに本論文をまとめるにあたっての御指導をいただいた。

境田慎一 主任研究員、鹿喰善明 研究主幹、合志清一 元主任研究員、三須俊枝 専任研究員、井口和久 専任研究員、豊田崇弘 研究員、岩村俊輔 研究員、伊藤崇之 元人間・情報研究部長、八木伸行 元人間・情報研究部長、中須英輔 元テレビ方式部長には、4章と5章の研究を進めるにあたり、多大な御指導、御協力ならびに御助言をいただくとともに、本論文をまとめるにあたっての御配慮をいただいた。

以上、御指導、御協力いただいた方々に対して、心から感謝の意を表する。

最後に、本論文の作成に当たって多くの方々の支えがあったことを思い出し

つつ、本論文の作成はもとより、日々研究生生活を支えてくれる妻 景子、長男 祐汰、長女 京佳に感謝する。

参考文献

- [1] SMPTE 428-1-2006: “Digital Cinema Distribution Master (DCDM)” (2006)
- [2] Digital Cinema Initiatives, LLC: “Digital Cinema System Specification, Version 1.2” (Mar. 2008)
- [3] Y. Shishikui, Y. Fujita, and K. Kubota: “Super Hi-Vision - the star of the show!”, EBU Technical Review, pp. 4–16 (Jan. 2009)
- [4] K. Mitani, M. Kanazawa, K. Hamasaki, Y. Nishida, K. Shogen, and M. Sugawara: “Current Status of Studies on Ultra High Definition Television”, SMPTE Motion Imaging Journal, pp. 377–381 (Sep. 2007)
- [5] M. Sugawara, M. Kanazawa, K. Mitani, H. Shimamoto, T. Yamashita, and F. Okano: “Ultrahigh-definition video system with 4000 scanning lines”, SMPTE motion imaging journal, vol. 112, no. 10–11, pp. 339–346 (Oct.-Nov. 2003)
- [6] M. Kanazawa, K. Mitani, K. Hamasaki, M. Sugawara, F. Okano, K. Doi, and M. Seino: “Ultrahigh-definition Video System with 4000 Scanning Lines”, Conference Publication IBC, pp. 321–329 (2003)
- [7] SMPTE 2036-3-2010: “Ultra High Definition Television - Image Parameter Values for Program Production” (2010)
- [8] Rec. ITU-R BT.2020: “Parameter value for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange” (2012)
- [9] T. Fujio, et al.: “High-Definition Television”, NHK Technical Monograph, no. 32 (Jun. 1982)
- [10] Rec. ITU-R BT.709-5: “Parameter value for the HDTV standards for production and international programme exchange” (2002)
- [11] 馬場秋継, 大槻一博: “技研公開 2013 NHK のハイブリッドキャスト展示”,

- 放送技術, vol. 66, no. 8, pp. 72–77 (2013)
- [12] P. G. J. Barten: “Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality”, SPIE Optical Engineering Press, Washington, U.S.A. (1999)
- [13] 寺山善郎, 坂田晴夫, 谷村洋, 金子隆一, 佐藤栄一, 日下秀夫, 上原隆司, 岩村総一: “テレビジョン方式変換研究の背景”, NHK 技術月報, vol. 10, pp. 447–498 (Oct. 1967)
- [14] 坂田晴夫, 谷村 洋, 金子隆一, 日下秀夫, 佐藤栄一, 上原隆司, 久保徳司, 池田幸三郎, 斉藤利也, 横沢美紀, 中村統太郎, 唐原 久, 中上一雄, 田中一夫: “テレビジョン標準方式変換装置特集”, NHK 技術研究, vol. 23, no. 3, pp. 1–84 (May 1971)
- [15] C. K. P. Clarke, and N. E. Tanton: “Digital Standards Conversion : interpolation theory and aperture synthesis”, BBC R.D., 1984/20, pp. 1–47 (Dec. 1984)
- [16] A. N. Netravali, and J. D. Robbins: “Motion-adaptive interpolation of television frames”, Proceedings of IEEE PCS, pp. 115 (Jan. 1981)
- [17] G. Schamel: “Pre- and postfiltering of HDTV signals for sampling rate reduction and display up-conversion”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 34, no. 11, pp. 1432–1439 (Nov. 1987)
- [18] IBE, International Broadcasting Engineer: “Television Standard Converter”, 21, Edition 235, pp. 21–35 (Jan. 1990)
- [19] 田中 豊, 大村俊郎, 岡田清孝, 大塚吉道, 栗田泰市郎, 合志清一, 二宮佑一, 西澤台次: “動き補正型フレーム数変換法を用いた HDTV-PAL 方式変換装置の構成と画質評価”, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J70-D, no. 8, pp. 1535–1545 (Aug. 1987)
- [20] Y. Ninomiya, and Y. Ohtsuka: “A Motion-Compensated Interframe Coding Scheme for Television Pictures”, IEEE Transactions on Communications, vol. 30, no. 1, pp. 201–211 (Jan. 1982)
- [21] 野尻裕司, 平林洋志, 曾根原源, 岡野文男: “HDTV 方式変換装置”, テレビジョン学会誌, vol. 48, no. 1, pp.84–94 (Jan. 1994)
- [22] Y. Nojiri, H. Sonehara, H. Hirabayashi, and F. Okano: “Motion Vector Detection for HDTV Standards Converter”, 135th SMPTE Technical Conference (Oct.-

- Nov. 1993)
- [23] R. L. Lagendijk, and M. I. Sezan: “Motion compensation frame rate conversion of motion picture”, Proceedings of IEEE ICASSP, vol. 3, pp. 453–456 (Mar. 1992)
 - [24] M. F. Fu, O. Au, and W. C. Chan: “Temporal interpolation using wavelet domain motion estimation and motion compensation”, in Proc. IEEE ICIP, vol.3, pp.393-396 (2002)
 - [25] M. Karlsson, P. Pohjala, H. Rantanen, and S. Kalli: “Evaluation of scanning rate up conversion algorithms: subjective testing of interlaced to progressive conversion”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 38, pp.162–167 (Aug. 1992)
 - [26] G. D. Haan, P. W. A. C. Biezan, and O. A. Ojo: “True-Motion Estimation with 3-D Recursive Search Block Matching”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 3, no. 5, pp. 368–379 (Oct. 1993)
 - [27] Y. -T. Yang, Y. -S. Tung, and J. -L. Wu: “Quality Enhancement of Frame Rate Up-Converted Video by Adaptive Frame Skip and Reliable Motion Extraction”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 17, no. 12, pp. 1700–1713 (Dec. 2007)
 - [28] K. Kawaguchi, and S. K. Mitra: “Frame rate up conversion considering multiple motion”, Proceedings of IEEE ICIP, vol. 1, pp. 727–730 (Oct. 1997)
 - [29] T. Chen: “Adaptive temporal interpolation using bidirectional motion estimation and compensation”, Proceedings of IEEE ICIP, vol. 2, pp. 313–316 (Sep. 2002)
 - [30] B. T. Choi, S. -H. Lee, and S. -J. Ko: “New frame rate up-conversion using bidirectional motion estimation”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 46, no. 3, pp. 603–609 (Aug. 2000)
 - [31] M. E. Al-Mualla: “Motion field interpolation for frame rate conversion”, Proceedings of IEEE ISCAS, vol. 2, pp. 652–655 (May 2003)
 - [32] B. D. Choi, J. W. Han, C. S. Kim, and S. J. Ko: “Motion-compensated frame interpolation using bilateral motion estimation and adaptive overlapped block motion compensation”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 17, no. 4, pp. 407–416 (Apr. 2007)

- [33] C. C. Chang, W. L. Hwang, Z. Shan, and T. Xia: “Advanced motion compensation techniques for blocking artifact reduction in 3-D video coding systems”, Proceedings of IEEE ICIP, vol. 3, pp. 89–92 (Sep. 2005)
- [34] H. Sasai, S. Kondo, and S. Kadono: “Frame-rate up-conversion using reliable analysis of transmitted motion information”, Proceedings of IEEE ICSP, vol. 5, pp. V-257-60 (May 2004)
- [35] S. Liu, J. Kim, and C. C. Jay Kuo: “MCI-embedded motion compensated prediction for quality enhancement of frame interpolation”, Proceedings of SPIE International Symposium on Voice, Video, and Data Communications, Multimedia Systems and Applications III, Boston, MA (Nov. 2000)
- [36] T. Ha, S. Lee, and J. Kim: “Motion compensated frame interpolation by new block-based motion estimation algorithm”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 50, no. 2, pp. 752–759 (May 2004)
- [37] S-H. Lee, O. Kwon, and R-H. Park: “Weighted-adaptive motion-compensated frame rate-up conversion”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 49, no. 3, pp. 485–492 (Aug. 2003)
- [38] R. Castagno, P. Haavisto, and G. Ramponi: “A method for motion adaptive frame rate up-conversion”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 6, no. 5, pp. 436–446 (Dec. 1996)
- [39] J. Zhai, K. Yu, J. Li, and S. Li: “A Low Complexity Motion Compensated Frame Interpolation Method”, Proceedings of IEEE ISCAS, vol. 5, pp. 4927-4930 (May 2005)
- [40] ISO/IEC 13818-2: “Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information : Video” (2000)
- [41] ISO/IEC 14496-10: “Information technology, coding of audio-visual objects - Part 10: Advanced video coding” (2003)
- [42] 松尾康孝, 三須俊枝, 境田慎一, 鹿喰善明: “超高精細映像の高確度レジストレーション手法の一検討”, 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J93-D, no. 9, pp. 1675–1678 (Sep. 2010)
- [43] H. Shimamoto, T. Yamashita, N. Koga, K. Mitani, M. Sugawara, F. Okano,

- M. Matsuoka, J. Shimura, I. Yamamoto, T. Tsukamoto, and S. Yahagi: "An 8k x 4k Ultrahigh-Definition Color Video Camera with 8M-Pixel CMOS Imager", SMPTE Motion Imaging Journal, vol. 114, no. 7-8, pp. 260-268 (Jul. 2005)
- [44] 宮下充弘, 佐藤清次, 山下一美: "両方向動きベクトルを用いた動画像のフレーム内挿方式", 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J75-D-II, no. 2, pp. 335-341 (Feb. 1992)
- [45] (社) テレビジョン学会監修: "ハイビジョンシステム評価用標準動画像統計量測定解説書", (財) NHK エンジニアリングサービス, 東京 (1995)
- [46] 鄭文涛, 鹿喰善明, 田中豊, 湯山一郎: "時空間3次元ブロックマッチングによる動画像の動きベクトル場推定", 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J81-D-II, no. 8, pp. 1736-1743 (Aug. 1998)
- [47] ITU-R Recommendation BT.500-10: "Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures" (2000)
- [48] N. Narita: "Effect of impairment ranges on reliability of the Modified EBU method", IEICE Transactions EA, vol. E78-A, no. 11, pp.1553-1555 (Nov. 1995)
- [49] B. E. Bayer: "Color imaging array," US Patent 3 971 065 (1976)
- [50] K. Hirakawa, and P. J. Wolfe: "Spatio-Spectral Color Filter Array Design for Enhanced Image Fidelity", Proceedings of IEEE ICIP, vol. 2, pp. 645-648 (Oct. 2007)
- [51] B. K. Gunturk, J. Glotzbach, Y. Altunbasak, R. W. Schafer, and R. M. Mersereau: "Demosaicking: Color filter array interpolation in single chip digital cameras", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 1, pp.44-54 (Jan. 2005)
- [52] 吹抜敬彦: "TV 画像の多次元信号処理", 日刊工業新聞社, 東京 (1988)
- [53] T. Fukinuki, and Y. Hirano: "The To-and-Fro Zone-Plate(TFZP) Method for Observing Frequency Characteristics in Three Dimensions", SMPTE Journal, vol. 95, no. 9, pp. 899-902 (Sep. 1986)
- [54] T. Fukinuki: "Three-dimensional signal processing for full utilization of NTSC signals and capacities", Journal of Visual Communications and Image Representation, vol. 2, no. 4, pp.325-331 (Dec. 1991)

- [55] T. Fukinuki, and N. Suzuki: “Multi-dimensional Signal Processing for NTSC TV Signals(invited)”, IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E75-A, no. 7, pp. 767–775 (Jul. 1992)
- [56] 大谷 禧夫, 藤尾 孝, 浜崎 孝幸: “高品位テレビジョンの画面方式と主観画質”, NHK 技術研究, vol. 28, no. 4, pp. 1–19 (Mar. 1976)
- [57] NHK 放送技術研究所編: “ハイビジョン技術”, 日本放送出版協会, 東京 (1988)
- [58] 近藤いさお, 杉浦幸雄, 金澤 勝, 湯山一郎: “ディスプレイ動解像度測定方法の検討”, 電子情報通信学会技術報告, SAT99-82, CQ99-26, vol. 99, no. 216, pp. 55–60 (Aug. 1999)
- [59] M. Kanazawa, and I. Kondoh: “Automatic MTF (Modulation Transfer Function) measurement of CRT display”, Japan Display '92, S12-4, pp. 403–406 (Oct. 1992)
- [60] M. Schlockrman, S. Wittmann, T. Wedi, and S. Kadono: “Film grain coding in H.264/AVC”, JVT of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG, JVT-I034 (Sep. 2003)
- [61] C. V. Jiji, M. V. Joshi, and S. Chaudhuri: “Single-frame image super-resolution using learned wavelet coefficients”, International Journal of Image Systems and Technology, vol. 14, no. 3, pp. 105–112 (2004)
- [62] M. Nguyen, and P. Milanfar: “An efficient wavelet-based algorithm for image superresolution”, Proceedings of IEEE ICIP, vol. 2, pp. 351–354 (Sep. 2000)
- [63] A. Temizel, and T. Vlachos: “Wavelet domain image resolution enhancement using cycle-spinning”, Electronics Letters, vol. 41, no. 3, pp. 119–121 (Feb. 2005)
- [64] T. Temizel, and T. Vlachos: “Image resolution upscaling in the wavelet domain using directional cycle spanning”, Journal of Electronics Imaging, vol. 14, no. 4 (2005)
- [65] S. D. Babacan, R. Molina, and A. K. Katsaggelos: “Total variation super resolution using a variational approach”, Proceedings of IEEE ICIP, pp.641–644 (Oct. 2008)
- [66] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. kang: “Super-resolution image reconstruction: a technical overview”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 20, no. 3, pp. 21–36 (May 2003)

-
- [67] D. Capel: “Image Mosaicing and Super-resolution”, Springer, U.S.A. (2004)
- [68] D. L. Donoho, I. M. Johnstone, G. Kerkycharian, and D. Picard: “Wavelet shrinkage: Asymptopia?”, *Journal of Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, vol. 57, no. 2, pp. 301–369 (1995)
- [69] D. L. Donoho: “De-noising by soft-thresholding”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613–627 (May. 1995)
- [70] G. L. Chang, B. Yu, and M. Vetterli: “Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 9, no. 9, pp. 1532–1546 (Sep. 2000)
- [71] Y. Matsuo, T. Nishida, S. Gohshi, and S. Sakaida: “Reducing noise in high-resolution video sequences by using wavelet shrinkage in the temporal-spatial domain”, *Proceedings of IEEE PCS* (May. 2009)
- [72] K. T. Mullen: “The contrast sensitivity of human vision to red- green and blue yellow chromatic gratings”, *Journal of Physiology*, no. 359, pp. 381–409 (Feb. 1985)
- [73] 松本信幸, 井田孝: “画像のエッジ部の自己合同性を利用した再構成型超解像”, *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J93-D, no.2, pp. 118–126 (Feb. 2010)
- [74] A. Cohen, I. Daubechies, and J. -C. Feauveau: “Biorthogonal bases of compactly supported wavelets”, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. 45, no. 5, pp. 485–560 (Jan. 1992)
- [75] 清水雅夫, 奥富正敏: “画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法”, *電子情報通信学会論文誌 D*, vol. J84-D-II, no. 7, pp. 1409–1418 (Jul. 2001)
- [76] R. R. Schulz, and R. L. Stevenson: “Extraction of high-resolution frames from video sequences”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 5, no. 6, pp.996–1011 (Jan. 1996)
- [77] C. Tomasi, and R. Manduchi: “Bilateral filtering for Gray and Color Images”, *Proceedings of IEEE ICCV*, pp. 839–846 (Jan. 1998)
- [78] Y. Matsuo, Y. Nishida, S. Gohshi, and S. Sakaida: “Reducing noise in high-resolution video sequences by using wavelet shrinkage in the temporal-spatial

- domain”, Proceedings of IEEE PCS (2009)
- [79] S. P. Lloyd: “Least squares quantization in PCM”, IEEE Tranaction Information Theory, vol. IT-28, pp. 129–136 (Mar. 1982)
- [80] J. Max: “Quantizing for minimum distortion”, IRE Transactions on Information theory, vol. 6, no. 1, pp. 7–12 (Mar. 1960)
- [81] T. Ito, Y. Bandoh, S. Takamura, and H. Jozawa: “A coding method for high bit-depth images based on optimized bit-depth transform”, Proceedings of IEEE ICIP, pp. 3141–3144 (Sep. 2010)
- [82] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda: “Photographic Tone Reproduction for Digital Images”, ACM Transactions on Graphics, vol. 21, no. 3, pp. 267–276 (Jul. 2002)
- [83] M. Winken, D. Marpe, H. Schwarz, and T. Wiegand: “Bit-Depth Scalable Video Coding”, Proceedings of IEEE ICIP, pp. 5–8 (Sep. 2007)
- [84] JM reference software: “<http://iphome.hhi.de/suehring/tml/>”, Fraunhofer
- [85] DCI StEM: “<http://www.dcmovies.com/StEM/DCIStEM.pdf>” (Sep. 2010)

研究業績

論文

(全て査読付き、◎は本博士論文を構成する重要な論文かつ第一著者としての論文、○は第一著者としての論文)

- ◎ 松尾康孝, 高田涼生, 岩崎真也, 甲藤二郎:
 “デジタルシネマ画像が持つ雑音成分を考慮したウェーブレット多重解像度解析成分のレジストレーションによる画像超解像”,
 映像情報メディア学会誌, vol.68, no.2, pp.J92–J98 (Feb. 2014) (フルペーパー)
- ◎ **Y. Matsuo** and S. Yano:
 “Conversion from Ultrahigh-definition Video with Bayer-sampling to Digital Cinema by Using Time-expanded Bi-directional Motion Estimation”,
IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology,
 vol.20, no.1, pp.65–75 (Jan. 2010) (フルペーパー)
- ◎ 松尾康孝, 矢野澄男:
 “4000 本級超高精細映像を用いた 24 フレーム/秒の高精細映像へのフレームレート変換方の検討”,
 電子情報通信学会論文誌 **D**, vol.J91-D, no.2, pp.471–483 (Feb. 2008) (フルペーパー)
- M. Sugawara, K. Masaoka, M. Emoto, **Y. Matsuo**, and Y. Nojiri:
 “Research on Human Factors in Ultra-high-definition Television to Determine its Specifications”,
SMPTE Motion Imaging Journal, vol.117, no.3, pp.23–29 (Apr. 2008) (フルペーパー)
- 松尾康孝, 三須俊枝, 境田慎一, 鹿喰善明:
 “超高精細映像の高精度レジストレーション手法の一検討”,
 電子情報通信学会誌 **D**, vol.J93-D, no.9, pp.1675–1678 (Sep. 2010) (レター)
- 岩崎真也, 山村勇太, 松尾康孝, 甲藤二郎:
 “奥行き情報を用いたオクルージョン検出による符号化画質改善の一検討”,
 電子情報通信学会誌 **D**, vol.J96-D, 2013, pp.1975–1977 (Sep. 2013) (レター)
- 竹内健, 山村勇太, 松尾康孝, 甲藤二郎:
 “グラデーション補間を用いたビット深度スケーラブル動画像符号化方式の検討”,

電子情報通信学会誌 **D**, vol.J95-D, no.9, pp.1669–1671 (Sep. 2012) (レター)

国際会議

(全て査読付き、◎は本博士論文を構成する重要な論文かつ第一著者としての論文、○は第一著者としての論文)

- ◎ **Y. Matsuo**, T. Misu, S. Iwamura, and S. Sakaida:
 “Ultra High-definition Video Coding using Bit-depth Reduction with Noise Reduction and Pseudo Contour Prevention”,
Proceedings of IEEE VCIP (Kuching, Malaysia), FP, no.489 (Nov. 2013) (採択率 **48.0%**)
- ◎ **Y. Matsuo**, T. Misu, S. Sakaida, and Y. Shishikui:
 “Video Coding with Wavelet Image Size Reduction and Wavelet Super Resolution Reconstruction”,
Proceedings of IEEE ICIP (Brussels, Belgium), MP.PG.6, pp.1181–1184 (Sep. 2011) (採択率 **40.8%**)
- **Y. Matsuo**, R. Takada, S. Iwasaki, and J. Katto:
 “Image Super-resolution Using Registration of Wavelet Multi-scale Components with Affine Transformation”,
Proceedings of IEEE ISM (Anaheim, U.S.A.), IVQ, pp.279–282 (Dec. 2013) (short paper 採択率 **24.2% (31/128 件)**)
- **Y. Matsuo**, S. Iwasaki, Y. Yamamura, and J. Katto:
 “Super-resolution from Digital Cinema to Ultra High Definition Television Using Image Registration of Wavelet Multi-scale Components”,
Proceedings of IEEE ICCE (Las Vegas, U.S.A.), pp.163-164 (Jan. 2013) (採択率 **50.6%**)
- **Y. Matsuo**, S. Iwasaki, Y. Yamamura, and J. Katto:
 “Wavelet Domain Image Super-resolution from Digital Cinema to Ultrahigh Definition Television by Dividing Noise Component”,
Proceedings of IEEE VCIP (San Diego, U.S.A.), HO5, no. 40 (Nov. 2012) (採択率 **49.8%**)
- 松尾康孝, 岩崎真也, 山村勇太, 甲藤二郎:
 “ウェーブレット多重解像度成分のレジストレーションによるデジタルシネマから超高精細映像への空間超解像法の検討”,
 情報科学技術フォーラム (FIT) (Tokyo, Japan) (査読付論文, 国際会議扱 (FIT 論文賞受賞), no.3, RI-001, pp.1–6 (Sep. 2012) (採択率 **8.3% (1/12 件)**)
- **Y. Matsuo**, Y. Nishida, S. Gohshi, and S. Sakaida:

- “Reducing noise in high-resolution video sequences by using Wavelet Shrinkage in the Temporal-spatial Domain”,
Proceedings of IEEE PCS (Chicago, U.S.A.), pp.1–4 (May 2009) (採択率 < 50%)
- S. Iwasaki, R. Takada, **Y. Matsuo**, and J. Katto:
 “Improvement of 2-D Picture Quality for H.265/HEVC by Occluded Region Detection Using 3-D Depth Map”,
Proceedings of IEEE ICCE (Las Vegas, U.S.A.) (Jan. 2014)
 - T. Misu, **Y. Matsuo**, S. Iwamura, and S. Sakaida:
 “Real-time Implementation of UHD TV Video Coding System with Super-resolution Technique”,
Proceedings of IEEE PCS (San Jose, U.S.A.) (Dec. 2013)
 - Y. Yamamura, S. Iwasaki, **Y. Matsuo**, and J. Katto:
 “Quality Assessment of Compressed Video Sequences having Blocking Artifacts”,
Proceedings of IEEE ICCE (Las Vegas, U.S.A.), pp.496–497 (Jan. 2013)
 - T. Misu, **Y. Matsuo**, S. Iwamura, and S. Sakaida:
 “Reconstructive Video Coding System - Broadcasting UHD TV to homes with the aid of Super-resolution Technique”,
Proceedings of IEEE GCCE (Chiba, Japan), pp.558–560 (Oct. 2012)
 - T. Misu, **Y. Matsuo**, S. Sakaida, and Y. Shishikui:
 “Motion-adaptive Sub-Nyquist Sampling Technique for Multi-Frame Super-Resolution”,
Proceedings of IEEE PCS (Krakow, Poland), P3b-1, pp.321–324 (May 2012)
 - M. Takeuchi, **Y. Matsuo**, Y. Yamamura, and J. Katto:
 “A Bit-depth Scalable Video Coding Approach Considering Spatial Gradation Restoration”,
Proceedings of IEEE ICASSP (Kyoto, Japan), IVMS-P10.8, pp.1373–1376 (Mar. 2012)
 - T. Misu, **Y. Matsuo**, S. Sakaida, Y. Shishiku, and E. Nakasu:
 “Novel Video Coding Paradigm with Reduction/Restoration Processes”,
Proceedings of IEEE PCS (Nagoya, Japan), S2-2, pp.466–469 (Dec. 2010)
 - T. Misu, **Y. Matsuo**, S. Sakaida, and Y. Shishikui:

“Novel Framework for Single/Multi-Frame Super-Resolution using Sequential Monte Carlo Method”,

Proceedings of ACM Multimedia (Firenze, Italy), pp.771–774 (Oct. 2010)

講演

(○は第一著者としての講演)

- 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解像復元型符号化の検討”,
 画像符号化シンポジウム (PCSJ), P-2-03 (Nov. 2013) (PCSJ ベストポスター
 賞受賞, PCSJ 優秀論文賞受賞)
- 松尾康孝, 岩崎真也, 山村勇太, 甲藤二郎:
 “デジタルシネマ画像が持つ雑音を考慮したウェーブレット多重解像度解析成分の
 レジストレーションによる画像超解像法の検討”,
 映像情報メディア学会技術報告, vol.37, no.10, CE2013-8, MMS2013-8, pp.11-14
 (Feb. 2013)
- 松尾康孝, 三須俊枝, 岩村俊輔, 境田慎一:
 “パラメータ最適化を伴う階調削減と階調復元を用いた超高精細映像符号化の検
 討”,
 画像符号化シンポジウム (PCSJ), P-1-01 (Oct. 2012)
- 松尾康孝, 三須俊枝, 岩村俊輔, 境田慎一:
 “雑音除去およびグラデーション保存を考慮した階調削減と階調復元を用いた超高
 精細映像符号化の検討”,
 映像情報メディア学会年次大会, 3-1 (Aug. 2012)
- 松尾康孝, 山村勇太, 竹内健, 甲藤二郎:
 “パラメータ最適化によるデジタルシネマから超高精細映像への超解像法の検討”,
 電子情報通信学会年次大会, D-11-19, pp.19 (Mar. 2012)
- 松尾康孝, 山村勇太, 竹内健, 甲藤二郎:
 “デジタルシネマから超高精細映像への画像超解像法の一検討”,
 映像情報メディア学会冬期大会, 1-4 (Dec. 2011)
- 松尾康孝, 三須俊枝, 境田慎一, 鹿喰善明:
 “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”,
 映像情報メディア学会年次大会, 14-10 (Sep. 2010) (鈴木記念奨励賞受賞)
- 松尾康孝, 三須俊枝, 境田慎一, 鹿喰善明:
 “超高精細映像の高確度レジストレーション手法の一検討”,
 映像メディア処理シンポジウム (IMPS), I-5-22 (Oct. 2009)
- 松尾康孝, 西田幸博, 合志清一:
 “時空間 Wavelet Shrinkage による高精細動画の雑音除去法の検討”,
 情報科学技術フォーラム (FIT), no.3, I-089, pp.389-390 (Aug. 2008) (FIT ヤ

ングリサーチャー賞受賞)

- 松尾康孝, 江本正喜, 菅原正幸:
“広視野映像システムに必要なフレーム周波数の検討 –横方向動体視力の視角依存性–”,
情報科学技術フォーラム (FIT), no.3, J-015, pp.419–420 (Aug. 2007)
- 松尾康孝, 三谷公二, 矢野澄男:
“デジタルシネマからスーパーハイビジョンへの空間解像度変換”,
電子情報通信学会総合大会, D-11-52, pp.52 (Mar. 2007) (電子情報通信学会学術奨励賞受賞)
- 松尾康孝, 矢野澄男:
“Bayer 型画素構造のスーパーハイビジョンからデジタルシネマへの方式変換”,
電子情報通信学会総合大会, D-11-59, pp.59 (Mar. 2006)
- 松尾康孝, 矢野澄男:
“双方向動きベクトル検出を用いた 60/24 フレーム数変換”,
映像情報メディア学会冬期大会, 10-4 (Nov. 2005)
- 岩崎真也, 高田涼生, 松尾康孝, 甲藤二郎:
“奥行き情報を用いた H.265/HEVC の 2 次元符号化画質改善の検討”,
画像符号化シンポジウム (PCSJ), P-1-01 (Nov. 2013)
- 三須俊枝, 松尾康孝, 岩村俊輔, 井口和久, 境田慎一:
“2K/4K リアルタイム超解像装置の開発と映像符号化への応用”,
映像情報メディア学会年次大会, 4-2 (Aug. 2013)
- 岩村俊輔, 松尾康孝, 三須俊枝, 境田慎一:
“色・時間相関を考慮したフレーム時間分割による映像符号化の検討”,
画像符号化シンポジウム (PCSJ), P-4-04 (Oct. 2012)
- 岩崎真也, 山村勇太, 松尾康孝, 甲藤二郎:
“奥行き情報を用いたオクルージョン検出による符号化画質改善の一検討”,
画像符号化シンポジウム (PCSJ), P-4-11 (Oct. 2012)
- 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), no.3, I-019, pp.289–292 (Sep. 2012)
- 杉藤泰子, 松尾康孝, 市ヶ谷敦郎, 境田慎一:
“スーパーハイビジョン画像における HEVC と AVC/H.264 との符号化性能比較”,
映像情報メディア学会年次大会, 12-5 (Aug. 2012)
- 山村勇太, 岩崎真也, 松尾康孝, 甲藤二郎:
“ケプストラム解析によるブロック歪みを有する動画像の画質評価手法に関する検

討”。

画像電子学会年次大会, P-12 (Jun. 2012)

- 三須俊枝, 松尾康孝, 岩村俊輔, 境田慎一:
“複数枚超解像による画像復元型符号化方式のための折り返し歪付加 一周波数応答
および遮断周波数の設計”,
電子情報通信学会技術報告 **IE** 画像工学, vol.112, no.20, IE2012-6, pp.29–34
(Apr. 2012)
- 山村勇太, 竹内健, 松尾康孝, 甲藤二郎:
“ケプストラム解析によるブロック歪みの評価手法の検討”,
電子情報通信学会年次大会, D-11-41, pp.41 (Mar. 2012)
- 竹内健, 山村勇太, 松尾康孝, 甲藤二郎, 井口和久:
“グラデーション補間を用いたビット深度スケーラブル動画像符号化方式の検討”,
画像符号化シンポジウム (**PCSJ**), P-1-02 (Oct. 2011)
- 山村勇太, 竹内健, 松尾康孝, 甲藤二郎:
“ケプストラム解析を用いたブロック歪みを有する画像の画質評価手法”,
画像符号化シンポジウム (**PCSJ**), P-2-06 (Oct. 2011)
- 三須俊枝, 松尾康孝, 境田慎一, 鹿喰善明:
“画像復元型符号化における折り返し歪の適応付加”,
情報科学技術フォーラム (**FIT**), no.3, I-028, pp.343–348 (Sep. 2011)
- W. Peter, S. Gohshi, and **Y. Matsuo**:
“Supporting the March to 8K”,
SMPTE Annual Technical Conference & Exhibition (Oct. 2008)
- 江本正喜, 松尾康孝:
“広視野映像システムに必要なフレーム周波数に関する検討 ー横方向胴体視力の視
角依存性ー”,
映像情報メディア学会年次大会, 22-6 (Aug. 2008)
- M. Sugawara, K. Masaoka, M. Emoto, **Y. Matsuo**, and Y. Nojiri:
“Research on Human Factors in Ultra-high-definition Television to Determine
its Specifications”,
SMPTE Annual Technical Conference & Exhibition (Oct. 2007)

寄稿

(○は第一著者としての寄稿)

- 泉本貴広, 東島健太郎, サイモンクリッピングデル, 村山研一, 袴田佳孝, 松尾康孝, 関口俊一:
“CES2013, ICCE2013 レポート”,
映像情報メディア学会誌, vol.67, no.5, pp.387–391 (May 2013)
- **Y. Matsuo**:
“2011 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2011)”,
電子情報通信学会誌, vol.95, no.2, pp.184 (Feb. 2012)
- 筋誠久, 鈴木陽一, 小島政明, 清水丈晴, 橋本明記, 田中祥次, 木村武史, 豊田崇弘, 松尾康孝, 中島奈緒, 井口和久, 奥村玲子, 中山靖茂, 増田裕康, 尾澤勉, 高橋卓, 大川貢, 正源和義:
“超高速インターネット衛星『きずな』によるスーパーハイビジョンの多チャンネル・生中継伝送実験”,
放送技術, vol.62, no.9, pp.91–98 (Sep. 2009)

規格化

- Y. Shishikui, **Y. Matsuo**, A. Ichigaya, K. Iguchi, and S. Sakaida:
“Characteristics of Super Hi-Vision test sequences”,
JCT-VC of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 3rd meeting (Guangzhou, China), JCTVC-C032/m18053 (Oct. 2010)
- S. Sakaida, Y. Shishikui, A. Ichigaya, **Y. Matsuo**, K. Iguchi, and T. Toyoda:
“7680 × 4320 format test sequences for JCT-VC”,
JCT-VC of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 1st meeting (Dresden, Germany), JCTVC-A023 (Apr. 2010)
- S. Sakaida, A. Ichigaya, **Y. Matsuo**, T. Toyoda, K. Iguchi, and Y. Shishikui:
“7680 × 4320 format test sequences for HVC”,
ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 (MPEG) 91st meeting (Kyoto, Japan), MPEG2010/M17173 (Jan. 2010)

特許

本博士論文内容に関して、現在までに筆頭発明者として特許出願 55 件を行った。

受賞

(○は第一著者としての受賞)

- 学術奨励賞,
電子情報通信学会,
(Mar. 2008)
- **FIT** ヤングリサーチャー賞,
電子情報通信学会 情報システムソサイエティ, 同 ヒューマンコミュニケーション
グループ, 情報処理学会,
(Sep. 2009)
- 鈴木記念奨励賞,
映像情報メディア学会,
(Aug. 2011)
- **FIT** 論文賞,
電子情報通信学会 情報システムソサイエティ, 同 ヒューマンコミュニケーション
グループ, 情報処理学会,
(Sep. 2012)
- **PCSJ** ベストペーパー賞,
電子情報通信学会 画像工学研究専門委員会,
(Nov. 2013)
- **PCSJ** 優秀論文賞,
電子情報通信学会 画像工学研究専門委員会,
(Nov. 2013)