超高精細・高階調カラー画像の統計的性質とLossless Coding

戸田昌枝† 剣持雪子† 小谷一孔† 加藤茂夫††

†北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1
0761-51-1699 (内線 1384)

††宇都宮大学 工学部
〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2
028-689-6256

toda@jaist.ac.jp kenmochi@jaist.ac.jp ikko@jaist.ac.jp kato@mclaren.is.utsunomiya-u.ac.jp

あらまし：超高精細・高階調カラー画像は、解像度が 2000×2000(pixels) 以上、階調は RGB 各 12(bits/pixel) 以上と定義されている。この超高精細・高階調カラー画像では、解像度・階調の高さによる膨大なデータ量が、伝送・保存などの際に問題となる。このため、画像データ圧縮が必要であるが、圧縮によって歪が生じ、画像情報が損なわれては、超高精細・高階調画像そのものの存在意義が失われてしまう。情報が損なわれない圧縮のためには、Lossless Coding が不可欠である。そこで本研究では、まず、超高精細・高階調カラー画像の統計的性質を明らかにし、次に、この性質に適した Lossless Coding を提案し、最後に試作した符号化器による実際の圧縮結果も示す。

キーワード：超高精細・高階調カラー画像、Lossless Coding、算術符号、統計的性質

Statistical characters of Super High Difinition and High Level Color Images and Their Lossless Coding

Masae TODA † Yukiko KENMOCHI † Kazunori KOTANI † Shigeo KATO ††

†Graduate School of Information Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology
1-1 Asahidai, Tatsunokuchi-machi, Nomi-gun, Ishikawa, 923-1292, Japan
0761-51-1699 (ext.1384)

††Faculty of Engineering, Utsunomiya University
7-1-2 Youtou, Utsunomiya-shi, Tochigi, 321-8585, Japan
028-689-6256

toda@jaist.ac.jp kenmochi@jaist.ac.jp ikko@jaist.ac.jp kato@mclaren.is.utsunomiya-u.ac.jp

Abstract : A Super High Difinition and High Level color image is defined as an image which contains 2000×2000 (pixels) or more and each of whose pixel has 12 (bits) or more for each color, red, green, blue. In these Super High Difinition and High Level color images, there is a problem such that the image data is too much because of the heights of the resolution and the level, and it consumes too much memory and time at the transmission and storing. Therefore, compression of the image data is necessary. Since the compresion must not causes any distortion and loss of the information in the image because of the meaning of Super High Difinition and High Level color images, we only consider lossless coding in thes paper. First we are investigete statistical characters of Super High Difinition and High Level color images, and then look for Lossless Coding (based on the Arithmetic Coding) which are adapted to these statistical characters.

Key words : Super High Difinition and High Level Color Images, Lossless Coding, Arithmetic Coding, Statistical Character

1　はじめに

超高精細・高階調画像は、解像度が 2000 × 2000[pixels] 以上、階調は RGB 各 12[bits/pixel] 以上と定義されている [1][2]。この超高精細・高階調画像は、印刷における電子的な編集作業や、医療分野において、ディジタル化された X 線、CT などの画像を診断に用いる際に必要である。

このような画像では、解像度・階調の高さによる膨大なデータ量が、伝送・保存などの際に問題となる。このため、画像データ圧縮が必要であるが、圧縮によって歪が生じ、画像情報が損なわれては、超高精細・高階調画像そのものの存在意義が失われてしまう。そこで、歪や損失のない圧縮を実現するために、Lossless Coding が必要となる。ここで Lossless Coding には、

(1) 可逆性 (Lossless)
(2) 高圧縮率
(3) 部分復号可能
(4) 階層的

等の特性が必要となるが、本報告では (1) および (2) までの特性について検討する。

これまでに、モノクロの超高精細、または高階調画像に対する Lossless Coding が報告されている。例えば、超高精細画像には階層的可逆符号化 [3]、高階調画像には適応的算術符号化 [4] などである。

本研究では、超高精細かつ高階調カラー画像に適した Lossless Coding の方法を考えることを目的とする。この目的の実現のために、まず、超高精細・高階調カラー画像の統計的性質を明らかにする。次に、この性質に適した Lossless Coding を検討する。最後に、試作した 符号化器により実際の圧縮率を示す。

2　超高精細・高階調画像の統計的性質

画像の統計的性質で、画素間の相関、隣合う画素間のビットの相関、信号レベル分布の偏りについて検討する。ただし、今のところ、超高精細かつ高階調であるカラー画像は入手できていないので、入手できている超高精細カラー画像、高階調カラー画像に対して、別々に検討を行なっている。

2.1　画素間の相関 (超高精細画像)

画素間の距離が d のときの画素値の相関 $C_h(d)$ (水平方向)、$C_v(d)$ (垂直方向) は、それぞれ式 (1)、式 (2) により計算する (図 1)。ただし、$x(i,j)$ は画像の位置 (i,j) における画素値を、$E\{\cdot\}$ は期待値を示す。

$$C_h(d) = \frac{E\{x(i,j)x(i,j+d)\}}{E\{x^2(i,j)\}} \tag{1}$$

$$C_v(d) = \frac{E\{x(i,j)x(i+d,j)\}}{E\{x^2(i,j)\}} \tag{2}$$

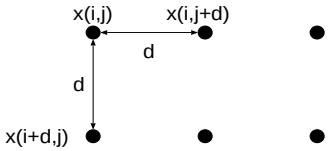


図 1: 画素間の距離

実験に用いた画像は、画像電子学会・高精細標準電子画像の超高精細カラー画像 4 枚であり [5]、これらの画像の画素数は、縦長のものは画素数が 3072 × 4096[pixels]、横長のものは画素数が 4096 × 3072[pixels] であり、階調は RGB 各 8[bit/pixel] である (図 2)。

(a) Bride

(b) Harbor

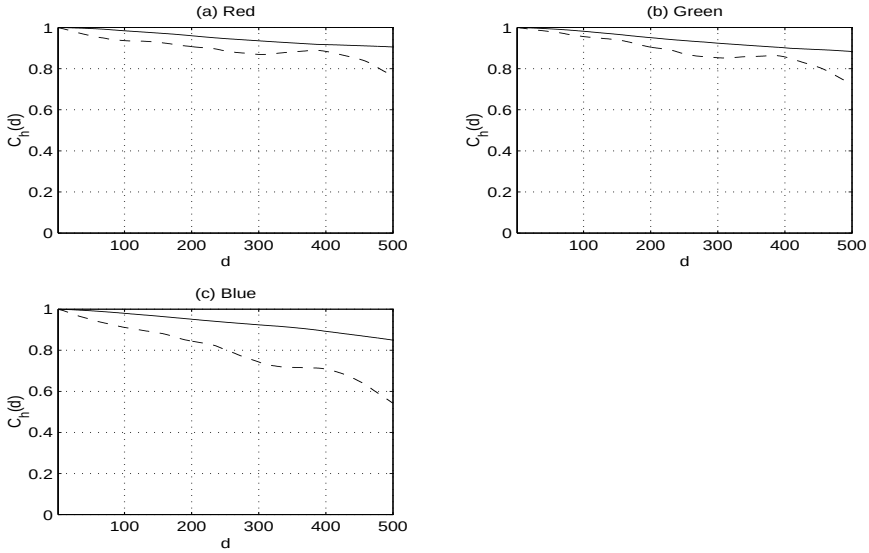
(c) Wool

(d) Bottles

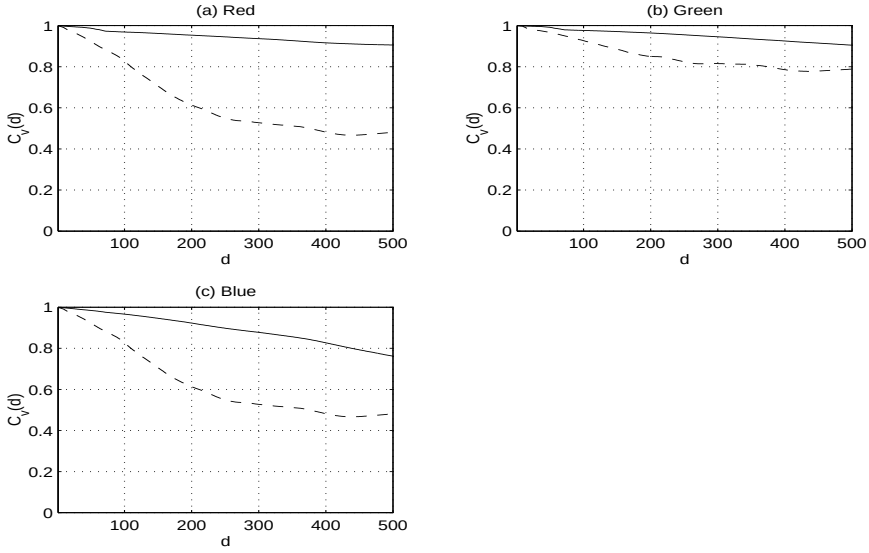
図 2: 超高精細カラー画像[5]

ここで、原画像の RGB 各成分毎の相関係数と、原画像を 3 次補間法 [5] によって、ディスプレイの解像度 (XGA) と同じになるよう、縮小した画像の RGB 各成分毎の相関係数を計算する。

計算結果のうち、例として、図 2の (a) Bride の結果を図 3に示す。



(1) 水平方向



(2) 垂直方向

図 3: 超高精細画像 (Bride) の画素間の相関

グラフの横軸は画素間の距離 d、縦軸は相関係数 $C_h(d)$、$C_v(d)$ であり、画像の RGB 各成分毎に示してある。超高精細画像は解像度が高いので、画素間の相関が高くなっていることがわかる。また、水平方向だけでなく、垂直方向の相関も高いことがわかる。他の 3 枚の画像でも、同様の結果であった。

2.2 隣合う画素間のビットの相関 (高階調画像)

画像の位置 (i, j) の画素値 $x(i, j)$ の下位から k 番目のビット値を $b^k(i, j)$ で表し、隣合う 2 つの画素 $x(i, j)$ と $x(i, j + 1)$ の k番目のビット $b^k(i, j)$、$b^k(i, j + 1)$ に対して

$$b^k(i,j) \odot b^k(i,j+1) = \begin{cases} 1, & b^k(i,j) = b^k(i,j+1) \\ 0, & b^k(i,j) \neq b^k(i,j+1) \end{cases} \quad (3)$$

とする (図 4)。

そして、画像全体における、下位から k番目のビットの相関 C^kを、式 (4) によって求める。ただし、M は画像の縦方向の画素数、Nは画像の横方向の画素数とする。

$$C^k = \frac{1}{M(N-1)} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N-1} \left\{ b^k(i,j) \odot b^k(i,j+1) \right\} \quad (4)$$

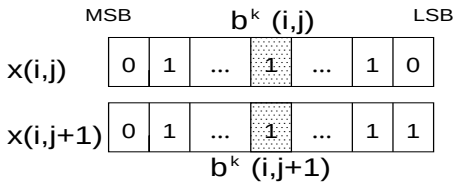
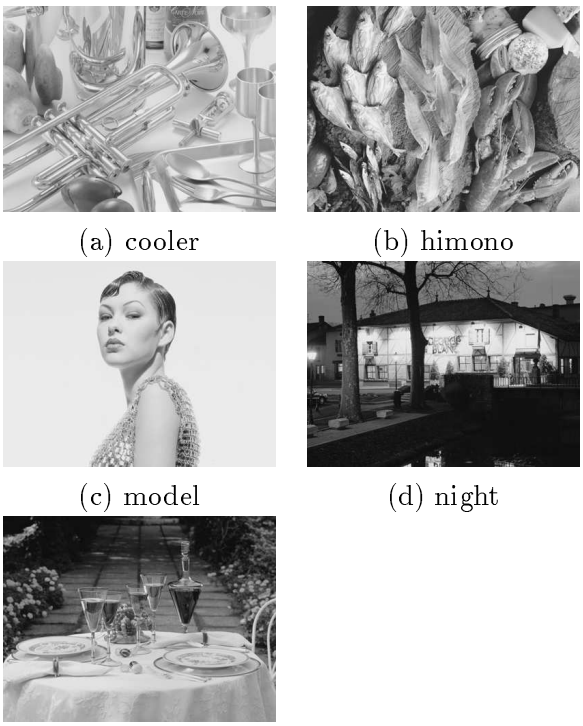


図 4: 隣合う画素のビット間の相関

ビットの相関を調べるのに用いた画像は、未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFTE97P00601) で用いられているテスト画像の高階調カラー画像 5 枚である (図 5)。これらの画像の階調は RGB 各 12[bit/pixel] であり、画素数は 1600×1200[pixels] である。



(a) cooler (b) himono

(c) model (d) night

(e) table

図 5: 高階調カラー画像

計算結果のうち、図 5の (b) himono に対する k 番目のビット値の相関 C^kの計算結果を図 6に示す。高階調画像では、隣合う画素間の画素値の変化は、一般的な階調 (8[bit/pixel], 256 階調) のものより小さいので、上位ビットでの相関が高いことがわかる。他の 4 枚の画像でも、同様の結果が得られた。

2.3 RGB 間の相関

図 2に示す超高精細画像と図 5に示す高階調画像を用いて、各画像の RGB 各々の間の相関を調べる。例えば、R-G 間の相関 C_{RG}は、式 (5) により計算する。ただし、$x_R(i,j)$ は R 画像の位置 (i,j) における画素値、$x_G(i,j)$ は G 画像の位置 (i,j) における画素値、$E\{\cdot\}$ は期待値を示している。同様に、G-B 間の相関 C_{GB}、B-R 間の相関 C_{BR}も求める。

$$C_{RG} = \frac{E\{x_R(i,j)x_G(i,j)\}}{\sqrt{E\{x_R^2(i,j)\}}\sqrt{E\{x_G^2(i,j)\}}} \qquad (5)$$

計算結果を、表 1、表 2に示す。表 1、表 2から、RGB 各々の間の相関は高く、特に超高精細画像よりも高階調画像のほうが、階調が高いため相関も高いと考えられる。また、超高精細画像、高階調画像ともに、R-G 間の相関 C_{RG}、G-B 間の相関 C_{GB}が高いことがわかる。

表 1: 超高精細画像の RGB 間の相関

画像名	C_{RG}	C_{GB}	C_{BR}
Bride	0.780	0.635	0.271
Harbor	0.906	0.895	0.649
Wool	0.517	0.709	0.454
Bottles	0.950	0.942	0.862

表 2: 高階調画像の RGB 間の相関

画像名	C_{RG}	C_{GB}	C_{BR}
cooler	0.923	0.935	0.879
himono	0.819	0.951	0.675
model	0.965	0.986	0.934
night	0.976	0.909	0.829
table	0.819	0.951	0.675

2.4 信号レベル分布の偏り

図 5に示す高階調画像を用いて、各画像の RGB 各成分毎にヒストグラムを調べる。図 5の (b)himono に対するヒストグラムを図 7 に示す。この図から、画素値の低い部分と高い部分 (特に、この画像においては、低い部分) の色は使用されていないことがわかる。他の 4 枚の画像でも、ほぼ同じ傾向が見られた。また、図 2の超高精細画像 4 枚でも、同じ傾向があることを確かめている。この結果から、画素値の分布に偏りがあることがわかる。

このような偏りは、スキャナ等による画像の読みとりの時、A/D コンバータの特性や信号クリップ等の非線形な特性の影響によるものとも考えられる

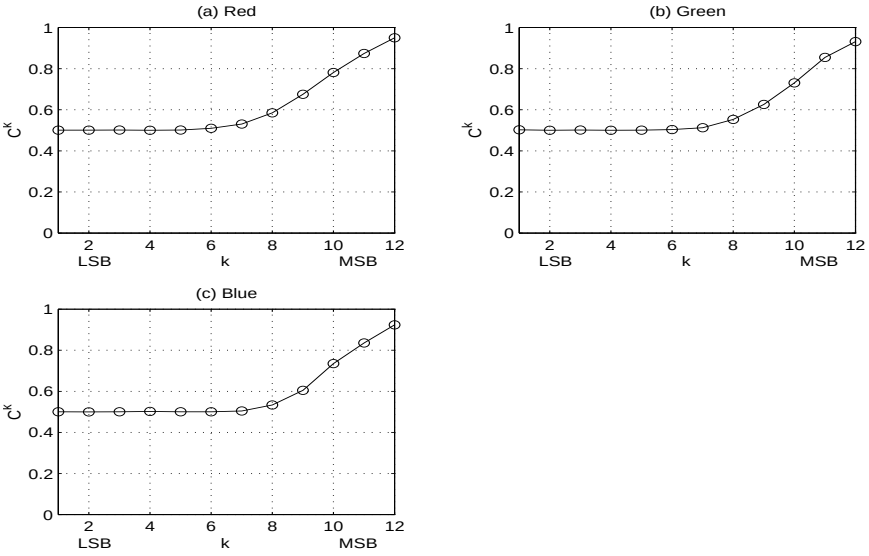


図 6: 高階調画像 (himono) のビット相関

が、文献 [6] によれば、RGB 各 12[bit/pixel] の色空間には自然界に存在しない色が点在していて、特に明度の高い範囲と低い範囲には存在しない色が多く見られることから、本来データが存在しえない部分ではないかと考えている。

また、図 5に示す高階調画像 5 枚を用いて、画像中で使用している色数を調べる。RGB 各成分毎に調べた結果を、表 3 に示す。この表から、画像中で使用している色数は、 8 割前後であり、約 2 割の色が使用されていないことがわかる。

表 3: 使用されている色数 (高階調画像) (%)

画像名	R	G	B
cooler	72.19	79.69	83.15
himono	77.08	79.81	76.54
model	75.51	83.13	83.47
night	86.21	89.43	89.58
table	85.45	89.33	89.65

3 統計的性質を考慮した Lossless Coding

情報の Lossless Coding は、モデル化と符号化の 2 つのステップからなっている。まず、モデル化の部分で、入力データの統計的性質を用いてモデル化を行ない、次に符号化の部分において、入力データのモデルに合わせて符号化を行う。

第 2 章で得られた超高精細・高階調画像の性質を、以下にまとめる。

(1) 超高精細画像... 画素間の空間密度が高いため、画素間の画素値の相関が高い。

(2) 高階調画像... 階調が高く、画素値の変化がより緩やかであるため、上位ビットの変化が少なく、ビットの値の相関が高い。また、RGB 間の相関も高い。さらに、信号レベル分布に偏りがあり、使用している色は 8 割前後である。

このような統計的性質から、超高精細・高階調カラー画像の Lossless Coding には、(a)Entropy Coding、(b) 予測符号化 (DPCM)、(c)Color Palette による色数の削減などの可能性が考えられる。

本研究では、まず、超高精細・高階調カラー画像では、画素値の相関が高いことと、ビットの相関が高いことから、(b) 予測符号化 (DPCM) を用いて画像の相関による冗長性を削減する。次に、信号レベル分布に偏りがあることから、(a)Entropy Coding のうちの 1 つである算術符号を用いて圧縮を行ない、さらに圧縮効率を向上させることを考える。

3.1 予測符号化 (DPCM)

予測符号化とは、すでに復号されてわかっている信号から、次に入力されてくる信号を予測して、その予測がはずれた分だけを伝送することにより、画像の相関による冗長性を削減しようとするものである。この予測に用いる関数は、表 4に示すものが提案されている [7]。

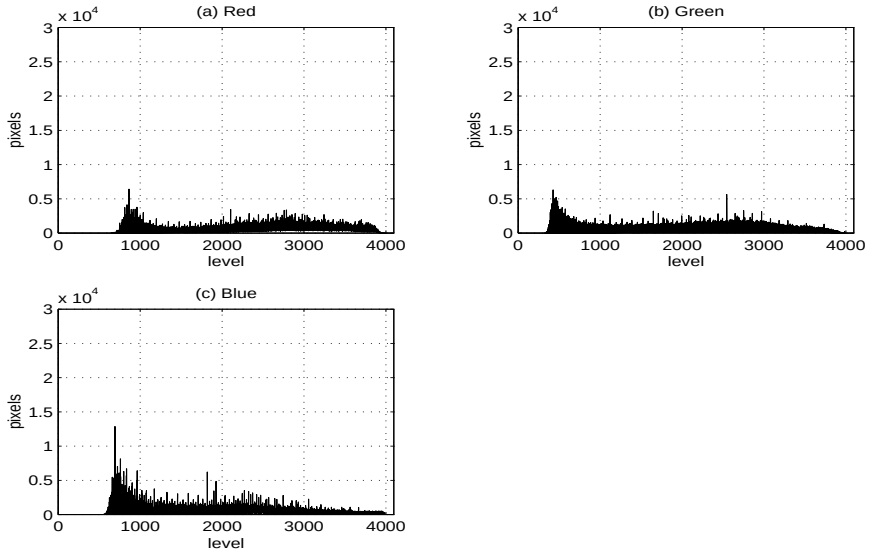


図 7: 高階調画像 (himono) のヒストグラム

表 4: 予測方法と関数

予測方法	予測関数
前置予測	$\hat{x}(i,j) = A$
行列予測	$\hat{x}(i,j) = \frac{1}{2}(A + C)$
平均予測	$\hat{x}(i,j) = \frac{1}{2}(A + D)$
平面予測 1	$\hat{x}(i,j) = A - B + C$
平面予測 2	$\hat{x}(i,j) = \frac{1}{2}A + \frac{1}{4}(C + D)$

ただし　$\hat{x}(i,j)$　：　予測値
A, B, C, D　：　予測に用いる画素値
(画素の配置は、図 8 参照)

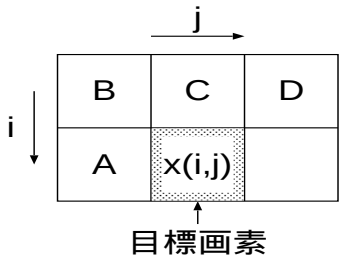


図 8: 画素の配列

図 5の高階調画像に対して、表 4に示す予測符号化を行う。評価には式 (6) によって定義されるエントロピーを用いる。ここで、$P(x(i,j) - \hat{x}(i,j))$ は予測誤差 $x(i,j) - \hat{x}(i,j)$ の出現確率を表す。

$$H = -\sum_{k=1}^{n} P(x(i,j) - \hat{x}(i,j)) \cdot \log_2 P(x(i,j) - \hat{x}(i,j)) \qquad (6)$$

エントロピーは、1 記号を符号化するのに必要な平均符号長の下限を与えているので、理想的な符号化を行なえば、このエントロピーで示される値まで情報が圧縮できることが知られている。

計算結果のうち、図 5の (b)himono の結果を表 5 に示す。画像の絵柄によって最適な予測関数は異なると考えられるが、ここで用いた画像において、表 5から平面予測 2 が適した予測符号化であると考えられる。他の 4 枚の画像でも、ほぼ同様の結果が得られている。

表 5: 高階調画像 (himono) のエントロピー [bit]

予測方法	Red	Green	Blue
原画像	11.148	11.055	10.954
前置予測	9.367	9.699	9.827
行列予測	9.039	9.379	9.516
平均予測	8.998	9.352	9.507
平面予測 1	9.317	9.681	9.879
平面予測 2	8.952	9.300	9.446

3.2　算術符号

超高精細・高階調画像は、信号レベル分布に偏りがあることから、算術符号を用いることを考える。また、画像に予測符号化を行なった後の信号レベル分布は、予測符号化を行なう前よりもさらに偏ると考えられるので、予測符号化を行なった後にも算術符号を用いることを考える。

算術符号とは、符号語を算術演算により逐次的に構成し、シンボル系列の出現確率に応じて確率数直線を区間分割、分割された区間内の位置を示す小数値を、その系列に対する符号とするものである [8]（図 9 ）。

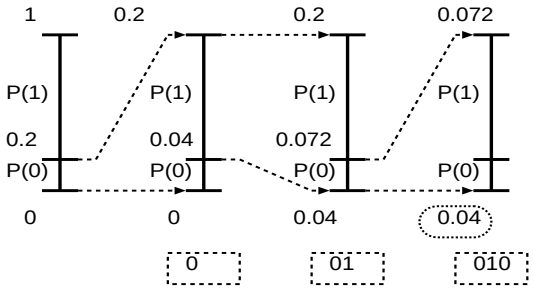


図 9: 算術符号を用いた符号化の例

同じ Entropy Coding にハフマン符号がある。ハフマン符号を用いて符号化を行なう場合、可能な限り長いブロックに対して符号化を行なうことで圧縮率は向上するが、ブロック長を長くするにつれて、ハフマン木を構成するための計算量は指数関数的に大きくなるという問題がある。しかし、算術符号では、計算量が記号列長に比例する程度で、記号列全体を 1 つの符号語にする符号化法である。したがって、ハフマン符号よりも有利であると考えられる。

4　符号化実験

データ圧縮を行なう実際のソフトウェアのうち、代表的なものである compress、gzip、LHA と、算術符号化器のみ、予測符号化 + 算術符号化器の比較を行なう。ここで用いる画像は、先の統計的性質を調べるのに用いた、超高精細画像 4 枚 (図 2) と高階調画像 5 枚 (図 5) である。この超高精細・高階調画像の RGB 各成分毎に圧縮し、その圧縮率を平均したもので比較を行なう。

一般に、 compress、gzip、LHA などのデータ圧縮ソフトは、1[byte] ずつデータを読み込み処理を行なっている。しかし、ここで用いている高階調画像は、 1 画素あたり 2[byte] のデータを持っているので、高階調画像の圧縮に用いた算術符号化器は、2[byte] ずつデータの処理を行なうように拡張してある。まず、compress、gzip、LHA と、算術符号化器のみの場合の結果を表 6、表 7に示す。

超高精細画像を圧縮した場合、算術符号化器の圧縮率は最も劣っている。しかし、高階調画像を圧縮した場合は、他の圧縮法と比較して一概に圧縮率が劣っているとは言えない。

表 6: 超高精細画像の圧縮結果 (%)

画像名	compress	gzip	LHA	算術符号
Bride	58.69	60.93	62.49	88.09
Harbor	72.29	71.66	72.19	91.12
Wool	60.92	63.40	64.27	87.22
Bottles	66.26	68.14	69.54	92.78

表 7: 高階調画像の圧縮結果 (%)

画像名	compress	gzip	LHA	算術符号
cooler	84.14	73.11	73.34	70.92
himono	90.26	79.27	78.81	72.49
model	51.79	51.70	52.10	54.20
night	77.95	70.34	70.75	67.94
table	82.53	71.93	72.18	73.30

次に、予測符号化と算術符号化器を組み合わせた場合の結果を表 8 に示す。予測関数は、表 4に示したものを用いた。

表 8: 予測符号化 + 算術符号化器の圧縮結果 (%)

画像名	a	b	c	d	e
cooler	53.99	52.86	52.52	53.49	52.31
himono	63.71	61.77	61.67	63.76	61.32
model	43.49	41.93	42.11	45.41	41.45
night	59.07	59.07	59.67	61.03	59.11
table	55.48	55.04	55.04	56.58	54.70

a : 前置予測　　b : 行列予測
c : 平均予測　　d : 平面予測 1
e : 平面予測 2

表 7 と 表 8より、どの画像においても、予測符号化 + 算術符号化器のほうが、compress、gzip、LHA の圧縮率よりも良いことが分かる。また、予測関数は、適用する画像の絵柄によって、最適な関数は異なると考えられるが、今回用いた高階調画像では、表 8より e. 平面予測 2 を行なった後、算術符号化器を用いた場合に、良い圧縮率を得られると思われる。

5　まとめ

まず、Lossless Coding の設計のために、超高精細・高階調カラー画像の統計的性質の検討を行なった。超高精細・高階調カラー画像では、解像度が高いため画素間の相関が高いということが、また、階調が高いため上位ビットの変化が少なく、ビットの

相関が高いこと、RGB 間の相関も高いこと、信号レベル分布に偏りがあることが確かめられた。これらの統計的性質により、超高精細・高階調カラー画像には予測符号化 (DPCM) と Entropy Coding (算術符号) が適していると考えられる。

そこで、算術符号化のみの場合と、予測符号化 (DPCM) と算術符号化を組み合わせたものを、一般的なデータ圧縮ソフトである compress, gzip, LHA と比較した。その結果、算術符号のみの場合の圧縮率は劣っていたが、予測符号化 (DPCM) と算術符号化を組み合わせることにより、圧縮率を大きく向上できることを示した。

本研究における符号化の対象はカラー画像であり、その性質として、RGB 間の相関が高いことと、信号レベル分布に偏りがあることが確認できたので、Color Palette を用いた 圧縮を行なうことで、圧縮率の向上が期待できる。さらに、画像の局所的特徴に適応した算術符号化器の検討により、圧縮率の向上も可能であろう。また、今回は超高精細かつ高階調であるカラー画像が入手できていないので、別々に検討・実験を行なったが、入手できしだい、画像の統計的性質の調査や圧縮率の比較等を行ないたい。

参考文献

[1] 谷本 他: “ディジタル高精細 / 超高精細動画像メディアの動向”, 信学誌, vol.78, 12, pp.1234-1243,(1995).

[2] 小野:“超高精細画像”, テレビ誌, vol.47, 9, pp.1024-1215,(1993).

[3] 長谷川, 加藤, 山田:“ピラミッド構造による超高精細画像の可逆符号化に関する検討”, PCSJ97, P-1.14, pp.35-36,(1997).

[4] 柴田, 半田, 大下: “無符号化部分を持つ高階調画像の適応的算術符号化”, 信学技報, CS97-130, IE97-111, (1997.12.).

[5] 高精細標準電子画像作成委員会 監修 : “高精細 XYZ・CIELAB・RGB 標準画像”, 画像電子学会,(1997).

[6] 甘, 小谷, 宮原:“高品質カラー画像の処理に必要な量子化精度”, 信学論, vol.76-D-II, 9, pp.1902-1909,(1993).

[7] 吹抜:“TV 画像の多次元信号処理”, 日刊工業新聞社,(1988).

[8] 植松:“文書データ圧縮アルゴリズム入門”, CQ 出版, (1994).

[9] 原島 他:“画像情報圧縮”, オーム社,(1991).