

超高精細動画像信号の高圧縮ロスレス符号化手法の開発

研究代表者 長谷川 まどか 宇都宮大学大学院工学研究科准教授

1 まえがき

マルコフモデル符号化は、画像信号の可逆の高圧縮符号化方式における符号化モデルの一つであり、画素値の出現確率のマルコフ性を利用し、参照画素の状態ごとに信号を分離して符号化を行う。この方式は、理論的圧縮限界であるエントロピーを実現できる優れた方式であるが、統計ベースの符号化であるため、データ量が少ない場合には理論値の実現が困難であることから、これまであまり顧みられることがなかった。しかし、超高精細動画像信号はこれまでの静止画像や動画像などに比してデータ量が膨大であることや、近年のハードウェア技術の急速な発展により、統計ベースの符号化がリアルタイムで実現できる可能性が高まっている。

本研究はこのような状況に着目し、マルコフモデル符号化を用いた超高精細動画像信号のスケラブル可逆符号化の検討を行った。通常の高圧縮マルコフモデル符号化では画素単位で参照が行われるため参照画素の選択の自由度が低く、多値画像をビットプレーン分解した各成分(以下、エレメントと呼ぶ)を単位として見た場合、着目エレメントと相関の低いエレメントも参照画素として使用していた。また、二値マルコフモデル符号化では同一ビットプレーン内のエレメントのみを参照画素として用いており、画像内のエレメントの相関を十分利用できていないと言え難い。そこで、提案手法では、因果律を満足する、すなわち符号化済みのエレメントを参照するという条件下で参照エレメント選択の自由度を増やし、着目画素の周辺画素のエレメント、上位ビットプレーンのエレメント、および、他の色成分内のエレメントを参照位置の候補に加えることでエントロピーの削減を図った。他の色成分との相関を用いる手法としては、RGB成分のままエレメント参照を行う手法と、RGB画像に可逆コンポーネント変換を施して輝度成分と色差成分からなるYCbCr成分画像を作成し、このYCbCr成分間でエレメント参照を行う手法の2種類について検討を行った。また、シームカービングによる画像内容の凝縮を用いた動画像スケラブル伝送の検討や、エントロピー符号化部で使用する算術符号の高速化の検討も行った。以下、研究成果の要約を述べる。

2 成分画像間相関を用いたカラー画像のマルコフモデル符号化

2-1 はじめに

画像信号の情報量は、文字情報や音声情報などと比較すると膨大な量であるため、画像データの効率的な保存・伝送を行うためには高圧縮符号化技術が必要不可欠となる。画像信号の符号化方式は、JPEG(Joint Photographic Experts Group)[1]などに代表される非可逆符号化方式と、JPEG-LS(JPEG-Lossless)[2]やJPEG2000[3]などに代表される可逆符号化方式(Lossless Coding / Reversible Coding)に分けられる。

画像信号の可逆の高圧縮符号化方式としてマルコフモデル符号化[4][5]が知られている。マルコフモデル符号化では画素値のマルコフ性を利用して符号化を行うが、一般的な多値のマルコフモデル符号化では画素単位で参照が行われるため、多値画像をビットプレーン分解した各成分(エレメント)単位で考えた場合、着目エレメントと相関の低いエレメントも参照される可能性がある。この点を考慮して、画像をビットプレーンに分解し、エレメント単位での参照を行うことにより効率のよいマルコフモデル符号化が可能な3次元マルコフモデル符号化[6][7]が提案されているが、カラー画像の成分画像間の相関については考慮されていない。

本研究では、カラー画像の3次元マルコフモデル符号化において、カラー画像を構成する成分画像間の相関を用いる手法を提案する。成分画像間相関を用いる手法としては、RGB成分画像間のエレメント参照によって参照エレメント候補数を増加させる手法と、RGB成分画像に対してコンポーネント変換を施し、輝度成分と色差成分を表すYCbCr成分画像に対してエレメント参照を行う手法の2種類について検討する。種々の画像に対してシミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。

2-2 マルコフモデル符号化の原理

(1) 一般的なマルコフモデル符号化

一般的なマルコフモデル符号化では、着目画素を近傍画素の状態によって分類し、状態ごとに異なる符号

を用いることで高効率の符号化を行う方式である。マルコフモデル符号化において、状態ごとの符号をまとめた符号表をマルコフテーブルと呼ぶ。マルコフモデル符号化では、理論的な圧縮限界であるエントロピーを直接の圧縮目標としているため、原理的に優れた方式である。図1に示す m 個の画素を参照してマルコフモデル符号化を行う際のエントロピーは、式(1)に示す m 重マルコフモデルエントロピー H_c で表される。

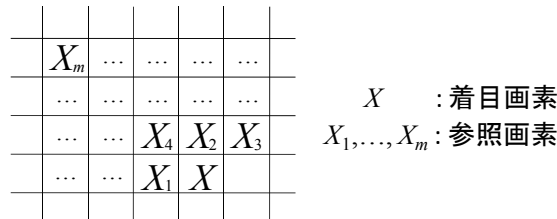


図1 着目画素と参照画素の位置関係

$$H_c = - \sum_{X_m=0}^{k-1} \dots \sum_{X_1=0}^{k-1} \sum_{X=0}^{k-1} P(X, X_1, \dots, X_m) \log_2 P(X | X_1, \dots, X_m) \quad (1)$$

式(1)において、 k は画像の階調数、 $P(X, X_1, \dots, X_m)$ は着目画素 X と X に先行する m 個の参照画素 X_1, \dots, X_m の結合確率を表しており、 $P(X | X_1, \dots, X_m)$ は着目画素 X の条件付き確率を表している。また、参照画素の状態を S_X とし、状態 S_X の出現確率を $P(S_X)$ とすれば、式(1)は次の式(2)のように表せる。

$$H_c = - \sum_{S_X} P(S_X) \sum_{X=0}^{k-1} P(X | S_X) \log_2 P(X | S_X) \quad (2)$$

(2) 3次元マルコフモデル符号化

3次元マルコフモデル符号化では、多値画像をビットプレーン分解した各成分(エレメント)による3次元構成で考える。図2に示す8ビット画像の場合、図2(a)における着目画素 $X_{(0,0)}$ は、図2(b)のようにビットプレーン上の値 $x_{0(0,0)}, \dots, x_{7(0,0)}$ で表現可能であるため、8枚の2値画像として考えられる。図2(b)のビットプレーン構成を考えた場合、式(2)は $x_{0(0,0)}, \dots, x_{7(0,0)}$ を用いて次の式(3)で表せる。

$$\begin{aligned} H_c &= - \sum_{S_X} P(S_X) \sum_{x_{0(0,0)}=0}^1 \dots \sum_{x_{7(0,0)}=0}^1 P(x_{0(0,0)}, \dots, x_{7(0,0)} / S_X) \log_2 P(x_{0(0,0)}, \dots, x_{7(0,0)}) \\ &= H(x_{0(0,0)} / S_X) + H(x_{1(0,0)} / x_{0(0,0)}, S_X) + H(x_{2(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, S_X) \\ &\quad + H(x_{3(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, x_{2(0,0)}, S_X) \\ &\quad + H(x_{4(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, x_{2(0,0)}, x_{3(0,0)}, S_X) \\ &\quad + H(x_{5(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, x_{2(0,0)}, x_{3(0,0)}, x_{4(0,0)}, S_X) \\ &\quad + H(x_{6(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, x_{2(0,0)}, x_{3(0,0)}, x_{4(0,0)}, x_{5(0,0)}, S_X) \\ &\quad + H(x_{7(0,0)} / x_{0(0,0)}, x_{1(0,0)}, x_{2(0,0)}, x_{3(0,0)}, x_{4(0,0)}, x_{5(0,0)}, x_{6(0,0)}, S_X) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)において、 $H(x_{j(0,0)} / x_{0(0,0)}, \dots, x_{j-1(0,0)}, S_X)$ は参照画素の状態 S_X および着目エレメント $x_{j(0,0)}$ よりも上位のビットプレーン上のエレメント $x_{0(0,0)}, \dots, x_{j-1(0,0)}$ を利用した場合の条件付きエントロピーであり、式(3)は式(2)が各ビットプレーンの条件付きエントロピーの和で表されることを表している。

図2のように3次元空間で考えることで、参照エレメント選択の自由度を増加させることが可能となる。例えば、図2(a)において $X_{(-1,0)}$ を参照することは図2(b)において $x_{0(-1,0)}, \dots, x_{7(-1,0)}$ を参照することと等価であるが、着目画素の最上位ビット $x_{0(0,0)}$ と参照画素の最下位ビット $x_{7(-1,0)}$ の相関は低いと考えられる。このとき、3次元マルコフモデル符号化を用いることで、 $x_{7(-1,0)}$ の代わりに $x_{0(0,-1)}$ などの着目エレメントとより高い相関があるエレメントを選択することが可能となる。これにより、状態数を増加させることなくマルコフモデルエントロピーのさらなる削減が可能であると考えられる。

このように、3次元マルコフモデル符号化の基本的な考え方は、従来のマルコフモデル符号化と状態数を同一にする条件下で、参照エレメント選択の自由度を活かしてエントロピーの削減を図るものである。

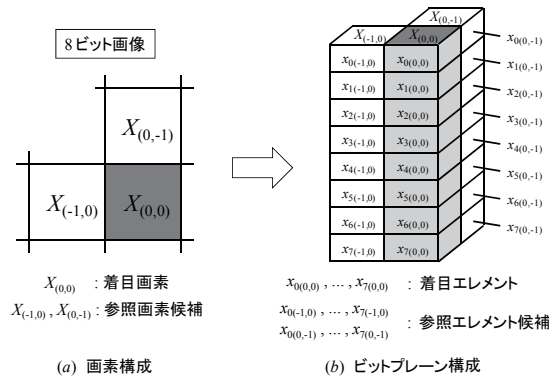


図2 多値画像からのビットプレーン分解

2-3 成分画像間相関を用いた3次元マルコフモデル符号化の提案

(1) 成分画像間相関の利用

前節で説明した従来の3次元マルコフモデル符号化(以下, 従来手法)では, カラー画像の色成分画像間の相関を用いていない. ここで成分画像とは, カラー画像を構成する複数の画像(*RGB* など)のことを指す. しかし, 成分画像間には相関があるため, 成分画像間相関を用いることでエントロピーの削減が期待できる.

そこで本研究では, 成分画像間相関を用いた3次元マルコフモデル符号化手法を提案した. 具体的には, *RGB* 成分画像間の元素参照によって参照元素候補数を増加させることで, より圧縮に効果的な元素を選択する手法と, *RGB* 成分画像にコンポーネント変換を施し, 輝度成分と色差成分を表す *YCbCr* 成分画像に対して元素参照を行う手法の2種類を提案し検討を行った.

(2) 成分画像間参照法

提案手法では, 3次元マルコフモデル符号化において成分画像間相関を利用する手法として, 着目する色成分以外の成分画像内の元素も参照候補に加える. 以下, 本手法を成分画像間参照法と呼ぶ.

図3に示すように, 従来手法における参照元素候補は着目画像中の元素のみであるが, 図4に示す成分画像間参照法では, 例えば着目画像である *R* 成分画像の符号化の際に, 参照画像である *G* 成分画像中の元素も参照元素候補に加える. これにより, 参照元素候補数が増加し, 従来手法よりも符号化に適した参照元素が選択されることでエントロピーが削減されると考えられる.

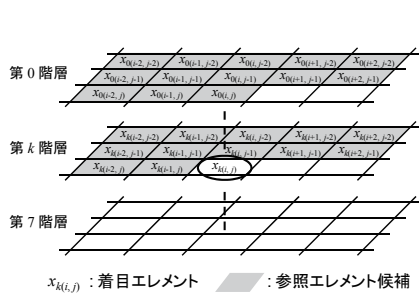


図3 従来手法の参照元素候補

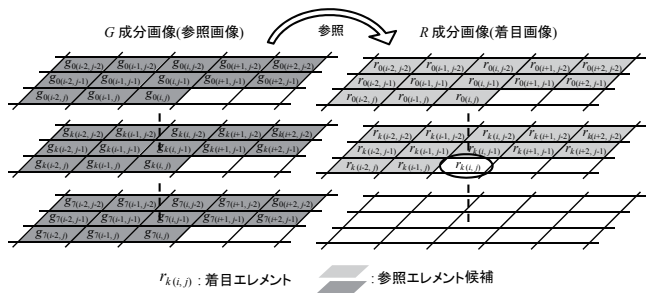


図4 成分画像間参照法の参照元素候補

(3) 系列変換法

成分画像間相関を利用するもう1つの手法として, *RGB* 成分画像を輝度成分と色差成分に変換するコンポーネント変換を施し, 変換後の信号に対して元素参照を行う手法の検討を行う. 以下, 本手法を系列変換法と呼ぶ.

本研究ではコンポーネント変換手法として, 式(4)で与えられる *YCbCr* 変換を用いる. 式(4)は可逆変換式であり, 式(5)で表される逆変換式を用いて元の信号を完全に復元可能である.

$$\begin{cases} Y = \left\lfloor \frac{R + 2G + B}{4} \right\rfloor \\ Cb = B - G \\ Cr = R - G \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} G = Y - \left\lfloor \frac{Cb + Cr}{4} \right\rfloor \\ B = Cb + G \\ R = Cr + G \end{cases} \quad (5)$$

式(4),式(5)において, Y は輝度成分画像, Cb, Cr は色差成分画像を表している. なお, 式(4)より, Cb, Cr 成分画像には負値が出現するため, 色差成分画像のダイナミックレンジは変換前の RGB 成分画像よりも広い.

系列変換法により, 色差成分画像中の画素値の分散が小さくなる. 例として, カラー画像 harbor の B 成分画像および Cb 成分画像のヒストグラムをそれぞれ図 5, 図 6 に示す. 各図において, 色差成分画像における画素値の分散は小さいため, 系列変換法によりエントロピーを削減できる可能性を示唆している.

なお, 系列変換法によって成分画像間の相関は小さくなると考えられるため, 系列変換法を用いる際は成分画像間参照法は用いないこととする.

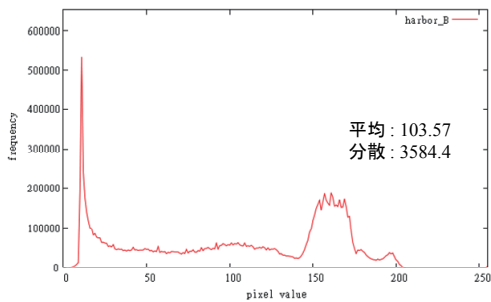


図 5 画像 harbor の B 成分画像のヒストグラム

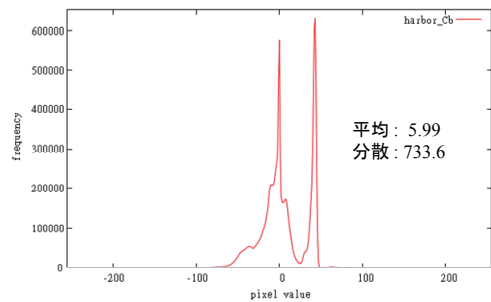
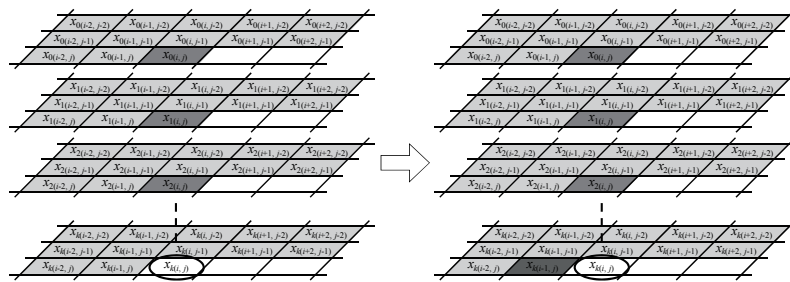


図 6 画像 harbor の Cb 成分画像のヒストグラム

(4) 上位プレーン優先参照

従来手法においては, 参照エレメントの組み合わせ数が膨大になることから, 参照エレメント選択手法としてエレメントの逐次的な選択を行っていた. これに対して本研究では, 着目エレメントと相関が高いエレメントを事前に参照エレメントとして選択する手法を提案する. 以下, 本手法を上位プレーン優先参照と呼ぶ. 上位プレーン優先参照では, 図 7 に示すように, 着目エレメントと同一画素位置の上位プレーンのエレメントはすべて参照することとし, それ以外の参照エレメントは, 従来手法と同様に逐次的な選択を行う. 上位プレーン参照により, 着目エレメントと高い相関があると考えられるエレメントが先に選択されるため, 従来手法よりもエントロピーが削減される可能性があると考えられる.



$X_{R(i,j)}$: 着目エレメント ◻: 参照エレメント候補 ◼: 参照済エレメント ◼: 新たに参照するエレメント

図 7 上位プレーン優先参照の参照エレメント選択

(5) 階層ごとの適応的な参照エレメント数選択

従来手法において、階層ごとの参照エレメント数は12エレメントで固定であったが、これは多値のマルコフモデル符号化とマルコフテーブルの状態数を揃えて比較を行うためであり、最適な参照エレメント数については検討が行われていなかった。

ここで、カラー画像に対して3次元マルコフモデル符号化を行い、符号割り当てに算術符号を用いる場合のオーバーヘッド情報量について考える。マルコフテーブルの1状態につき、優勢シンボルの表現に1ビット、優勢シンボルの出現確率に4ビットを割り当てて計5ビットで表現すると仮定した場合、従来手法における各階層のオーバーヘッド情報量は $2^{12}[\text{状態}] \times 5[\text{bit}] = 20480[\text{bit}]$ となる。ここで、本研究のシミュレーションで使用する 4096×3072 画素の画像においては、1エレメントあたりのオーバーヘッド情報量は $20480[\text{bit}] / (4096 \times 3072)[\text{画素}] \approx 0.002[\text{bit/element}]$ となる。これは充分小さい値であると考えられるため、さらに参照エレメント数を増加させることで、オーバーヘッド情報の増加量よりもエントロピーの削減量が大きくなり、合計の情報量の削減につながる可能性がある。

そこで本研究では、各階層における最大の参照エレメント数を20エレメントとして、オーバーヘッド情報量と情報源のエントロピーの総和が最小となる参照エレメント数を階層ごとに適応的に選択する手法についても検討を行う。

2-4 シミュレーション

(1) シミュレーション条件

提案手法の有効性を確認するために、提案する各手法を用いて3次元マルコフモデル符号化を行い、エントロピーを測定する実験を行った。

まず、実験1では、従来手法、成分画像間参照法、系列変換法の3種類を用いてエントロピーを測定し、成分画像間相関の利用法ごとのエントロピー削減効果について検証した。次に、実験2では、上位プレーン優先参照を用いてRGB成分画像およびYCbCr成分画像のエントロピーを測定し、上位プレーン優先参照を用いることによるエントロピー削減効果について検証した。最後に、実験3では、階層ごとに適応的に参照エレメント数を選択する手法を用いてエントロピーおよびオーバーヘッド情報量を測定し、合計の情報量の削減効果について検証した。

各実験には、画像電子学会のSHIPP(Standard High Precision Picture data)よりharbor, wool(各 4096×3072 画素, 24bit/pel), bride, bottles(各 3072×4096 画素, 24bit/pel)の4枚を用いた。なお、ビットプレーン分解は、RGBおよびY成分画像に対してはグレイコード、Cb, Cr成分画像に対しては符号-絶対値表現を採用した。また、着目エレメントが画像の端に存在する場合の例外処理として、図8に示すように、参照エレメント候補位置が画像領域外となる場合は該当する参照エレメントの値を0として扱った。

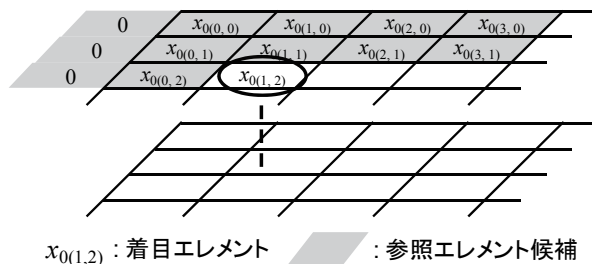


図8 参照エレメント選択時の例外処理

(1) 実験1の結果

表1に3次元マルコフモデル符号化による成分画像ごとのエントロピーの測定例を示す。表2には、各成分画像間相関法によるエントロピーを測定した結果を示す。なお、表1において、“階層ごとのエントロピー”はビットプレーン分解した各階層から得られた1エレメントあたりのエントロピーを表し、“合計エントロピー”は階層ごとのエントロピーを成分画像ごとに合計して求められた1画素あたりのエントロピーを表す。また、表2における“平均エントロピー”は、4枚のカラー画像から得られる12枚の成分画像から得られたエントロピーの平均値を表している。

表2より、成分画像間相関の利用法として成分画像間参照法を用いることで従来手法よりも約1.0%、また系列変換法を用いることで約5.2%エントロピーが削減されることがわかる。これは、色差成分画像における画素値の分散が小さくなったことによる効果であると考えられる。また、成分画像間相関の利用法としては系列変換法が最も優れていることが分かる。

表 1 成分画像のエントロピー測定結果

符号化対象画像		階層ごとのエントロピー [bit/element]								合計 エントロピー [bit/pel]
		着目階層								
		0	1	2	3	4	5	6	7	
harbor	R	0.054	0.134	0.218	0.405	0.600	0.816	0.931	0.983	4.141
	G	0.056	0.095	0.125	0.312	0.475	0.703	0.827	0.948	3.541
	B	0.056	0.119	0.263	0.331	0.507	0.708	0.838	0.959	3.781

表 2 従来手法および提案手法のエントロピー[bit/pel]

符号化手法	平均エントロピー
従来手法	3.417
成分画像間参照法	3.384
系列変換法	3.238

(3)実験 2 の結果

上位プレーン優先参照を用いてエントロピーを測定した結果を表 3 に示す。なお、実験 1 の結果から、以降の実験では成分画像間相関の利用には系列変換法のみを用いることとする。つまり、表 3 における RGB 成分画像のエントロピーは、成分画像間相関を用いない場合の値である。また、上位プレーン優先参照を用いない場合の結果は、表 2 の従来手法および系列変換法による結果と同一となる。

表 3 より、上位プレーン優先参照を用いることで、RGB 成分画像においてはエントロピーが約 1.0%削減されたが、YCbCr 成分画像においてはエントロピーが約 0.5%増大する結果となった。この原因を調査するため、YCbCr 成分画像から得られたエントロピーの内訳を検証した結果を表 4 に示す。

表 3 上位プレーン優先参照によるエントロピー[bit/pel]

符号化対象画像	上位プレーン優先参照	
	あり	なし
R, G, B 成分画像	3.383	3.417
Y, Cb, Cr 成分画像	3.254	3.238

表 4 YCbCr 成分画像のエントロピー内訳[bit/pel]

符号化対象画像	上位プレーン優先参照	
	あり	なし
Y 成分画像	3.107	3.154
Cb, Cr 成分画像	3.328	3.280

表 4 より、Y 成分画像においてはエントロピーが約 1.5%削減されているが、Cb, Cr 成分画像においてはエントロピーが約 1.5%増大していることがわかる。これは、色差成分画像 Cb, Cr において、上位プレーンのエレメントが参照エレメントとして適当でなかったことが原因だと考えられる。すなわち、図 6 に示したように、色差成分画像では絶対値の大きな値を持つ画素値の出現確率が低いため、符号プレーンを除く上位プレーンにおいて多くのビットが‘0’となり、これを参照しても状態の分類が適切に行われなかったと考えられる。一例として、表 5 に、画像 harbor の Cb 成分画像の、階層 1 におけるビット‘0’、‘1’の出現頻度を示す。

表 5 画像 harbor の Cb 成分画像の階層 1 における各ビットの出現頻度

ビット	出現頻度
0	12582810
1	102

表5より、色差成分画像の上位プレーンでは各ビットの出現頻度に大きな偏りがあり、参照エレメントとして適当ではないため、色差成分画像に対しては上位プレーン優先参照を用いるべきでないと考えられる。

これらの結果から、RGB成分画像およびY成分画像のみに対して、上位プレーン優先参照を限定的に用いた場合のエントロピーを表6に示す。表6より、上位プレーン優先参照を適切に用いることで、YCbCr成分画像においてもエントロピーが約0.5%削減されており、上位プレーン優先参照がエントロピー削減に有効であると考えられる。

表6 上位プレーン優先参照の限定的利用によるエントロピー[bit/pel]

符号化対象画像	上位プレーン優先参照	
	R, G, B, Y 成分画像のみ	なし
R, G, B成分画像	3.383	3.417
Y, Cb, Cr成分画像	3.222	3.238

(4)実験3の結果

表7に、階層ごとに適応的に参照エレメント数を変更する手法を用いた場合の、成分画像ごとのエントロピーおよびオーバーヘッド情報量の測定例を示し、表8にそれらの平均値および合計情報量を測定した結果を示す。なお、表7において、“参照エレメント数”は、各階層においてエントロピーとオーバーヘッド情報量の合計が最も削減された参照エレメント数を表す。また、表7中の値は小数点以下第4位を四捨五入しているため、合計エントロピーの値が各項の総和と異なる。

また実験3では、実験2の結果から、上位プレーン優先参照を限定的に用いて測定を行っている。

表7 実験3におけるエントロピーおよびオーバーヘッド情報量の測定結果

符号化対象画像		着目階層								合計エントロピー [bit/pel]
		0	1	2	3	4	5	6	7	
画像harbor R成分画像	参照エレメント数	11	12	13	14	15	15	14	13	
	階層ごとのエントロピー [bit / element]	0.062	0.145	0.224	0.383	0.556	0.792	0.917	0.979	4.057
	オーバーヘッド情報量 [bit / element]	0.001	0.002	0.003	0.007	0.013	0.013	0.007	0.003	0.048

表8 適応的な参照エレメント数選択によるエントロピー[bit/pel]

符号化対象画像	参照エレメント数	成分画像ごとのエントロピー	オーバーヘッド情報量	成分画像ごとの合計情報量
R, G, B 成分画像	12エレメント固定	3.383	0.013	3.396
	適応的に選択	3.312	0.046	3.358
Y, Cb, Cr 成分画像	12エレメント固定	3.222	0.014	3.236
	適応的に選択	3.166	0.034	3.200

表8より、オーバーヘッド情報量を考慮して階層ごとに適応的に参照エレメント数を変更することで、RGB成分画像を用いた場合では約1.1%、YCbCr成分画像でも約1.1%合計情報量が削減される結果となった。このため、オーバーヘッド情報量を考慮して、階層ごとに適応的に参照エレメント数を選択することが、エントロピー削減に効果的であると考えられる。

また、提案した各手法を適切に組み合わせてエントロピーおよびオーバーヘッド情報量を測定し、従来手法との比較を行った結果を表9に示す。表9より、提案手法を用いることで約6.7%情報量が削減されたことから、提案手法の有効性が確認できる。

表 9 従来手法および提案手法による情報量[bit/pel]

符号化手法	符号化対象画像	成分画像ごとのエントロピー	オーバーヘッド情報量	成分画像ごとの合計情報量
従来手法	R, G, B 成分画像	3.417	0.013	3.430
提案手法	Y, Cb, Cr 成分画像	3.166	0.034	3.200

2-5 成分画像間相関を用いたカラー画像のマルコフモデル符号化のまとめ

本章では、成分画像間相関を用いたカラー画像の3次元マルコフモデル符号化について検討した。実験の結果、提案した各手法によって情報量が削減されたことから、提案手法の有効性が確認できた。今後の課題としては、コンポーネント手法の適応的選択とその組み合わせによるエントロピー削減効果の検証などが挙げられる。なお本章の内容は文献[12]にて発表を行った。

3 凝縮・希釈処理を利用した動画像のスケラブル圧縮

従来の動画像圧縮の枠組みに動画像の凝縮・希釈という処理を加えることにより、動画像圧縮の効率を劇的に向上させることを目的とし、シームカービングを用いて縮小画像を作成し、これを符号化する手法の検討を行った。画像における凝縮・希釈処理とは、従来行われているような線形的なサイズ変更手法ではなく、画像中の着目オブジェクトは保存したまま画像全体をリサイズする処理を指す。このような特徴を持つ画像のサイズ縮小を凝縮と呼ぶこととする。また、同様にサイズ拡大（凝縮後の画像から原画像を復元すること）を希釈と呼ぶこととする。図9(a)の原画像に対しシームカービング凝縮によりリサイズを行った結果を同図(b)に、また、比較のため従来の線形手法によりリサイズを行った画像を同図(c)に示す。

図からわかるように、(b)の凝縮処理によるリサイズでは、画像中の重要な領域であるオブジェクト（ビルディングなどの建物）の画質は、(c)の線形処理によるリサイズ画像に比べて低下しておらず、凝縮処理が知的である点において、伝統的な解像度縮小手法と本質的に異なっている。

また、シームカービング等の凝縮・希釈処理によるリサイズは、1画素単位でのリサイズが可能であるため、きめの細かいスケラブル伝送が可能であると同時に、伝送の初期の段階で画像の重要な部分（オブジェクト）を精細に伝送し、伝送が進むにつれて背景などの部分が順次あらわれ、最終的には原画像に復元することができる。このように、凝縮・希釈処理を利用した符号化は、画像内容を考慮したインテリジェントなスケラブル伝送が可能となる点においてきわめて有用な方式であるといえる。

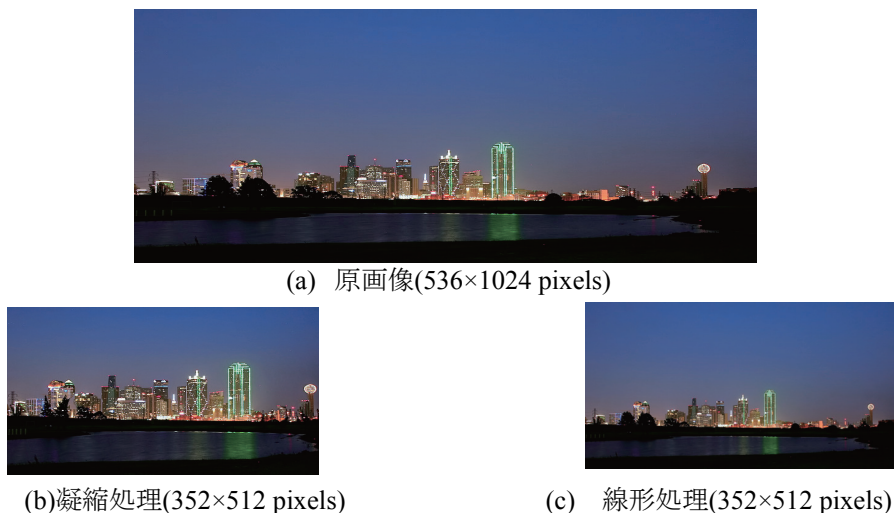


図 9 凝縮処理および線形処理による画像のリサイズ例

凝縮・希釈処理を利用した画像圧縮のブロック図を図10に示す。図から明らかなように、本方式は従来の動画像変換符号化（圧縮）の前後に凝縮・希釈処理を用いることに特徴があり、後述するように劇的な圧縮効率向上を期待できるパラダイムであると言える。この成果は文献[13]にて発表を行った。

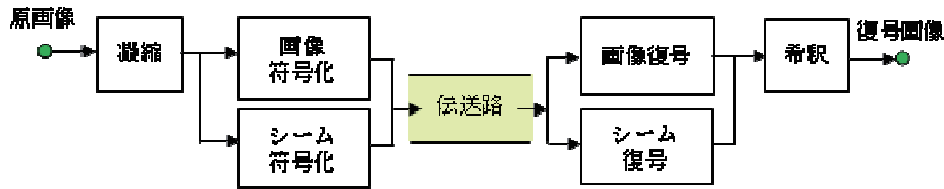


図 10 凝縮・希釈処理を利用した画像圧縮のブロック図

4 情報源拡大による算術符号の高速化について

4-1 はじめに

算術符号[8]は、無記憶情報源に対する理想的な符号化方式である Elias 符号化[9]を実用可能な形に再構成した符号であり、符号化効率がきわめて高いエントロピー符号化用符号として知られている。しかしながら、符号化・復号処理において 1 シンボルごとに加減算および乗算を必要とするため、多大な時間を要する。

そこで本稿では、無記憶 2 元情報源に対して情報源の拡大を行い、符号化対象シンボルを複数まとめて符号化することとし、さらに確率値の事前計算を用いて、演算回数を削減することにより、2 値算術符号の高速化を図る方式を提案する。また、符号化および復号シミュレーションを行い、提案方式の有効性を確認したので報告する。

4-2 従来の 2 値算術符号

2 値算術符号では、シンボルの生起確率に応じて半开区間 $[0, 1)$ を再帰的に分割し、符号化対象のシンボル系列と分割領域を対応づけることで符号化を行う。このとき、分割領域は C (Code:符号)および A (Augend:領域)を用いて、 $[C, C+A)$ のように表現される。ここで、半开区間 $[0, 1)$ は 0 以上かつ 1 未満の領域を表す。本稿では、この 2 値算術符号を従来方式と呼ぶ。

(1) 符号化アルゴリズム

2 値算術符号では、式(1)で C および A に初期値を与えた後、符号化する 2 値シンボル $x_i (\in F_2)$ に応じて式(7)または式(8)の操作を繰り返し、最終的に得られた Code 値を符号として出力する。ただし、復号側で符号化側と同じ P_1 を用いる必要があるため、オーバーヘッド情報として P_1 を伝送する。また、式(7)および式(8)の符号化操作において、逐次的な乗算を行う必要があるため、Renormalize 処理を用いて、必要となる演算精度を一定に保つ必要がある。式(1)-式(8)において、 C, A, A_0, A_1 および P_1 は V [bit] のレジスタであり、 P_1 には劣勢シンボルの生起確率を小数点以下 U [bit] で近似した値を格納する。

$$C \leftarrow 0 (= 00 \dots 0), \quad A \leftarrow 2^V - 1 (= 11 \dots 1) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &x_i = 0 \text{ の場合 (優勢シンボルの符号化)} \\ &A_1 \leftarrow A \times P_1, \quad A_0 \leftarrow A - A_1, \quad A \leftarrow A_0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &x_i = 1 \text{ の場合 (劣勢シンボルの符号化)} \\ &A_1 \leftarrow A \times P_1, \quad A_0 \leftarrow A - A_1, \quad C \leftarrow C + A_0, \quad A \leftarrow A_1 \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 復号アルゴリズム

2 値算術符号の復号は、式(9)で C および A に初期値を与えた後、式(10)-式(12)の操作を繰り返すことで行われる。ただし、符号化側と同様、Renormalize 処理により、必要となる演算精度を一定に保つ必要がある。式(9)-式(12)において、 Y は符号化側で出力した符号系列を表し、 $x_i (\in F_2)$ は復号した 2 値シンボルを表す。また、 C, A, A_0, A_1 および P_1 は符号化側と同様、 V [bit] のレジスタである。

$$C \leftarrow Y, \quad A \leftarrow 2^V - 1 (= 11 \dots 1) \quad (9)$$

$$A_1 \leftarrow A \times P_1, \quad A_0 \leftarrow A - A_1 \quad (10)$$

$$C < A_0 \text{ の場合 (優勢シンボルの復号)} \\ x_i \leftarrow 0, \quad A \leftarrow A_0 \quad (11)$$

$$C \geq A_0 \text{ の場合 (劣勢シンボルの復号)} \\ x_i \leftarrow 1, \quad C \leftarrow C - A_0, \quad A \leftarrow A_1 \quad (12)$$

4-3 2 値算術符号の高速化方式

2 値算術符号は逐次的な算術演算により符号化および復号を行うため、多大な時間を要する問題がある。そこで本稿では、無記憶 2 元情報源の N 次拡大および確率値の事前計算を行い、シンボル N 個を 1 通報として、通報単位で 2^N 値算術符号化を行うことにより、2 値算術符号の演算回数を削減し、高速化を図る方式を提案する。ただし、通報の生起確率は、シンボルの生起確率を U [bit] で表現した場合、 $U \times N$ [bit] で表現する必要があるため、提案方式のレジスタ長 V は $U \times N$ [bit] 必要になる。

(1) Schalkwijk 符号を利用した通報の順序づけ

提案方式では、生起確率が大きい通報の符号化および復号時における演算回数を削減するために、通報を生起確率の降順で並べておく必要がある。そのため、Schalkwijk 符号[10]を用いて通報の順序づけを行う。Schalkwijk 符号は、2 元情報源に対するエントロピー符号化用符号であり、劣勢シンボルの個数を表す prefix code と優勢シンボルおよび劣勢シンボルの出現パターンを表す pattern code から構成される[11]。

通報の順序づけは、通報に対して Schalkwijk 符号化を行い、得られた prefix code 値の昇順で通報を並べることで行う。また、prefix code 値が等しい場合、pattern code 値の昇順で通報を並べる。表 10 に、 $N=3$ の場合における通報順序づけの例を示す。表 10 において、 p_0 は優勢シンボルの生起確率を表し、 p_1 は劣勢シンボルの生起確率を表す。

表 10 Schalkwijk 符号による通報の順序づけ ($N=3$)

順序 i	prefix code	pattern code	通報 m_i	生起確率 p_{m_i}
0	0	0	000	p_0^3
1	1	0	100	$p_0^2 p_1$
2		1	010	
3		2	001	
4	2	0	110	$p_0 p_1^2$
5		1	101	
6		2	011	
7	3	0	111	p_1^3

(2) 確率値記録テーブル

通報 m_i 中における優勢シンボルの個数を N_0 、劣勢シンボルの個数を N_1 としたとき、通報 m_i の生起確率 p_{m_i} は式(13)で与えられる。式(13)より、 p_{m_i} は、 p_0 および p_1 が既知の場合、事前計算が可能であり、異なる生起確率値は $(N+1)$ 通りしか存在しない。ここでは、無記憶情報源の場合について検討を行うため、 $(N+1)$ 通りの生起確率値を事前に計算してテーブルに記録する。これにより、生起確率計算時に必要となる $(N-1)$ 回の乗算回数を削減できる。

$$p_{m_i} = p_0^{N_0} p_1^{N_1} \quad (13)$$

また、通報 m_i の累積確率 s_{m_i} は、生起確率 p_{m_i} を用いて式(14)で与えられる。ただし、Schalkwijk 符号を用いて、通報を生起確率の降順であらかじめ並べておくとする。通報の累積確率も生起確率と同様、事前計算可能であるが、累積確率値は 2^N 通り存在するため、 N が大きい場合、すべての累積確率値を記録することは現実的ではない。そこで、代表となる $(N-1)$ 通りの累積確率値(代表累積確率)を事前に計算してテーブルに記録し、それ以外の累積確率値は式(15)を用いて計算する手法を提案する。これを提案方式 A とする。式(15)

において、 s_i は代表累積確率を表し、 α は通報 m_i によって決まる定数である。一方、 N が小さい場合、すべての累積確率値を記録しておくことも可能である。そこで、 2^N 通りの累積確率値を事前に計算してテーブルに記録する手法を提案方式 B とする。累積確率計算時には、最大 $(2^N - 2)$ 回の加算回数を必要とする場合があるが、提案方式を用いることで累積確率計算時の演算回数を削減できる。

$$s_{m_i} = \sum_{j=0}^{i-1} p_{m_j} \quad (14)$$

$$s_{m_i} = s_i + p_{m_i} \times \alpha \quad (15)$$

(3) 符号化アルゴリズム

提案方式では、式(1)で C および A に初期値を与え、式(16)の操作を繰り返し、得られた Code 値を符号として出力する。ただし、復号側で同じ確率値記録テーブルを用いるために、劣勢シンボルの生起確率値をオーバーヘッド情報として伝送する。また、従来方式と同様、Renormalize 処理を行い、必要となる演算精度を一定に保つ必要がある。式(16)において、 mes は符号化対象の通報であり、 C, A, A_{mes}, P_{mes} および S_{mes} は V [bit] のレジスタである。また、 P_{mes} および S_{mes} は通報 mes の生起確率および累積確率を表し、これらの値は確率値記録テーブルを用いて与えられる。

$$A_{mes} \leftarrow A \times S_{mes}, C \leftarrow C + A_{mes}, A \leftarrow A \times P_{mes} \quad (16)$$

(4) 復号アルゴリズム

提案方式の復号は、式(9)で C および A に初期値を与え、式(17)の操作を繰り返すことで行われる。ただし、符号化側と同様、Renormalize 処理により、必要となる演算精度を一定に保つ必要がある。式(17)において、 mes は復号した通報を表す。また、 C, A, A_{mes}, P_{mes} および S_{mes} は符号化側と同様、 V [bit] のレジスタであり、オーバーヘッド情報により符号化側と同じ確率値記録テーブルが使用可能であるとする。

$$\begin{aligned} mes &\leftarrow \max\{m \mid C \geq A_m, A_m \leftarrow A \times S_m\}, \\ A_{mes} &\leftarrow A \times S_{mes}, C \leftarrow C - A_{mes}, A \leftarrow A \times P_{mes} \end{aligned} \quad (17)$$

4-4 シミュレーション

シミュレーションでは、プログラム中で仮想的なレジスタを作成して符号化および復号を行い、従来方式、提案方式 A および提案方式 B の実行時間を測定した。シミュレーションには、CPU 2.80GHz, RAM 1GB の PC を用いた。図 11 および図 12 に、 $U=8, N=4, V=32$ の場合における実行時間の測定結果を示す。ただし、従来方式の実行時間を 1 に正規化している。なお、すべての累積確率値を記録する提案方式 B のテーブルサイズは $[(N+1)+2^N] \times V$ [bit] であるので、 $N=4, V=32$ ではこの値は 672 [bit] となり、提案方式 B も十分に実現可能である。図中、 p_0 は優勢シンボルの生起確率を表す。図 11 および図 12 より、提案方式を用いることで、 p_0 が大きい 2 値系列に対して、高速なエントロピー符号化および復号を実行可能であることが確認できる。通常、データ圧縮を行う場合、 p_0 が大きくなるような情報源系列変換を行ってからエントロピー符号化を行うので、本提案方式は 2 値算術符号の高速化方式として有効であると考えられる。

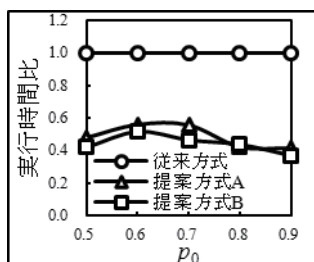


図 11 符号化の実行時間比

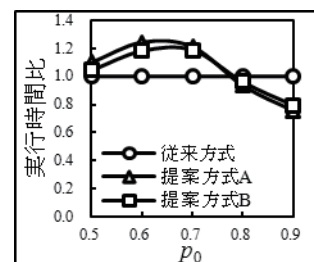


図 12 復号の実行時間比

4-5 情報源拡大による算術符号の高速化

本章では、2 値算術符号の演算回数を削減することにより高速化を可能とする方式について検討を行った。シミュレーションの結果、提案方式の有効性を確認した。今後の課題としては、通報復号時の演算回数を削減し、優勢シンボルの生起確率が小さい場合にも高速な復号を実現することなどが挙げられる。この成果は文献[14]にて発表を行った。

5 あとがき

本研究では、超高精細動画信号のスケラブル可逆符号化の実現を目指し、その符号化モデルとして色成分画像間の相関を利用した 3 次元マルコフモデルを提案しその有効性を検証した。また、エントロピー符号化部で使用する算術符号の高速化の検討や、スケラブル伝送のための画像内容の凝縮希釈の検討を行った。今後、ここで開発した各要素技術を統合し、既存符号化方式との詳細な比較検討を継続する予定である。

【参考文献】

1. ITU-T Recommendation T.81 | ISO/IEC 10918-1, Information technology - Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirement and guidelines, 1994.
2. ITU-T Recommendation T.87 | ISO/IEC 14495-1, Information technology - Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images, Baseline, 2000.
3. ITU-T Recommendation T.800 | ISO/IEC 15444-1, JPEG2000 Image Coding System: Core Coding System (JPEG2000 Part 1), 2000.
4. 佐々木, 長谷川, 加藤, “多階調画像のマルコフモデル符号化について,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol.29, No.42, pp.17-20, July 2005.
5. 原島博 監修, “画像情報圧縮,” オーム社, pp.171-176, 1991.
6. 長谷川, 加藤, 山田, “3次元マルコフモデル符号化による自然画像の可逆符号化,” 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.3, pp.393-399, 1997.
7. 長谷川, 加藤, “段階的伝送可能な自然画像の三次元マルコフモデル符号化についての検討,” 画像電子学会第 24 回年次大会, No.24, pp.63-64, June 1996.
8. Glen G. Langdon, “An Introduction to Arithmetic Coding,” IBM Journal of Research and Development, Vol.28, No.2, pp.135-149, Mar. 1984.
9. 原島博, “先端技術の手ほどきシリーズ 画像情報圧縮,” オーム社, pp.153-162, Oct. 1991.
10. J. Pieter and M. Schalkwijk, “An Algorithm for Source Coding,” IEEE Transactions on Information Theory, Vol.IT-18, No.3, pp.395-399, May 1972.
11. 大和田, 長谷川, 加藤, “Schalkwijk 符号の概念を用いたディザ化画像の効率的符号化,” 画像電子学会誌, Vol.37, No.1, pp.25-31, Jan. 2008.
12. 佐藤, 田中, 長谷川, 加藤, “成分画像間相関を用いたカラー画像のマルコフモデル符号化に関する研究,” 電子情報通信学会技術報告 CQ2010-79, vol.110, no.455, pp. 69-74, 2011.
13. Y. Tanaka, M. Hasegawa, S. Kato, “Improved Image Concentration for Artifact-Free Image Dilution and Its Application to Image Coding,” Proc. of ICIP2010, pp.1225-1228, 2010.
14. 金原, 田中, 長谷川, 加藤, “情報源拡大による算術符号の高速化について,” 画像電子学会第 39 回年次大会予稿集, S3-7, 2011.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Improved Image Concentration for Artifact-Free Image Dilution and Its Application to Image Coding	Proc. of ICIP2010	2010 年 9 月
成分画像間相関を用いたカラー画像のマルコフモデル符号化に関する研究	電子情報通信学会技術報告 CQ2010-79	2011 年 3 月
情報源拡大による算術符号の高速化について	画像電子学会第 39 回年次大会予稿集	2011 年 6 月