

コンシューマ・デバイス論文

# バーストアクセスを考慮した 画像信号処理 LSI 向けメモリバンド幅圧縮技術

小味 弘典<sup>1,a)</sup> 野中 智之<sup>1</sup> 荻野 昌宏<sup>1</sup>

受付日 2012年12月14日, 採録日 2013年4月26日

**概要:** 画像信号処理 LSI においては, 取り扱う画像の高解像度化, 高フレームレート化にともない, 外部メモリデバイスへのアクセスバンド幅の増加が高コスト化, 消費電力増加の大きな課題となっている. 本論文では, 画像処理 LSI がメモリデバイスにアクセスする際のメモリバンド幅を圧縮する技術を提案する. 提案手法により, 内部メモリバスにおいてバーストアクセスを行う際, 圧縮後のデータレートを厳密に定義することが可能となり, メモリアクセスが飽和するような状態でもリアルタイム画像処理を保証することが可能となる. 本技術を動画像信号処理 LSI 内に実装し, 低コストで構成でき, 高画質処理が実現できることを確認した.

**キーワード:** メモリバンド幅, 帯域圧縮, 画像圧縮, 信号処理

## A Bandwidth Compression Technology for Image Signal Processing LSI Considering Burst-mode Accessing

HIRONORI KOMI<sup>1,a)</sup> TOMOYUKI NONAKA<sup>1</sup> MASAHIRO OGINO<sup>1</sup>

Received: December 14, 2012, Accepted: April 26, 2013

**Abstract:** In image signal processing LSIs, the data bandwidth to the external memory is one of the big issues, because it increases the system costs and consuming power. In this paper, a new bandwidth reduction method is proposed, which works familiarly with the burst-mode accesses to the SDRAM and reduces the data bandwidth under the strict constraints. The proposed technology ensures the real-time image processing even in the case of the bandwidth saturation on the memory busses. We have implemented the proposed bandwidth compression technology in a signal processing LSI for moving pictures and confirmed that it required very small circuits and maintained high quality pictures.

**Keywords:** memory bandwidth, bandwidth compression, image compression, signal processing

### 1. はじめに

近年, テレビ, カムコーダなどのデジタル民生製品においては, 多種のリアルタイム画像信号処理回路をシステム LSI 内に実装し, 装置の小型化, 低コスト化を図ることが一般的になっている (図 1). このようなシステムにおいては, 動画像圧縮伸張, 高解像度化, ノイズ除去あるいはグラフィック描画処理を行う各機能ブロックは, 外部に接続

されたメモリデバイスに大量の画像データを書き込み, 読み出しを行う必要がある. このため, メモリの駆動クロックおよび関連する内部メモリ IF 回路部とメモリバスの周波数増加を招くことになり, システムのコストアップおよび消費電力増加の要因となっている.

本論文では, システム LSI 内のメモリアクセスが集中する内部メモリバスにおいて, 画像圧縮伸張処理を行い, 画像のメモリバンド幅を削減する技術を提案する. 本技術により, SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) へのアクセス上必須となるバーストアクセスを単位とし, 低コストでの回路実装が可能となる.

また, バンド幅圧縮後のデータレートを定義し, その制

<sup>1</sup> 株式会社日立製作所横浜研究所  
Yokohama Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Yokohama,  
Kanagawa 244-0817, Japan

<sup>a)</sup> hironori.komi.cq@hitachi.com

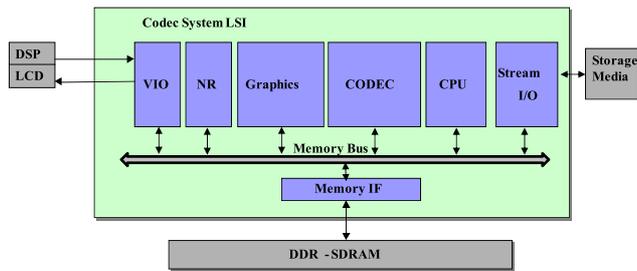


図 1 画像信号処理 LSI のブロック構成例

Fig. 1 Example of block diagram in image signal processing LSI.

約下に必ず圧縮するという特徴を持つ。これにより、システム LSI がリアルタイム処理する際のメモリバス帯域保証を容易にする。

以下、2 章では、関連する研究について述べ、3 章で解決すべき課題を説明する。4 章で提案アルゴリズムを詳説し、5 章で圧縮率と画質に関する評価結果、および実装結果について述べる。最後に 6 章でまとめる。

## 2. 関連研究

画像処理 LSI において、画像を外部メモリに格納する際に、画像圧縮技術を用いてデータ帯域を削減させようとする研究が行われている [1], [2], [3]。

本分野の技術では、本来システム LSI で実現すべき回路面積を圧迫することなく実現することが重要であり、小さな回路規模での実現が要求される。このため、JPEG2000 [4], H.264 [5] のように高圧縮率ではあるが、処理負荷が大きい圧縮技術はこの分野には適さない。

また、他の画像処理のシステム合理化に用いるため、バンド幅圧縮のための画質劣化は極力避ける必要がある。このため、圧縮率 (= 圧縮後のデータ量/圧縮前のデータ量) は 50~80% 程度であっても、ロスレス、もしくは画質劣化が軽微で人間に視認されないレベルのロッキー圧縮であることが要求される。

上記課題に対して、文献 [1], [2], [3] においては、 $4 \times 4$  や  $8 \times 8$ ,  $16 \times 8$  といった小ブロック画素単位での DPCM (Differential Pulse-Code Modulation) や隣接画素値からの予測処理を用い、原画像の冗長度を削減する。その後、Golomb-Rice [6], [7] や Huffman 符号化 [8] などの可変長符号を用いて情報を圧縮する手法が提案されている。

## 3. 解決すべき課題

本章では、本論文で解決すべき課題を整理する。

画像処理 LSI を構築する際、複数の画像処理ブロックからのデータが集中する LSI 内部のメモリバスのバンド幅がシステム上のボトルネックとなることが多い。

一般に、メモリバス上には、SDRAM へのアクセス効率を上げるため、1 回のアドレス設定で複数のデータを連続

して出力するバーストアクセスを行う。このバーストアクセス単位で各画像処理ブロックのアクセスを区切り、複数ブロックから要求されるアクセスをメモリ IF 部は、調停しつつ時分割で多重化する。

リアルタイムの動画処理のシステム設計を行う場合は、各画像処理ブロックにアクセス可能なバンド幅を割り当て、各ブロックはそのバンド幅以下のアクセス量になるよう設計される。もし、各画像処理ブロックへのバンド幅割当てを一時的にでも逸脱すると、一部のバッファメモリがアンダ・オーバフローすることになり、リアルタイムの動画処理が破綻する。

本論文で目指すバンド幅圧縮技術は、メモリバスが飽和するような厳しい条件下で、各画像処理ブロックが必要とするバンド幅を圧縮する。これにより、システムの複雑度を低減、さらに外部メモリに関連する回路の動作クロック周波数を抑えて消費電力を削減することを目的とする。

従来手法 [1], [2], [3] においては、メモリバンド幅の圧縮手法について述べられているが、主にエントロピー符号化の確率的な圧縮効率に依存するため、その圧縮率の最悪ケースが求められない。このため、各画像処理ブロックに割当てを必要とするバンド幅を見積もることができず、特にメモリバスの帯域余裕度が小さいときに、活用することが困難であった。

また、実現されるバンド幅圧縮率は、画像 1 フレームの総データ量に対して圧縮率を定義するため、メモリバス上の各バーストアクセスという小さいデータ単位で分割したときに、局所的な圧縮率と必要帯域が見積もれなかった。

上記の課題を考慮し、本論文の提案手法では、以下を要求条件とする。

- 内部メモリバスに画像処理ブロックがバーストアクセスする際のメモリバンド幅を圧縮する。
- バーストアクセス長を設定したときに、バンド幅圧縮後の圧縮効率の最悪ケース (圧縮率上限) を厳密に定義でき、それ以下のバンド幅になることを保証する。
- メモリの駆動周波数を抑え、SDRAM の消費電力を削減する。
- 圧縮率制約内でデータを有効活用し、高画質化を図るアルゴリズムとする。リアルタイム動画処理時に画質劣化が視認されないレベルとする (PSNR 40dB 以上)。
- 各画像処理ブロックに本技術を回路実装することをふまえて、個々の実現回路規模は小さくする。

## 4. 提案アルゴリズム

本章では、提案手法の詳細について述べる。

### 4.1 データフロー

本手法によるバンド幅圧縮は、図 2 に示すように、画像

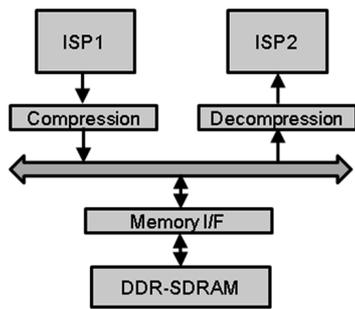


図 2 バンド幅圧縮および伸張回路の回路位置

Fig. 2 Compression and decompression circuit topology.

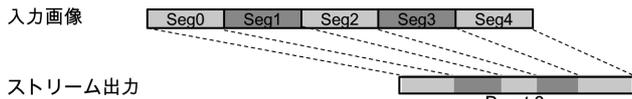


図 3 バースト書き込み時の入出力関係

Fig. 3 Input and output data correspondence in the compression flow.

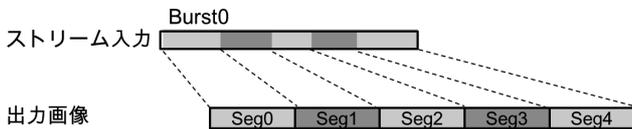


図 4 バースト読み出し時の入出力関係

Fig. 4 Input and output data correspondence in the decompression flow.

処理ブロックとメモリ IF との内部バスとの間に配置された圧縮回路 (Compression) と伸張回路 (Decompression) によって処理を行う。各信号処理ブロック (ISP1, ISP2) が外部メモリ (DDR-SDRAM) に画像格納および読み出しする際、画像圧縮と伸張を行う。

図 3 および図 4 は、バンド幅圧縮時の画像圧縮、伸張時の入出力対応関係を各々示したものである。画像圧縮時には、入力データは、信号処理ブロックからの画像データであり、固定画素数のセグメント単位 (Seq0, 1, 2, ...) で圧縮処理を行い、データをストリーム化する。ストリーム化されたデータは SDRAM のバーストアクセスの単位ごとにパッキングされ順次出力される (Burst0, 1, 2, ...)。反対に、SDRAM から読み出されたデータは、バーストアクセスの単位ごとに読み出され、データ伸張されたセグメントごとに順次出力される。

本提案手法では、上記セグメントを水平 16 画素単位で扱い、さらに後述の圧縮率の上限値 (最悪ケースの圧縮率) の規定により、圧縮処理を完結させるバーストアクセスの個数を定義する。

たとえば、図 3 および図 4 の例は、必ず 3 バーストアクセス内に、5 セグメント分の画像データを連続して圧縮することを保証する場合の図である。1 バーストを  $64 \text{ bit} \times 8 \text{ バースト} = 512 \text{ bit}$  とすると、1 セグメントは  $8 \text{ bit} \times 16 \text{ 画素} = 128 \text{ bit}$  であるから、 $512 / (128 \cdot 5) = 80\%$  の

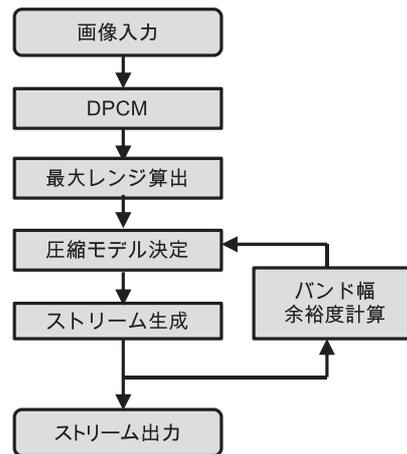


図 5 画像圧縮処理フロー

Fig. 5 Image compression flow.

圧縮率を得られることになる。各画像処理ブロックは、このセグメント数を各画像処理ブロックが連続して扱う基本単位とすることが可能である。本手法では、所望の圧縮率になるようこのセグメント数を決定して設定する。

従来手法では、上記のような小領域ではなく、たとえば 1 フレーム期間のような長周期で平均的な圧縮率を得る技術であったため、局所的なバンド幅がどのくらいになるかを正確に見積もることが困難であった。このため、バンド幅を圧縮しても、最終的な SDRAM の駆動クロックを正確に見積もることができなかった。

一方、本手法では少数のバースト単位を基本単位とし、圧縮処理を完結させることで、局所的なバンド幅を確定させる。これにより、バンド幅削減後に必要とされる SDRAM 駆動クロック周波数を正確に見積もることができ、余剰分の周波数を引き下げ消費電力低減を図る。また、 $16 \times 16$  のブロックアクセスや、ライン方向のデータアクセスなど、種々のアクセス単位を持つ画像処理があっても、最終アクセス時の水平 16 画素ごとに圧縮伸長処理できるため、様々な画像処理への適用が可能である。

#### 4.2 圧縮手順

次に、本手法におけるデータセグメント単位での画像圧縮処理について詳述する。本解説では、水平ライン方向の画像が入力されるものとする。

セグメント単位でデータが入力されるごとに、図 5 に示すような処理フローを、パイプライン方式で処理する。以下、各処理ステージについて説明する。

##### (1) DPCM 処理

バンド幅圧縮を行うため、データ圧縮回路では、セグメント単位で入ってくるデータをまず DPCM により、隣接画像間の差分処理を行う。16 画素をセグメント単位とし、8 bit の階調を持つ輝度もしくは色差値を、入力画素ごとに左隣のデータとの差分値を計算する。DPCM の計算結果

bit	ロスレス時の最大bit					ロッキー時の最大bit					0					
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	
3	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	
2	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	
1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	
0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	
	D[0]	D[1]	D[2]	D[3]	D[4]	D[5]	D[6]	D[7]	D[8]	D[9]	D[10]	D[11]	D[12]	D[13]	D[14]	D[15]

図 6 最大レンジの算出

Fig. 6 Scanning of maximum range.

は、符号フラグ 1 bit と絶対値差分 8 bit の合計 9 bit で表現される。

圧縮効率を上げるため、通常は、水平ラインの先頭のみ、画素値そのものを用い、その後のセグメントについては、1つ前のセグメントの右端値との差分を継続して計算する。

(2) 最大レンジの算出

DPCM が行われた後、各画素の DPCM 値を比較し、最も MSB に近い位置にあるビット '1' をサーチし、そのビット位置をそのセグメントの最大レンジと定義する。図 6 に、LSB に符号化ビット、ビット 1~8 に絶対値差分を配置した場合の最大レンジの例を示す。16 個の絶対値差分のうち、1 が立つ最上位ビットは、画素 D[3] の bit5 となる。

本提案手法では、後述するようにロスレス/ロッキー型の圧縮モデルを使い分ける。図 6 のような状態で最大レンジを求める場合、ロスレス型の処理の際には 5 を最大レンジとして使用する。一方、ロッキー型の場合は、5 に 1 加算した 6 とする。

これは (4) ストリームの生成「輪郭型の処理」で後述するローカルデコード処理により、桁上がりが発生する可能性があるためである。

(3) 圧縮モデルの決定

次の処理では、複数種ある圧縮モデルより、各セグメントに適用するものを選択し決定する。以下に各圧縮モデルについて説明する。

低周波型

ロスレスでデータを出力可能なモデルである。最大レンジをビット長とした符号化を行い、ロスレスでデータ圧縮を行う (図 7)。セグメント内での画素間のレベル差が小さい場合に、高い圧縮率でデータをストリーム化できる。

輪郭型

画像の輪郭部などに出現しやすいモデルで、セグメント内での画素間のレベル差が大きく、ロッキーの圧縮を行う (図 8)。差分値の大きい画素の差分値については、量子化し、データを出力する。圧縮時に設定される「圧縮レベル」に応じて、符号量が制限される。

オリジナル型

複雑なテクスチャ部分などで圧縮効率が悪く、元のデータを出力するモデルである (図 9)。オリジナル型を選択すると、圧縮効果はないが、すでに処理された部

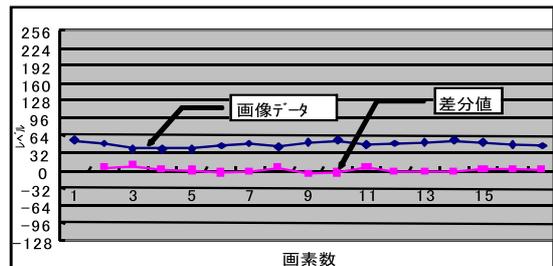


図 7 低周波型の例

Fig. 7 Example of low frequency model.

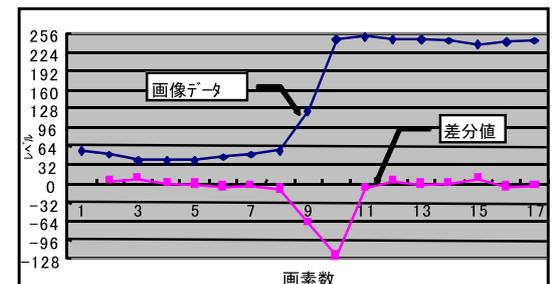
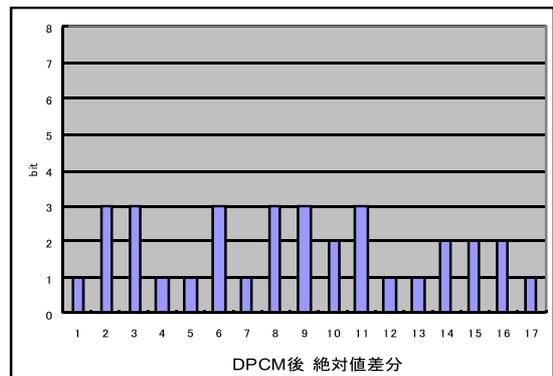
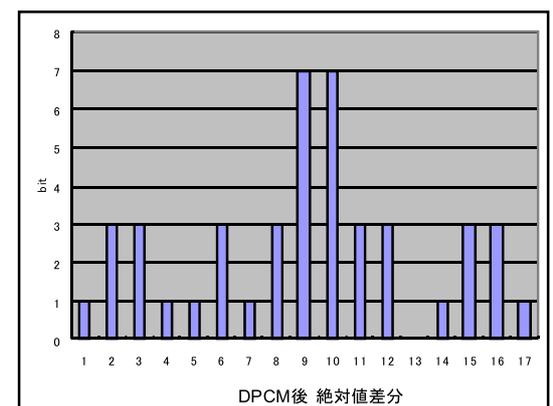


図 8 輪郭型の例

Fig. 8 Example of edge model.



分の圧縮によりバンド幅の余裕が確保されているような場合に、画質劣化を防ぐことができる。

次に、入力された画像データが、3種の圧縮モデルのうちいずれに該当するかの、決定方法について説明する。

圧縮モデルの選択を行う場合、あらかじめ設定された圧縮率上限と、算出された最大レンジより、低周波型、輪

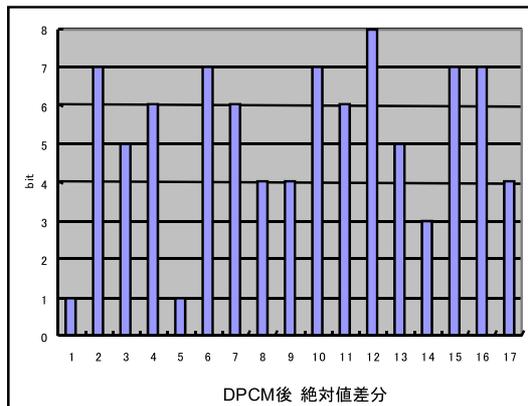
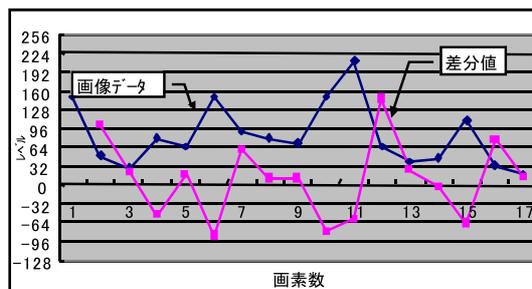


図9 オリジナル型の例

Fig. 9 Example of original model.

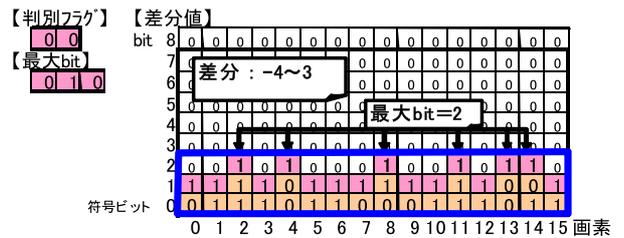
表1 圧縮率上限と最大レンジによる圧縮モデルの割当て

Table 1 Compression model mapping.

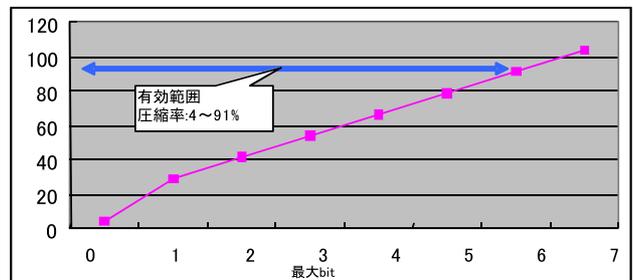
最大レンジ	圧縮率上限 104% (L=8)		圧縮率上限 91.4% (L=7)		圧縮率上限 78.9% (L=6)		圧縮率上限 66.4% (L=5)		ロシーフラグ(3bit)
	圧縮モデル	圧縮レンジ	圧縮モデル	圧縮レンジ	圧縮モデル	圧縮レンジ	圧縮モデル	圧縮レンジ	
0	低周波	-	低周波	-	低周波	-	低周波	-	0
1,2	低周波	-	低周波	-	低周波	-	低周波	-	1
3	低周波	-	低周波	-	低周波	-	低周波	-	2
4	低周波	-	低周波	-	低周波	-	輪郭	3	3
5	低周波	-	低周波	-	輪郭	3	輪郭	3	4
6	低周波	-	輪郭	4	輪郭	4	輪郭	3	5
7	オリジナル	-	輪郭	5	輪郭	4	輪郭	4	6
8	オリジナル	-	輪郭	6	輪郭	5	輪郭	4	7

郭型, オリジナル型を選択する. 表1に, 圧縮率上限値 66.4%, 78.9%, 91.4%, および 104% に対応する割当て表を示す. 圧縮符号化時には 4bit の最大レンジと 3bit の圧縮レンジを 3bit のロシーフラグにエンコードし, 符号量を低減させる. 本割当て表に基づき, 目標とする上限値以下の圧縮を行うモデルを選択する. この点が, エントロピー符号化を活用した従来手法と異なる点である. 従来は, 入力画像に依存して圧縮率が変動するため, 厳密に圧縮後のバンド幅の見積りができなかったが, 本手法では, 目標とする上限値以下の圧縮率を保証することが可能となった.

また, 後述するバンド幅余裕度に応じて, 一時的に, 参照する圧縮率上限を変更する. たとえば, 圧縮率上限が 78.9% と指定されているとき, それまでのバンド幅圧縮効率が十分に得られていると, 一時的に設定値以上の圧縮率上限 91.4% もしくは 104% 以上のテーブルを選ぶことを許容する. 高い圧縮率上限を持つテーブルでは, ロシー圧



(a) 低周波型の符号ビット



(b) 低周波型の圧縮率

図10 低周波型のストリーム生成

Fig. 10 Streaming procedure for the low frequency model.

縮となる輪郭型の選択範囲が狭くなり, 代わりに低周波型, オリジナル型の割当てが増える. これにより, 画質劣化を抑制することが可能となる.

#### (4) ストリームの生成

決定された各圧縮モードにおけるストリームの生成手順について, 以下説明する.

##### 低周波型

低周波型は, 主に平坦な画像に対し, 効率良く圧縮ができる圧縮モデルである. 本モデルでは, 最大レンジ以上のビット位置のデータはすべて 0 値となる. したがって, 最大レンジそのものと, 最大レンジ以下の各画素に対応した絶対値差分を求め, これを符号化する.

低周波型を示す判別フラグ "00" と最大レンジを表す "3bit" のデータをヘッダとし, 各画素の符号ビットと最大レンジ以下の絶対値差分を LSB 側から順次出力する (図 10(a)).

ここで, 低周波型の圧縮率は元のデータ数 128 bit に対する出力データ数で定義される. ただし, 図 10(b) に示すように, 最大レンジが 7 以上の場合, 原画像よりもむしろデータ量が増加するため, 最大レンジが 0 から 6 までを適用範囲として限定し, それ以上の場合でロスレスが望まれる場合には, オリジナル型が前述の圧縮モデルの決定時に選択される.

##### 輪郭型

輪郭型は, 主にエッジ成分を含む画像に対し, 効率良く圧縮ができる圧縮モデルである.

あらかじめ, 輪郭型が選択された段階で, 最大レンジより, 圧縮レンジが求まる. 圧縮レンジは, 最終的にそ

のレンジ以下に絶対値差分を量子化し出力するビット長を示したものであり、先に述べた圧縮モード決定時に、圧縮率上限と最大ビットより一意に決定される。

次に、圧縮レンジ以上の差分値を判別するために圧縮レンジ超えフラグを画素ごとに設け、圧縮レンジ以上の絶対値差分を持つ画素位置について‘1’を立てる。

圧縮レンジ超えフラグが1の絶対値差分の画素については、(最大レンジ - 圧縮レンジ) 分のビット幅だけLSB側にビットシフトし、すべての絶対値差分を圧縮レンジ以下のビット数に量子化する。

また、伸張処理において、DPCMの逆演算をビットシフトした差分値をそのまま用いると、ビットシフトされた誤差が次の画素計算時に蓄積されてしまう。これを回避するため、圧縮処理時には、量子化したデータについては逆量子化した値を求め、右隣のデータはその逆量子化値とのDPCMを行う。本処理をローカルデコード処理と称する。これにより、圧縮処理と伸張処理とでの処理の不一致を防止する。また、DPCM値の再計算により、最大レンジが変化することを見越し、1bit追加したものを輪郭型では最大レンジとしてあらかじめ用いる。

図11にロッシー圧縮時の輪郭型の例を示す。符号化される差分値は、図中の破線で示された範囲となる。

ストリーム化に際しては、圧縮モデルの判別フラグ“01”，最大レンジと圧縮レンジが符号化されたロッシー

フラグに続き、各画素の圧縮レンジ超えフラグ、符号ビット、および絶対値差分を順次出力する。すべてのデータはLSB側より出力される。

オリジナル型

オリジナル型は、低周波型と輪郭型に適さない複雑な画像に対し、画像データそのものを16画素分出力することで、ヘッダに必要なデータ量を最小限にするものである。

ストリーム化の際には、オリジナル型は、判別フラグとして‘1’と、16個の画素データをLSB側より、そのまま符号として出力する。

(5) バンド幅余裕度計算

(1)~(4)の工程で生成されたストリームは、各モデルにおいて生成される符号量がストリーム発生前に厳密に定義可能である。8bitの輝度値を1セグメント(16画素)分出力する場合の低周波型、輪郭型、およびオリジナル型の各モデルにおける発生符号量 ( $R_a, R_b, R_c$ ) は以下のとおりとなる。

低周波型

$$R_a = 16M + 5 \text{ bits}, \quad M: \text{最大レンジ} \quad (0 \leq M \leq 6) \tag{1}$$

輪郭型

$$R_b = 16(N + 1) + 5 \text{ bits}, \quad N: \text{圧縮レンジ} \quad (0 \leq N \leq 6) \tag{2}$$

オリジナル型

$$R_c = (128 + 1) \text{ bits} \tag{3}$$

上記数式を用いて、本手法の目的とする、圧縮後のバンド幅上限を厳密に規定することが可能となる。ターゲットとなる圧縮率の上限値  $\alpha$  は以下の式で定義される。

$$\alpha = (16L + 5)/128, \quad L: \text{自然数} \quad (L = 0, 1, \dots, 7) \tag{4}$$

$\alpha$ を規定するパラメータ  $L$ により、上述の圧縮モデルの選択が明確化される。

各セグメントの圧縮モデルを選択する際、 $M \leq L$ となる場合には低周波型を、 $L < M$ となる場合には輪郭型を選択し、圧縮レンジ  $N$ を  $N + 1 \leq L$ の条件を満たすように選択することで、確実にターゲットとする圧縮率よりも高い効率を得ることが可能となる。

また、低周波型と輪郭型の両モデルを選択可能である場合には、優先的に低周波型を基本的には選択する。これにより、ロッシー圧縮を極力避けることが可能となり、画質劣化を軽減する効果がある。一方で、最大レンジが高い場合には、輪郭型を用いて圧縮効率を優先させることも可能である。表1に示した最大ビット対圧縮モデルの割当ては、上記アルゴリズムを踏襲したものである。

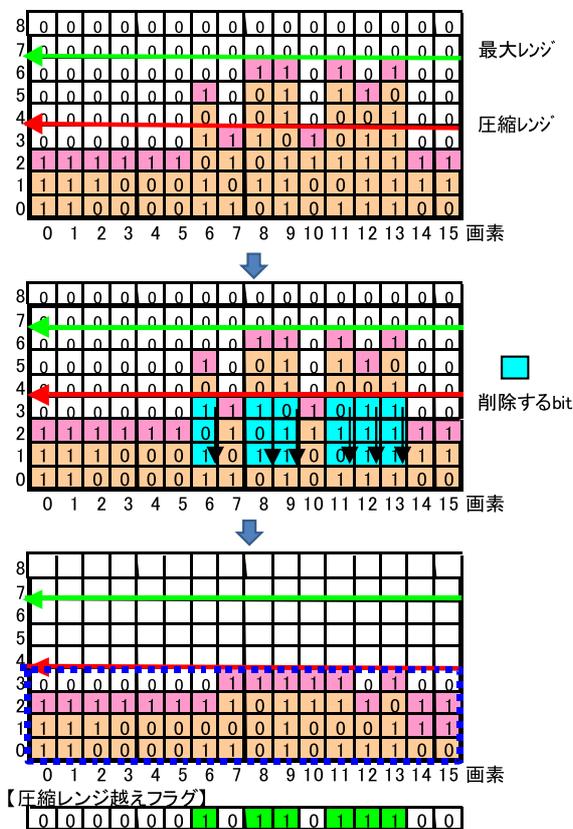


図11 輪郭型のロッシー圧縮

Fig. 11 Lossy compression procedure for the edge model.

さらに、実際の画像においては、低周波型が多く選択されることにより、ターゲットとする上限の圧縮率に対して、バンド幅に余裕が生じる場合が多い。本手法では、あらかじめ定められたセグメント数 ( $P$ ) ごとにバンド幅の余裕度を平滑化し、ロッシェー圧縮の発生を抑制するバンド幅余裕度のフィードバック制御を設ける。

$P$  個のセグメント中の  $n$  番目のセグメントの余裕度 ( $D_n$ ) は、 $n-1$  番目のセグメントまでの累積符号発生量 ( $R_{n-1}$ ) を用いて、以下のように計算される。

$$D_n = ((5 + 16L)n - R_{n-1})/16 + D_{init},$$

$$n : 0 \leq n < P \tag{5}$$

$n$  個目のセグメントの圧縮時に、パラメータ  $L$  を一時的に  $(L + D_n)$  として取り扱い、表 1 中の該当参照テーブルを変更しても、合計の圧縮データ量は上限を超えることがない。このため、表 1 に設定されている  $\alpha$  よりも高い圧縮率上限のテーブルを利用し、低周波型や、圧縮レンジの値が大きい輪郭型を多く割り当てることで、ロッシェー圧縮による画質劣化を抑制することが可能となる。

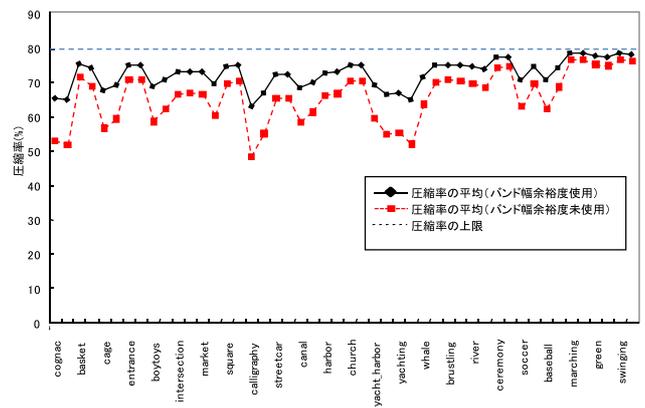
また、通常は、SDRAM バースト長と圧縮上限値  $\alpha$  から生じるデータ量のギャップより、バンド幅余裕度の初期値 ( $D_{init}$ ) を定義することが可能であり、最初のセグメント ( $n=0$ ) から余裕度を設けることができる。バンド幅余裕度によるフィードバック処理を行わない場合には、 $D_n = 0$  とする。

## 5. 実験結果

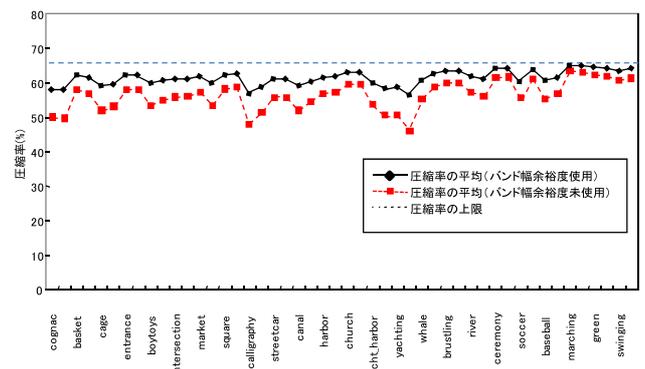
### 5.1 画質と圧縮率に関する評価

本手法を用いて、YUV4:2:2 の複数のサンプル動画画像 [9] に対して、圧縮伸張処理を行った。サンプル画像は、異なる絵柄による評価を増やすため、各シーケンスのタイトル画像を除く先頭フレームと途中 (No.149) の 2 フレームを抜き出して圧縮伸張を行い、圧縮率の計測と PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) を求めた。PSNR は YUV 各成分において計算し、平均値を使用している。

本実験では、メモリバスにおけるバーストサイズを (64 bit  $\times$  8 バースト長 = 512 bit) と設定した。複数種の画像処理アクセスが調停される時のバッファメモリ増加を防ぐためにはバースト長が短い方が有利であるが、一方で圧縮効率を上げるためにはバースト長を長く持つのが望ましい。本バースト長はそのトレードオフを考慮して選択した。本設定下で処理を行った結果、1 バーストあたりに圧縮される元画像のセグメント数はつねに固定になった。圧縮率上限 78.9% 時で 5 セグメント、66.4% 時で 6 セグメントとなり、すべてのバーストにおいて設定したバンド幅の上限を超えることなく、圧縮されることを確認した。本結果より、消費電力削減のため SDRAM の駆動クロックの周波数を下げてバンド幅削減分の帯域を削っても、各画像処



(a) 圧縮率上限 78.9%



(b) 圧縮率上限 66.3%

図 12 バンド幅圧縮結果

Fig. 12 Bandwidth compression results.

理のリアルタイム動作を保証できた。

図 12 に各バーストの圧縮率平均値を示す。圧縮率平均値は、各バーストにおいて符号化されたデータの圧縮率を 1 フレームで平均化したものである。バンド幅余裕度のフィードバックをかけた場合には、全体的に圧縮率が大きくなっている。

画質については、PSNR で 40~65 dB の性能を示しており、リアルタイム動画処理に活用可能なレベルであることを確認した。特にバンド幅余裕度のフィードバックをバーストごとに行った場合には、平均 PSNR が 2.0 dB 向上した。各バースト内のデータ量の余裕度を用いてできるだけ高画質化を図るよう制御された結果である。

### 5.2 回路実装結果

Full-HD 動画システムへの対応を考え、本回路を YUV4:2:2 1,920  $\times$  1,080  $\times$  60 p の動画の画素スループットに対応させ回路実装を行った。結果、圧縮回路、伸張回路各々 22 kGate, 8 kGate (90 nm プロセス, 200 MHz 動作) の回路規模でシステム LSI に実装し、外部に DDR2-SDRAM を接続しリアルタイム動作することを確認した。たとえば従来手法 [2] では、圧縮および伸張回路は各々 9.3 kGate, 4.7 kGate とあるが、従来技術は縦方向のデータの相関を

利用するため、ラスタスキャン入力の画像については、画像の水平方向の画像を蓄積するラインメモリを必要とする。Full-HD であれば、 $1,920 \times 8 \text{ bit} \times 2$  (4:2:2 相当分) = 30 Kbits を 1 つの圧縮もしくは伸長回路あたりに必要とする。本手法ではこれらの SRAM は不要であり、従来手法に比べ小さい規模で実装可能である。また各圧縮、伸長回路は 10 MGate 相当を搭載する全体の LSI 規模に比べ十分小さく、複数の圧縮伸長回路をシステム LSI に搭載することが可能な規模である。

次に、消費電力に関して解析する。試作した画像信号処理 LSI では、外部に DDR2-SDRAM (400 MHz 動作) を 2 個必要としたが、本技術適用後 (圧縮率上限 78%)、駆動周波数を 20% 下げ 320 MHz で動作させることが可能となった。これにより 1 フレームも破綻することなくリアルタイム画像処理が動作することを確認した、バンド幅上限値を規定できない従来手法では、このように駆動クロックを下げることは困難であった、本クロック周波数低減により、バンド幅圧縮を行わないときに比べ、約 210 mW 消費電力を削減することができた。

## 6. おわりに

画像処理 LSI に必要とされるバンド幅圧縮技術を開発した。本手法は、SDRAM への転送データがバースト単位で多重化されている内部メモリバスにおいて画像圧縮伸張技術を用いてバンド幅圧縮を行う。本技術では、従来困難であったメモリバンド幅の圧縮後の上限値を規定し、その制約内でデータ量を削減することを可能とした。

実験結果から、リアルタイム動画処理時に画質劣化がほとんど視認されないレベルの画質を実現することを確認した。また、バンド幅制約内でできるだけ高画質を図るアルゴリズムを開発しその効果を確認した。

試作結果より、低コストで画像処理 LSI に適用でき、さらにバンド幅を圧縮した分、DDR2-SDRAM の駆動クロック周波数を低減させ、消費電力を非圧縮時に比べ削減できることを確認した。

## 参考文献

- [1] Riemens, A.K., van der Vleuten, R.J., et al.: Transparent Embedded Compression in Systems-on-Chip, *SIPS* (2006).
- [2] Kim, H., Kim, M.C., et al.: Efficient Quasi-lossless Image Compression for Memory Bandwidth Reduction, *Proc. ICCE*, pp.256-261 (2009).
- [3] Tescher, A.G., Gokce, D., Aleksic, M. and Reznik, Y.A.: Embedded Memory Compression for Video and Graphics Applications, *Proc. SIPI*, Vol.7798 (2010).
- [4] Taubman, D.S. and Marcellin, M.W.: *JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*, Kluwer (2000).
- [5] ITU-T. H.264: Advance video Coding for generic audio-visual services (2007).

- [6] Golomb, S.W.: Run-Length Encodings, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.12, No.7, pp.399-401 (1966).
- [7] Rice, R.F. and Planunt, J.R.: Adaptive variable length coding for efficient compression of spacecraft television data, *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol.19, No.6, pp.889-897 (1971).
- [8] Cover, T.M. and Thomas, J.M.: *Elements of Information Theory*, John Wiley & Sons, New York (1991).
- [9] (財) NHK エンジニアリングサービス: DVD 版システム評価用標準動画画像シリーズ III, HD 画像 DISK HD No.1~24.



小味 弘典

1969 年生。1992 年大阪府立大学工学部電気工学科卒業。1994 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 日立製作所に入社。1999~2000 年南カリフォルニア大学客員研究員。画像圧縮伸張技術の研究開発に従事。映像情報メディア学会会員。



野中 智之

1972 年生。1991 年静岡県立浜松工業高等学校電気科卒業。同年 (株) 日立製作所に入社。民生機器向け画像処理の研究開発に従事。



荻野 昌弘

1973 年生。1996 年金沢大学工学部電気情報工学科卒業。1998 年同大学大学院修士課程修了。同年 (株) 日立製作所に入社。画像処理技術に関する研究開発に従事。