3次元マルコフモデルによる自然画像の可逆符号化

学生会員 長谷川 まどか[†], 正会員 加藤 茂夫[†], 山田 芳文[†]A Lossless Image Coding Scheme
Based on a 3-D Markov ModelMadoka Hasegawa[†], Shigeo Kato[†] and Yoshifumi Yamada[†]

Abstract Many schemes concerned with the lossless coding of continuous-tone still pictures have been proposed recently, and the coding scheme based on a Markov model is very effective. In this paper we propose a lossless coding scheme based on a 3-D Markov model in which correlations between bitplanes are utilized. The results of computer simulation showed that the 3-D Markov model entropy with 12 reference elements is lower than the conventional Markov model entropy with one reference pixel by 8 % at its maximum.

1. ま え が き

情報化社会の進展に伴い、文書画像通信サービスやテレビ会議システムなど、画像を主伝送メディアとしたシステムが開発、実用化されつつある。画像情報は即時理解性に富む反面、データ量が膨大であるため、画像データ圧縮技術は画像を伝送/蓄積する際に必要不可欠な技術になっている。

画像のデータ圧縮符号化方式は、可逆符号化方式と非可逆符号化方式に大別される。これまでは、2値～16値程度の多値画像に対しては可逆符号方式が用いられることが多く、1画素8ビット(256値)程度の自然画像に対しては非可逆方式が用いられることが多かった。

しかし、近年のハードウェアの性能向上および低

価格化によって、個人でも容易にフルカラー画像の編集、加工が行えるようになり、その素材となる画像を圧縮する際には画質劣化のない符号化方式が望まれるようになってきている。また、現在、ISO/IEC JTC1/SC29/WG1とITU-T SG8/CCICACとの共同作業機関において多値静止画像の可逆符号化方式の標準化が進められていることもあって¹⁾、可逆符号化に対する関心が高まってきている。

可逆符号化方式のひとつに、画素値のマルコフ性を利用して符号化を行うマルコフモデル符号化²⁾がある。2値画像の国際標準符号化方式であるJBIGにおいても、モデルテンプレート部にマルコフモデルが使用されている³⁾。多値画像の圧縮にマルコフモデル符号化を用いる場合には、多値マルコフモデル符号化を行う場合と、画像をビットプレーンに分解し各プレーンを

キーワード：可逆符号化、マルコフモデル、自然画像、データ圧縮

1995年10月2日、画像符号化シンポジウム(PCSJ 95)で発表

1996年9月11日受付、1996年12月19日最終受付

[†] 宇都宮大学 工学部情報工学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753, TEL 028-689-6267)

[†] Utsunomiya University, Faculty of Engineering, Department of Information Science (2753, Ishii-machi, Utsunomiya-shi, Tochigi 321, Japan)

2 値マルコフモデル符号化する場合がある。

これまでに、多値画像をビットプレーンに変換してから符号化した場合についての検討は行われている⁴⁾⁵⁾が、これらの検討においてはグレイコードによるビットプレーン変換を行った後に、参照画素をビットプレーン内で選んでいる。グレイコードは、ひとつ上のプレーンのビットとの排他的論理和で各プレーンのビット値を決定しており、プレーン間の相関をプレーン内の相関に変換していると考えられることができるが、他のビットプレーンとの相関を積極的に使用しているわけではない。

一方、多値マルコフモデル符号化をビットプレーンに分解して考えると、多値マルコフモデルエントロピーを各ビットプレーンの条件付きエントロピーの和の形で表現することができる。したがって、ビットプレーン間の相関を利用した符号化方式であると考えられることができるが、後述するように、参照するビットは画素単位で定まっている。

本論文では、画像をビットプレーンに分解して 3 次元構成とし、多値信号のままでは選ぶことが不可能であった画素を、ビットプレーン内の画素に限らず、他のビットプレーンからも参照して符号化を行う 3 次元マルコフモデル符号化^{6)~9)}による自然画像の可逆符号化についての検討を行ったので報告する。

2. 3次元マルコフモデル符号化

2.1 3次元マルコフモデル符号化の原理

マルコフモデル符号化は、画像を各画素の輝度値がそれ以前に出現した m 個の画素値に依存する m 重マルコフ情報源とみなしてモデル化を行い、 m 個の参照画素の状態によって着目画素を分類し、各状態毎にその条件付き確率にあわせたコンパクト符号を用いて符号化する方法である。

256 値画像の 1 画素参照マルコフモデルエントロピー H_c は、着目画素を x_i 、参照画素を x_{i-1} とし、条件付き確率を $P(x_i/x_{i-1})$ とすれば、次式で与えられる。

$$H_c = - \sum_{x_{i-1}=0}^{255} P(x_{i-1}) \sum_{x_i=0}^{255} P(x_i/x_{i-1}) \cdot \log_2 P(x_i/x_{i-1}) \quad (1)$$

さて、いま多値画像をビットプレーンに分解し、垂直、水平方向に輝度方向も加えた 3 次元構成で考えよう。例えば、図 1 のように画像の各画素が 8 ビットで構成されているとすれば、画素 x_i は、そのビットプレーン上の値 $b_0 \sim b_7$ で表現することができ、8 枚の 2

図 1 ビットプレーン構成
Bitplane structure.

値画像としてとらえることができる。図 1 のビットプレーン構成を考えるとき、(1) 式は $b_0 \sim b_7$ を用いて、次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} H_c &= - \sum_{x_{i-1}} P(x_{i-1}) \\ &\cdot \sum_{b_0=0}^1 \cdots \sum_{b_7=0}^1 P(b_0, b_1, b_2, \dots, b_7/x_{i-1}) \\ &\cdot \log_2 P(b_0, b_1, b_2, \dots, b_7/x_{i-1}) \\ &= H(b_0/x_{i-1}) + H(b_1/b_0, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_2/b_0, b_1, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_3/b_0, b_1, b_2, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_4/b_0, b_1, b_2, b_3, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_5/b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_6/b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, x_{i-1}) \\ &\quad + H(b_7/b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, x_{i-1}) \quad (2) \end{aligned}$$

多値信号で扱うときの参照画素と区別するため、ビットプレーン表現にしたときの着目画素および参照画素を、それぞれ、着目エレメント、参照エレメントと呼ぶことにすると、(2) 式は、多値のマルコフモデルエントロピーが、着目エレメントの上位ビットおよび参照画素の全ビットを参照エレメントとした 2 値のマルコフモデルエントロピーの和で表現できることを意味している。

しかし、参照エレメントとして取り得るエレメントは伝送順序のみに関係するので、図 1 のような 3 次元空間で考えると参照エレメントの選び方に自由度が増える。多値信号のまま扱おうと、例えば、 b_0 を符号化

する際には $a_0 \sim a_7$ を参照することになるが、 c_0 もすでに伝送済みであるので、ビットプレーンに分解して取り扱うことにより a_7 の代わりに c_0 を参照することも可能になる。

このように、画像をビットプレーンに分解して3次元構成とし、3次元空間上で参照エレメントを選択し、マルコフモデル符号化を行う方法を3次元マルコフモデル符号化と呼ぶことにする。3次元マルコフモデル符号化は、画像をビットプレーン構成にすることで、多値信号のままでは選ぶことが不可能であった近隣の特に関連性のある参照エレメントの組合せを参照し、状態数を増やすことなくマルコフモデルエントロピーを下げようとするものである。

2.2 マルコフモデル符号化の状態数についての考察

一般に、マルコフモデル符号化においては、参照画素数を増加させればエントロピーが減少することが知られている¹⁰⁾。しかしながら、参照画素数が多くなるとつれ状態数が幾何級数的に増えるために用意すべき符号表が多くなり、ハードウェア規模が増大する。したがって、提案する3次元マルコフモデル符号化のエントロピー低減効果を知るためには、3次元構成を考えない、従来型マルコフモデル符号化と状態数すなわち符号表の規模を揃えてエントロピーを比較する必要がある。

そこでまず、画像のレベル数を B ビットとして、従来型の n 画素参照マルコフモデル符号化と1プレーンあたり m エレメントを参照する3次元マルコフモデル符号化の状態数について考察する。

(1) 従来型マルコフモデル符号化の状態数

従来型のマルコフモデル符号化においては、第0ビットプレーン (MSB プレーン) を伝送する際に参照画素の全ビットを参照していることが (2) 式に示されている。同様に第1ビットプレーンを伝送する際には参照画素の全ビットおよび着目画素の第0ビットを参照している。このように従来型マルコフモデル符号化では参照画素の全ビットと着目画素のビットのうちすでに伝送されているビットプレーンを参照していることになる。したがって、第0ビットプレーンでの状態数は着目画素自身の状態を含んで考えれば、 2^{nB+1} であり、同様に第1ビットプレーンでの状態数は 2^{nB+2} 、…、LSB での状態数は $2^{B(n+1)}$ になる。LSB における状態は上位プレーンの状態を包含していることから、多値のままのマルコフモデル符号化の状態数は $2^{B(n+1)}$ となる。

(2) 3次元マルコフモデル符号化の状態数

3次元マルコフモデル符号化においては、全状態数

を保ったままで各ビットプレーンの状態数を自由に決めることができる。今、各ビットプレーンの状態数を等しくとことにすると、参照エレメント数が m のときの1プレーン当たりの状態数は 2^{m+1} であるので、全体の状態数は $2^{m+1} \cdot B$ で表される。

したがって、 n 画素参照のマルコフモデル符号化と m エレメント参照による3次元マルコフモデル符号化の間で状態数をそろえるためには次のような関係式が成立しなければならない。

$$2^{m+1} \cdot B = 2^{B(n+1)} \quad (3)$$

このことから、1画素8ビット ($B=8$) の画像の場合、

$$m = 8n + 4 \quad (4)$$

となり、1画素参照 ($n=1$) の従来型マルコフモデル符号化の状態数と12エレメント参照 ($m=12$) の3次元マルコフモデル符号化の状態数が等しくなる。

3. シミュレーション条件

3.1 参照エレメント位置

本論文では、Depth First (DF) 伝送、Breadth First (BF) 伝送のどちらの伝送方式をとった場合でも参照可能なエレメントを参照候補エレメントとし、その中から1プレーン当たり12エレメントを選択して参照した場合について検討を行った。

DF伝送法は、画像の左上の画素から順に各画素の0ビット目 (MSB)、1ビット目、2ビット目…というように深さ方向 (輝度方向) を優先して伝送し、その画素のすべてのビットを伝送した後次の画素を伝送する方法である。BF伝送法は、まず画像の第0ビットプレーン (MSB プレーン) の全画素を伝送し、次に第1ビットプレーンの全画素、第2ビットプレーンの全画素…というように、プレーン方向を優先して伝送する方法である。また、このどちらの伝送方式をとっても参照可能なエレメントを用いて伝送する方式をDF/BF伝送と呼ぶことにする。

DF/BF伝送で選択可能な参照位置は、着目エレメントのあるプレーンより上位のプレーンでは、着目エレメントの上位ビット、着目エレメントのあるラインより上のラインの画素、および、着目エレメントのあるラインの左側の画素となる。また、着目エレメントの存在するプレーンでは、着目エレメントのあるラインより上のラインの画素、および、着目エレメントのあるラインの左側の画素となる。ここでは、図2に示すように、着目エレメントよりも上位のプレーンの参照位置0~12と、着目エレメントのあるプレーンの参

図2 参照候補位置
The Positions of reference elements.

照位置 1～12 を参照候補エレメントとし、この中から 12 個の参照エレメントを選択して 3 次元マルコフモデルエントロピーの測定を行った。

しかし、参照可能なすべてのエレメントの組合せの中から最適な参照エレメントの組合せを選び出すには、組合せの数が膨大であるため多大な処理時間を要する。そこで、条件付きエントロピーが最も低くなる参照位置を調べ、順次、参照エレメントに加えていく方法²⁾で 12 エレメントの組合せを決定してエントロピーの測定を行った。具体的には、まず 1 エレメント参照の条件付エントロピーが最も低くなるエレメントを参照エレメントに選ぶ。次に、その参照エレメントとの組合せで 2 エレメント参照の条件付エントロピーを最も低下させるエレメントを参照エレメントに加える。この処理を参照エレメント数が 12 個になるまで繰り返した。

3.2 測定対象画像

SIDBA より Auto, Home (512 × 512 画素), JPEG テスト画像より Barbara, Boats, Hotel, Zelda (512 × 480 画素), および Cat (512 × 480 画素) の計 7 枚の画像についてエントロピー測定を行った。これらの画像は 1 画素あたり RGB 各 8 ビットの 24 ビットで表現された、カラーのディジタル画像である。これらの画像を RGB 成分に分離し、G 成分について測定を行った。測定対象画像の例として画像 Auto を図 3 に示す。

また、ビットプレーンの構成法としては、画素値を自然 2 進で表現した場合と、グレイコードで表現した場合の 2 通りについて測定を行った。自然数を自然 2 進表現した場合の各ビット値を MSB から $(b_0, b_1, \dots, b_{n-1})$ 、グレイコード表現した場合の各ビット値を MSB から $(g_0, g_1, \dots, g_{n-1})$ で表すとする、 b_i と g_i は次のような関係になっている。

$$g_i = \begin{cases} b_i & (i = 0) \\ b_{i-1} \oplus b_i & (i = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (5)$$

図3 測定対象画像の一例 (Auto)
An example of test image (Auto).

表1 マルコフモデルエントロピー
Markov model entropies.

画像	1 画素参照 H	3 次元マルコフ				
		自然 2 進		グレイコード		削減率 c
		H_n	削減率 a	H_g	削減率 b	
Auto	4.635	4.496	3.00	4.459	3.80	0.82
Home	4.338	4.108	5.30	4.121	5.00	-0.32
Barbara	5.258	5.020	4.53	4.930	6.24	1.79
Boats	4.451	4.247	4.58	4.248	4.56	-0.02
Cat	4.814	4.637	3.68	4.591	4.63	0.99
Hotel	5.100	4.674	8.35	4.678	8.27	-0.09
Zelda	4.244	4.194	1.18	4.227	0.40	-0.79
平均	4.691	4.482	4.37	4.465	4.70	0.34

単位：エントロピー (bit/pel), 削減率 (パーセント)

ここで演算 $\oplus$ は排他的論理和を表している。

4. シミュレーション結果と考察

4.1 1 画素参照マルコフモデルエントロピーとの比較

1 画素参照マルコフモデルエントロピーと 12 エレメント参照の 3 次元マルコフモデルエントロピーを測定した結果を表 1 に示す。ここでの 1 画素参照エントロピーは、最もエントロピーが低くなる参照画素位置での結果であり、Auto, Home は直前画素, Barbara, Boats, Cat, Hotel, Zelda は直上画素が最も低いエントロピーを与えている。

表中の削減率 a は自然 2 進表現プレーンに対して 3 次元マルコフモデルを用いた場合の削減率であり、削減率 b はグレイコードプレーンに対して 3 次元マルコフモデルを用いた場合の削減率である。また、削減率 c は、自然 2 進表現を用いた場合とグレイコードを用

いた場合の比較である．削減率 a, b, c は次式による．

$$\text{削減率 } a = \frac{H - H_n}{H} \cdot 100 \quad (6)$$

$$\text{削減率 } b = \frac{H - H_g}{H} \cdot 100 \quad (7)$$

$$\text{削減率 } c = \frac{H_n - H_g}{H_n} \cdot 100 \quad (8)$$

表 1 から，3 次元マルコフモデルを用いることにより，自然 2 進表現プレーンで 1.18～8.35%，グレイコードプレーンで 0.40～8.27%，従来よりエントロピーを削減できていることがわかる．また，ビットプレーン構成法が自然 2 進表現の場合とグレイコードの場合を比較すると，削減率 c の欄に示すように，その差が $-0.79\% \sim 1.79\%$ となっており，12 エLEMENT 参照の場合は，どちらのビットプレーン構成法を使ってもほぼ同程度のエントロピーが実現できるといえる．

しかし，参照エLEMENT 数が少ない場合はグレイコードに変換した方がエントロピー削減効果が大きい．画像 Auto (G 成分) を用いて，参照エLEMENT 数を 1 つずつ増やしていった場合のエントロピー測定結果を図 4 に示す．図中の実線 ($n_0 \sim n_7$) は画素値が自然 2 進表現の場合，破線 ($g_0 \sim g_7$) はグレイコードの場合であり，数字はビットプレーン番号である．図より，参照エLEMENT 数が少ない場合にはグレイコード表現の方がエントロピーが低い，参照エLEMENT 数が増加するにつれ，自然 2 進表現の場合とグレイコード表現の場合のエントロピーの差が小さくなっていく様子がわかる．

グレイコードは，あるビットの値をひとつ上のビッ

図 4 参照エLEMENT 数とエントロピーの関係 (Auto, G 成分)

Relationship between entropy and number of reference elements. (Auto, Green component)

トとの排他的論理和で求めるため，ビットプレーン間の相関をビットプレーン内の相関に反映させる効果があるものと考えられる．このため，参照エLEMENT 数が少ない場合にはビットプレーン内にビットプレーン間の相関を含んでいるグレイコード表現の方がエントロピーが低くなるが，エLEMENT 数が増加するにつれ，自然 2 進表現でもビットプレーン間の相関を利用できるため，エントロピーの差が小さくなっていくものと考えられる．

したがって，ここでは，1 画素参照マルコフモデルエントロピーとの比較を行うために参照エLEMENT 数を 12 としたが，より少ない参照エLEMENT 数で 3 次元マルコフモデル符号化を行う場合には，グレイコード表現の利用が有効であると考えられる．

4.2 参照エLEMENTの共通化

参照エLEMENT 位置を画像によって変える場合には，送信する際に選択したエLEMENT を受信側に伝えなければならない，わずかではあるが伝送情報量が増えることになる．また，参照エLEMENT の組合せを画像毎に選択する処理に多くの時間を要する．そこで次に，前節で挙げた DF/BF 伝送法対応の 12 エLEMENT 参照 3 次元マルコフモデル符号化について参照エLEMENT の共通化を考え，7 枚の画像共通の参照エLEMENT 位置を選定し，3 次元マルコフモデルエントロピーの測定を行った．共通参照エLEMENT の選定方法として，各ビットプレーン毎に全画像で使用した参照エLEMENT の中で使用頻度の多いものから順に 12 個を選ぶという方法をとった．図 5(a) に自然 2 進，図 5(b) にグレイコードの場合の共通化した参照エLEMENT を図示する．図中の黒いエLEMENT が着目エLEMENT，網かけの部分が参照エLEMENT である．これを見ると，自然 2 進表現の場合は着目エLEMENT の上位ビットとその近隣のエLEMENT が選択される傾向にあり，グレイコード表現の場合には着目エLEMENT と同一プレーン内のエLEMENT が選択される傾向があることがわかる．

これは，グレイコードに，ビットプレーン間の相関をビットプレーン内の相関に反映させる効果があるため，自然 2 進表現の場合には上位ビットプレーンを参照することで得られていたビットプレーン間の相関がビットプレーン内のエLEMENT から得られるため，同一プレーン内のエLEMENT が選択されることによるものと考えられる．

4.3 共通の参照エLEMENTを使用した場合のエントロピー

図 5(a), (b) の画像共通の参照エLEMENT を使用した場合のエントロピーを測定した結果を表 2 に示す．

図 5 共通化した参照エレメント
Common reference elements. (a) Natural binary planes, (b) Gray code planes

表 2 共通の参照エレメントによるエントロピー
Markov model entropies with common
reference elements.

画像	1 画素 参照 H	3 次元マルコフ			
		自然 2 進 H_n	削減率 a	グレイコード H_g	削減率 b
Auto	4.936	4.444	9.97	4.511	8.61
Home	4.431	4.149	6.36	4.149	6.36
Barbara	5.258	4.957	5.72	4.941	6.03
Boats	4.451	4.285	3.73	4.260	4.29
Cat	4.814	4.612	4.20	4.613	4.18
Hotel	5.100	4.704	7.76	4.704	7.76
Zelda	4.244	4.180	1.51	4.186	1.37
平均	4.748	4.476	5.61	4.481	5.51

単位：エントロピー (bit/pel), 削減率 (パーセント)

ここで H_n, H_g は、それぞれ、自然 2 進、グレイコードのプレーンに対して共通参照エレメントを参照した場合のエントロピーである。比較のため、1 画素参照の従来型多値マルコフモデルエントロピーは 7 画像共通の参照画素として、エントロピーを最も下げる参照画素となった直上画素（参照画素位置 2）を用いて測定した。また、表中の削減率 a, b はそれぞれ前出の (6), (7) 式による。

表 2 より、参照画素を共通化した 1 画素参照と比較すると平均で 5% 程度エントロピーを削減できていることがわかる。しかし、表 1 の画像毎に参照エレメントを選択した場合と比較すると、Auto の自然 2 進表現の場合のように、参照エレメントを全画像共通にし

ても、わずかではあるがエントロピーが減少している場合があることがわかる。この原因として、条件付きエントロピーが最も低くなる参照位置を調べ、順次、参照画素に加えていく方法で参照エレメントを選択したため、すでに選択した参照エレメントを変更しないという条件で参照エレメントを 1 つずつ増加させていく場合においてはエントロピーが最も低くなる組合せであるが、12 個の自由な組合せ方としては、よりエントロピーが低くなる組合せが存在していることが考えられる。したがって、局所最適な組合せは選り出せるものの、最善の組合せの選択にはなっていなかったことが考えられるが、その差はわずかであり、ほぼ最適な組合せが選べていると考えられる。

4.4 他のプレーンを参照しない場合との比較

次に、表 2 の結果と、他のビットプレーンのエレメントを参照せず、プレーン内で 12 エレメント参照した場合との比較を行った。結果を表 3 に示す。ここで H_{n2}, H_{g2} は、それぞれ、自然 2 進、グレイコードのプレーン内のみを参照した場合のエントロピーであり、削減率 a, b, c は次式による。

$$\text{削減率 } a = \frac{H_{n2} - H_n}{H_{n2}} \cdot 100 \quad (9)$$

$$\text{削減率 } b = \frac{H_{g2} - H_g}{H_{g2}} \cdot 100 \quad (10)$$

$$\text{削減率 } c = \frac{H_{g2} - H_n}{H_{g2}} \cdot 100 \quad (11)$$

表 3 の結果から、自然 2 進プレーンに対してプレーン間の相関を用いる 3 次元マルコフモデル符号化を

表3 プレーン内で12エレメント参照した場合の
エントロピー

Markov model entropies with 12 reference
elements of current plane.

画像	プレーン内のみ		削減率		
	自然2進 H_{n2}	グレイコード H_{g2}	a	b	c
Auto	5.549	4.598	19.91	1.89	3.35
Home	5.157	4.261	19.55	2.63	2.63
Barbara	5.813	4.979	14.73	0.76	0.44
Boats	5.243	4.320	18.27	1.39	0.81
Cat	5.477	4.663	15.79	1.07	1.09
Hotel	5.635	4.784	16.52	1.67	1.67
Zelda	5.141	4.254	18.69	1.60	1.74
平均	5.431	4.551	17.64	1.57	1.68

単位: エントロピー (bit/pel), 削減率 (パーセント)

行くと、プレーン間の相関を用いない場合と比較して平均17.64%エントロピーを削減できることがわかる(削減率 a)。グレイコードプレーンの場合には、平均1.57%とわずかではあるがエントロピーを削減できている(削減率 b)。「グレイコード+プレーン内のみ参照」の場合と、「自然2進+3次元マルコフ」の場合の比較においても、後者の方が平均1.68%エントロピーを削減できていることがわかる(削減率 c)。

以上の結果から、ビットプレーン間の相関を用いることでエントロピーを削減することが可能であり、プレーン間の相関をプレーン内の相関に変換する効果のあるグレイコードプレーンにおいても、さらにプレーン間の相関を用いることでわずかではあるがエントロピーの削減ができるといえる。

5. む す び

本論文では画像をビットプレーンに分解し、プレーン毎に最適な参照エレメントを用いて符号化を行う、3次元マルコフモデル符号化を自然画像の可逆符号化に適用する方法について検討を行った。従来の1画素参照マルコフモデルと状態数が等しくなる12エレメント参照の3次元マルコフモデルエントロピーを測定した結果、従来の1画素参照マルコフモデルよりも最大8%程度、平均で4%程度、エントロピーを削減できることを確認した。また、参照エレメントを共通化した場合においても、3次元マルコフモデルがエントロピーの低減に有効であるという結果が得られた。

また、参照画素をビットプレーン内に留めた場合との比較から、他のビットプレーンを参照することのエントロピー削減効果が確認でき、自然2進表現プレーン

ンの場合では削減率が平均17.64%という結果が得られた。プレーン間の相関をプレーン内の相関に変換する効果のあるグレイコードプレーンにおいても、さらにプレーン間の相関を用いることで、平均1.57%エントロピーが減少する結果となった。

本研究では、カラー自然画像の色成分を別々に取り扱ったが、RGB間には相関があり、これを考慮した符号化を行えば、エントロピーをさらに削減できる可能性があると思われる。RGB間の相関を活かした3次元マルコフモデル符号化方式の検討は今後の課題である。

(参 考 文 献)

- 1) 小野: “静止画符号化の標準化動向”, 画電学誌, **25**, 3, pp.200-206 (1996)
- 2) 大西, 上野, 小野: “近接画素相関を利用するファクシミリ信号帯域圧縮の最適設計”, 信学論 (B), **61**, 8, pp.745-752 (1978)
- 3) 山崎, 小野, 吉田, 遠藤: “2値画像階層形符号化方式—JBIGアルゴリズム—”, 画電学誌, **20**, 1, pp.41-49 (1996)
- 4) 松原, 谷口, 村山: “ニアロスレス符号化方式”, PCSJ'94, 4-1, pp.63-64 (1994)
- 5) Ronald B. Arps, Thomas K. Truong: “Comparison of International Standards for Lossless Still Image Compression”, Proc. of IEEE, **82**, 6, pp.889-899 (1994)
- 6) 加藤, 安田: “ビットプレーン構成による多値画像の3次元マルコフ符号化”, 第13回画像コンファレンス, 10-3.
- 7) 梶原, 加藤: “3次元マルコフモデルを用いた階調画像の高効率符号化に関する一検討”, テレビ学技報, **15**, 40, pp.25-30 (1991)
- 8) 長谷川, 鈴木, 加藤: “段階的伝送を指向した静止画像の可逆符号化”, PCSJ95, 3-12, pp.49-50 (1995)
- 9) 長谷川, 加藤: “段階的伝送可能な自然画像の3次元マルコフモデル符号化についての検討”, 画電学全大, pp.63-64 (1996)
- 10) 安田: “ファクシミリの基礎と応用”, 電子通信学会, pp.135-137 (1982)

は せ が わ

長谷川まどか 1994年, 宇都宮大学工学部情報工学科卒業。1996年, 同大学院博士前期課程修了。現在, 同大学院博士後期課程在学中。自然画像の可逆符号化等に関する研究に従事。学生会員。

か と う し げ お

加藤 茂夫 1972年, 北海道大学工学部応用物理学科卒業。日本電子(株)などを経て, 1977年, 東京大学生産技術研究所入所。1990年, 宇都宮大学に転任。現在, 同大学工学部情報工学科助教授。自然画像の高効率符号化, エントロピー符号化などの研究に従事。工学博士。正会員。

や ま だ よ し ふ み

山田 芳文 1966年, 東北大学工学部電気卒業。1971年, 同大学院博士課程修了。同年, 東北大学工学部電子工学科助手。1974年, 北大応電研講師を経て, 1979年, 宇都宮大学工学部電気工学科助教授, 1990年, 同情報工学科教授となり現在に至る。NMRを用いた生体計測に関する研究等に従事。工学博士。