

階調画像の可逆符号化に関する研究

加治佐 清光

概要

本論文は、階調画像の可逆符号化に関する研究をまとめたものであり、各章より構成される。

近年、フルカラー画像に代えられる階調画像の使用が広く情報伝達の中で普及してきており、圧縮効率の高い非可逆符号化(lossy coding)が用いられている。他方、可逆符号化(lossless coding)は実用化の途ではあまり普及しておらず、階調画像の可逆符号化は圧縮効率などの面で劣るという認識が一般的である。しかし、マルチメディアの普及に伴い、編集を行う階調画像の可逆符号化や、原画像からの画像抽出などの非可逆符号化では対応できない応用分野では、可逆符号化の階調画像の可逆符号化方式の確立が強く望まれる。

学位論文

階調画像の可逆符号化に関する研究

(Research on Lossless Coding of Continuous-tone Images)

平成9年3月25日

加治佐 清光

Kiyomitsu KAJISA

概要

本論文は、階調画像の可逆符号化に関する研究をまとめたものであり、全9章より構成される。

近年、フルカラー画像に代表される階調画像の使用が広く情報産業の中で普及してきており、圧縮効率の高い非可逆符号化(lossy coding)がその普及を支えている。他方、可逆符号化(lossless coding)は実用化の面ではファクシミリに代表される2値符号化の域を脱しておらず、階調画像の可逆符号化は医用画像などの特殊な分野でしか活用されていないのが現状である。しかし、マルチメディアの普及に伴い、編集を伴う階調画像の符号化や劣化のない原画像からの特徴抽出などの非可逆符号化では対応できない応用分野では、符号化効率の高い階調画像の可逆符号化方式の確立が強く望まれる。

本論文は、このような背景を踏まえ、予測符号化(prediction coding)と呼ばれる階調画像の可逆符号化について、(1) ビットプレーン(bit plane)の2値符号化、(2) 1次マルコフモデル、(3) 複数の予測法、および(4) セグメンテーション(領域分割)の4つの異なる観点から新たに考察し、圧縮率の低減を論じたものである。考察の結果、複数の予測法の観点から提案する2予測法が最良であると結論づけられる。以下に、各章の概要を述べる。

第1章の「序論」では、画像の符号化に関する技術背景の概説とともに、本研究の目的と意義および本研究に關与する符号化の範囲について述べている。

第2章の「階調画像の可逆符号化と算術符号化」では、階調画像の可逆符号化の従来技術、本研究の4つの観点からの可逆符号化、および算術符号化の概要を述べている。

第3章の「修正縮退差分によるビットプレーン画像の符号化」では、階調画像をプレーンごとの2値のデータへ展開したビットプレーン画像の2値符号化について述べている。従来、このような方法で階調画像の可逆符号化を行う場合、2進数で表現される画素値をグレイ符号へ変換した後にビットプレーンへ展開し、各ビットプレーンを2値の符号化方式で符号化する方式が用いられてきた。一方、圧縮率を改善する手法として予測符号化がよく知られているが、この手法を適用した場合、得られる予測差分を2進数表現のままビットプレーンへ展開した後に符号化してもほとんど圧縮はできない。この問題を解決するために、本章では、縮退した予測差分を表現するために頻度順2進数符号、折返し符号、交換奇偶符号と呼ぶ新しい符号体系への変換を提案している。15枚のフルカラー標準画像を用いた実験で、提案方式により、予測差分の符号化が可能となること、および従来方式よりも圧縮率の改善が図られることを示している。

第4章の「縮退差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化」では、縮退した予測差分の確率モデルとして1次マルコフモデルを用いる符号化について述べている。従来、予測差分の出現確率をそのまま算術符号化する手法の他に、階調値のまま算術符号化する手法があり、そこでは、テキストの符号化と同様に、注目画素の直前画素値(previous pixel value)を条件(状態)とする1次マルコフモデルが用いられてきた。本章では、予測差分にも直前画素と注目画素間で相関があることに着目し、縮退した予測差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化を提案している。この提案は、低解像度の粗い画像よりも、隣接する画素間の画素値の変化がより少ない高解像度の精細な画像に有効である。10枚の800x600画素のフルカラーの標準画像を用いた実験で、提案方式により、従来の直前画素値を条件とする1次マルコフモデルを用いる方式よりも、圧縮率の改善が図られることを示している。

第5章の「2予測法による符号化」では、できるだけ小さい予測差分を得るために符号化対象の注目画素ごとに最適と思われる階調値予測法へ逐次、切り換える符号化について述べている。横線の多い画像では注目画素の直前画素値を、縦線の多い画像では注目画素の直上画素値(upper pixel value)を予測値とすると画素あたりの平均予測差分が小さくなる。従来は、ひとつの階調値予測法をひとつの画像全体に適用するのが一般的であったが、このように画像の局所の特性に応じて複数の予測法の中から最適な予測法を適宜選択する方法の確立が望まれる。本章では、より小さい予測差分を生じる予測法(番号)の出現パターンは画像上で2次元の連続性があることに着目し、3近傍画素での予測法(番号)の出現パターンに応じて予測法を適応的に選択する方法を提案している。具体的には、階調値の境界部に効果のあるGrahamの予測法と、階調値の平坦部に効果のある直前画素値と直上画素値の平均値を予測値とする予測法を適応的に選択する2予測法を提案している。2つのフルカラー標準画像(15枚と8枚)を用いた実験で、直前画素値や、直前画素値と直上画素値の平均値を予測値とする従来方式に対し、いずれの標準画像でも、提案の2予測法により圧縮率の改善が図られることを示している。

第6章の「2予測法の7近傍画素法との比較」では、前章の2予測法を、さらに、1995年に新しい可逆符号化の国際標準の一候補としてあげられている7近傍画素法と呼ぶ方式と比較した結果について述べ、共通の評価基準を用いた実験で、2予測法の方が有効であることを確認している。

第7章の「可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化」では、画像をブロックにセグメント化(領域分割化)することによる符号化について述べている。画像を8x8, 4x4あるいは2x2画素のブロックへ分割し、それぞれのブロックをランレングス、ベースオフセットあるいはブロックマッチングと呼ばれる符号化手法により符号語へ変換する可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化が1995年にRanganathanらにより提案された。本章では、従来方式に対し、各ブロックの参照画素を4種類から2近傍画素の平均値へ固定することにより、符号語より2ビットを削減する方法の提案と、2x2ブロックに対して1x1ブロックの符号化手法を適用する方法を提案している。15枚の標準画像を用いた実験で、Ranganathanらの従来方式に対して提案方式では圧縮率の改善が図られること、および、ブロックの大きさ、符号化手法および符号化対象値の大きさを示す分類番号のファイルをハフマン符号化ではなく算術符号化で符号化することにより、さらに圧縮率の改善が図られることを示している。

第8章の「比較評価と考察」では、共通の評価基準を用いて、上述の方式の異なる4つの提案方式の比較評価を行い、考察している。また、1993年に制定された国際標準JPEGのオプションであるロスレス符号化(DPCM方式, Spatial方式, 予測差分の値を画素ごとに逐次, ハフマン符号化あるいは2値で算術符号化する方式)との比較実験の結果も本章で述べ、4提案方式中で最良の結果が得られる2予測法が優れた方式であることを確認している。

第9章の「結論」では、本研究により得られた成果を要約して述べている。

以上のような研究から、これまで異なる観点から行われていた可逆符号化の効果が明らかとなり、この知見に基づき、提案の2予測法が現時点では最良の可逆符号化方式であると考えられる。

目次

第1章	序論	1
第2章	階調画像の可逆符号化と算術符号化	4
第3章	修正縮退差分によるビットプレーン画像の符号化	8
第4章	縮退差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化	13
第5章	2予測法による符号化	21
第6章	2予測法の7近傍画素法との比較	30
第7章	可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化	33
第8章	比較評価と考察	41
第9章	結論	44
謝辞		45
参考文献		46
本研究に関する著者の学会発表		48
本研究の動機となった著者の学会発表		48
付録		49
	フルカラーSIDBA標準画像	
	高精細カラーデジタル標準画像データ	

第1章 序論

本章では、画像の符号化に関する技術背景の概説とともに、本研究の目的と意義および本研究に關与する符号化の適用範囲について述べる。

1.1 画像の符号化の技術背景

近年のマルチメディア技術の進展により、画像の使用が広く情報産業の中で普及してきている。画像は静止画像(still image)と動画像(moving image)に大別され、静止画像は、さらに、表1.1に示すように色彩、階調、解像度の3点から分類することができる。このうち、カラー画像は3つ(RGB)あるいは4つ(CMYK)の階調画像(あるいは濃淡画像)からなる多重画像と考えることができる。

画像はデータ量が非常に大きいため、また、ユーザ間でのデータの互換性を保つために、符号化の国際標準が規定されている。代表的な画像の符号化の国際標準を表1.2に示す。この内、本研究では、静止画像の符号化について論じる。

現時点では、静止画像の圧縮 [1]~[14] の普及の基盤をなす実用化された技術は非可逆符号化(不可逆符号化、情報非保存形符号化、non-reversible coding, lossy coding)であり、カラー静止画像の国際標準JPEG(Joint Photographic Experts Group) [15]~[18] がその代表として知られている。JPEGは離散コサイン変換(discrete cosine transform)に基づく符号化方式であるが、この他、非可逆符号化の分野では、ベクトル量子化(vector quantization)、ブロックトランケーション符号化(block truncation coding)、サブバンド符号化(subband coding、帯域分割符号化)、ニューラルネットによる符号化などの種々の方式による研究が盛んに行われている [2] [5] [13] [14]。

他方、2値画像の可逆符号化(情報保存形符号化、reversible coding, lossless coding)の分野では、従来のファクシミリのG3やG4の国際標準よりも、特に自然画像に対して、圧縮効率の高いJBIG(Joint Bi-level Image experts Group) [19]~[21] が1993年の末に国際標準化された。

反面、階調画像の可逆符号化については、現時点では広く普及するに至っていないが、医用画像や天体画像などの劣化を前提としない従来の応用分野に加え、

表 1.1: 静止画像の分類

色彩レベルによる分類	白黒画像 (明暗のみ, monochrome)
	濃淡画像 (明暗のみ)
階調 (tone)による分類	疑似カラー画像
	フルカラー画像
・濃淡による分類	2 値画像
	中間調画像 (多値画像, 約 2-5bit/pel)
解像度による分類	自然階調画像 (256 階調程度以上)
	低解像度画像
	高解像度画像

表 1.2: 代表的な画像の符号化の国際標準

動画像	MPEG
2 値静止画像	G3, G4 FAX
	JBIG
カラー自然画像	JPEG

今後は特定の情報の抽出や編集した画像の圧縮などの分野で広い用途も考えられるため、より効果の高い符号化技術の確立が望まれている。

1.2 階調画像の可逆符号化の課題

階調画像の圧縮に関する大半の文献は、符号化されたデータからは元の階調値は完全に復元できない非可逆符号化を扱っている。しかし、例えば、特定の情報を抽出する目的などの、画像が更に処理される多くの応用分野ではオリジナルの階調画像の可逆符号化が必要となる [22]。また、非可逆符号化で復号された画像上で、文字や図形の重ね書きや、色合いの変更などの画像の編集が行われた場合、オリジナルの画像上での編集ではないため、劣化した画像上での編集結果を再

表 1.3: JPEG の試作プログラムによる画像符号化の例
(画像 mandrill, 512x512 画素, 8bit/pel, Green)

画質係数	圧縮率	画質劣化
1	49%	原画と差は見られない
3	26%	劣化が少しあるが実用範囲
10	12%	劣化が目立つが実用範囲
30	7%	劣化 (8x8 の出現) が目立つ
50	6%	劣化 (8x8 の出現) が著しい

画質係数 (スケーリングファクタとも呼ばれる) は量子化の度合いを決める係数である。

表 1.4: テキスト圧縮プログラムによる画像符号化の例
(画像 mandrill, 512x512 画素, 8bit/pel, Green)
(画像 milkdrop, 512x512 画素, 8bit/pel, Green)

圧縮率		符号化方式
mandrill	milkdrop	
94%	86%	ハフマン符号化
93%	86%	算術符号化(画素値)
84%	58%	算術符号化(画素値) の1次マルコフモデル)

び非可逆符号化することになる。つまり、編集のたびに劣化が進むことになる。可逆符号化では原理上このような劣化は生じない。

しかし、階調画像の可逆符号化の圧縮率¹ (画像により異なるが、例えば、約1/2のオーダー) は非可逆符号化の圧縮率 (表 1.3 を参照) に比べ圧縮率が高いため、広く普及するには至っていない。そのため、圧縮率を少しでも低くするための方式の確立が強く望まれる。

参考までに、画像データ (256 階調/画素) を、テキストの圧縮で用いられている1次元のデータ (256 種類/文字) として、そのままテキスト専用のプログラム [40] [41] で符号化したときの実験結果を表 1.4 に示す。複雑な画像ほど (ここでは mandrill)、圧縮が難しいことがわかる。

なお、階調画像の可逆符号化の詳細については次章で述べる。

¹本研究では、圧縮率を、「符号化後の画像サイズ/符号化前の画像サイズ」として定義する。

1.3 本研究の目的と意義

以上に述べた技術背景と課題を踏まえ、本研究では、階調画像の可逆符号化について検討し、従来方式に比べ圧縮率の改善を図る方式を確立することを目的とする。

その目的に合わせ、具体的には、予測符号化 (prediction coding) と呼ばれる階調画像の可逆符号化について、次の4つの異なる観点から研究を進めた。

- (1) ビットプレーン (bit plane) の2値符号化
- (2) 1次マルコフモデル
- (3) 複数の予測法
- (4) セグメンテーション (領域分割)

本研究の結果、これまで異なる観点から行われていた可逆符号化のそれぞれの効果が明らかとなり、複数の予測法から最適と思われる予測法を選択する方式が最も有力な方向であることが明らかとなった。

1.4 本研究の範囲と適用限界

本研究は階調画像の可逆符号化に関する研究であるが、研究対象の範囲は次に掲げる範囲とした。

- (1) 静止画像
- (2) 256 階調画像 (8 ビット/画素), モノクロおよびフルカラー画像

また、実験に当たっては、次に掲げる既存の技術と評価法を使用した。

- (3) 既存の階調値予測法の使用
- (4) 既存の算術符号化の実現方法の使用
- (5) ソフトウェアによるシミュレーション実験
- (6) 標準画像を用いた評価

従って、上記の前提条件以外の範囲については、本研究で得られた結果の適用が制限される。

1.5 本論文の構成

本論文は全9章により構成される。以下に各章の概要を記す。第3章から第5章および第7章では、4つの異なる観点からの研究結果について述べる。

- 第1章 序論として、画像の符号化に関する技術背景の概説とともに、本研究の目的と意義および本研究に關与する符号化の範囲について述べる。
- 第2章 階調画像の可逆符号化の従来の方式と算術符号化の概要について述べる。
- 第3章 階調画像をプレーンごとの2値のデータへ展開したビットプレーン画像の2値符号化について述べる。
- 第4章 縮退した予測差分の確率モデルとして1次マルコフモデルを用いる符号化について述べる。
- 第5章 できるだけ小さい予測差分を得るために符号化対象の注目画素ごとに最適と思われる階調値予測法へ逐次、切り換える符号化について述べる。
- 第6章 前章の2予測法を7近傍画素法と呼ぶ方式と比較した結果について述べる。
- 第7章 画像をブロックへセグメント化（領域分割化）することによる符号化について述べる。
- 第8章 共通の評価基準を用いて、第3章から第7章の各章中で述べた4つの提案方式の比較評価を行い、それぞれの提案方式の今後の発展方向について述べる。
- 第9章 本研究により得られた成果を要約して述べる。

可逆符号化と算術符号化

本章は主に階調について述べる。次に、階調の可逆符号化の概要について述べる。最初に、算



(a) ビットプレーン画像の符号化



(b) 階調値のままの可逆符号化

図2.1 元の階調画像の可逆符号化

方式などの提案されてきた [1]。近年では、確率モデルを使用する方法 [2]、階調画像のDPCMのインプレメントであるロスレス(DPCM)符号化方式 [3]、サブバンド符号化 [4]、変換符号化 [5]、変換のないコンプレクスモデルを使用する方法 [6] など提案されてきた。

このうちの確率モデルを使用する方式では、階調値のみで独立モデル、注目画素と注目画素との差分の差分モデル、注目画素を状態とする1次マルコフモデルなどの確率モデルを使用する方法が知られている [2]。1次マルコフモデルをベースに、文献 [6] ではMDF(Markov Decision Function Length) 基準 [7] [8] を用いて確率モデルを選択することにより、また文献 [9] ではCTW(Costed Tree Weighing) [9] を用いて確率モデルを用いて確率モデルを合成することにより正

2.1.2 階調値のままの可逆符号化

階調値のままの可逆符号化する方法としては、従来のランダム符号化の形式として、階調値やサブバンドでの階調値について可逆符号化の符号化を割り当てる

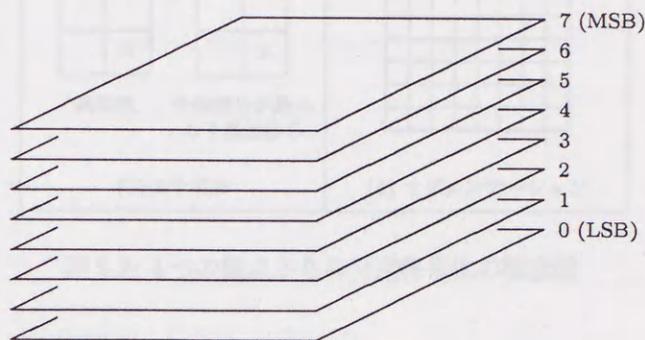
[1] 同様に、近年では、ビットプレーンごとの階調値を可逆符号化する方法が提案されている。また、階調値のままの可逆符号化の方法として、階調値やサブバンドでの階調値について可逆符号化の符号化を割り当てる

第2章 階調画像の可逆符号化と算術符号化

本章では、まず、階調画像の可逆符号化の従来技術の概要について述べる。次に、次章以降で論じる本研究の4つの異なる観点からの可逆符号化の概要について述べ、最後に、算術符号化の概要について述べる。

2.1 階調画像の可逆符号化

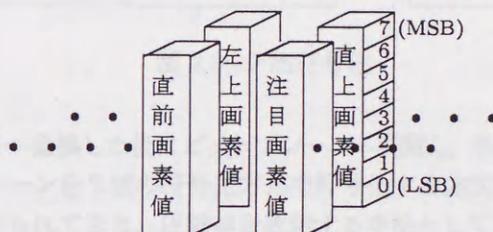
階調画像の可逆符号化は、階調値をビットプレーンへ展開¹した後に各ビットプレーンごとに国際標準の JBIG [19]~[21] などの2値画像の符号化法を適用する方法と、階調値をそのまま符号化する方法²とに大別される [1]。図2.1にこの違いを示す。ビットプレーン画像の符号化は、256階調画像の場合、階調が1画素当たり8ビットの信号を8枚の2値(1ビット)画像として扱う方法である。



(a) ビットプレーン画像の符号化

2.1.1 ビットプレーン画像の可逆符号化

階調画像をビットプレーンへ展開し、2値の算術符号化を適用する可逆符号化では、従来、画素値をグレイ符号で表現する方式が用いられてきた [5] [14], [21]。2進数符号の画素値を隣接する符号間のビット変化数が1であるグレイ符号へ変換することは、ビット変化のより少ないビットプレーンを生成することになり、各ビットプレーンにおいて注目画素の予測確率の向上につながる。



(b) 階調値のままの符号化

図 2.1: 256階調画像の可逆符号化

他方、階調画像の符号化を行う場合、符号化対象値として注目画素の予測値と実際値との予測差分(誤差)を用いる予測符号化によりエントロピーは小さくなることが知られている。従って、予測差分をビットプレーンごとに符号化するには、各ビットプレーンにおいて隣接画素間でのビット変化がより少ない予測差分を表現する符号が望まれる。

2.1.2 階調値のままの可逆符号化

階調値をそのまま符号化する方法としては、従来のランレングス符号化の延長として、階調値やブロック内での階調値に対応した可変長の符号語を割り当てる

¹ここでは、文献 [1] に従い、ビットプレーンへ展開した画像(あるいは画像データ)をビットプレーン画像と呼ぶ。

²濃度データ利用方式とも呼ばれる [1]。

方式などが提案されてきた [1]。近年では、確率モデルを使用する方法 [23]、国際標準 JPEG のオプションであるロスレス(DPCM)符号化方式 [18]、サブバンド符号化法 [24]、変換符号化法 [25]、汎用的なコンテキストモデルを使用する方法 [22] などが提案されてきた。

このうちの確率モデルを使用する方法では、画素値のみの独立モデル、注目画素と直前画素との差分の差分モデル、直前画素を状態とする1次マルコフモデルなどの確率モデルを使用する方法が知られている [23]。1次マルコフモデルをベースに、文献 [26] では MDL(Minimum Description Length) 基準 [27] [28] を用いて確率モデルを選択することにより、また文献 [29] では CTW(Context Tree Weighting) [30] を用いて確率モデルを用いて確率モデルを合成することにより圧

縮率を改善する方法が提案されている。また、これらの確率モデルを使用する方法では算術符号化が前提となっているが、そこで使用される多値算術符号器自身を改良する方法も提案されている [31]。

また、1995年にRanganathanらにより、上述の方法とは異なる可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化方式が提案された [47]。これは、画像を8x8, 4x4あるいは2x2画素のブロックへ分割し、それぞれのブロックをランレングス、ベースオフセットあるいはブロックマッチングと呼ばれる符号化手法により符号語へ変換する方式である。

この他、1995年に複数の予測法より適応的に予測法を選択する方法（本研究では7近傍画素法と呼ぶ）が提案されているが、この方法については、第6章で述べる。また、上述のJPEGのオプションであるロスレス符号化については第8章で述べる。

2.2 本研究の可逆符号化

第1章の「序論」で述べたように、本研究では、(1) ビットプレーンの2値符号化、(2) 1次マルコフモデル、(3) 複数の予測法（具体的には、2予測法）、および(4) セグメンテーション（領域分割）の4つの異なる観点から予測符号化と呼ばれる可逆符号化について新たに考察するが、これらの概念の違いを図2.2に示す。

階調画像の予測符号化 [32] は、一般に、図2.3に示すようにモデル化(modeling)と符号化(coding)の二つに分けられる。モデル化はさらに空間的な冗長性を取り除くための予測モデル(prediction model)と統計モデル(statistical model)の二つの段階に分けられる [33]。つまり、予測モデルで注目画素の画素値を予測し、統計モデルでその予測差分の出現確率を求め、得られた出現確率に基づき予測差分のエントロピー符号化を行う。

上記の(3)は予測モデルに関する研究であり、(1)と(2)は2値あるいは多値の統計モデルに関する研究である。また、(4)は予測モデル、統計モデルおよび符号化に関する研究である。

図2.2に示す4つのそれぞれの観点からの可逆符号化の研究結果については次章以降の各章で詳述するが、ここではそれらの概要について述べる。

2.2.1 修正縮退差分によるビットプレーン画像の符号化

階調画像のビットプレーンの可逆符号化を行う場合、上述したように、2進数で表現される画素値をグレイ

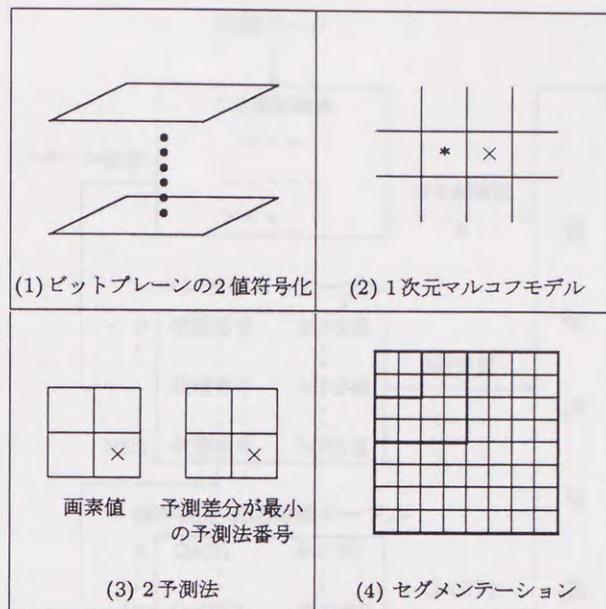


図 2.2: 4つの観点からの可逆符号化の概念図

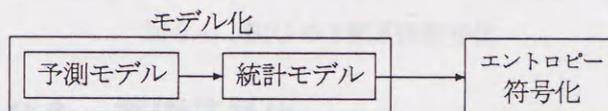


図 2.3: 予測符号化

符号へ変換した後にビットプレーンへ展開し、各ビットプレーンを2値の符号化方式で符号化する方式が従来用いられてきた。圧縮率を改善する手法として予測符号化がよく知られているが、この手法を適用した場合、得られる予測差分を2進数表現のままビットプレーンへ展開した後に符号化してもほとんど圧縮はできない。

この問題を解決するために、本研究では、縮退した予測差分を表現するために頻度順2進数符号、折返し符号、交換奇偶符号と呼ぶ新しい符号体系への変換を提案する。15枚のフルカラー標準画像を用いた実験では、交換奇偶符号の場合、画素値をグレイ符号へ変換した後に2値算術符号化を行う従来方式に対して平均4.5%の圧縮率の改善率が得られる。

2.2.2 縮退差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化

階調値のまま算術符号化する手法として、予測差分の出現確率をそのまま算術符号化する手法の他に、テキストの符号化と同様に、直前画素値を状態とする1次マルコフモデルが従来用いられてきた。

本研究では、予測差分にも直前画素と注目画素間で

相関があることに着目し、縮退した予測差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化を提案する。この提案は、低解像度の画像よりも、隣接する画素間の画素値の変化がより少ない高解像度の画像に有効である。10枚の800x600画素のフルカラーの標準画像を用いた実験では、画素値に対する1次マルコフモデルを用いる従来方式に対して平均6.7%の圧縮率（平均符号長）の改善率が得られる。

2.2.3 2予測法による符号化

横線の多い画像では注目画素の直前画素値を、縦線の多い画像では注目画素の直上画素値を予測値とすると画素あたりの平均予測差分が小さくなる。従来は、ひとつの階調値予測法をひとつの画像全体に適用するのが一般的であったが、このように画像の局所特性に応じて複数の予測法の中から最適な予測法を適宜選択する方法の確立が望まれる。

本研究では、より小さい予測差分を生じる予測法（番号）の出現パターンは画像上で2次元の連続性があることに着目し、3近傍画素での予測法（番号）の出現パターンに応じて予測法を適応的に選択する方法を提案する。階調値の境界部に効果のあるGrahamの予測法と、階調値の平坦部に効果のある直前画素値と直上画素値の平均値を予測値とする予測法を適応的に選択する実験では、直前画素値のみを予測値とする従来方式に対し、15枚と8枚の2つのフルカラー標準画像でそれぞれ平均6.2%と5.5%の圧縮率（平均符号長）の改善率が得られる。

2.2.4 可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化

上述したように、1995年にRanganathanらにより新しい考え方の可逆符号化方式が提案された。本研究では、Ranganathanらの方式を吟味した結果、各ブロックの参照画素を4種類から2近傍画素の平均値へ固定することにより、符号語より2ビットを削減する方法の提案と、2x2ブロックに対して1x1ブロックの符号化手法を適用する方法を提案する。15枚の標準画像を用いた実験では、Ranganathanらの従来方式に対して提案方式では平均約6%の平均圧縮率の改善率が得られる。さらに、ブロックの大きさ、符号化手法および符号化対象値の大きさを示す分類番号のファイルをハフマン符号化ではなく算術符号化で符号化することにより、10%の平均圧縮率の改善率が得られる。

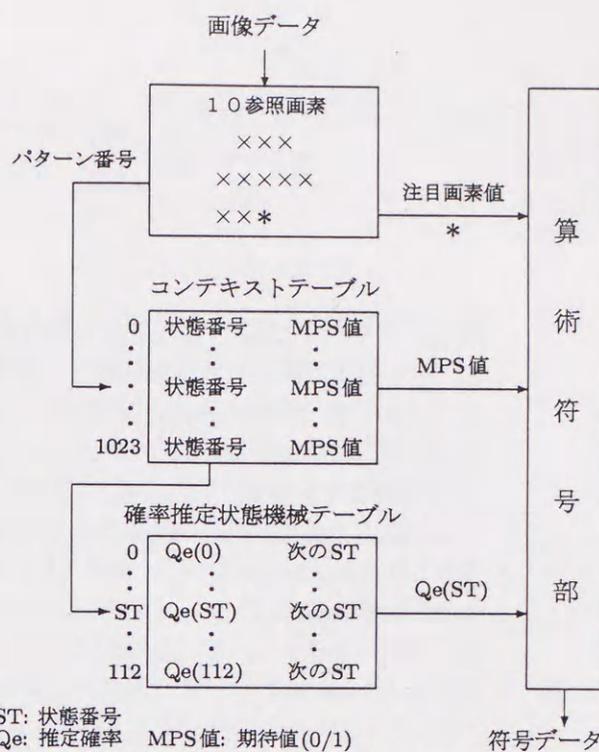


図 2.4: JBIG の 2 値算術符号化

2.3 算術符号化

従来、テキストの圧縮や、ファクシミリに代表される2値画像の圧縮ではハフマン符号化が代表的なエントロピー符号化方式として用いられてきた [5] [6] [34] [39]. これは出現確率に基づき1個のシンボル(通報)に1個の符号語を割り当てる方式であるが、これに対し、シンボル列の出現確率を用いて符号化する算術符号化と呼ばれる方式がMITのP.Eliasにより考案された。算術符号化はその後、J.J.RissanenとG.G.Langdonにより実現され [35]~[38], 上述の2値画像符号化の国際標準JBIGやカラー静止画像符号化の国際標準JPEGで採用されている。

本研究の符号化に関し、ビットプレーン画像の符号化では2値静止画像符号化の国際標準JBIGの算術符号化を用いている。また、階調値のままの符号化では、可変ブロックサイズセグメンテーションを除き、Wittenらの多値算術符号化の実現方式 [39]~[41] を用いている。

Wittenらの多値算術符号化については、第5章でふれるので、ここでは、JBIGとJPEGで採用されている2値算術符号化について概要を述べる。

2.3.1 JBIG の 2 値算術符号化

JBIGの2値算術符号化の構成を図2.4に示す。算術符号化は同図の左部の確率推定部と右部に示す算術符

号部により行われる。左部の注目画素の値(0/1)と出現確率を推定する確率推定部は、さらに、注目画素の10近傍画素($2^{10}=1024$ 通り)のパターン番号(0~1023)を求める部分、パターンごとの状態番号とMPS(Most Probable Symbol)値(期待値, 0/1)を保持するコンテキストテーブル、および確率推定状態機械テーブルより構成される。

確率推定状態機械テーブルは、113の状態よりなる状態遷移表で、ある状態のときに推定が当たればさらに推定確率を高くし、推定がはずれば推定確率を低くするというように、推定の一致、不一致により遷移すべき次の状態番号とMPS値を出力する表である。また、状態番号がコンテキストテーブルより与えられれば、その状態の推定確率を出力する。

コンテキストテーブルは、10近傍画素のパターンごとに、状態番号とMPS値を保持しているの、保持しているMPS値を算術符号部へ送り、状態番号より確率推定状態機械テーブルを検索し、得られた推定確率を算術符号部へ送る。算術符号部では、注目画素値とMPS値(推定値)とが一致(0)しているか、不一致(1)かの、0/1に応じて推定確率を符号化する。符号化の後に、実際の注目画素値(0/1)に応じて、そのパターン番号の状態番号とMPS値を確率推定状態機械テーブルに従い更新する。

2.3.2 JPEGの2値算術符号化

カラー自然画像の符号化の国際標準であるJPEGでは、非可逆符号化のJPEGでも、オプションのロスレス符号化でも、エントロピー符号化はハフマン符号化か算術符号化のいずれかを選択できる規定となっている。

JPEGの算術符号化では、図2.4の2値算術符号化の確率推定状態機械テーブルと算術符号部をそのまま使用する。コンテキストテーブルは、JPEG独自のものを使用する。基本的には、予測差分を2のべき乗で分類し、その分類番号とその分類における何番目かの値(オフセット, 付加ビット)をある定められた規則で2値化し、算術符号化する。また、予測差分の正負や差分が0であるかなどを条件とし、コンテキストテーブルのインデックスとして使用する。

2.3.1 2値算術符号化によるビットプレーン

2値算術符号化は、符号化対象のデータを2値(0/1)で表現し、その2値列を連続的に読み出すことで、元のデータを復元する。このとき、2値列の長さは、元のデータの長さの2倍程度になる。また、2値列の長さは、元のデータの長さの2倍程度になる。また、2値列の長さは、元のデータの長さの2倍程度になる。

2値算術符号化は、符号化対象のデータを2値(0/1)で表現し、その2値列を連続的に読み出すことで、元のデータを復元する。このとき、2値列の長さは、元のデータの長さの2倍程度になる。また、2値列の長さは、元のデータの長さの2倍程度になる。

3.2 予測差分と超過

予測差分は、元のデータの値と、その直前のデータの値との差分を指す。この差分を2のべき乗で分類し、その分類番号とその分類における何番目かの値(オフセット, 付加ビット)をある定められた規則で2値化し、算術符号化する。また、予測差分の正負や差分が0であるかなどを条件とし、コンテキストテーブルのインデックスとして使用する。

第3章 修正縮退差分によるビットプレーン 画像の符号化

階調画像をビットプレーンへ展開し、2値の算術符号化を適用する可逆符号化では、従来、2進数で表現される画素値をグレイ符号へ変換した後に符号化する方式が用いられてきた [21]。本章では、展開されたビットプレーンの算術符号化の圧縮率を改善することを目的として、予測値との差分を縮退した縮退差分(reduced difference)を直接的にビットプレーンの算術符号化に適した別の符号体系へ符号変換した後に符号化する方式を提案する。

具体的には、2進数で表現される縮退差分の符号を出現頻度の順に入れ換えた頻度順2進数符号(reordered binary code)とよぶ新しい符号と、折返し符号(turnup code)および奇偶符号(odd-even code)とよぶ新しい符号への変換方式を提案し、いずれの提案方式でも従来の画素値をグレイ符号へ変換する方式よりも圧縮率が改善されることを示す。また、奇偶符号をさらに隣接する符号間で頻度に応じて交換した交換奇偶符号(swapped odd-even code)とよぶ新しい符号を提案し、この符号が最も圧縮率の改善の効果が高いことを示す。

なお、ここでは、予測値の算出には3近傍画素を用いた既存の予測方式を用いる。また、実際の算術符号化には、2値静止画像符号化の国際標準である JBIG [20] を用いる。

3.1 予測符号化と算術符号化

階調画像の符号化を行う場合、符号化対象値として注目画素の予測値と実際値との予測差分(誤差)を用いる予測符号化によりエントロピーは小さくなる。これは、画素値の出現分布に比べ、予測差分の出現分布では符号化対象値の出現確率が高くなるためである。一方、JBIGの2値画像の算術符号化では、注目画素の10近傍画素に対応する1024パターンの状態機械を用いた確率推定表より得られる予測値(1/0)の予測確率を算術符号化する [20]。10近傍画素から得られる予測確率が高くなると、エントロピーが小さくなるため、圧縮率は低くなる。

階調画像をビットプレーンへ展開し、各ビットプレーンの符号化を行う場合、階調画像は隣接画素間での差分が少ない特徴があるので、2進数符号の画素値を隣接する符号間のビット変化数が1であるグレイ符号へ変換することは、ビット変化のより少ないビットプレーンを生成することになり、各ビットプレーンにおいて注目画素の予測確率の向上につながる。同様に、予測差分をビットプレーンごとに符号化するには、各ビットプレーンにおいて隣接画素間でのビット変化がより少ない予測差分を表現する符号が望まれる。

以上で明らかのように、画素値をそのまま符号化す

る方法と異なり、ビットプレーンへ展開した後に2値の算術符号化を行う方法では、階調画像の予測差分を用いた予測符号化に適した符号体系はいまだ確立されていない。本章の主眼はそのような符号を提案することにある。次節でまず予測差分の縮退について述べ、その次の節で縮退差分の表現に適した符号の提案を行う。

3.2 予測差分と縮退

予測符号化の圧縮率はより正確な注目画素値の予測に依存する。通常、直前画素が注目画素の適応的な予測に用いられることが多いが、より正確な予測法として、図3.1の下部に示す3近傍画素を用いたGrahamの予測値 [42] と Anastassiou の予測値 [10] が知られている (図3.1の上部を参照)。

代表的な15枚のフルカラーのSIDBA標準画像 (RGB別に計45枚) を用いた256階調に対する画素あたりの平均予測差分の実験結果を表3.1に示す。Anastassiouの予測値を用いた場合に最も低い平均予測差分が得られ、予測値としてGrahamの予測値、直前画素、直上画素を用いた順に高い値となる。従って、以降の実験では、適応的な予測差分の算出にAnastassiouの予測値のみを採用した。

256階調の場合に-255から255までの範囲の値 (9ビ

• R.E.Graham's Prediction
 $S0 = S1$, if $|S2-S1| < |S3-S2|$
 $S0 = S3$, otherwise

 • D.Anastassiou's Prediction
 $S0 = S1 + (S3-S2) / 2$

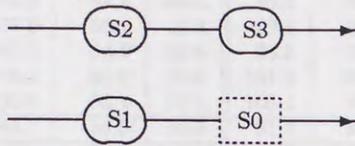


図 3.1: 3近傍画素による注目画素の適応型予測

ット)をとる予測差分は, $\text{mod}(256)$ の縮退 [1] により 0 から 255 までの範囲の値 (8 ビット) の縮退差分へ変換できる. 縮退差分は 0 と 255 で鋭いピークをもつ出現分布となる.

3.3 縮退差分の表現符号

予測差分をできるかぎり小さい正の 2 進数で表現するために, 低ビットプレーン集中符号 (lower bit-plane concentrating code) と呼ばれる符号へ変換する方式が知られている [1]. この方式では予測差分を条件に応じて符号変換する. 予測値が 128 より小さく, 実際値が予測値の 2 倍よりも小さければ, 正の差分を偶数符号へ, 負の差分を奇数符号へ割り当てる. 予測値が 128 より小さく, 実際値が予測値の 2 倍よりも大きければ, 実際値がそのまま符号化される. 予測値が 128 以上のときは, 255 からの予測値の差分を予測値とし, 255 からの実際値の差分を実際値と置き換えた上で, 上述の変換を行う. このように, この方式は縮退差分を直接的に使用する方式ではなく, 変換時の符号の条件分けが多いので, 圧縮率をさらに改善するための後述の 2 パス処理による符号変換には適さない.

ところで, 8 ビットで表現される縮退差分はそのままビットプレーンへ適用することはできない. これは, 2 進数で表現される縮退差分の 0 近傍ではビット 0 が多い反面, 255 近傍ではビット 1 が多いために, 連続する画素間の全ビットプレーン上で 0 から 1 あるいは 1 から 0 へのビット反転が多くなるためである. 縮退差分をそのままビットプレーンへ適用しても, 全ビットプレーンで圧縮がほぼ不可能となる (後述の表 3.3(a) と表 3.5 を参照). この問題の一解決法として, 2 進数で表現された縮退差分を符号変換した後に符号化する方

表 3.1: 画素あたりの平均予測差分

Predictor	Upper Pel	Previous Pel	Graham's Predictor	Anasta's Predictor
Average of 45 SIDBA Images	7.4	6.3	5.6	5.4

表 3.2: 符号化対象値と表現符号

Value for Coding	Code for Expression
Pixel Value	Binary Code
	Gray Code
Diff = Predict - Actual	Lower Bit-Plane Code
	Binary Code
Diff = Reduce(Diff)	Turnup Code
	Odd-Eve Code

式を以下で提案する.

圧縮率を良くするためには, すべてのビットプレーン上でより少ない 1/0 のビット変化が望まれる. 理想的には, 2 進数で表現される縮退差分は 0 をピークとして次第に減少する出現分布が望まれる. そのような分布では, 出現頻度の最も高い縮退差分が 0 の状態とその他の状態との間の状態遷移でそれぞれの符号間の 1/0 のビット変化が最も少なくなる. 縮退差分が 1, 2 などの他の状態との状態遷移でも同じことがいえる. 縮退差分をそのまま用い, このような分布とするために, 折返し符号と奇偶符号とよぶ 2 つの符号への変換の方式を提案する.

今までに述べた符号化対象値とその表現符号をまとめたものを表 3.2 に示す.

3.3.1 頻度順 2 進数符号

2 進数符号で表現された縮退差分を 2 パスで頻度順 2 進数符号へ符号変換する手順を図 3.2 に示す. この方式では, まず最初のパスで, 得られた 256 個の縮退

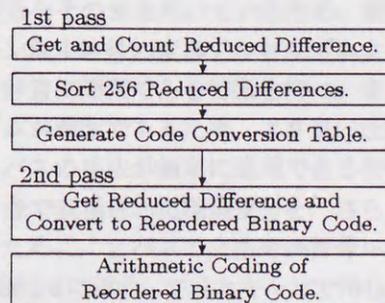


図 3.2: 頻度順 2 進数符号の生成と符号化

表 3.3: 縮退差分の JBIG 算術符号化の一致率 [%] と圧縮率 [%] (画像 milkdrop, 512x512 画素)

(a) Binary code.

Bit-Plane	Coincident Ratio			Compression Ratio		
	Red	Green	Blue	Red	Green	Blue
7 MSB	70.5	64.5	65.4	85.5	91.0	92.2
6	70.5	64.5	65.4	85.5	90.9	92.2
5	70.3	63.7	65.0	85.8	92.2	92.7
4	70.0	62.8	64.4	86.6	93.2	93.5
3	67.9	58.1	60.8	89.5	96.6	97.9
2	63.3	54.9	52.8	94.3	98.5	103.8
1	55.3	53.9	50.2	101.9	99.1	104.9
0 LSB	50.0	53.4	50.1	105.1	99.3	105.1
Ave.	64.7	59.5	59.3	91.8	95.1	97.8

(b) Reordered binary code.

Bit-Plane	Coincident Ratio			Compression Ratio		
	Red	Green	Blue	Red	Green	Blue
7 MSB	100.0	99.9	100.0	0.0	0.7	0.4
6	99.8	99.4	99.4	1.2	3.2	3.2
5	99.5	98.3	98.7	2.8	9.4	7.1
4	97.6	89.9	94.3	11.5	44.7	27.5
3	89.3	72.6	79.6	40.3	83.2	72.2
2	75.7	62.0	62.8	74.6	93.7	97.3
1	61.2	56.4	54.4	98.5	98.2	103.3
0 LSB	60.2	59.4	61.2	98.5	95.8	97.7
Ave.	85.4	79.7	81.3	40.9	53.6	51.1

差分の出現頻度をソートし、出現頻度の高い順に0からの2進数符号を割り当てる。2パス目では、符号変換の表にしたがい得られた縮退差分を符号変換した後に算術符号化を行う。これにより、0近傍と255近傍に集中する縮退差分は、0近傍のみへ変換され、上位ビットでの1/0のビット変化の少ないビットプレーンデータを符号化することができる。

2進数符号あるいは頻度順2進数符号で表現された縮退差分を符号化するときのビットプレーンごとの算術符号化による一致率と圧縮率の例を表3.3に示す。同表(a)より2進数符号では上位ビットプレーンでの一致率が悪いために、ほとんど圧縮できないことがわかる。同表(b)の頻度順2進数符号では、上位ビットプレーンでの一致率が改善されるために圧縮が可能となる。なお、同表中での一致率は、JBIGによる各ビットプレーン上での10近傍画素と状態機械を用いた確率推定表による1/0の予測値と実際値との一致率を示す。

この方式の特徴は、符号変換の前後で、表現符号として2進数の考え方を一貫して使用できることである。復号化のために追加の256バイトの符号変換表が必要となるが、これは800x600画素の256階調の標準画像の場合、0.05%と非常に小さい割合である。

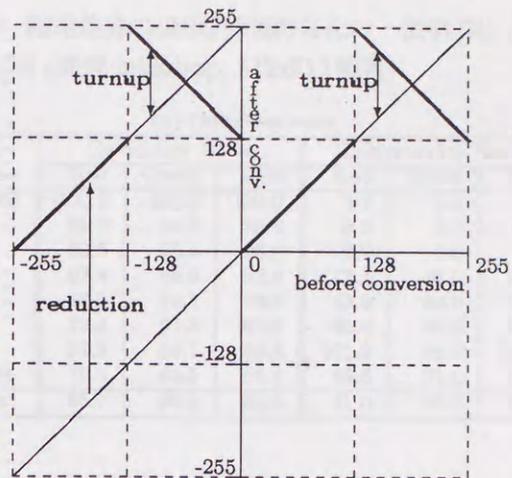


図 3.3: 予測差分から折返し符号への符号変換

3.3.2 折返し符号

2進数で表現された縮退差分の255から128までの範囲を128から255までの範囲の2進数へ折返して変換する。図3.3に、予測差分(-255~255)から縮退差分(0~255)へ、さらに折返し符号(0~255)へ変換するときの値の対応関係を示す。この変換により、折返し符号で表現された縮退差分の出現のピークが0近傍と128近傍に集中し、主に差分の正負を示す最上位ビットを除いたその他のビットプレーンでの出現の分布が0以上と128以上で同じようになる。そのため、最上位ビットを除く上位ビットでの1/0のビット変化の少ないビットプレーンデータが得られる。符号化され、復号化された縮退差分の折返し符号から元の注目画素値は予測値を基準とすることにより一意に復号できる。

3.3.3 奇偶符号と交換奇偶符号

2進数で表現された縮退差分の0から127までを2倍の偶数の0から254までの2進数へ割り当て、255から128までを1から255までの奇数の2進数へ割り当てる。この提案方式は+256の簡単な処理により得られる縮退差分をそのまま用いているため、前述の低ビットプレーン集中符号の変換アルゴリズムよりもアルゴリズムが非常に簡潔である特徴を持つ。また、変換アルゴリズムが簡潔であるため、より良い圧縮率を得るための2パスの手法が簡単に適用できる特徴がある。

奇偶符号で表現された縮退差分を、さらに圧縮率を改善するために、2パスで交換奇偶符号へ符号変換する手順を図3.4に示す。プリスキャンで得られた縮退差分の出現頻度より、隣接する奇数と偶数の符号を、偶数の頻度が奇数の頻度より高いときに入れ換えるだけ

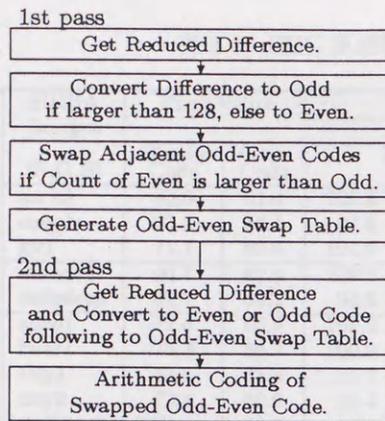


図 3.4: 変換奇偶符号の生成と符号化

の処理である。

このようにして得られる奇偶符号で表現された縮退差分の出現分布の例を図3.5に示す。図中、奇偶符号に対応する差分と縮退差分は、奇数と偶数の交換が行われないときの値を示す。奇偶の入れ換えにより、出現頻度の高い方に前述の状態0に近い状態を割り付けることになり、全体としてよりビット変化数の少ないビットプレーンデータを得られる。

奇偶符号あるいは交換奇偶符号で表現された縮退差分を符号化するときのビットプレーンごとの算術符号化による一致率と圧縮率の例を表3.4に示す。同表(b)より、奇数と偶数の入れ換えにより、いくつかのビットプレーンで一致率が向上し、予測確率が高くなることによりエントロピーが減少するため、結果的に圧縮率が向上していることがわかる。復号化のために追加の16バイト(128ビット)の符号変換表が必要となるが、これは通常の画像サイズからは無視できる。

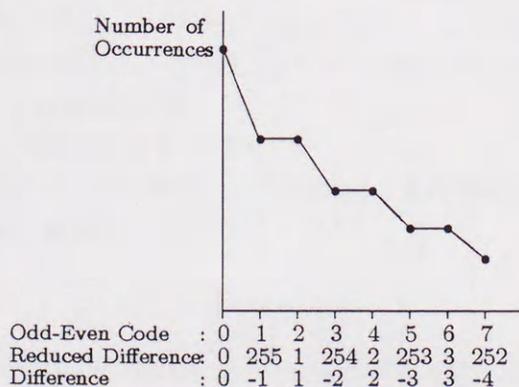


図 3.5: 奇偶符号で表現された縮退差分の出現分布の例

表 3.4: 縮退差分の JBIG 算術符号化の一致率 [%] と圧縮率 [%] (画像 milkdrop, 512x512 画素)

(a) Odd-even code.

Bit-Plane	Coincident Ratio			Compression Ratio		
	Red	Green	Blue	Red	Green	Blue
7 MSB	100.0	100.0	100.0	0.1	0.3	0.5
6	99.9	99.5	99.6	0.5	2.3	2.2
5	99.5	98.4	98.8	2.7	9.0	6.7
4	97.4	89.6	93.9	12.1	46.0	29.0
3	88.3	72.1	78.0	43.8	84.0	76.3
2	72.4	61.3	61.6	82.4	94.6	98.5
1	57.9	56.1	53.8	101.2	98.4	103.6
0 LSB	70.5	64.5	65.4	85.5	91.0	92.2
Ave.	85.7	80.2	81.4	41.0	53.2	51.1

(b) Swapped odd-even code.

Bit-Plane	Coincident Ratio			Compression Ratio		
	Red	Green	Blue	Red	Green	Blue
7 MSB	100.0	100.0	99.9	0.1	0.3	0.5
6	99.9	99.5	99.6	0.5	2.2	2.2
5	99.6	98.4	98.7	2.5	8.9	7.1
4	97.6	90.0	94.4	11.3	44.6	27.2
3	89.3	72.5	79.7	40.2	83.1	72.1
2	75.7	61.9	63.0	74.6	93.6	97.1
1	54.3	55.1	53.2	103.4	98.5	103.8
0 LSB	75.5	64.7	64.5	75.3	89.9	92.9
Ave.	86.5	80.3	81.6	38.5	52.6	50.4

3.4 シミュレーション実験

15枚のSIDBA標準画像を今までに述べた符号変換方式によりビットプレーンへ展開し、JBIG算術符号化を行ったときの圧縮率を表3.5に示す。ここでの圧縮率は各フルカラー画像のRGB別の256階調画像の平均圧縮率である。

表中の8方式中で、交換奇偶符号を用いた場合に最も低い圧縮率(56.1%)が得られ、階調値をグレイ符号で表現した場合(58.8%)に対し4.5%の改善率となる(表3.5の右欄を参照)。但し、複雑な画像であるaerialとmandrillでは、折返し符号の場合がわずかに圧縮率が低い結果となる。頻度順2進数符号、低ビットプレーン集中符号、折返し符号および奇偶符号を用いた場合は、57.1%、56.8%、57.0%および57.1%とほぼ同じ圧縮率となる。折返し符号の場合、階調値をグレイ符号で表現した場合に対し改善率は2.7%となる(表3.5の右欄を参照)。

3.5 第3章のむすび

2進数で表現される縮退差分を頻度の順に割り付ける方式と、折返し符号および奇偶符号への2つの符号変換方式を提案し、いずれの提案方式でも従来の画素

表 3.5: JBIG 算術符号化によるビットプレーン画像の圧縮率 [%]

Image Size [pels]	SIDBA Images [R,G,B]	Pixel Value		Reduced Difference by Anastassiou's Prediction						Improvement **	
		Binary Code	Gray Code	Reordered		L.B.C. Code	Turnup Code	Swapped		Turnup Code	Swapped
256 x256	aerial	90.6	81.4	105.8	78.3	77.9	*77.8	*77.8	77.9	4.4	4.3
	couple	63.6	56.5	97.8	56.5	56.1	56.1	56.1	*55.3	0.7	2.1
	girl	71.1	62.9	101.9	62.3	62.0	61.9	61.9	*61.6	1.6	2.1
512 x512	mandrill	90.7	82.9	102.6	82.5	81.7	*81.5	*81.5	81.9	1.7	1.2
	milkdrop	62.7	49.1	94.9	48.5	48.3	48.4	48.4	*47.2	1.4	3.9
800 x600	autol	72.6	60.9	101.2	57.9	57.9	58.0	58.0	*57.5	4.8	5.6
	bear1	76.3	66.2	100.9	61.0	60.7	60.6	60.6	*60.2	8.5	9.1
	city1	73.4	61.3	99.7	57.3	57.0	57.0	57.0	*56.4	7.0	8.0
	city2	72.4	60.9	99.4	58.6	58.4	58.5	58.5	*57.8	3.9	5.1
	desk1	69.1	56.7	98.1	54.7	54.4	54.5	56.2	*53.7	3.9	5.3
	face1	54.1	44.8	96.1	44.9	44.8	45.4	45.4	*43.6	-1.3	2.7
	home3	65.1	54.3	97.4	52.8	52.6	52.9	52.9	*51.5	2.6	5.2
	home4	67.6	55.0	97.0	53.7	53.4	53.8	53.8	*52.4	2.2	4.7
room1	57.6	44.4	95.5	43.5	43.4	44.0	44.1	*42.0	0.9	5.4	
room7	56.1	44.1	95.0	44.2	44.1	44.7	44.7	*42.8	-1.4	2.9	
Average		69.5	58.8	98.9	57.1	56.8	57.0	57.1	*56.1	2.7	4.5

L.B.C. Code: Lower Bit-plane Concentrating Code

*: The best ratio among 8 methods.

** : for Pixel Value in Gray Code.

値をグレイ符号へ変換する方式よりも圧縮率が改善されることを実験結果で示した。また、隣接する奇偶符号を頻度に応じて入れ換えた交換奇偶符号が圧縮率の改善に最も効果が高いことを示した。

本提案方式は、2進数表現のままでは圧縮が不可能な縮退差分を符号変換により可能とするいくつかの解決法を示したことになる。縮退差分は他の予測法からも得られるので、本提案方式は他の予測法にも応用が可能である。例えば、今回は予測値の算出に3近傍画素を用いたが、より多くの近傍画素から精度の高い予測を行うことにより、さらに圧縮率を改善することができるものと思われる。

第4章 縮退差分に対する1次マルコフモデルを用いた符号化

近年、静止画像は高解像度化および高階調化してきており、非可逆符号化に加えて、応用分野によっては、圧縮率の良い可逆符号化が望まれている。従来は、256x256画素程度の低解像度の画像を対象に圧縮率の改善を図る方式が提案されてきたが、低解像度の画像と高解像度の画像では画像の性質が異なるために、高解像度の画像ではそれにふさわしい符号化方式が確立されなければならない。

このような背景をふまえ、本章では、高解像度の256階調画像を対象に、まず、1次マルコフモデルの符号化対象値と状態の両方に縮退した予測差分（以下、縮退差分とよぶ）を用いる確率モデルを提案する。モデル化の裏付けとして、隣接する画素における予測値との差分は隣接する画素値と同様に相関があることを示す。また、提案モデルを用いた場合の符号化と復号化が可能であることをアルゴリズムで示す。次に、1次マルコフモデルの状態の縮退と、低解像度と高解像度の画像の圧縮率について考察する。

最後に、高解像度の画像を用いたシミュレーション実験にて提案モデルが有効であることを示す。提案方式によれば、実験で用いた30枚の800x600画素の高解像度の標準画像では、従来の縮退差分を用いた0次の独立モデル、状態を縮退した画素値を用いた1次マルコフモデル、およびJBIG（2値画像符号化の国際標準）をビットプレーンに適用した場合よりも良い圧縮率（平均符号長）が得られた。

なお、本章では、縮退(reduction)という用語を縮退差分(reduced difference)と状態の縮退(reduction of states)に用いているが、それぞれ、値を縮めた差分値と状態数を縮めるということを意味している。

4.1 画像データのモデル

4.1.1 確率モデル

本章では大きく分類して次に示す(1)から(3)の3つの確率モデルについて議論する。このうち、(3)に分類される縮退差分1次マルコフモデルが新たに提案するモデルである。0次モデルあるいは1次マルコフモデルの前の名称は、ここでは、各モデルを区別するための符号化対象値を示す。

(1) 縮退差分0次モデル

画像上の*i*行*j*列目の注目画素 $s_{i,j}$ と直前画素 $s_{i,j-1}$ (図4.1を参照) との差分

$$e_{i,j} = s_{i,j-1} - s_{i,j} \quad (1)$$

に対して0次（独立）モデルを適用する [23]。この差分 $e_{i,j}$ は0を中心とする鋭いピークの出現分布となる。この差分のとりうる値は256階調の画像では-255~255

であるので、次のように0~255に縮退する。

$$\begin{aligned} e_{i,j} < 0 \quad \text{ならば} \quad e_{i,j} &= e_{i,j} + 256 \\ e_{i,j} \geq 0 \quad \text{ならば} \quad e_{i,j} &\text{のまま} \end{aligned} \quad (2)$$

得られる縮退差分は0付近と255付近に集中した出現分布となる。

画素 $s_{i,j}$ が縮退差分 k ($k = 0, 1, \dots, 255$) となる頻度 $c(k)$ より、出現確率 $p(k)$ を

$$p(k) = c(k)/N \quad (3)$$

として推定する。ここで、 N は全出現画素数である。ある縮退差分を有する画素は固有の出現確率を有することになる。このモデルのエントロピー H は、

$$H = - \sum_{k=0}^{255} p(k) \log_2 p(k) \quad (4)$$

となる。

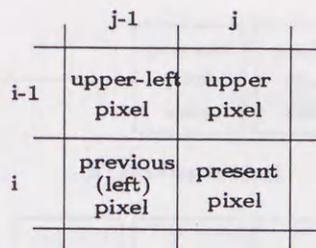


図 4.1: 注目画素の3近傍画素

この縮退差分0次モデルは、1次元の画像データから得られる予測値との縮退差分の確率モデルである。式(1)と(2)より得られる縮退差分をここでは直前縮退差分(previous reduced difference)とよび、このモデルを次に述べるモデルと区別するために直前縮退差分0次モデルとよぶ。この直前縮退差分に対し、さらに正確な予測を目標として、2次元の画像データから得られる縮退差分が考えられる。

図4.1に示す注目画素に対する2次元の近傍画素を用いた適応型予測(adaptive prediction)の方法として、直前画素と直上画素の平均を予測値とする方法[23]のほか、Grahamの予測法[42]やAnastassiouの予測法[10]が知られている。Grahamの予測法は、水平方向と垂直方向の濃度勾配より、予測差分が小さくなるように、直前画素あるいは直上画素の値を適応的に予測値として選択する方法である。後述の標準画像の45画像を用い、画素あたりの平均予測差分を求める実験を行った結果、直前画素(1次元画像データ)や直上画素を予測値とする方法、直前画素と直上画素の平均を予測値とする方法、あるいはGrahamの予測法よりも、Anastassiouの予測法が最も小さい平均予測差分(絶対値)が得られた(256階調に対し、それぞれ6.21, 7.12, 5.41, 5.56, 5.39)。そのため、モデル化と以降の実験では、Anastassiouの予測法と、比較の目的で直前画素を予測値とする方法の2通りを用いた。

Anastassiouの予測法では、画像上の*i*行*j*列目の注目画素 $s_{i,j}$ に対し、直前画素 $s_{i,j-1}$ 、直上画素 $s_{i-1,j}$ および左上画素 $s_{i-1,j-1}$ (図4.1を参照)の3つの近傍画素から注目画素の予測値 $s'_{i,j}$ を

$$s'_{i,j} = s_{i,j-1} + \frac{s_{i-1,j} - s_{i-1,j-1}}{2} \quad (5)$$

$$s'_{i,j} < 0 \quad \text{ならば} \quad s'_{i,j} = 0 \quad (6)$$

$$s'_{i,j} > 255 \quad \text{ならば} \quad s'_{i,j} = 255$$

により算出する。式(5)は、予測値として、直前画素値を水平方向の変化分で補正することを意味している。

式(6)は、予測値が範囲外の際に範囲内に丸め込む処理である。予測差分は

$$e_{i,j} = s'_{i,j} - s_{i,j} \quad (7)$$

により得た後に、直前縮退差分0次モデルと同じく、式(2)により0~255の範囲に縮退する。出現確率とエントロピーはそれぞれ式(3)と式(4)より定まる。

式(5)~(7)より得られる縮退差分をここではAnastassiouの縮退差分(Anastassiou's reduced difference)とよび、このモデルを前に述べた直前縮退差分0次モデルと区別するためにAnastassiouの縮退差分0次モデルとよぶ。

(2) 画素値1次マルコフモデル [23] [26]

注目画素 $s_{i,j}$ に対し、モデルの状態を直前画素 $s_{i,j-1}$ の値とする。出現確率 $p(k|z)$ は、全出現画素の中で状態 z が出現する頻度 $c(z)$ と、状態 z の下で画素値 k が生じる頻度 $c(k|z)$ を用いて、

$$p(k|z) = c(k|z)/c(z) \quad (8)$$

として推定する。このモデルのエントロピー H は、

$$H = \sum_{z=0}^{255} p(z) \left(- \sum_{k=0}^{255} p(k|z) \log_2 p(k|z) \right) \quad (9)$$

となる。

(3) 縮退差分1次マルコフモデル

1次マルコフモデルの符号化対象値と状態の両方に縮退差分を用いた縮退差分1次マルコフモデルとよぶ確率モデルを新たに提案する。具体的な縮退差分として、ここでは、(1)で述べた直前縮退差分とAnastassiouの縮退差分を用い、それぞれ直前縮退差分1次マルコフモデルとAnastassiouの縮退差分1次マルコフモデルとよぶ。別の予測法により得られた縮退差分をこの提案モデルに適用することも可能である。

直前縮退差分1次マルコフモデルでは、注目画素 $s_{i,j}$ と直前画素 $s_{i,j-1}$ との直前縮退差分 $e_{i,j}$ に対し、モデルの状態を直前画素での直前縮退差分 $e_{i,j-1}$ の値とする。出現確率とエントロピーはそれぞれ式(8)と式(9)より定まる。

Anastassiouの縮退差分1次マルコフモデルでは、注目画素 $s_{i,j}$ とAnastassiouの予測値により得られるAnastassiouの縮退差分 $e_{i,j}$ に対し、モデルの状態を直前画素でのAnastassiouの縮退差分 $e_{i,j-1}$ の値とする。出現確率とエントロピーはそれぞれ式(8)と式(9)より定まる。

従来の画素値1次マルコフモデルと提案の縮退差分1次マルコフモデルに基づく出現確率の違いを図4.2に示す。

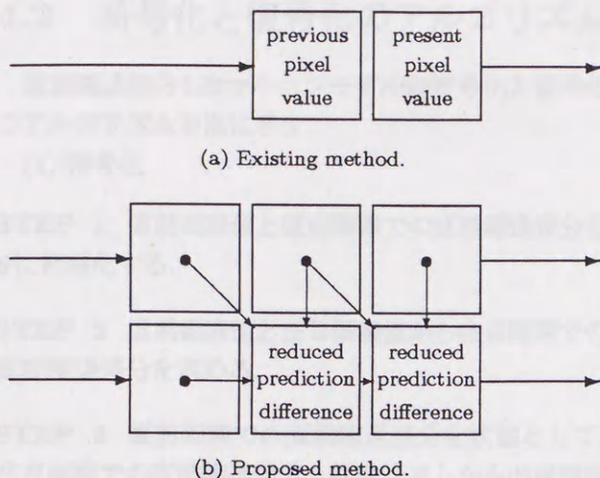


図 4.2: 1次マルコフモデルに基づく注目画素での出現確率

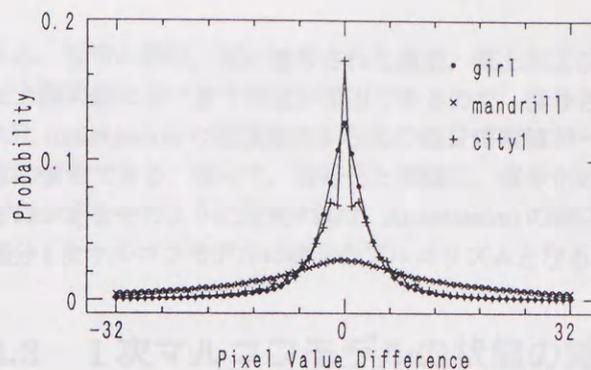
4.1.2 画像の特徴とモデル

図 4.3(a) に直前画素と注目画素の画素値の差分 (pixel value difference) の出現分布の例を, 同図 (b) に直前画素での差分と注目画素での差分の差分の出現分布の例を示す. 使用したSIDBA 標準画像の girl は 256x256 画素, mandrill は 512x512 画素, city1 は 800x600 画素である (いずれも Green). 同図 (b) は, 画素値の変化の少ない所では, 近傍画素の差分は 0 付近に集中し, 濃度が徐々に変化する所では, 近傍画素の差分は互いに近い値をとる傾向があるという画像データの特徴を示している. 同一の画像においては, 高解像度の画像ではこの傾向が低解像度の画像よりも強いことが予想される.

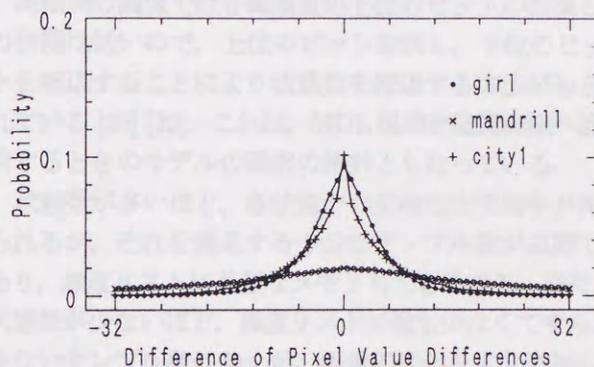
直前画素値を状態とし, 注目画素値を符号化対象値とする画素値 1 次マルコフモデルは, 同図 (a) の画像の特徴を反映したモデルである. 同様に, 同図 (b) の画像の特徴を反映したモデルが, 直前画素での縮退差分を状態とし, 注目画素での縮退差分を符号化対象値とする提案の縮退差分 1 次マルコフモデルである. 提案モデルは, 画素値 1 次マルコフモデルでの注目画素値と直前画素値との相関と同様に, 注目画素での縮退差分と直前画素での縮退差分の相関を利用していることになる.

縮退差分 1 次マルコフモデルを提案する理由を次に掲げる.

- 直前画素値の 0~255 の範囲を状態とする画素値 1 次マルコフモデルに比べて, 差分の分布はほぼ -32 ~ 32 の狭い範囲にほぼ集中しており, 状態の縮退



(a) Pixel value difference between the previous pixel and the present pixel.



(b) Difference between the pixel value difference at the previous pixel and the pixel value difference at the present pixel.

図 4.3: 差分と差分の差分の出現分布の例

により適している.

- 実際に使用される状態の数が直前画素値を状態とする場合に比べて小さく, 実際に使用される符号化対象値の数も注目画素値を符号化対象値とする場合に比べて小さいので, 前述の少ないサンプル数に起因する初期段階での不正確な出現確率の問題を回避できる.
- 同図 (a) に比べて同図 (b) は分布の集中の度合いにやや欠けるが, 確率算出の観点からは, 分布の集中の度合いはいずれも高いので圧縮率への影響は少ないと思われる.

上記の理由から明らかなように, 提案する縮退差分 1 次マルコフモデルは, 出現分布の集中する縮退差分を状態と符号化対象値とすることにより, 画素値 1 次マルコフモデルで状態の縮退を行う場合よりも高い出現確率が期待される.

4.2 符号化と復号化のアルゴリズム

直前縮退差分1次マルコフモデルの符号化と復号化のアルゴリズムを次に示す。

(1) 符号化

STEP 1 直前画素値と直前画素での直前縮退差分を0に初期化する。

STEP 2 直前画素値と注目画素値から注目画素での直前縮退差分を求める。

STEP 3 直前画素での直前縮退差分を状態として、注目画素での直前縮退差分と頻度リストから出現確率を求め、算術符号化する。

STEP 4 直前画素での直前縮退差分を状態として、注目画素での直前縮退差分の頻度リストを更新する。

STEP 5 注目画素での直前縮退差分と画素値を、直前画素での直前縮退差分と画素値とみなす。

STEP 6 終端符号でなければ[STEP2]へ戻る。

(2) 復号化

STEP 1 直前画素値と直前画素での直前縮退差分を0に初期化する。

STEP 2 直前画素での直前縮退差分を状態として、算術復号器内の出現確率から注目画素での直前縮退差分を復号化する。

STEP 3 直前画素値と注目画素での直前縮退差分から注目画素値を求める。

STEP 4 直前画素での直前縮退差分を状態として、注目画素での直前縮退差分の頻度リストを更新する。

STEP 5 注目画素での直前縮退差分と画素値を、直前画素での直前縮退差分と画素値とみなす。

STEP 6 復号値が終端符号でなければ[STEP2]へ戻る。

以上のアルゴリズム中の直前縮退差分を Anastassiou の縮退差分へ置き換え、符号化の [STEP2] の直前縮退差分を求める箇所を3近傍画素から Anastassiou の縮退差分を求めるように変更すれば、Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデルの符号化アルゴリズムとなる。このモデルでは、Anastassiou の縮退差分が算術符号化され、Anastassiou の縮退差分が算術復号化さ

れる。復号の際は、既に復号された直前、直上および左上画素値に基づき予測値が算出できるので、復号された Anastassiou の縮退差分から元の注目画素値が一意に復号できる。従って、符号化と同様に、復号化の [STEP2] をそのように変更すれば、Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデルの復号化アルゴリズムとなる。

4.3 1次マルコフモデルの状態の縮退

高階調の画像では各画素値の下位のビットの画像との相関は低いので、上位のビットを残し、下位のビットを縮退することにより状態数を縮退する方法が知られている [26] [29]。これは、MDL 規準を階調画像へ適用するときのモデルの選択の指針ともなっている。

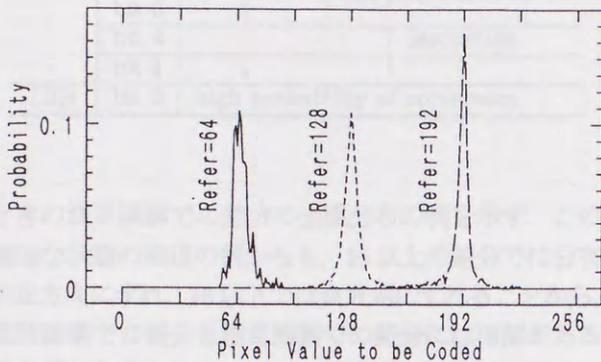
状態数が多いほど、各状態での正確な出現確率が得られるが、それを満足する十分なサンプル数が必要であり、頻度リストに必要なメモリも大きくなる。逆に、状態数が少ないほど、頻度リストの数も少なくてすみ、少ないサンプル数に向くが、画像の変化をより詳細に反映した状態でのより正確な出現確率が得られない。

従って、画像サイズや画像データの変化の度合いに応じた適切な状態数が決定されなければならない。本章では、縮退する状態数を固定したモデルを以下、検討の対象とする。まず、状態の縮退と出現確率について考察し、画素値1次マルコフモデルと同じく提案の縮退差分1次マルコフモデルでも状態の縮退が可能なることを示す。次に、縮退差分の状態の縮退について述べた後、解像度の異なるいくつかの画像における圧縮率について考察する。

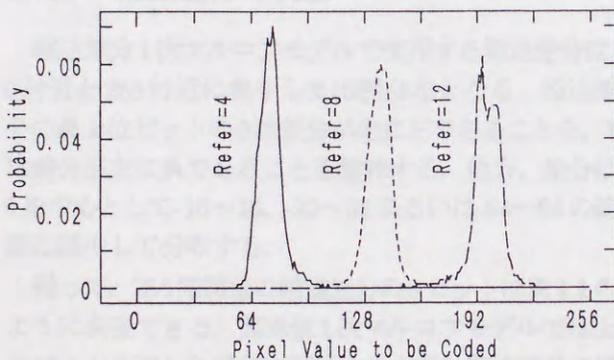
4.3.1 状態の縮退と出現確率

図4.4(a)に直前画素値が64,128,192のときの注目画素値の出現分布の例を、同図(b)にそれぞれの直前画素値を上位4ビット(16状態中の4,8,12)へ縮退した場合の注目画素値の出現分布の例を示す。使用した画像はSIDBA標準画像のcity1(800x600画素, Green)である。同図(b)より、参照値(reference value)の縮退により出現頻度のピーク値は下がるが、分布の幅は広くなるのがわかる。同図(b)の分布の中心が同図(a)の分布の中心よりも正方向にずれるのは、例えば、参照値の縮退後の4(4以上5未満)は縮退前の64以上80未満(中心は72)を参照することに相当するためである。各状態の出現確率の最大値はほぼ同じオーダーとなる。

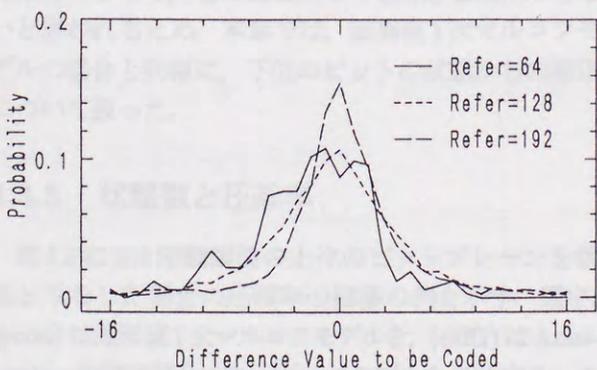
同図(c)に直前画素値が64,128,192のときの直前画素値と注目画素値の差分の出現分布の例を示す。いずれの分布も0付近に集中する。1次マルコフモデルで直前画素値を状態とし差分を符号化対象値としても、注



(a) Occurrence distribution of the present pixel value when the previous pixel value is 64, 128 or 192.



(b) Occurrence distribution of the present pixel value when the previous pixel value of 64, 128 or 192 is reduced to 4 bits.



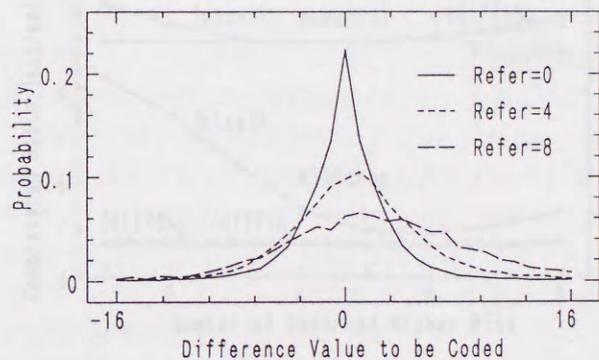
(c) Occurrence distribution of the difference between the present pixel and the previous pixel when the previous pixel is 64, 128 or 192.

図 4.4: 注目画素と差分の出現分布の例 (city1, Green)

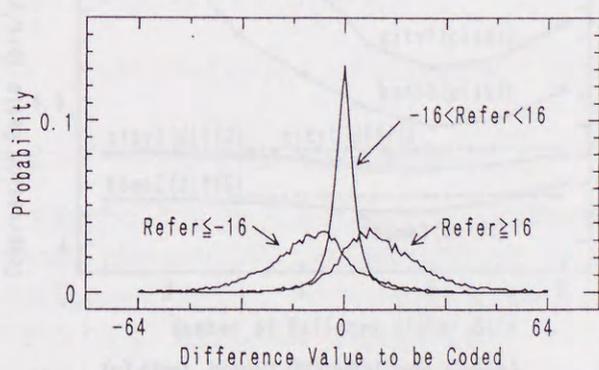
目画素値を符号化対象値とした場合 (同図(a)) と同じ出現確率なので、圧縮結果に変化はない。

次に、注目画素での直前画素値と注目画素値の差分と、直前画素での同様の差分の関係について考える。図 4.5(a)に直前画素での差分が0,4,8のときの注目画素での差分の出現分布の例を示す。直前画素での差分が0の場合は注目画素での差分0を中心として最もピークが鋭い。直前画素での差分が正の値の4と8の場合は、分布の中心が徐々に正方向である右にずれる。このずれは直前画素での差分と注目画素での差分には相関があることを意味している。つまり、直前画素での差分を状態とし、注目画素での差分を符号化対象値とする提案の1次マルコフモデルの意義が裏付けられる。

状態数が極めて少ない場合として、同図(b)に直前画素での差分が-15~-15, -16以下, 16以上の3状態の



(a) Occurrence distribution of difference at the present pixel when the difference at the previous pixel is 0, 4 or 8.



(b) Occurrence distribution of difference at the present pixel when the difference at the previous pixel is reduced to 3 states of ~ -16 , $-15 \sim 15$ or $16 \sim$.

図 4.5: 注目画素での差分の出現分布の例 (city1, Green)

表 4.1: 256階調値の縮退差分

MSB	bit 7	signifies mainly plus or minus sign of difference	
	bit 6	very low probability of occurrence	
	bit 5	low probability of occurrence	
	bit 4	↑	
	bit 3		
	bit 2		Reduction
	bit 1		↓
LSB	bit 0	high probability of occurrence	

ときの注目画素での差分の出現分布の例を示す。この極端な状態の縮退の例からも、16以上の差分では分布が正方向にずれ、16以下では負方向にずれることから、直前画素での差分と注目画素での差分には相関があることがわかる。

4.3.2 縮退差分の状態

縮退差分1次マルコフモデルで使用する縮退差分は、0付近と255付近に集中した出現分布となる。縮退差分の最上位ビットの0は差分が主に正であることを、1は差分が主に負であることを意味する。他方、差分は0を中心として-16~16、-32~32あるいは-64~64の範囲に集中して分布する。

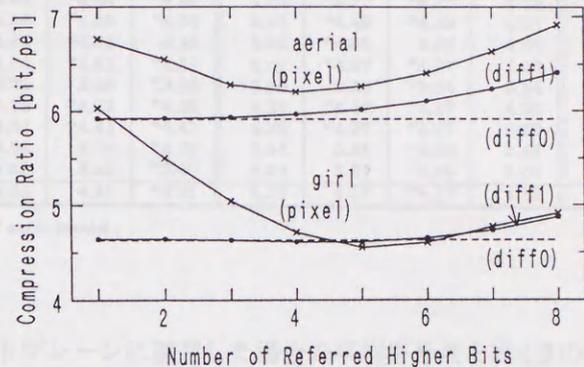
従って、256階調値の縮退差分の8ビットは表4.1のように表現できる。画素値1次マルコフモデルでは上位ビットを残した状態に縮退する[26]。縮退差分の場合も、変化の激しい下位のビットを縮退することが望まれる。出現頻度の低いbit6やbit5は、状態数の減少には寄与しなく、そのまま残しても悪影響は及ぼさないとと思われるため、本章では、画素値1次マルコフモデルの場合と同様に、下位のビットの状態からの縮退について扱った。

4.3.3 状態数と圧縮率

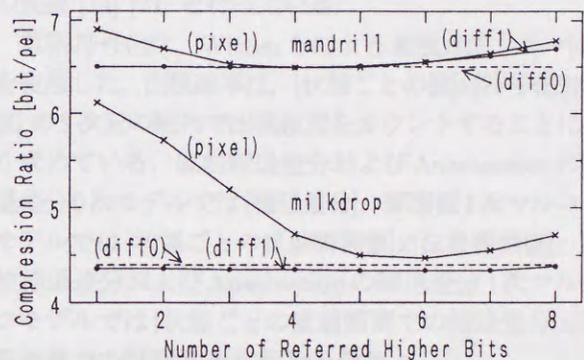
図4.6に256階調画像の上位のビットプレーンを状態とみなした場合の圧縮率の推移の例を示す。図中、(pixel)は画素値1次マルコフモデルを、(diff1)はAnastassiouの縮退差分1次マルコフモデルを意味する。また、(diff0)はAnastassiouの縮退差分0次モデルを意味し、比較のための参考値とした。

同図(a)と(b)から明らかのように、画素値の変化の激しい画像aerialと画像mandrillでは直前画素と注目画素での縮退差分の相関を利用する利点は得られない。また、画像girlと画像milkdropでもその効果は低い。

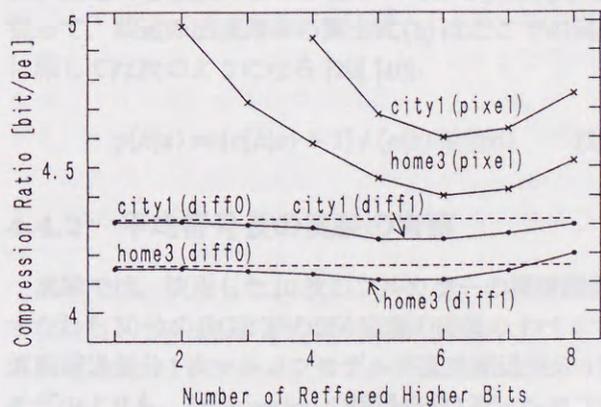
画像girlでは、上位5ビットに状態を縮退した画素値1次マルコフモデルが最も圧縮率が低くなる。ミルク滴が垂直に跳ね返る画像milkdropでは、画素当たりの平



(a) aerial, girl (256x256 pels, Green).



(b) mandrill, milkdrop (512x512 pels, Green).



(c) city1, home3 (800x600 pels, Green).

- (pixel): pixel value 1st-order Markov model,
- (diff1): Anastassiou's reduced difference 1st-order Markov model,
- (diff0): previous reduced difference 0-order model.

図 4.6: 状態ごとの圧縮率の例

表 4.2: フルカラー標準画像の平均符号長 (800x600 pels, 8x3bits/pel) [bit/pel]

Model Image	Pre. *1	Anastassiou's	Pixel Value				Previous Reduced Difference			Anastassiou's Reduced Difference				JBIG *3 gray code
			*2				1st-Order Markov Model			**				
			Reduced Difference 0-Order Model	5 bit 32 lvl	6 bit 64 lvl	7 bit 128lvl	8 bit 256lvl	4 bit 16 lvl	5 bit 32 lvl	6 bit 64 lvl	4 bit 16 lvl	5 bit 32 lvl	6 bit 64 lvl	
auto1	4.76	*4.66	4.86	*4.83	4.89	5.02	4.72	*4.71	4.72	4.55	*4.54	*4.54	4.57	4.87
bear1	5.06	*5.00	5.11	*5.09	5.17	5.31	4.97	*4.94	*4.94	4.78	*4.77	*4.77	4.79	5.30
city1	*4.63	4.66	*4.78	4.81	*4.78	4.89	4.58	*4.55	*4.55	4.51	*4.49	*4.49	4.51	4.90
city2	4.87	*4.64	5.04	*4.99	5.02	5.13	4.84	*4.83	4.84	4.62	*4.61	4.62	4.67	4.87
desk1	4.63	*4.33	4.78	*4.71	4.74	4.85	4.54	*4.51	*4.51	4.40	*4.37	*4.37	4.39	4.54
face1	3.80	*3.64	3.97	3.78	*3.75	3.80	3.72	3.69	*3.66	3.59	3.56	*3.54	3.54	3.58
home3	4.39	*4.27	4.52	*4.45	*4.45	4.54	4.33	*4.32	*4.32	4.19	*4.17	*4.17	4.20	4.34
home4	4.46	*4.36	4.60	*4.51	*4.51	4.61	4.43	*4.41	*4.41	4.29	*4.27	*4.27	4.30	4.40
room1	3.61	*3.48	3.82	3.67	*3.63	3.69	3.58	3.58	*3.57	3.44	3.44	*3.43	3.45	3.55
room7	3.72	*3.62	3.96	3.82	*3.78	3.85	3.62	3.61	*3.60	3.52	3.51	*3.49	3.50	3.53
Average	4.39	*4.27	4.54	*4.47	4.47	4.57	4.33	4.31	*4.31	4.19	4.17	*4.17	4.19	4.39

* : The best ratio of each model.

均予測差分は直前画素の3.0に対して直上画素の2.7であることから、Anastassiouの縮退差分1次マルコフモデルの効果が発揮されていない。

しかし、同図(c)に示す画像city1と画像home3のより解像度の高い画像の例では縮退差分1次マルコフモデルの効果が高いことがわかる。いずれの画像でも、画素値1次マルコフモデルの最良値はAnastassiouの縮退差分0次モデルには及ばないが、Anastassiouの縮退差分1次マルコフモデルの最良値はAnastassiouの縮退差分0次モデルよりも良い圧縮率となる。画像city1と画像home3では上位5ビットあるいは上位6ビットへ縮退したときに最良の圧縮率が得られる。

以上の例より、Anastassiouの縮退差分1次マルコフモデルは、同じ画像において、画素値の変化が激しいために直前画素と注目画素での差分の相関が低い低解像度には不向きであるが、差分の相関がより高くなる高解像度では効果が期待できることがわかる。

4.4 シミュレーション実験と考察

4.4.1 平均符号長の実験

直前縮退差分およびAnastassiouの縮退差分0次マルコフモデル、画素値1次マルコフモデル、直前縮退差分およびAnastassiouの縮退差分1次マルコフモデルの5つのモデルを、800x600画素の代表的な10枚のSIDBA標準画像(フルカラー、24ビット/画素)に適用したシミュレーション実験の結果を表4.2に示す。表中の1次マルコフモデルのbitとlevel(lvl)は、縮退した後の状態数である上位のビット数とそのレベルを示す。また、平均符号長は、RGB(各8bit/画素)ごとの画像データに対する平均符号長の平均を示す。

比較のために、JBIGの算術符号化[20][18]を8ビット

トプレーンに適用した場合の平均符号長を表4.2の右欄に示す。符号化に際し、ここでは、ビットプレーンの符号化での常套手段である画素値からグレー符号への変換[14][21]を行っている。

算術符号化は、Wittenらによる実現方法[39]~[41]を使用した。出現確率は、[状態ごとの値]x[符号化対象値]の2次元の配列で出現頻度をカウントすることにより求めている。直前縮退差分およびAnastassiouの縮退差分0次モデルでは[縮退差分]、画素値1次マルコフモデルでは[状態ごとの直前画素値]x[注目画素値]、直前縮退差分およびAnastassiouの縮退差分1次マルコフモデルでは[状態ごとの直前画素での縮退差分]x[注目画素での縮退差分]の配列となる。

過去の出現確率が0では算術符号化が行えないために、上述の各頻度カウンタはすべて1で初期化する。従って、前述の出現確率の算出式(8)はここでの実現に際しては次のようになる[29][40]。

$$p(k|z) = (c(k|z) + 1) / (c(z) + 256) \quad (10)$$

4.4.2 平均符号長の実験の考察

実験では、使用した10枚のフルカラーの標準画像、すなわち30枚のRGB別の256階調の画像のすべてで、直前縮退差分1次マルコフモデルが直前縮退差分0次モデルよりも、Anastassiouの縮退差分1次マルコフモデルがAnastassiouの縮退差分0次モデルよりも低い平均符号長が得られた。直前縮退差分およびAnastassiouの縮退差分1次マルコフモデルの両モデルで、6ビットへ状態を縮退したときに最も低い平均符号長が得られる。画素値1次マルコフモデルでは画像face1を除き、いずれの画像でも直前縮退差分0次モデルよりも平均符号長が高い。

表 4.3: Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデル (**) による平均符号長の改善率 [%]

Image	Previous Reduced Difference 0-Order Model *1	Pixel Value 1st-Order Model *2	JBIG Gray code *3
auto1	4.6	6.0	6.8
bear1	5.7	6.3	10.0
city1	3.0	6.7	8.4
city2	5.1	7.4	5.3
desk1	5.6	7.2	3.7
face1	6.8	6.4	1.1
home3	5.0	6.3	3.9
home4	4.3	5.3	3.0
room1	5.0	6.5	3.4
room7	6.2	8.6	1.1
Average	5.1	6.7	4.7

*1, *2, *3, **: Corresponds to the cases with asterisk marks in Table 2.

画像 face1 (長髪の上半身像) で直前画素との差分を用いる直前縮退差分0次モデルの効果は低いのは、この画像が他の画像と異なり、水平方向よりも垂直方向での相関が高い (各画素当たりの平均予測差分が直前画素3.0に対して直上画素2.7) のがその原因であると思われる。

表4.3に、6ビットへ状態を縮退したときの提案の Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデルの、直前縮退差分0次モデル、画素値1次マルコフモデル、およびJBIGによるビットプレーン符号化方式に対する平均符号長の改善率を示す。

結果として、従来の画素値1次マルコフモデルの最良の平均符号長 (4.47bit/pel) に対して、提案する Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデルの最良の平均符号長 (4.17bit/pel) は、6.7%の改善率となる。なお、従来の直前縮退差分0次モデルの平均符号長 (4.39bit/pel) に対して、Anastassiou の縮退差分0次モデルの最良の平均符号長 (4.27bit/pel) は、2.7%の改善率となる。

JBIG のビットプレーン方式との比較では、Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデルは、4.7%の平均符号長の改善率となる。この差は、6ビットへ状態を縮退した1次マルコフモデルでは、ノイジーな最下位の2つのビットプレーンが出現確率に反映されないのに対して、JBIG のビットプレーン方式では、これらのビットプレーンも10参照画素で注目画素値を低い予測確率で推定しながらビットごとに算術符号化を行うのがその一因である。

文献 [21] では、JBIGを階調画像に適用した場合、JPEG のオプションであるロスレス符号化 (Spatial方式) [18] と圧縮率は遜色がないことが報告されているが、文献 [43] に見られるように、周辺画素の画素値を前処理として考慮するなど、JBIG の階調画像への適用にあたっては改善の余地があると思われる。画素値のままの符号化に関しても、さらに、同様の改善の検討が必要と思われる。

4.4.3 処理時間

図4.6(c) に示す256階調の800x600画素の画像 city1 (Green) を例としてパソコン (Pentium 133MHz) 上で処理時間を測定した。Anastassiou の縮退差分1次マルコフモデル (6ビットへ縮退) の符号化の時間は16秒、復号化は25秒で、状態の縮退なしの画素値1次マルコフモデルの場合はそれぞれ14秒と25秒であった。

処理時間は、2次元画像データからの縮退差分の算出のオーバーヘッドに大きくは左右されないことがわかる。復号化の時間が符号化の時間よりも長いのは、試作プログラムの場合、復号化された確率から注目画素値を求める際に出現リストをリニアサーチするためである。

4.5 第4章のむすび

1次マルコフモデルの符号化対象値と状態の両方に縮退差分を用いる確率モデルを提案し、解像度の高い256階調画像では、従来の直前縮退差分0次モデル、状態を縮退し画素値を符号化対象値に用いる1次マルコフモデルモデル、およびJBIGをビットプレーンに適用した場合よりも良い平均符号長が得られることを示した。また、具体的な予測差分の算出に、直前画素との予測差分に加えて、2次元の画像データを用いた Anastassiou の予測値を採用することにより、さらに平均符号長が改善されることを示した。

今後の課題として、他の高解像度の標準画像を用いた実験や、より多くの近傍画素からより小さな予測差分を求める方式の研究があげられる。

第5章 2 予測法による符号化

階調画像は一般に、階調値が均一なあるいは徐々に変化する平坦部分や階調値が急激に変化する境界（輪郭）部分で構成される。従来の予測符号化を用いた階調画像の可逆符号化では、画像のこのような特徴が逐次変化するにかかわらず、固定化されたひとつの階調値の予測法が用いられていた。三菱電機（情報技術総合研究所）の文献 [43] では、7近傍画素を用いて画像の境界を検出し、境界線の方向などの条件に応じてあらかじめ割りつけられた予測法を適応的に選択する方法を提案している。しかし、テスト画像を用い、境界の条件に応じてあらかじめ予測法を割りつけるこの方法は、さまざまな特徴をもつ種々の画像に対して必ずしも有効であるとは限らない。（この方法との比較は次章で述べる。）

そこで、本章では、画像の符号化と並行して複数の予測法による予測を行い、近傍画素での予測差分が最小であった予測法のパターンごとに予測差分が最小であった予測法の出現頻度を累積し、この頻度リストを参照することにより、注目画素での最適な予測法を決定する符号化方式を提案する。本提案方式の特徴は、実際の画像で並行して複数の予測法による予測を行うことにより、符号化対象の画像の特徴をとらえた予測法の選択を適応的に行う点にある。そのため、本提案方式は種々の画像に対して汎用的に適用することができる。本提案方式によれば、従来のあらかじめ定められたひとつの階調値予測法を用いる場合よりも符号量を改善することができる。

本章では、まず、複数の予測法を用いるための2つのアプローチについて述べる。次に、階調値の予測法と最小値の実験結果について述べ、さらに、予測法選択の方法と適応的予測の実験結果について述べる。最後に、数多くの標準画像を用いたシミュレーション実験により提案する方法の有効性を確認する。

なお、本章でも、256階調の画像を対象とし、確率モデルとして、予測値と注目画素値との予測差分(9ビット、-255~255)を8ビット(0~255)へ縮退した縮退予測差分(reduced prediction difference)モデルを用いる。

5.1 複数の予測法へのアプローチ

複数の予測法を用いることにより予測差分をより小さくすることが可能となる。この手法の実現法として、(1) 実際に予測差分が最小であった予測法の識別番号とその予測差分で符号化する方法と、(2) 予測差分が最も小さいであろうと推定される予測法により適応的に符号化する方法とが考えられる。これらの2つの方法による符号量の違いの概念を図5.1に示す。

5.1.1 最小の予測差分を符号化する方法

図5.1において上から3番目がこの方法に相当する。実際に最小の予測差分を使用するので、予測差分の符号量は最も少なくなる。しかし、どの予測法により予測差分を求めたかの情報が復号時に必要なため、予測法の識別番号も符号化しなければならない。

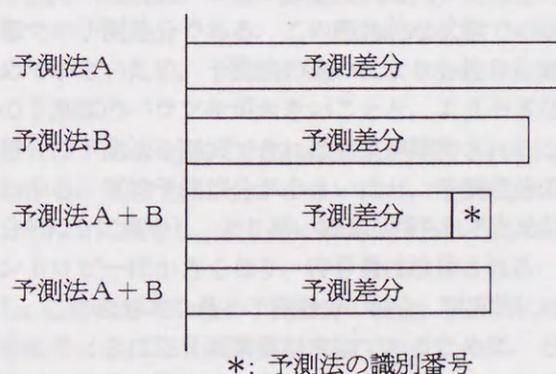


図 5.1: 複数の予測法による符号量

5.1.2 最小の予測差分を符号化する方法の実験

一つの算術符号器を用い、実際に最小の予測差分と予測法の識別番号を交互に符号化することにより、圧

表 5.1: 最小の予測差分の符号化

Image	Minimum Prediction Difference	Compression Ratio			
		With PMIN		Without PMIN	
		[%]	[bit/pel]	[%]	[bit/pel]
aerial	7.72	81.0	6.48	67.8	5.43
couple	2.55	57.8	4.62	45.7	3.66
girl	3.29	63.6	5.09	50.7	4.05
mandrill	12.11	87.6	7.01	74.8	5.98
milkdrop	2.65	60.5	4.84	47.8	3.82
city1	2.84	61.4	4.91	49.1	3.93
home3	2.79	57.9	4.63	45.5	3.64

PMIN.: Prediction Method Identification Number

縮率を求めた。ここでは、階調値予測法として、3章で述べたGrahamaの予測値と、直前画素値と直上画素値の平均値の2つの予測法を用いた。また、比較のために、実際の最小の予測差分のみも符号化した。但し、後者のときの符号化データは復号できない。その実験結果を表5.1に示す。

同表より、予測法の識別番号の有る場合は無い場合よりも、約1[bit/pel]の符号量が増すことがわかる。これは、2つの予測法を識別するために必要な1ビットに相当する。この1ビットの差は大きく、後述の平均値の予測法による予測差分を符号化した結果に比較すると、識別番号無しの場合は、圧縮率は低い、識別番号有りの場合は、圧縮率は逆に高い。つまり、識別番号を伴うこの方法は、識別に必要な1ビットがこのままでは圧縮の対象とはならないので、符号化の方法としては望ましくない。

5.1.3 適応的に符号化する方法

図5.1において上から4番目がこの方法に相当する。この場合は、予測差分が最も小さいであろうと推定される予測法を何らかの方法で符号化、復号化のときに定めなければならない。しかし、前述の予測法の識別番号の符号化は不必要となる。

本章では、以降、このアプローチに基づき、2予測法による符号化を検討する。

5.2 階調値の予測法

5.2.1 予測法と予測差分

第3章の図3.1で3近傍画素の位置とGrahamとAnastassiouの2つの階調値予測法を示したが、ここでは、さらに、3つの予測値を加えて、5つの階調値予測法を図5.2にまとめて示す。直前画素値や直上画素値を固定して予測値とする予測法では、局所的な画像

• Left Pixel Prediction $S_0 = S_1$
• Upper Pixel Prediction $S_0 = S_3$
• R.E.Graham's Prediction $S_0 = S_1, \text{ if } S_2 - S_1 > S_3 - S_2 $ $S_0 = S_3, \text{ otherwise}$
• Average Pixel Prediction $S_0 = (S_1 + S_3) / 2$
• D.Anastassiou's Prediction $S_0 = S_1 + (S_3 - S_2) / 2$

図 5.2: 5つの階調値予測法

の特徴を反映できない。その欠点を改善した予測法として、適応的に直前画素値あるいは直上画素値を選択するGrahamの予測法[42]が知られている。この予測法では、水平方向の変化が大きいときは直上画素値を予測値とし、垂直方向の変化が大きいときは直前画素値を予測値とする。一方、局所的な画素値の変化を大域的に均一化する予測法として、直前画素値と直上画素値の平均値を予測値とする方法が知られている[23], [18]。その他、直前画素値を水平方向の変化分で補正するAnastassiouの予測法が有効であることが知られている[10]。

各予測法を45のRGB別のSIDBA標準画像へ適用したときの画素当たりの平均予測差分(絶対値)を表5.2に示す。この実験結果では、Anastassiouの予測法が最も小さい平均予測差分となっている。

同表中の右欄の最小値は、各注目画素における上述の5つの階調値予測法の予測値と実際の注目画素値との差分(絶対値)の最小値を逐次選択した理想的な状態での予測差分である。この理想的な状態での値は極めて小さいため、予測法の違いにより各注目画素値での予測値のバラツキが大きいことと、より小さな予測差分の予測法を選択できれば効果が期待されることがわかる。平均予測差分が小さいほど、予測差分の確率分布は0に集中し、より高い確率が得られるために、エントロピーは小さくなり、符号量は改善される。しかし、この理想的な最小予測差分の場合、現実的には、復号化のときは注目画素値が未知であるために、どの予測法の差分が最小であるかを定めること、つまり、符号化で行った予測法の選択を再現することは困難となる。そのため、復号化のときも符号化のときと同じ予測法の選択が可能な予測法の確立が必要となる。

以上では、図5.2に示した代表的な5つの階調値予測法について述べたが、その他、国際標準JPEGのオプションであるロスレス符号化(DPCM)方式[18]で

表 5.2: 画素当たりの平均予測差分 [1/256]

	Upper Pixel	Left Pixel	Graham's Predictor	Average Pixel	Anasta's Predictor	Minimum
Average of 45 SIDBA Images	7.12	6.15	5.56	5.41	5.39	2.62

Minimum: average prediction difference per pixel when minimum values of 5 prediction methods are accumulated.

表 5.3: 1 予測法の画素当たりの平均予測差分 [1/256] とエントロピー [bit/pel]

SIDBA Image (Green)	Average Prediction Difference per Pixel				Entropy [bit/pel]			
	Left Pixel	Graham's Predictor	Average Predictor	Anasta's Predictor	Left Pixel	Graham's Predictor	Average Predictor	Anasta's Predictor
aerial	12.50	11.69	*10.48	10.81	6.06	5.97	*5.81	5.85
couple	5.61	* 3.73	4.32	4.21	4.64	*4.15	4.39	4.36
girl	5.53	4.97	* 4.48	4.76	4.75	4.60	*4.49	4.60
mandrill	17.27	17.98	*16.22	17.27	6.54	6.55	*6.45	6.54
milkdrop	4.98	4.02	* 4.01	4.10	4.53	4.39	*4.31	4.38
city1	4.27	4.12	5.31	* 3.72	4.48	4.46	4.80	*4.32
home3	5.09	4.27	4.37	* 4.08	4.59	4.42	4.40	*4.37

*: the best value of average prediction difference per pixel and entropy.

は、直前画素値、直上画素値、それらの平均値、および Anastassiou の予測値のほか、左上画素、 $S1+S3-S2$ 、 $S3+(S1-S2)/2$ を加えた計7つの階調値の予測法があり、符号化の前にあらかじめいずれかの予測法を選択する規定となっている。このように階調値の予測法には多くの方法があるが、本章では、図5.2に示した予測法を中心に検討する。

5.2.2 最小の予測差分とエントロピー

図5.2に示した階調値予測法をここでは1予測法(1-prediction method)と呼ぶ。このうち、直上画素値を予測値とした場合を除く4つの予測値について、いくつかの代表的なSIDBA標準画像(Green)での画素当たりの平均予測差分(絶対値)とエントロピーを表5.3に示す。aerial,coupleおよびgirlは256x256画素、mandrillとmilkdropは512x512画素、city1とhome3は800x600画素の256階調の標準画像である。同表中の*印はこれら4つの予測法中で予測差分あるいはエントロピーが最小の場合を示す。このように、画像によっても最適な予測法は異なることがわかる。

ここでのエントロピーの算出は、1画像分の最終的な統計データから得られる静的な出現確率ではなく、動的に各画素ごとに逐次得られる出現確率を用いて行った。K種のレベルのうち、あるレベル*i*の出現確率を P_i とし、全画素数を N 、レベル*i*の出現する画素数を

N_i とすれば、平均情報量(エントロピー) H は、

$$H = \left(-\sum_{i=0}^{K-1} N_i \log_2 P_i\right) / N \quad [\text{bit/pel}] \quad (1)$$

となり、全画素数 N が十分に大きいとき、出現確率 P_i は、全画素数 N に対するレベル i の出現画素数 N_i の比として表現できる [2]。各レベルの静的な情報量の和は全画素での動的な情報量の和に対応するので、第 j 画素目 ($j = 1 \sim N$) の出現確率を P_j とすると、式(1)より、動的な出現確率の変化を考慮した平均情報量 H_d は、

$$H_d = \left(-\sum_{j=1}^N \log_2 P_j\right) / N \quad [\text{bit/pel}] \quad (2)$$

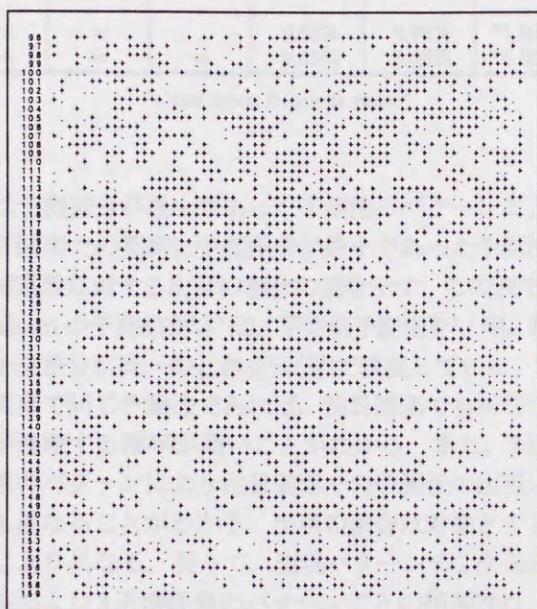
となる。ここでは、出現確率 P_j は、第 $j-1$ 画素目までの全出現画素数 $j-1$ に対する、第 j 画素目の予測差分の第 $j-1$ 画素目までの出現回数の比として得られる。

表5.4に、Grahamの予測法、平均値予測法および Anastassiouの予測法のうちからそれぞれ二つの予測法を用いた2予測法(2-prediction method)について、いずれかの予測差分のうちの小さい方(最小値)を逐次累積したときの画素当たりの平均予測差分とエントロピーを示す。この実験結果から、Grahamの予測法と平均値予測法の組合せが他の組合せよりも優れていることがわかる。これは、Grahamの予測法は直前あるいは直上画素への依存性の強い領域、平均値予測法は依存性の弱い領域に対して有効であり、これらの二

表 5.4: 2 予測法の予測差分の最小値を累計したときの画素当たりの平均予測差分 [1/256] とエントロピー [bit/pel]

SIDBA Image (Green)	Average Prediction Difference per Pixel			Entropy [bit/pel]		
	Graham & Average	Average & Anasta	Anasta & Graham	Graham & Average	Average & Anasta	Anasta & Graham
aerial	* 7.71	7.80	8.72	*4.45	4.47	4.62
couple	* 2.54	3.27	2.84	*2.95	3.23	3.07
girl	* 3.27	3.45	3.76	*3.28	3.34	3.45
mandrill	*12.11	12.19	14.02	*5.07	5.08	5.28
milkdrop	* 2.65	3.04	3.03	*3.05	3.15	3.23
city1	2.84	* 2.78	3.04	3.12	*3.10	3.21
home3	* 2.78	3.00	3.12	*3.06	3.13	3.20

*: the best value of average prediction difference per pixel and entropy.



+ : Graham's predictor
space : Average predictor
.: the same difference
(Xstart, Ystart) = (80, 96), Width = 64 pels

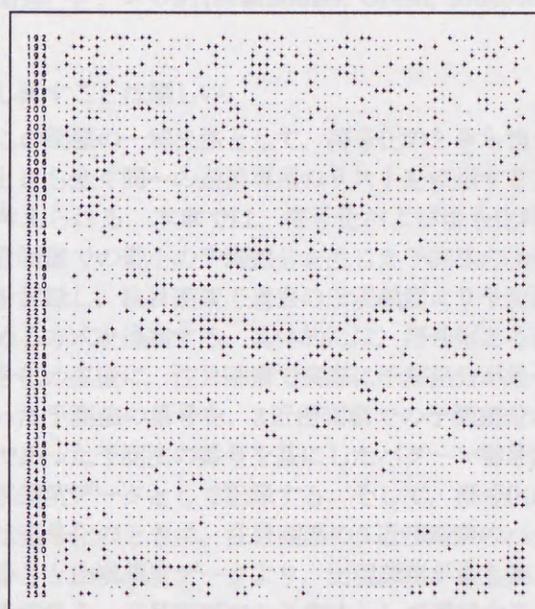
図 5.3: 最小の予測差分の出現パターンの例 (girl の顔部)

つが互いに補完しあうためであると思われる。いずれの画像においても、二つの階調値予測法を併用することにより単独の予測法を用いる場合よりも、画素当たりの平均予測差分とエントロピーをともに改善できることがわかる。

5.3 予測法の選択

5.3.1 予測法の選択の指針

2 予測法のときの実際の画像での予測差分の最小値の発生の様子を観察してみる。図 5.3 と図 5.4 に画像



+ : Graham's predictor
space : Average predictor
.: the same difference
(Xstart, Ystart) = (64, 192), Width = 64 pels

図 5.4: 最小の予測差分の出現パターンの例 (girl のスカーフ部)

girl(256x256 画素, Green) の中央の顔面部と首に巻かれたスカーフ部の Graham の予測値の予測差分が最小であった画素 (+ 印), 平均値予測法の予測差分が最小であった画素 (スペース印) および両方の予測差分が同じであった画素 (. 印) を示す。同じ予測法で予測差分が最小であった画素の出現パターンには両図から明らかのように 2 次元の連続性が観察される。

つまり、例えば、注目画素の 3 近傍 (直前, 左上, 直上画素) での予測差分が最小であった予測法の出現パターンと注目画素での予測差分が最小であった予測法の出現には相関がみられる。表 5.5 に、3 近傍画素で実

表 5.5: 最小の予測差分の予測法の出現の割合の例 (girl)

Prediction Method with Minimum Difference at the 3 Neighbor Pixels			Occurrence Percentage of Prediction Method with Minimum Difference		
Left Pixel	Upper-Left Pixel	Upper Pixel	Graham +	Average -	Equal =
+	+	+	*3.78%	2.12%	0.84%
+	+	-	1.75%	*2.22%	0.65%
+	+	=	*0.74%	0.72%	0.57%
+	-	+	*1.95%	1.88%	0.59%
.
.
-	-	+	2.24%	*3.00%	0.85%
-	-	-	3.13%	*6.31%	1.64%
-	-	=	1.00%	*1.78%	0.99%
.
.
=	=	-	0.60%	0.96%	*1.00%
=	=	=	0.69%	0.98%	*4.05%

*: the more frequent case.

際に予測差分が最小であった予測法のパターンごとの注目画素での実際に予測差分が最小であった予測法の全面素数に対する出現の割合の例を示す。この表では、Graham の予測法を '+' 印、平均値予測法を '-' 印、および予測差分が同一のときを '=' 印で表現している。3近傍画素で同じ予測法であれば、注目画素でも同じ予測法が連続する確率が高いことがわかる。また、3近傍画素のパターンにより注目画素での予測法の出現の確率も異なることがわかる。出現の割合は対象とする画像により異なる。従って、出現パターン of 2次元の連続性および3近傍画素のパターンごとの相関性は、対象画像の局所的な特徴が階調値の予測法に反映されているためであると考えられる。本章の提案方式では次に述べるようにこの特徴ある2次元の出現パターンを利用する。

同様に、SIDBA 標準画像 home3 において、Graham の予測値の予測差分が最小であった画素を黒 (1)、そうでない画素を白 (0) としたときの2値画像を図 5.5 に示す。輪郭部だけでなく、ほぼ平坦な領域においても領域により異なる出現パターン of 2次元の連続性が観察されることがわかる。

5.3.2 適応的な選択

先に述べたように、複数の階調値予測法から画素ごとに予測差分のより小さい予測法を適応的に選択することにより符号量を改善することが期待できる。しかし、予測法ごとの複数の予測差分の頻度リストつまり複数の出現確率を使用し、符号化のときに選択した最小の予測差分を生じる予測法を再び復号化のときも選



図 5.5: Graham の予測値による予測差分が最小の画素の出現パターンの例 (画像 home3, Green, 800x600)

択し直すことは難しい。

この問題の一解決法として、符号化のときも復号化のときも全く同一の選択専用のリストを使用する方法が考えられる。本章では、符号化および復号化時に、注目画素での最小の予測差分を生じた予測法の出現頻度を記録し、注目画素で過去の出現頻度より予測法を定める方式を提案する。具体的には、符号化あるいは復号化の直後に、注目画素で実際に予測差分が最小であった予測法の番号を、3近傍画素での予測差分が最小であった予測法の番号を基にしたパターン番号別に出現頻度データとして記録する。そして、符号化あるいは復号化のときに、注目画素の3近傍画素のパターン番号と出現頻度データより、出現頻度が最も高かった予測法を、注目画素での予測法として選択する。

本提案方式は完全には局所的ではないが、画像の最初の画素から注目画素の直前の画素までの出現頻度の累計データを使用するので、対象とする画像の今までの画像の特徴を反映した推定が行える利点がある。また、この方式は3つ以上の予測法においても可能であるが、ここでは簡単化のために、2予測法の場合に効果の高かった Graham の予測法と平均値予測法の組合せを使用して考察する。2予測法の場合の本提案方式の構成を図 5.6 に示す。

2予測法により予測差分のより小さいと推定される方を選択する場合、両予測法による予測差分が、例えば0などのように、同一のときが生じる。この状態も含めて出現頻度データを構成することとし、3近傍画素における Graham の予測法、平均値予測法あるいは同一の3通りの、つまり [3通り]x[3通り]x[3通り] の計27通りのパターンに対する、Graham の予測法、平均値予測法あるいは同一の3通りの出現頻度を同図に示す最小予測差分カウンタ (Minimum Difference Counter)

表 5.6: 2 予測法の選択された予測値による画素当たりの平均予測差分 [1/256] とエントロピー [bit/pel]

SIDBA Image (Green)	Average Prediction Difference per Pixel				Entropy [bit/pel]			
	Graham & Average	Average & Anasta	Anasta & Graham	Gra.& Ave. 8 Dynamic Range	Graham & Average	Average & Anasta	Anasta & Graham	Gra.& Ave. 8 Dynamic Range
aerial	*10.44	10.49	10.85	10.48	*5.81	*5.81	5.86	*5.81
couple	3.51	4.15	3.62	* 3.50	4.09	4.33	4.13	*4.08
girl	* 4.33	4.41	4.78	4.35	*4.45	4.47	4.58	*4.45
mandrill	16.08	16.12	17.36	*15.88	6.44	6.44	6.55	*6.42
milkdrop	3.56	3.87	3.79	* 3.39	4.21	4.27	4.32	*4.16
city1	3.82	* 3.66	3.75	3.81	4.36	*4.30	4.33	4.35
home3	3.98	4.06	3.93	* 3.87	4.30	4.32	4.32	*4.27

*: the best value of average prediction difference per pixel and entropy.

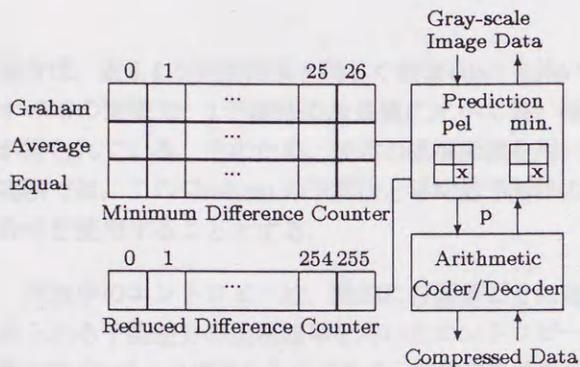


図 5.6: 提案方式の構成 (2 予測法)

でカウントする。同図の予測 (Prediction) 部に示すように、各予測法での予測値は画素値を記憶する 2 ラインバッファ内の 3 近傍画素の画素値を使用し、予測法は、実際に予測差分が最小であった方の予測法の番号を記憶する 2 ラインバッファ内の 3 近傍画素での予測法の番号を使用する。3 近傍画素で実際に予測差分が最小であった予測法の 3 つの番号より定まるパターン番号で最小予測差分カウンタを検索し、3 つのケース中で予測差分が最小であった出現頻度の高いケースを注目画素での予測法として選択する。但し、選択されたものが同一の場合は、ここでは Graham の予測法で予測する。

次に、選択された予測法で求めた予測差分を縮退した縮退予測差分 (0~255) に対応する出現回数を、同図に示す縮退差分カウンタ (Reduced Difference Counter) から求め、さらに、今までの出現画素数とから求めた縮退予測差分の出現確率を同図中の算術符号器で符号化する。復号化の際は、算術復号器で復号された確率と縮退差分カウンタから縮退予測差分を復号し、上述したように注目画素での予測法があらかじめ定まるの

でその予測法を用いて、注目画素値を復号する。

なお、同図中の算術符号器と算術復号器は、本章では JPEG の QM-Coder [18] ではなく、Witten らによる多値算術符号化の実現方法 [39], [40], [41] を使用している。この方法では、同図に示す 256 個のカウンタを含む縮退差分カウンタから対応する縮退予測差分のカウントを求め、その値を総出現数で割った出現確率で算術符号化し、その後、そのカウンタをカウントアップする。

5.3.3 ダイナミックレンジの考慮

階調値を予測する場合、参照画素間のダイナミックレンジ (最大値-最小値) に応じて区分分けを行うことにより、より正確な予測が行えることが知られている [43]。本提案方式でもこのダイナミックレンジの手法を加味し、2 予測法の最小予測差分カウンタをさらに 8 つの直前と直上画素間のダイナミックレンジ (2 のべき乗未満ごと) で区分する別法を提案する。

5.4 標準画像を用いた実験

5.4.1 2 予測法の実験

表 5.6 にいくつかの代表的な SIDBA 画像 (Green) について本提案方式の 2 予測法により選択された画素値予測法を用いたときの画素当たりの平均予測差分とエントロピーを示す。Graham の予測法と平均値予測法の組合せが良く、Anastassiou の予測法との組合せは 800x600 画素の画像 city1 で良い。表 5.3 の 1 予測法と比較すると、Anastassiou の予測法との組合せの 2 予測法の中には 1 予測法の最良値に比べて悪い場合がある。しかし、Graham の予測法と平均値予測法の組合せの

表 5.7: 縮退予測差分の確率モデルを用いた算術符号化の平均符号長 [bit/pel] と従来の多値符号化方式との比較

SIDBA Image (Green)	1-Prediction Method				2-Prediction Method				Pixel Value Method		
	—				—				8 Dynamic Range	JBIG Bit-Plane Coding (Gray Code)	1st-Order Markov Model (6bits)
	Left Pixel	Gra.	Ave.	Ana.	Gra. & Ave.	Ave. & Ana.	Ana. & Gra.	Gra. & Ave.			
aerial	6.11	6.02	*5.86	5.91	* 5.86	* 5.86	5.91	* 5.86	6.50	6.40	
couple	4.65	*4.19	4.41	4.38	4.13	4.35	4.17	* 4.12	4.28	4.55	
girl	4.78	4.64	*4.52	4.63	* 4.48	4.50	4.62	* 4.48	4.70	4.60	
mandrill	6.51	6.55	*6.41	6.50	6.40	6.40	6.51	* 6.38	6.70	6.55	
milkdrop	4.53	4.41	*4.31	4.40	4.22	4.28	4.34	* 4.18	4.38	4.47	
city1	4.46	4.45	4.72	*4.32	4.34	* 4.29	4.33	4.34	4.72	4.60	
home3	4.34	4.21	*4.15	4.16	4.07	4.09	4.12	* 4.04	4.30	4.40	

Gra.: Graham's predictor, Ave.: Average pixel predictor, Ana.: Anastassiou's predictor
*: the best value of average code length.

場合は、表 5.4 の実験結果と同じく画像 city1 を除いたすべての画像で、1 予測法の最良値に比べて良い結果が得られている。そのため、後述の標準画像を用いた実験では、この Graham の予測法と平均値予測法の組合せを使用することとする。

同表中のエントロピーは、動的に各画素ごとに逐次得られる予測差分の出現確率を用いたエントロピーの算出式 (2) により求めたものである。前述の多値算術符号化のときに使用される縮退予測差分カウンタから得られる出現確率を用いて式 (2) によりエントロピーを求めると、後述の算術符号化後の平均符号長とほぼ同一の値が得られるため、この値は示していない。これは、使用した多値算術符号器の符号化効率がほぼ 100% に近いことに起因するためと思われる。

表 5.7 に 1 予測法と 2 予測法による縮退予測差分の確率モデルを用いた算術符号化の平均符号長を比較して示す。2 予測法の最良値はすべての画像において 1 予測法の最良値よりも良い。また、同表に示す近傍画素のダイナミックレンジを加えた場合は、ダイナミックレンジを考慮しないときよりも、7 画像中の 4 画像で、わずかに平均符号長は改善される。

比較のために、まえがきで述べた従来の多値符号化方式 [21],[23],[26] による平均符号長を表 5.6 の右欄に示す。1 次マルコフモデルの場合は、条件として用いる直前画素値を上位 6 ビットへ縮退したときの平均符号長である。いずれの従来方式よりも、画像 couple を除き、直前と直上画素の平均画素値を用いた 1 予測法の効果が高いが、Graham の予測法と平均値予測法を組合せた 2 予測法の提案方式によりさらに改善できることがわかる。

5.4.2 SIDBA 標準画像

表 5.8 に、15 のフルカラー SIDBA 標準画像へ従来の方式 (直前画素値と平均画素値の 1 予測法) と提案方式を適用したときの選択された予測法による画素当たりの平均予測差分、エントロピーおよび平均符号長の実験結果を示す。画像は表 5.3, 表 5.4, 表 5.6 および表 5.7 で使用した 7 つの画像に加えて、800x600 画素の auto1, bear1, city2, desk1, face1, home4, room1, room7 の計 15 画像を使用し、RGB 別に計 45 枚の 256 階調画像を符号化した。表中の値は 45 枚の画像の平均値である。

2 通りの提案方式のいずれも従来の方式よりも改善された結果が得られる。同表の右側の欄に、従来の直前画素を予測値とした場合と、平均値予測法に対するダイナミックレンジを加えた提案方式の改善率を示す。これより、提案方式の有効性が確認できる。

5.4.3 SCID 高精細標準画像

表 5.9 に、ISO/JIS の SCID 高精細標準画像 (CMYK 成分, 256 階調) [46] へ従来の方式と提案方式を適用したときの選択された予測法による画素当たりの平均予測差分と、平均符号長の実験結果を示す。ここでは、各画像ごとに全成分での平均を算出している。同表中のはじめの 3 つの画像が 2048Hx2560V 画素で、残りの画像が 2560Hx2048V 画素である。

同表は先の表 5.7 の実験結果と同じ傾向を示している。平均符号長については、二通りの提案方式のいずれも従来の方式よりも改善された結果が得られ、ダイナミックレンジを付加した提案方式が最も良い。これより、提案方式の有効性が再確認できる。

表 5.8: 15フルカラーSIDBA標準画像の画素当たりの平均予測差分[1/256], エントロピーおよび平均符号長 [bit/pel]

SIDBA (RGB)	Existing Methods		Proposed Methods		Improvement Ratio of 8 Dynamic Range	
	Left Pixel	Average	Graham & Average		For Left Pixel	For Average
			—	8 Dynamic Range		
Average Prediction Difference	6.15	5.41	5.02	4.93	19.8%	8.9%
Average Entropy [bit/pel]	4.76	4.58	4.46	4.44	6.7%	3.1%
Average Code Length [bit/pel]	4.70	4.51	4.41	4.39	6.2%	2.7%

表 5.9: 8 SCID 高精細標準画像の画素当たりの平均予測差分 [1/256] (上段) と平均符号長 [bit/pel] (下段)

SCID (CMYK)	Existing Methods		Proposed Methods		Improvement Ratio of 8 Dynamic Range	
	Left Pixel	Average	Graham & Average		For Left Pixel	For Average
			—	8 Dynamic Range		
portrait	7.72	5.88	5.71	* 5.64	26.9%	4.1%
cafeteria	12.86	11.27	9.48	* 9.24	28.1%	18.0%
bicycle	7.09	5.81	5.10	* 4.84	31.7%	16.7%
fruitbasket	4.80	4.59	4.49	* 4.43	7.7%	3.5%
wine&table	6.03	5.26	5.05	* 4.75	21.2%	9.7%
orchid	3.33	2.83	2.81	* 2.75	17.4%	2.8%
musicians	13.05	10.50	10.46	*10.26	21.4%	2.3%
candle	15.89	13.45	12.69	*12.46	21.6%	7.4%
Average	8.85	7.45	6.97	* 6.80	22.0%	8.1%
portrait	5.03	4.69	4.66	* 4.64	7.8%	1.1%
cafeteria	5.65	5.55	5.32	* 5.29	6.4%	4.7%
bicycle	4.30	4.13	4.02	* 3.98	7.4%	3.6%
fruitbasket	4.34	4.30	4.27	* 4.26	1.8%	0.9%
wine&table	4.56	4.41	4.38	* 4.32	5.3%	2.0%
orchid	4.05	3.83	3.82	* 3.81	5.9%	0.5%
musicians	5.76	5.53	5.53	* 5.51	4.3%	0.4%
candle	6.22	6.04	5.96	* 5.92	4.8%	2.0%
Average	4.99	4.81	4.75	* 4.72	5.5%	1.9%

*: the best value of average prediction difference per pixel and entropy.

5.4.4 実験の考察

上述の標準画像を用いた実験で、二通りの提案方式のいずれも従来の方式よりも、平均予測差分、エントロピーおよび平均符号長のいずれも改善された結果が得られることが確認できた。従って、予測差分が最小であった予測法の番号の近傍画素でのパターンと頻度データより注目画素での予測法を定め、以降の予測のために、注目画素で二つの予測法から求めた最小の予測差分の予測法の頻度データをパターンごとに更新する、本章の提案する方式が有効であることが確認できる。

なお、本章では、1予測法と提案方式の2予測法の平均符号長の算出に、前述したWittenらによる多値算術符号化の実現方法を共通して用いた。算術符号化そのものについては、別法 [18], [45] や改良法 [31], [43] などがあるが、それらによる符号量の改善は本章の意図外とする。

5.5 第5章のむすび

画像の符号化と並行して二つの予測法による階調値の予測を行い、予測差分が最小であると推定される予測法を画素ごとに選択する方式を提案した。予測法の選択は、予測値と注目画素値との予測差分が最小であった予測法の番号の2次元の出現パターンは平坦部や境界部の画像の特徴を反映していることに着目し、予測差分が実際に最小であった予測法の番号を2ラインバッファで記憶し、注目画素の3近傍画素での最小であった予測法の番号のパターンごとの最小であった予測法の出現頻度データをもとに、最適な予測法を選択する方式とした。また、この方式に従来行われている近傍画素のダイナミックレンジで場合分けする手法を加味した方式も提案した。さらに、標準画像を用いた実験で本提案方式が画像の特徴の異なる種々の画像で従来方式よりも有効であることを確認した。

本章では、提案する複数の予測法のうち2予測法に限定して実験を行い、その有効性を示したが、今後の課題として、3予測法以上の実現方法の検討と評価があげられる。

7 近傍画素法との比較

本章をさらに発展させるために、本章の提案方式と従来の近傍画素法を用いて画像の符号化を行った。ここでは、近傍画素法と平均予測差分の予測法との比較を行う。図 7.1 は、近傍画素法と平均予測差分の予測法との比較を示している。図 7.1 は、近傍画素法と平均予測差分の予測法との比較を示している。図 7.1 は、近傍画素法と平均予測差分の予測法との比較を示している。

図 7.1 境界の方向を示す2次元パターン

近傍画素	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.1.1 境界の方向

境界の方向は、図 6.1 のようにして決定する。まず、注目画素の近傍画素の最大値と最小値の差分を計算し、差分が大きい場合は、境界の方向を決定する。差分が小さい場合は、境界の方向を決定しない。このようにして、境界の方向を決定する。図 6.1 は、境界の方向を示している。図 6.1 は、境界の方向を示している。図 6.1 は、境界の方向を示している。

6.1.2 ダイナミックレンジ

画像の符号化の大きさを決定するために、近傍画素での最大値と最小値からなるダイナミックレンジ (最大値 - 最小値) を計算する。このようにして、ダイナミックレンジを決定する。図 6.1 は、ダイナミックレンジを示している。図 6.1 は、ダイナミックレンジを示している。図 6.1 は、ダイナミックレンジを示している。

第6章 2予測法の7近傍画素法との比較

本章では、前章で述べた提案方式の有効性をさらに確認するために、前章のはじめで述べた三菱電機（情報技術総合研究所）より提案された7近傍画素を用いて画像の境界を検出することにより予測法を選択する別法 [43]（以下、ここでは7近傍画素法と呼ぶ）との比較について述べる。この方法は、国際標準JPEGのオプションであるロスレス符号化に代わる新しい多値ロスレス符号化の国際標準として、1995年7月に締め切られた9提案方式中のひとつであると推定される [44]。

共通の評価基準を用いた比較実験で、複数の予測法から適応的に予測法を選択する方法として、7近傍画素法よりも2予測法の方が有効であることを確認できた。

6.1 7近傍画素法

文献 [43] では、図 6.1 に示す7近傍画素を用いて境界の方向と参照画素内のダイナミックレンジ（最大値－最小値）から予測法を適応的に選択する方式を提案している。境界の方向は、7近傍画素中の指定された画素のしきい値との大小により、同図に示すように境界の方向が垂直、右斜め(/)、左斜め(\)、水平方向あるいはないか、また垂直、右斜め、左斜めについては注目画素の直前か直後かの計8モードのいずれかを決定する。同図中に境界の方向のモード(Boundary Mode)のBM0～BM7を示す。ダイナミックレンジは0から255までを16区分したモードとして扱う。そして、境界の方向の8モードと、ダイナミックレンジの16モード(Range Mode)の128の組合せに対して、あらかじめテスト画像により得られた4つの予測法のいずれかを割り付けておく。符号化あるいは復号化の際は、この割り当てられた表に基づき各画素ごとに適応的に予測法を選択する。

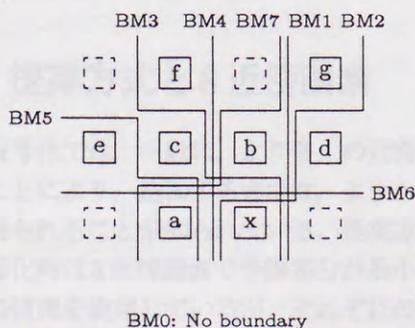


図 6.1: 7近傍画素法による境界方向の検出

表 6.1: 境界の方向を示す2値化パターン

BM	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	-	-	-
1	0	0	-	1	-	-	1
2	0	0	-	1	-	-	0
3	0	1	0	-	-	1	-
4	0	1	0	-	-	0	-
5	0	1	1	-	0	-	-
6	0	1	1	-	1	-	-
7	0	0	1	0	-	-	-

6.1.1 境界の方向

境界の方向は次のようにして決定する。まず、7近傍画素中の最大値と最小値の平均値をしきい値として、7近傍画素を2値化する。画素値がしきい値以下ならば0、しきい値より大きければ1とする。この2値化パターンあるいは0/1を反転した2値化パターンが表 6.1 に示す8通りのいずれかのパターンと一致すれば、その2値化パターンのモードが図 6.1 に示した境界の方向を示すことになる。従って、a='1' の場合は、すべての2値化パターンを反転させることになる。

6.1.2 ダイナミックレンジ

画像の起伏の大きさを表すために、7近傍画素中の最大値と最小値から定まるダイナミックレンジ（最大値－最小値）を表 6.2 により16通りに定める。このようにして定められたレンジのモードを、ここでは、Range Mode (RM) と呼ぶ。

表 6.2: ダイナミックレンジ

RM	Dynamic Range
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5~6
6	7~8
7	9~12
8	13~16
9	17~24
10	25~32
11	33~48
12	49~64
13	65~96
14	97~128
15	129~255

6.1.3 予測法の割り当て

境界モード(BM)により表せられる平坦部, 境界部とレンジモード(RM)により表せられる画像の起伏の大きさにより注目画素での予測法を定める。

階調値の予測値は, 次に示す直前画素値, 直上画素値, それらの平均値, あるいは3近傍画素値から定まる予測法の4予測法のいずれかを用いる (a, b, d は図 6.1 中の近傍画素値を示す)。

$$p = a \quad (1)$$

$$p = b \quad (2)$$

$$p = (a+b)/2 \quad (3)$$

$$p = a/2 + (b+d)/2 \quad (4)$$

4予測法(数式番号の1~4)のうちいずれを用いるかは, 境界の方向とダイナミックレンジのモードによりあらかじめ表 6.3 で割り当てておく。同表は, テスト画像に対し, 各モードごとにエントロピーが最小となるように決定したものである。

6.2 提案方式と8近傍画素

予測符号化では, 一般に, より多くの近傍画素を参照することにより, 飽和するまでは, より小さい予測差分が得られることが知られている。提案方式では実際の符号化時は3近傍画素で予測差分が最小であった予測法の情報を使用しているが, それぞれの情報はさらにその画素の3近傍の画素値から得られている。この様子を図 6.2 に示す。従って, 7近傍画素法では直接,

表 6.3: BM と RM による予測法の選択

RM	BM (Boundary Mode)							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	-	-	-	-	-	-	-
1	3	3	3	1	1	1	1	3
2	3	3	3	1	3	1	1	3
3	3	3	3	1	3	1	1	3
4	3	3	3	3	3	1	1	3
5	3	3	3	3	4	4	1	3
6	3	3	3	3	4	4	1	4
7	3	3	3	3	4	4	1	4
8	3	3	3	3	4	4	1	4
9	3	3	3	3	4	4	1	4
10	3	3	4	3	4	4	1	4
11	3	3	4	3	2	4	1	4
12	3	3	4	3	2	3	1	4
13	3	3	4	3	2	3	1	4
14	3	3	4	3	2	3	1	4
15	3	3	4	3	2	3	1	4

7近傍の画素値から予測法を選択しているのに対し, 提案方式は注目画素での予測法を選択するにあたり, 間接的には8近傍画素を参照しているとみなすことができる。

6.3 比較実験と考察

6.3.1 平均符号長の比較

8区分のダイナミックレンジを用いた2予測法の提案方式と7近傍画素法との比較を行うにあたり, 得られた予測差分は8ビットに縮退し, Wittenらによる多値算術符号化を共通して用いた。また, 7近傍画素法の場合は, 境界方向の8モードとダイナミックレンジの16モードの計128の組合せごとに4つの予測法のいずれかを表 6.3 に従いあらかじめ割り当て, 符号化を行った。

表 6.4 に, 7近傍画素法による圧縮後の平均符号長とその値に対する提案方式(前章の表 5.7, 表 5.8, 表 5.9 の平均符号長を参照)の改善率を示す。表中のすべての画

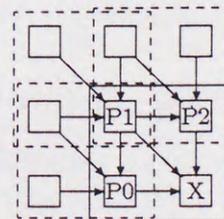


図 6.2: 提案方式と8近傍画素

表 6.4: 7近傍画素法の平均符号長 [bit/pel] と提案方式による改善率 [%]

Images		7-Neighbor Pixel Method	Proposed Method
		Average Code Length [bit/pel]	Improvement Ratio
SIDBA (Green)	aerial	5.88	0.3%
	couple	4.26	3.3%
	girl	4.49	0.2%
	mandrill	6.39	0.2%
	milkdrop	4.27	2.1%
	city1	4.46	2.7%
	home3	4.14	2.4%
SIDBA 45 RGB Images		4.47	1.8%
SCID (CMYK)	portrait	4.68	0.9%
	cafeteria	5.36	1.3%
	bicycle	4.07	2.2%
	fruitbasket	4.29	0.7%
	wine&table	4.39	1.6%
	orchid	3.88	1.8%
	musicians	5.59	1.4%
candle	5.98	1.2%	
Average of Total 77 Images			1.6%

像の項目で提案方式の平均符号長が7近傍画素法に比べて小さくなるのがわかる。RGB別の45のSIDBA標準画像とCMYK別の32のSCIDの計77枚の256階調画像として平均の改善率を求めると1.6%が得られる。

この比較結果から明らかなように、わずかではあるが7近傍画素法よりも提案方式の2予測法が有効であることがわかる。はしがきで述べたように、テスト画像を用い、境界の条件に応じてあらかじめ予測法を割りつける方法は、さまざまな特徴を持つ種々の画像に対しては必ずしも有効であるとは限らない。本提案方式は対象の画像の特徴をとらえた予測法であるために、種々の画像に対して汎用的に適用することができる。

6.3.2 処理時間の比較

パソコン(Pentium 133MHz)上での試作プログラムによる処理時間は、大半が算術符号化に要するため、画像city1(800x600画素,Green)の場合、7近傍画素法の符号化は19秒(4.46[bit/pel])、復号化は28秒、提案方式の符号化は17秒(4.34[bit/pel])、復号化は26秒と大差はみられなかった。

6.4 第6章のむすび

提案方式の2予測法を、国内では最も優れた新しい可逆符号化方式と思われる7近傍画素法と共通の評価基準を用いた実験で比較し、提案方式の方がわずかに

低い圧縮率が得られ、有効であることを確認した。

第7章 可変ブロックサイズセグメンテーションによる符号化

画像は一般にローカルな均一さ (smoothness) とグローバルな類似性 (similarity) を持つが、画像を可変サイズのブロックでセグメント化し、そのブロック内の画素の特性に応じて符号化することにより、それらの持つ冗長性を取り除くことができる。本章では、1995年にRanganathanらにより提案された可変ブロックサイズセグメンテーションを用いた画像の可逆符号化方式 [47] について考察する。まず、その概要について述べ、次に、ブロックの符号化の際の参照画素と、 2×2 ブロックの 1×1 ブロックによる符号化の2つの観点から改善した方式を提案する。最後に、標準画像を用いたシミュレーション実験で提案方式がRanganathanらによる方式よりも6%の平均圧縮率の改善率が得られることを確認する。さらに、分類番号のファイルの符号化をRanganathanらの方式で用いられているハフマン符号化から算術符号化へ変更することにより、10%の平均圧縮率の改善率が得られることを示す。

7.1 可変ブロックサイズセグメンテーション

Ranganathanらにより提案された可変ブロックサイズセグメンテーション (Variable Block Size Segmentation, 以下、VBSSと略す) を用いた画像の可逆符号化について述べる [47]。

7.1.1 画像のセグメンテーションと符号化

画像は一般にローカルな均一さ (smoothness) とグローバルな類似性 (similarity) を持つが、画像を可変サイズのブロックでセグメント化 (領域分割) し、そのブロック内の画素の特性に応じて符号化することにより、それらの持つ冗長性を取り除くことができる。ローカルな均一さはブロック内の画素の最大値と最小値の差分 d により表現できる。256階調の画像では、 $K \times K$ のサイズのブロックを表現するのに必要なビット数 $B[K, d]$ は、ブロック内の基準とする画素 (ベース画素) の画素値と、残りの画素の画素値とのオフセット (ベースとの差分) の和で表現できるので、

$$B[K, d] = 8 + (K^2 - 1) \log_2(d + 1) \quad (1)$$

となる。よって、このブロックの圧縮率 $C[K, d]$ は、

$$C[K, d] = B[K, d] / (8 \times K^2) \times 100 \quad (2)$$

となる。ブロック外の画素の画素値を基準とし、その識別のために r ビットを使用すると、ブロックを表現するのに必要なビット数 $B[K, d, r]$ は、

$$B[K, d, r] = K^2 \log_2(d + 1) + r \quad (3)$$

となる。VBSSを用いた符号化では、画像のローカルな均一さに対して後述するランレングス (run-length) 符号化とベースオフセット (base-offset) 符号化を適用する。

グローバルな類似性は、パターンの繰り返しにより表現できる。つまり、あるパターンが画像中で n 回出現するとすると残りの $(n - 1)$ 回のパターンは最初の出現へのポインタで表現できる。これは、テキスト圧縮の分野で広く使用されている Lempel-Ziv 符号化において繰り返される文字列のパターンを検索し、これを前の出現からのポインタで置き換えることと同じ考えに基づいている。VBSSを用いた符号化では、画像のグローバルな類似性に対して後述するブロックマッチング (block matching) 符号化を適用する。

7.1.2 ブロックの分類と符号化アルゴリズム

VBSSでは、画像を $8 \times 8, 4 \times 4, 2 \times 2$ のサイズの矩形ブロックへ分割し、ブロックサイズとブロック内の画素の特性に応じて28のグループへ分類する。これらのブロックはランレングス、ベースオフセット、ブロック

表 7.1: 可変ブロックサイズセグメンテーション (VBSS)

Category	Block Size	Offset Range	Coding Scheme	Length (bits)	
0	8x8	0	run-length	2	
1	4x4				
2	2x2				
3	8x8	1~2	base-offset	$64x1+2=66$	
4	4x4			$16x1+2=18$	
5	2x2	-	block matching	$3+3=6$	
6		-1~0	base-offset	$4x1+2=6$	
7		0~1		4x2+2=10	
8		-2~1			
9		0~3			
10		-3~0			
11		-3~4			4x3+2=14
12		-5~2			
13		-2~5			4x4+2=18
14		-7~8			
15		-4~11			
16		-11~4			
17		-2~13			
18		-13~2			
19	-15~16	4x5+2=22			
20	-4~27				
21	-27~4				
22	-20~11				
23	-11~20				
24	-31~32		4x6+2=26		
25	-15~48				
26	-48~15				
27	-	raw data	$4x8=32$		

マッチング、および生データを送る非符号化を含めた4つの符号化法のいずれかを用いて符号化する。28の分類の分類番号、ブロックサイズ、オフセットの範囲、符号化法および符号語を表7.1に示す。可変長の符号語はひとつの符号化データファイルとして格納する。また、ブロックの分類番号は符号化データファイルとは別の分類番号のファイル（ヘッダファイル）として格納する。この分類番号より符号化したときのブロックのサイズなどの情報がわかるので、復号が可能となる。

VBSSを用いた符号化のアルゴリズムの大まかな流れを図7.1に示す。アルゴリズムは次のように動く。まず、画像を8x8のブロックに分割する。ブロック内の全面素が参照画素値と同じ階調値であれば、ランレングス符号化を行う。ブロック内の変化の度合いが少なければ、ベースオフセット符号化を行う。いずれにも合致しないときは、そのブロックを更に4x4のブロックへ分割し、上述の処理を施す。4x4のブロックでいずれにも合致しないときは、更に2x2のブロックへ分割する。2x2ブロックのときは、ブロック内の全面素が参照画素値と同じ画素値であれば、ランレングス符号化を行うが、そうでなければ、符号化対象の2x2ブロックと全く同じパターンの2x2ブロックを近傍領域で検索する（ブロックマッチング）。全く同じブロッ

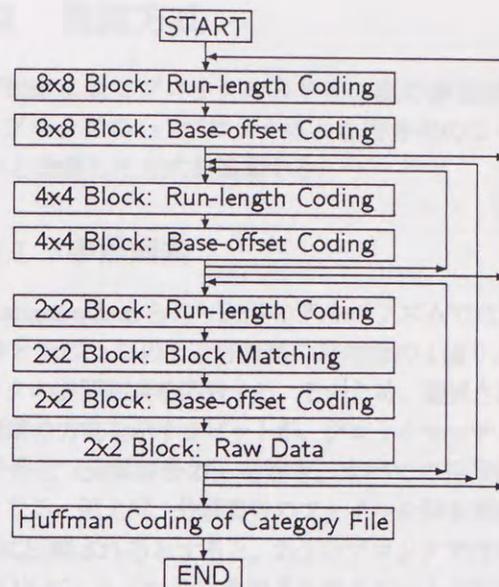


図 7.1: VBSSを用いた符号化アルゴリズム

クが存在すれば、そのブロックは全く同じブロックへのx,y方向の距離で符号化する。全く同じブロックが検索されず、変化の度合いが指定のしきい値以下であれば、そのブロックはベースオフセット符号化を行う。ブロック内の変化の度合いが指定のしきい値を越えるときは、ブロック内の4画素値は圧縮せず、そのまま格納する。

画像の符号化と並行して、可変ブロックサイズの符号語の圧縮ファイルと分類番号のファイルを生成する。分類番号のファイルは各符号語に対応する分類番号を保持するので、符号化を行う最中の各符号語の出現状態を順に示すことになる。分類番号のファイルは、全ブロックの符号化の直後に、ハフマン符号化で圧縮する。

7.1.2.1 参照画素の選択

可変サイズのブロックのランレングス符号化とベースオフセット符号化では、参照画素を比較および符号化のためのベース（基準）画素（base pixel）として使用する。各ブロックの参照画素は、3近傍画素（直上、直前、左上）¹のうちの一つ、あるいは2近傍画素（直上、直前）の平均値、これらの4通りのうちの一つから選択する。近傍画素からの参照画素の選択は、最も近い近傍画素を選ぶことにより行う²。

選択された参照画素の方向(direction of reference

¹Ranganathanらは、3近傍画素を北（直上）、東（直後）、北東（右上）と表現しているが、本論文では、ブロックの左上の画素の直上、直前、左上画素とする。

²本論文のシミュレーション実験では、ブロック内の全面素値の平均値に最も近い値の参照画素を選択する。

pixel)は2ビットで指定し、参照画素の方向の選択は各ブロックごとに行う。したがって、各ブロックごとに参照画素の画素値を表現する必要はない。

また、ベースオフセット符号化では、選択された参照画素(ベース画素)の画素値に対するブロック内の各画素値のオフセット(差分)で符号化する。

7.1.2.2 ランレングス(run-length)符号化

ブロック内の画素値が参照画素値とすべて同じであれば(表7.1の分類番号0,1,2),参照画素の方向とブロックサイズでそのブロックを表現できる。

7.1.2.3 ベースオフセット(base-offset)符号化

ブロック内の最大値と最小値の差が0ではないが十分に小さいときに、ベースオフセット符号化を行う。符号語はブロック内の全画素のオフセットとベース画素(参照画素)の方向で構成する。表7.1の分類番号3,4,6~26がこの分類に属する。 n をブロック内の画素数とすると、符号語の語長は $n \times \log_2(\text{最大オフセット})$ ビットとベース画素の方向を表す2ビットとなる。

7.1.2.4 ブロックマッチング(block matching)

2x2のブロックに対して同一のパターンのブロックをブロックの4倍の8x8の領域から検索する³。検索時間の観点から、2x2のブロック以外ではブロックマッチングは行わない。符号語は符号化対象パターンから同一のパターンへのx方向とy方向の差分とで構成し、2x2のブロックでは6ビットとなる⁴。表7.1の分類番号5がこの分類に属する。

7.1.2.5 非符号化

以上のいずれにも合致しないときは、ブロック内の画素値は符号化は行わずそのまま表現する。2x2のブロックだけがこの場合に該当し、4バイトでブロックを表現する。表7.1の分類番号27がこの分類に属する。

³Ranganathanらは8x8の検索領域を詳述していない。本論文のシミュレーション実験では、符号化対象の2x2ブロックを含む左上の8x8画素を検索領域とし、そのうちの未符号化の画素を含む4ブロックを除く45ブロック(7x7-4)を検索対象の2x2ブロックとする。

⁴Ranganathanらはブロックマッチングの符号語を8ビットと記述しているが、ブロックマッチングでは参照画素の方向の選択(2ビット)は使用しないため、8x8ブロックの検索領域内的一致位置はx方向3ビットとy方向3ビットの計6ビットで表現できる。

7.2 提案方式

VBSSによるブロックの符号化の際の参照画素と、2x2ブロックの1x1ブロックによる符号化の2つの観点から改善した方式を提案する。

7.2.1 参照画素

RanganathanらのVBSSのアルゴリズムでは3近傍画素とそのうちの2近傍画素の平均値の4通りからブロックの参照画素を選択する。そのため、選択された参照画素の方向を示す2ビットが、ブロックマッチングと非符号化(分類番号27)を除き、すべての符号語に必要となる。例えば、分類番号のファイルを除き画像が約1/2に圧縮されるとすると、2x2のブロックでは符号語は約16ビットとなり、そのうちの2ビット(12.5%)が参照画素の方向を示すために必要となる。したがって、この2ビットは圧縮率の観点からは決して小さな値であるとはいえない。また、最適な参照画素を決定するにはそのための余分な処理時間を要することになる。

3近傍画素は、予測符号化の分野でひとつの注目画素値を予測するとき用いられる典型的な参照画素である。予測結果は対象とする画像により異なるが、いくつかの標準画像を用いた著者らの実験では、参照画素として直上画素、直前画素、それらの平均値を用いた順で画素当たりの平均予測差分は小さくなる。また、文献[18]でも、JPEGのテスト画像にJPEGのオプションであるロスレス符号化の7つの予測法を適用した実験では、直上画素と直前画素の平均値を予測法に用いたときに最も圧縮効果が高いことが報告されている。これは1画素の予測の場合であるが、2x2、4x4あるいは8x8のブロックの最初の画素にも適用できる。ブロックサイズが大きいときは、そのブロック内の画素の平均値に近い画素値の近傍画素を参照画素とすることが望まれるが、ブロック内の各画素からは距離の隔たったおそらくそれぞれは近い値であろう3近傍画素の中から最適値を選択することは効率的なことではない。

そこで、本章では、ブロックの参照画素として、直前画素と直上画素の平均値を固定化して使用する方式を提案する。この提案によれば、ブロックマッチングと非符号化(分類番号27)を除き、すべての符号語で参照画素の方向を示す2ビットは不必要になる。表7.2の分類番号0~4にこの提案方式のときの各符号語のビット長を示す。3参照画素を用いないためにブロックを分類する際にしきい値内に入らない場合が増すが、符号語の2ビットの減少により圧縮率の改善につながる事が期待される。

表 7.2: 提案方式の符号語のビット長

Category	Block Size	Offset Range	Coding Scheme	Length (bits)
0	8x8	0	run-length	0
1	4x4			
2	2x2			
3	8x8	1~2	base-offset	64
4	4x4			16
5	2x2	-	block matching	6
6~133	1x1	0	base-offset	0
		-1,1		1
		-3~-2,2~-3		2
		-7~-4,4~7		3

7.2.2 2x2ブロックの符号化

VBSSを用いた符号化では、通常、2x2ブロックのベースオフセット符号化の出現頻度が最も高い。そのため、更に圧縮効果の高い2x2ブロックの符号化手法の確立が望まれる。Ranganathanらの方式では、2x2ブロックに対してひとつの参照画素を使用し、それをベース画素としてブロック内の4画素値との差分を符号化している。しかし、予測差分(予測誤差)をより小さくするためには、2x2ブロックを4つの1x1ブロックへ展開し、それぞれの1x1ブロックごとにより近傍の参照画素を用いる方法が考えられる(図7.2参照)。図7.2において、2x2画素を左上(P0)、右上(P1)、左下(P2)、右下画素(P3)の順に符号化すれば、復号時にも使用される参照画素は既に復号された画素であるので、1x1ブロックの符号化が可能となる。

まず、予測差分を(0),(-1,1),(-3~-2,-2~-3),...(-127~-64,64~127),(-255~-128,128~255)の9通りに分類する1x1ブロックごとのベースオフセット符号化が考えられる。この分類は基本的には、JPEGのDCT変換やJPEGのオプションであるロスレス符号化のハフマン符号化で使用されている分類と同じである[18][11]。

本章では、実験結果では上述の9通りの分類法よりもわずかではあるが更に圧縮効果の高かった1x1ブロッ

U: Upper Pixel

L: Left Pixel

P: Pixel to be coded

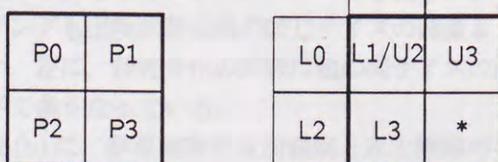


図 7.2: 2x2ブロック内の画素と画素ごとの参照画素

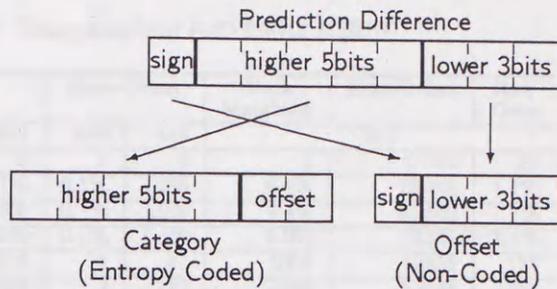


図 7.3: 1x1ブロックの符号化

クの符号化を提案する。予測差分の符号化の処理を図7.3に示す。得られた9ビットの予測差分のうちノイズ成分の多い下位3ビットは予測差分の符号ビットとともにオフセットとして扱う。表7.2の下部に1x1ブロックのオフセットの範囲を示す。これらの4通りの分類を示す2ビットは、得られた予測差分の符号ビットを除く上位5ビットとともに7ビットの分類番号(6~133の128通り)を構成する。前述の9通りの分類法との違いは、上位5ビットをオフセットではなく分類番号として扱う点である。これ、以降のステップでは非符号化の対象となるノイズな下位3ビットと異なり、上位5ビットは出現頻度に偏りがあるので、以降のステップでの分類番号のファイルの圧縮の対象になりうると考えられるためである。

7.2.3 提案による影響の考察

参照画素を固定化する提案による影響を考察する。影響は、参照画素の固定化による2ビットの削減の効果と、固定化することによる適合する分類の出現数の減少および予測差分の増大の影響との比較に集約される。

表7.3にRanganathanらの行った14の画像⁵を用いた実験結果[47]から算出した各分類の占める画素数と出現回数を示す。算出値はそれぞれ7画像分の各分類の総出現回数から求めた。同表から、参照画素を用いる2x2ブロックの画素数が8割以上を占めること、および4x4ブロックの画素数の占める割合は非常に小さいことがわかる。ランレングス符号化とオフセットが1と2のみのベースオフセット符号化の対象となる8x8ブロックについては、前述したように、ブロックの左上の画素の3近傍画素から距離の隔たったブロック内の画素では、4通りの参照画素値からどれを選択するかはほとんど影響がないと思われる。従って、ここで

⁵man, planets, challenger, house, shuttle, F16, coralの256x256画素の画像とbridge, lenna, pentagon, renault, sandwich, truckrun, rocksの512x512画素の画像。

表 7.3: 各分類の占める画素数と出現回数の例 (Ranganathan らの文献より算出)

Coding		Run-Length			Base-Offset		Block Matching	Base-Offset	Raw Data
Block Size		8x8	4x4	2x2	8x8	4x4	2x2		
Category		0	1	2	3	4	5	6~26	27
Average Occurrence	7 Images (256x256)	11.1%	1.2%	3.1%	0.1%	1.2%	6.4%	75.9%	1.1%
Percentage of Pixels	7 Images (512x512)	2.7%	0.6%	4.6%	0.1%	1.0%	7.4%	81.9%	1.7%
	Average of 14 Images	6.9%	0.9%	3.9%	0.1%	1.1%	6.9%	78.9%	1.4%
Average Occurrence	7 Images (256x256)	114	47	512	1	47	1053	12431	177
Number of Category	7 Images (512x512)	109	103	2983	3	172	4869	53688	1095

は、大半を占める 2x2 ブロックについて、予測差分とそのエントロピーの増大の影響を考察する。

表 7.4 に、15 の代表的な SIDBA 標準画像 (256 階調, Green) を 2x2 ブロックのみで処理したときの画素当たりの平均予測差分と出現確率から得られるエントロピーを示す。エントロピーは、予測差分の出現回数の累計に基づく出現確率から求めた。今まで述べたように、従来方式では 3 近傍画素を用いた 4 通りの参照画素値から最も近いものをブロックごとに選択し、提案方式では 2x2 ブロック内の画素ごとに参照画素値を直前画素と直上画素の平均値に固定化している。同表から明らかのように、いくつかの画像においては提案方式では予測差分やエントロピーのわずかな増大がみられる (表中に *印で示す)。エントロピーの増分の最大値は 0.15 [bit/pel] であり、これは、2x2 ブロックの 4 画素では 0.60 ビットの増分に相当する。しかし、この値は、提案方式の 2x2 ブロック当たりの符号語からの削減量である 2 ビットと比較して小さい。従って、このワークケースの例でも改善の差は 1.4 ビットと大きいので、通常は提案方式により従来方式の持つ基本的な利点が損なわれることはないと言える。

7.3 シミュレーション実験と考察

7.3.1 分類の出現回数

15 の代表的な SIDBA 標準画像 (256 階調, Green) に従来方式の VBSS を適用したときの各分類の出現回数を表 7.5(a) に示す。画素値の変化の激しい画像 aerial や mandrill では、8x8 や 4x4 ブロックのベースオフセット符号化の出現はなく、ランレングス符号化やブロックマッチングも出現回数は他の同じサイズの画像よりも少ない。逆に、非符号化の回数は他の同サイズの画像に比べて多くなっている。

同表 (b) に、参照画素を直前画素と直上画素の平均値に固定し、2x2 ブロックのベースオフセット符号化に代わり 2x2 ブロックに対して 1x1 ブロックのベース

表 7.4: 画素当たりの平均予測差分とエントロピー

SIDBA Image (Green)	Average Prediction Difference per Pixel		Entropy [bit/pel]		
	Method		Method		Increase
	Exist	Propose	Exist	Propose	
aerial	12.05	11.89	6.03	6.01	-
couple	5.35	4.86	4.58	4.57	-
girl	5.42	5.10	4.68	4.67	-
mandrill	16.76	*17.39	6.50	*6.55	+0.05
milkdrop	4.69	4.46	4.38	*4.46	+0.08
auto1	5.24	5.11	4.73	*4.74	+0.01
city1	7.30	6.75	5.26	5.18	-
bear1	6.43	*6.50	4.98	*5.07	+0.09
city2	6.22	5.92	4.97	4.95	-
desk1	5.71	*5.84	4.71	*4.86	+0.15
face1	1.93	1.83	3.07	*3.13	+0.06
home3	5.14	5.10	4.52	*4.58	+0.06
home4	4.77	*4.80	4.44	*4.52	+0.08
room1	2.40	*2.54	3.53	*3.64	+0.11
room7	2.52	2.42	3.37	*3.48	+0.11

*: Increase from the the case of the existing method.

オフセット符号化を適用する提案方式による各分類の出現回数を示す。全般的に、表中の左欄の 8x8 ブロックのランレングス符号化から 4x4 ブロックのベースオフセット符号化の出現回数が減り、ブロックマッチングの出現回数が増えている。このように、参照画素を用いる符号化で出現回数が減少しているのは、提案により参照画素を一通りに固定したためである。

また、結果として、従来方式の 2x2 ブロックのベースオフセット符号化と非符号化の対象となる出現画素数よりも、提案方式の 1x1 ブロックのベースオフセット符号化の対象となる出現画素数がわずかに増加している。しかし、増加は、提案方式の 3.1 の参照画素の所で述べた選択された参照画素の方向を示す 2 ビットの占める割合の例 (12.5%) に比べると小さい率なので、この 2 ビットの削減の効果が期待できる。

7.3.2 圧縮率

表7.6(a)に、従来方式のVBSSを適用したときの分類番号の出現回数、分類番号のファイルのハフマン符号化後のサイズ、VBSSを用いて符号化した後のサイズ、および圧縮率を示す。ここでは、圧縮率は、(VBSS符号化後のサイズ+分類番号ファイルのハフマン符号化後のサイズ)/画像データのサイズ、により求めている。

同表(b)に、提案方式のVBSSを適用した場合を示す。分類番号の出現回数は1x1ブロックの符号化を適用したために、約4倍弱に増える。VBSSを用いて符号化した後のサイズは、すべての画像で従来方式よりも提案方式が小さくなる。これは、提案方式の参照画素の方向の2ビットの削減と1x1ブロックの符号化方式の適用に起因している。従来方式で使用されているハフマン符号化を分類番号のファイルの符号化に使用した場合、従来方式の圧縮率に対して提案方式の圧縮率は、平均6.2%の改善率となり、提案方式の有効性が確認できる。

同表(b)中に、ハフマン符号化に加えて0次独立モデルによる算術符号化(Arith)あるいは1次マルコフモデルによる算術符号化(Arith1)により分類番号のファイルの符号化を行ったときの分類番号ファイルの圧縮後のサイズと、それぞれにVBSSによる符号化のサイズを加えることにより得られる圧縮率を示す。算術符号化はWittenらによる実現法[39], [40], [41]を使用し、分類番号のファイルを1次元のデータとして圧縮した。

表中の*印は3符号化のうちで最良の圧縮率の場合である。結果として、算術符号化はすべての画像でハフマン符号化よりも有効である。また、表中の*印より、小さいサイズの画像では0次独立モデルによる算術符号化が、大きいサイズの画像では1次マルコフモデルによる算術符号化が有効であることがわかる。これは、大きいサイズの画像では、小さいサイズの画像に比べて注目ブロックの分類番号と直前のブロックの分類番号の相関が高いためである。

同表(b)の右欄に、算術符号化の最良値(Arith*)のときの従来方式に対する提案方式の圧縮率の改善率を示す。15画像の平均で10%の改善率が得られ、算術符号化を適用することによりさらに改善を図ることができる。

なお、本章では他の可逆符号化方式との比較実験は行っていないが、文献[47]でVBSSが国際標準であるJPEGの可逆符号化方式よりも圧縮率が良いことが実験報告されていることを付記しておく。

7.4 第7章のむすび

本章では、Ranganathanらにより提案されたVBSSを用いた画像の可逆符号化方式のアルゴリズムの実現方法について吟味し、3近傍画素からブロックの参照画素を逐次選択し、その参照画素の方向を2ビットで符号化する従来方式から、参照画素を直前画素と直上画素の平均値として固定することにより各ブロックの符号語を短くする方式を提案した。また、頻度の高い2x2ブロックのベースオフセット符号化を4つの1x1ブロックのベースオフセット符号化に展開し、予測差分の上位ビットを分類番号に含める方式を提案した。

15の標準画像を用いたシミュレーション実験でこれら二つの提案を適用することにより従来方式に対して、6.2%の平均圧縮率の改善率が得られることを確認した。さらに、分類番号のファイルの符号化方式をRanganathanらにより提唱されているハフマン符号化から算術符号化へ変更することにより、従来方式に対して平均圧縮率の改善率が10%となることを確認した。

本章ではひとつの参照画素として直前画素と直上画素の平均値を用いたが、今後の課題として、可変サイズのブロックのベース画素値のより正確な予測算出法の検討があげられる。また、表7.1に示した分類の妥当性の詳細な検討も必要と思われる。

表 7.5: 各分類の出現回数

(a) Existing method.

Coding		Run-Length			Base-Offset		Block Matching	Base-Offset	Raw Data
Block Size		8x8	4x4	2x2	8x8	4x4	2x2		
Category		0	1	2	3	4	5	6~26	27
aerial	256	0	0	3	0	0	1	14944	1436
couple	x256	25	87	569	0	6	571	13944	528
girl		2	29	375	0	1	449	14930	478
mandrill	512	0	0	2	0	0	4	48958	16572
milkdrop	x512	138	363	944	0	3	734	58261	1925
auto1	800	0	0	132	0	0	429	116764	2675
bear1	x600	0	0	42	0	0	108	115506	4344
city1		0	200	155	0	0	413	114057	4575
city2		0	8	602	0	4	3196	112503	3651
desk1		0	0	489	0	10	2112	112595	4764
face1		0	0	2025	0	11	12101	105066	764
home3		0	0	1042	0	3	6028	109070	3848
home4		0	0	1764	0	81	7198	107618	3096
room1		0	0	2178	0	21	11760	105261	717
room7		0	0	3969	0	136	18181	95175	2131

(b) Proposed method.

Coding		Run-Length			Base-Offset		Block Matching	Base-Offset
Block Size		8x8	4x4	2x2	8x8	4x4	2x2	1x1
Category		0	1	2	3	4	5	6~133
aerial	256	0	0	3	0	0	1	65520
couple	x256	24	68	406	0	2	759	58220
girl		2	23	268	0	0	531	61844
mandrill	512	0	0	0	0	0	4	262128
milkdrop	x512	138	344	704	0	2	1001	240956
auto1	800	0	0	62	0	0	431	478028
bear1	x600	0	0	23	0	0	109	479472
city1		0	200	72	0	0	419	474836
city2		0	8	301	0	2	3328	465324
desk1		0	0	265	0	0	2193	470168
face1		0	0	1062	0	4	12428	425976
home3		0	0	530	0	1	6173	453172
home4		0	0	1097	0	3	7737	444616
room1		0	0	1203	0	1	12198	426380
room7		0	0	2392	0	17	19512	392112

表 7.6: 符号化後のサイズ[bytes]と圧縮率

(a) Existing method.

SIDBA Image (Green)	Image File	Category Occurrence	Category Coded Huffman	VBSS Coded	Comp. Ratio
aerial	65536	16384	7306	46827	82.6%
couple		15730	8210	31150	60.1%
girl		16264	8147	33369	63.3%
mandrill	262144	65536	27562	201390	87.3%
milkdrop		62368	27800	127981	59.4%
auto1	480000	120000	55182	255915	64.8%
bear1		120000	56931	285678	71.4%
city1		119400	57956	264837	67.2%
city2		119964	60219	260996	66.9%
desk1		119970	58257	247279	63.7%
face1		119967	49587	164995	44.7%
home3		119991	59436	231897	60.7%
home4		119754	59570	227926	59.9%
room1		119931	53817	185095	49.8%
room7		119592	53198	174742	47.5%

(b) Proposed method.

SIDBA Image (Green)	Categ. Occur.	Category Coded			VBSS Coded	Compression Ratio			Improvement Ratio	
		Huff.	Arith	Arith1		Huff.	Arith	Arith1	Huff.	Arith*
aerial	65524	31791	31580	33897	16640	73.9%	*73.6%	77.1%	10.5%	10.9%
couple	59479	24550	24166	24860	12887	57.1%	*56.5%	57.6%	5.0%	6.0%
girl	62668	24866	24587	25322	13972	59.3%	*58.8%	60.0%	6.3%	7.1%
mandrill	262132	146259	144645	145932	67229	81.4%	*80.8%	81.3%	6.8%	7.4%
milkdrop	243145	89992	88265	86752	55349	55.4%	54.8%	*54.2%	6.7%	8.8%
auto1	478521	178861	176798	168660	106582	59.5%	59.0%	*57.3%	8.2%	11.6%
bear1	479604	194050	193426	187716	113873	64.2%	64.0%	*62.8%	10.1%	11.8%
city1	475527	192133	190197	181071	107880	62.5%	62.1%	*60.2%	7.0%	10.4%
city2	468963	192897	190182	179040	106228	62.3%	61.8%	*59.4%	6.9%	11.2%
desk1	472626	192091	190517	177210	101655	61.2%	60.9%	*58.1%	3.9%	8.8%
face1	439470	136424	131774	121811	69832	43.0%	42.0%	*39.9%	3.8%	10.7%
home3	459876	183464	182029	164380	93453	57.7%	57.4%	*53.7%	4.9%	11.5%
home4	453453	178878	177303	160831	94125	56.9%	56.5%	*53.1%	5.0%	11.3%
room1	439782	147003	146064	128788	80872	47.5%	47.3%	*43.7%	4.6%	12.2%
room7	414033	138686	137558	124678	80722	45.7%	45.5%	*42.8%	3.8%	9.9%
Average									6.2%	10.0%

Huff. : Huffman coding

Arith : Arithmetic coding using 0-order Markov model.

Arith1: Arithmetic coding using 1st-order Markov model.

Arith*: When the best ratio of Arith and Arith1 is used.

* : The best ratio among three (3) entropy coding methods.

第8章 比較評価と考察

今までの章で、階調画像の可逆符号化について、ビットプレーン画像の可逆符号化方式と、3つの階調値をそのまま符号化する方式の計4つの異なる観点から考察し、それぞれの観点からの従来方式と提案方式との比較を行い、提案方式が有効であることを述べた。

本章では、まず、共通の評価基準を用いて、上述の方式の異なる4つの提案方式の比較評価を行う。次に、1993年に制定された国際標準JPEGのオプションであるロスレス符号化との比較実験の結果を本章で述べる。このJPEGのロスレス符号化は、上述の4つの観点からの方式と異なり、予測差分を逐次、2値で算術符号化する（あるいは、ハフマン符号化する）方式である。

比較評価の結果、2予測法が最も有効な可逆符号化方式であることが確認できる。

8.1 4つの提案方式の比較評価

8.1.1 圧縮率の比較

表8.1に、階調画像をビットプレーン画像へ展開した場合、1次マルコフモデルを使用した場合、0次（独立）モデルを使用し、2予測法を適用した場合、および可変ブロックサイズセグメンテーションを行った場合の4つの方式について、従来方式と提案方式の比較を示す。画像は15のSIDBA画像（Green）を用い、ここでは、平均符号長[bit/pel]ではなく圧縮率[%]を共通に使用した。

それぞれの提案方式は従来方式よりも有効であることは各章で示した。4つの従来方式と比較すると、画像により異なるが、15画像の平均として、0次（独立）モデルと縮退差分を用いた方式が最も効果が高いことがわかる。

4つの提案方式を比較すると、いくつかの画像では、ビットプレーン画像へ展開した後に交換奇偶符号へ変換し、JBIGの2値符号化を行う方式も圧縮率が低いが、全般的および15画像の平均では、2予測法を用いた提案方式の圧縮率が最も低くなることがわかる。

8.1.2 考察

以上で、提案の2予測法が最も効果の高い可逆符号化方式であることが明らかとなったが、これは次の2点が大きな理由であると考えられる。まず、2予測法では、上述の従来方式の比較結果から明らかのように、符号化効率の高い縮退予測差分の0次モデルをそのベースとしている点があげられる。第2点目として、縮退

予測差分の0次モデルを1次マルコフモデルへ拡張するよりも、つまり、予測差分の相関性を利用するよりも、もとなる予測差分そのものをより正確に予測する方が効果が高いという点である。

8.2 国際標準JPEGロスレス符号化との比較

4つの提案方式について、表8.1および今までの各章では、それぞれのモデルあるいはそれぞれ方式の範疇における従来方式との比較検討を行ってきた。ここでは、最後に、はしがきで述べた階調画像の可逆符号化の国際標準JPEGのオプションのロスレス符号化（DPCM方式、Spatial方式、1993年制定）[3][5][11][15][18]との比較を行う。

8.2.1 JPEGロスレス符号化

JPEGロスレス符号化は、上述の従来方式や提案方式のモデルとは異なり、多値の予測差分を逐次、大きさの分類番号とその分類中の何番目の値であるかを示す付加ビット（オフセット）で表現し、これらの値をハフマン符号化、あるいはさらに2値データへ変換した後に2値算術符号化する方式である。算術符号化の場合のこの方式の特徴は、上述のモデルとは異なり、画素値から得られた予測差分（レベルのある値）を0/1に2値化し、その0/1のビットごとに推定確率を算術符号化する点にある。

8.2.1.1 予測値

JPEGロスレス符号化では、5.2.1で述べたように7つの予測値からひとつをあらかじめ選択する規定と

表 8.1: 4 方式の従来方式と提案方式の圧縮率 [%] の比較

SIDBA Image (Green)	算術符号化						ブロック符号化 + エントロピー符号化	
	ビットプレーン		1次マルコフモデル		0次モデル		VBSS	VBSS
	Gray Code	swapped odd-even Anasta.	Pixel Value 6bits	Reduced Diff. Anasta. 6bits	Reduced Diff. average	2予測法 Gra+Ave 8DR	4選択 Huffman	average Arith*
	従来	提案	従来	提案	従来	提案	従来	提案
aerial	81.3	77.3	80.0	76.3	*73.3	*73.3	82.6	73.6
couple	53.5	52.0	56.9	54.8	55.1	*51.5	60.0	56.5
girl	58.7	57.0	57.5	58.1	56.5	*56.0	63.3	58.8
manrill	83.8	82.8	81.9	81.9	80.1	*79.8	87.3	80.8
milkdrop	54.8	52.6	55.9	54.3	53.9	*52.3	59.3	54.2
auto1	59.4	54.9	59.5	54.9	55.9	*54.6	64.8	57.3
bear1	65.7	58.5	63.8	*58.1	61.5	59.6	71.2	62.8
city1	59.0	*53.0	57.5	53.1	59.0	54.3	67.2	60.2
city2	59.2	55.4	61.8	56.3	57.5	*55.0	66.9	59.4
desk1	53.9	49.8	57.3	51.8	57.0	*49.5	63.7	58.1
facel	39.0	*36.6	43.5	39.0	38.0	37.4	45.1	39.9
home3	53.7	*50.1	55.0	51.4	51.9	50.5	60.9	53.7
home4	53.2	*49.9	54.8	51.3	51.3	50.3	60.0	53.1
room1	42.9	40.1	45.4	41.6	40.6	*39.5	50.0	43.7
room7	40.1	*38.4	46.9	40.4	40.0	39.3	47.4	42.8
average	57.2	53.9	58.5	54.9	55.4	*53.5	63.3	57.0

*: the best ratio among 8 methods.

なっている。図8.1に注目画素(x)と予測に用いる3近傍画素(a,b,c)の位置関係と選択可能な7つの予測演算子を示す。このうち、後述するJPEGロスレス符号化の試作プログラムによる実験では、直前画素値および直前と直上画素値の平均値を予測値とした。

予測差分は予測値と注目画素値の差分として求める。予測差分の分類を表8.2に示す。ハフマン符号化を用いる場合は、この分類番号と付加ビットにより符号化する。但し、本研究では、256階調の画像を前提としているので、JPEGのサポートしている16ビットまでは記述していない(以下も同様)。

8.2.1.2 予測差分の2値化

算術符号化を行う場合は、JPEGの非可逆符号化と同じく、2値算術符号器(QM-Coder [18])を用いるために、予測差分を表8.2に示した分類に属すれば0(真、一致)、属さなければ1(偽、不一致)として2進数化する。従って、予測差分は表8.3に示す可変長の2値に変換される。2番目のビットは予測差分が0以外のときの正負の符号を示す。

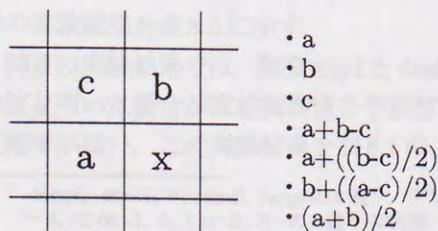


図 8.1: 選択可能な7つの予測演算子

表 8.2: 予測差分の分類

Difference Categories	Prediction Difference
0	0
1	-1, 1
2	-3, -2, 2, 3
3	-7~-4, 4~7
4	-15~-8, 8~15
5	-31~-16, 16~31
6	-63~-32, 32~63
7	-127~-64, 64~127
8	-255~-128, 128~255

予測差分が0以外のときは、変換した予測差分の大きさ($Sz = |\text{difference} - 1|$)により定まるグループ番号(Group)に属するか属さないかにより2値(0/1)化する。これを、同表中のX0~X8で示す。続いて、変換後の予測差分がそのグループの何番目の値であるかを示すビット(Magnitude Bits)を付加する。これを、同表中のB2~B8で示す。なお、変換後の予測差分が0あるいは1のときは、付加ビットは不要となる。

8.2.1.3 1,2次元の条件付け

表8.3に示した2値化された予測差分を2値算術符号化するとき、既に符号化された直前画素と直上画素での予測差分の2次元、あるいは直上画素での予測差分の1次元の情報を状態として条件付け(conditioning)を行うことにより確率を推定する。表8.4にこの統計モデルの条件付けを示す。

同表中の5x5は、直前画素と直上画素での予測差分

表 8.3: 予測差分の算術符号化のための2値化

Prediction Difference	Binary Decision	
0	0	
Sz		
Group 0	0	1S0
Group 1	1	1S10
Group 2	2,3	1S110M
Group 3	4~7	1S1110MM
Group 4	8~15	1S11110MMM
Group 5	16~31	1S111110MMMM
Group 6	32~63	1S1111110MMMMM
Group 7	64~127	1S11111110MMMMMM
Group 8	128~255	1S111111110MMMMMMM
Sequence of Binary Bits	XXXXXXXXXBBBBBBB 0123456782345678	

Sz = | difference | - 1
 S : 0 if positive and 1 if negative.
 M : Magnitude bit

表 8.4: 算術符号化によるロスレス符号化の統計モデル

Difference	Conditioning
0	25 (5x5) states
Positive/negative	25 states
Group 0	25x2 states
Group 1	X1
Group 2~8	X2~X8
Magnitude Bits	B2~B8

} 2 states each

をその大きさと正負によりそれぞれ5通りの状態¹に分割することを示す。x2は、予測差分の正負によりさらに状態を分割することを示す。グループ番号を示すビットX2~X8と付加ビットB2~B8は、直上画素の差分値の大小²により条件付けされる。

従って、表 8.4 より、256階調画像の確率推定のための状態の数は合計で130となる³。なお、国際標準は16ビットの予測差分をサポートしているので、グループ番号を示すビットはX2~X15、付加ビットはB2~B15となる。そのため、状態の数は合計で158と定められている⁴ [18]。

8.2.2 JPEG ロスレス符号化による圧縮率

以上に述べた国際標準JPEGロスレス符号化を実現した試作プログラムにより、比較のために求めた圧縮率の実験結果を表 8.5 に示す。

同表の実験結果では、画像city1とdesk1を除き、平均値を用いた場合が直前画素値を予測値とするよりも圧縮率が低い。この実験結果を表 8.1 の15画像の平均

¹ -large, -small, 0, small, large の5通り、デフォルトで、
 ~-3, -2 or -1, 0, 1 or 2, 3~の5通りの状態。
² -large or large と -small, 0, or small の2状態。
³ 25+25+25x2+(8+7)x2 = 130。
⁴ 25+25+25x2+(15+14)x2 = 158。

表 8.5: 国際標準JPEGロスレス符号化の圧縮率 [%]

Predictor	Left Pixel	Average of Left Pixel & Upper Pixel
aerial	78.4	76.0
couple	54.3	52.2
girl	58.5	55.9
manrill	84.2	82.5
milkdrop	55.2	53.1
autol	57.8	55.8
bear1	61.6	60.3
city1	54.6	56.5
city2	58.8	57.1
desk1	54.3	54.6
facel	40.0	36.6
home3	53.2	51.1
home4	52.6	50.5
room1	42.7	40.3
room7	41.2	38.9
average	56.5	54.8

圧縮率と比較すると、JPEGロスレス符号化は、縮退差分による1次マルコフモデルの提案方式とほぼ同じ平均圧縮率であり、可変ブロックサイズセグメンテーションの提案方式よりは良い結果となっている。

しかし、他の2提案方式に比べるとJPEGロスレス符号化の方が悪く、平均値を予測値としたときのJPEGロスレス符号化に対して、提案方式の2予測法では2.4%、提案方式の交換奇偶符号では1.6%の平均圧縮率の改善率が得られる。

8.2.3 考察

上記の実験により、提案方式の2予測法がJPEGロスレス符号化よりも効果が高いことが確認された。

この比較実験で明らかになったことは、まず、第一に、予測法をユーザに選択させる方式は、妥当な方式と言えないということである。これは、一般のユーザは画像の特徴をとらえて、最適な予測法を選択するに至らないと思われるためである。その意味で、提案方式の2予測法は、ユーザの選択なしに、汎用的に種々の画像に対して効果が期待できる方式であるといえる。

第二に、予測差分を2値化し、2値算術符号化を行うことの利点が少ないということである。これは、多値算術符号化が実用化されている現時点では、最初の算術符号化である、2値画像の符号化を主眼として開発された2値算術符号化を多値の画像へ適用する必要性は低いと考えられるためである。その意味で、多値算術符号化を利用した提案方式の2予測法は、今後、期待される可逆符号化方式であるといえる。

第9章 結論

本章では、本研究で得られた成果を要約して述べる。

9.1 提案方式の特徴と今後の方向

前章で4つの提案方式の比較評価を行い、2予測法が最も効果の高い方式であることが明らかとなった。最後に、ここでは、まとめとして、表9.1に4つの提案方式の特徴と今後の方向について要約したものを掲げる。なお、同表中には記していないが、VBSSを除く3つの提案方式で共通して縮退した予測差分を用いていることも特徴である。

9.2 本研究の結論

静止画像の符号化に関し、現在、専ら画像の表示用に圧縮率の低い非可逆符号化が広く普及している。しかし、非可逆符号化は本来、画質の劣化を伴うため、編集や特徴抽出などのさらに処理を行う目的には適していない。他方、可逆符号化はこのような目的に適して

いるが、圧縮率が高いために広く普及するに至っていない。

このような認識に立って、本研究は、上述の(1)ビットプレーンの2値符号化、(2)1次マルコフモデル、(3)2予測法、(4)セグメンテーションの4つの観点から圧縮率の低減に取り組んできた。

最終的に、提案する2予測法が、4つの観点からの新たな提案方式の中では最も圧縮率が低く、また、現在の国際標準のJPEGロスレス符号化や次の国際標準の国内からの一候補である7近傍画素法よりも圧縮率が低く、今後の最も有力な方向であると思われる。

本研究は、マルチメディアの分野での編集を伴う階調画像の符号化や、画像認識の分野での画質劣化のない原画像からの特徴抽出などの非可逆符号化では対応できない応用分野に役立つほか、高精細な印刷画像などの可逆符号化を必須とする分野での符号化の研究にも重要な指針を提供するものであると言える。

表 9.1: 4提案方式の特徴と今後の方向

提案方式	特徴と今後の方向
交換奇偶符号	<ul style="list-style-type: none">・階調画像を2値のビットプレーン画像へ展開する。・今までの常套手段であるグレー符号への変換方式に勝る。・符号器の階調数への依存性が少ない。・JPEGロスレス符号化と同様な符号化方式の分野で、多値(予測差分)から2値への符号変換への適用が考えられる。・多値符号化が適さない分野への適用が考えられる。
縮退差分 1次マルコフモデル	<ul style="list-style-type: none">・直前画素での予測差分と注目画素での予測差分との相関性を利用する。・2次元の確率モデルに基づく。・状態とする予測差分のビット数の縮退と多次元化との関係の究明が必要である。
2予測法	<ul style="list-style-type: none">・画素ごとに適応的に予測法を選択する。・近傍画素での予測差分が最小であった予測法の出現パターンを利用する。・3予測法以上の複数の予測法からの選択法を確立することにより、より高い符号化効率が期待できる。
可変ブロックサイズ セグメンテーション の改善	<ul style="list-style-type: none">・サイズの異なるブロック内の画像の冗長性を除くことにより圧縮する。・大きいブロック単位で均一な画像やブロックマッチング(類似性)の効果が期待できる画像では有効であると思われる。・実験で使用した自然画像(標準画像)以外の、複雑でない画像での効果が期待できる。

謝辞

本研究は、多くの方々の御指導と御協力のもとに行うことができた。

本論文をまとめるに当たっては、鹿児島大学工学部情報工学科 村島定行教授に懇切な御指導と御鞭撻を賜った。ここに心から感謝の意を表す。また、本論文に対し、種々の有益な御教示、御助言を頂いた鹿児島大学工学部情報工学科 行田尚義教授、棚田嘉博教授、および鹿児島大学工学部電気電子工学科 宮島廣美教授に深謝する。

また、本研究の遂行に当たり、御助言を頂いた村島研究室の栗園貢氏と中村博文氏に感謝の意を表す。

- 参考文献
- [1] R. A. Reagan, "A Digital Image Compression Standard," *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 4, pp. 586-590, June 1981.
 - [2] M. A. Weinberger, J. J. Reagun, and R. A. Reagun, "Applications of Universal Context Modeling to Lossless Compression of Gray-Scale Images," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, no. 4, pp. 575-586, April 1996.
 - [3] 北田茂, 棚田嘉博, 有本幸, "ディジタル画像圧縮法の発展と将来展望," 信学誌 (D), vol. J76-D, no. 4, pp. 636-646, Apr. 1995.
 - [4] 小沢茂紀, 藤崎誠, 安田明彦, "画像圧縮法の可逆的変換符号化方式," 信学誌 (D-11), vol. J75-D-11, no. 3, pp. 429-436, March 1996.
 - [5] 小沢茂紀, 藤崎誠, "画像圧縮法の可逆的変換符号化," 信学誌 (A), vol. J77-A, no. 4, pp. 581-590, Apr. 1996.
 - [6] 佐, 河野隆二, 今井秀雄, "MDL原理を導入した画像圧縮法による画像符号化," 信学誌 (A), vol. J77-A, no. 3, pp. 1157-1166, Aug. 1994.
 - [7] J. Rissanen, "Universal Coding, Information, Prediction, and Estimation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 39, no. 4, pp. 670-676, July 1984.
 - [8] 藤崎誠, "MDL原理による画像圧縮法による画像符号化," 信学誌 (A), vol. J69-A, no. 8, pp. 974-983, Aug. 1990.
 - [9] 有本幸, 山本清実, 有本幸, "Biplane Tree Weighting法による多階層画像データのDCT法," 第14回画像処理とその応用シンポジウム予稿集, pp. 373-376, Oct. 1991.
 - [10] F.M.J. Williams, Y.M. Sharkey, and T.J. Tjallingii, "The Context-Tree Weighting Method: Basic Properties," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 653-664, May 1995.
 - [11] 立野茂夫, 平田純, "画像符号化法に関する進展とその将来展望," 信学誌 (A), vol. J74, no. 6, pp. 744-750, Dec. 1995.
 - [12] 立野茂夫, "中階層画像法の可逆的符号化," 信学誌 (D), vol. J75-D-1, no. 6, pp. 584-590, June 1996.
 - [13] N.D. Memon and A. Vetro, "On Coding Color Maps for Lossless Predictive Coding," *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 5, no. 11, pp. 1513-1517, Nov. 1995.
 - [14] 藤崎誠, "画像圧縮法" アルゴリズム入門, OQ社, 1995.
 - [15] J.J. Reagun and G.C. Langdon, "Arithmetic Coding," *IBM Journal of Res. & Dev.*, vol. 26, No. 3, pp. 149-182, March 1973.
 - [16] G.C. Langdon and J.J. Reagun, "Compression of Block-White Images with Arithmetic Coding," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 35, no. 5, pp. 555-557, June 1987.
 - [17] 小沢茂紀, "ディジタル画像圧縮法の発展," 信学誌 (D), vol. J76-D, no. 4, pp. 636-646, Apr. 1995.
 - [18] J.A. Storer, "Image and Text Compression," Kluwer Academic Publishers, Inc., 1992.
 - [19] R.J. Cigno, "Digital Compression of Still Images and Video," Academic Press, 1995.
 - [20] V. Bhaskaran and K. Konstantinides, "Image and Video Compression Standards - Algorithms and Architecture," Kluwer Academic Publishers, Inc., 1998.
 - [21] W. Han, "Digital Image Compression - Algorithms and Standards," Kluwer Academic Publishers, Inc., 1996.
 - [22] B.V. Deryzhin, "Image Data Compression - Block-Transformation Coding," IEEE Computer Society Press, 1993.
 - [23] K. Sayood, "Introduction to Data Compression," Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1995.
 - [24] 小沢茂夫, 小沢文夫, "カラー静止画像符号化標準規格方式 (JPEG) の概観 (その1)," 画像電子学会誌, vol. 20, no. 1, pp. 50-62, 1997.
 - [25] 小沢茂夫, "カラー静止画像符号化標準規格方式 (JPEG) の概観 (その2)," 画像電子学会誌, vol. 20, no. 2, pp. 112-121, 1997.
 - [26] 立野茂夫, 藤崎誠, "画像符号化法 - DCTとその他の画像符号化," オークス社, 1992.
 - [27] W.E. Pennebaker and J.L. Mitchell, "JPEG Still Image Data Compression Standard," Van Nostrand Reinhold, 1993.
 - [28] 小沢茂夫, 小沢文夫, 立野茂夫, 藤崎誠, "画像符号化標準規格方式 - JBIGアルゴリズム入門," 画像電子学会誌, vol. 20, no. 1, pp. 41-49, 1997.
 - [29] ISO/IEC 11544, "Progressive Bi-level Image Compression Standard," 1993.

参考文献

- [1] 安居院猛, 中嶋正之, “画像情報処理,” 森北出版, 1991.
- [2] 原島博監修, “画像情報圧縮,” オーム社, 1991.
- [3] 安田浩編著, “マルチメディア符号化の国際標準,” 丸善, 1991.
- [4] 堀内司朗, 有村一朗監修, “画像圧縮技術のはなし,” 工業調査会, 1993.
- [5] 画像電子学会編, “画像電子ハンドブック,” コロナ社, 1993.
- [6] 奥村晴彦, “ファイル圧縮技術,” bit, vol.27, No.1, pp.53-62, 1995.
- [7] 中嶋正之編著, “マルチメディア工学,” 昭晃堂, 1994.
- [8] 安田浩, 渡辺裕, “デジタル画像圧縮の基礎,” 日経BP出版センター, 1996.
- [9] J.A. Storer, “Image and Text Compression,” Kluwer Academic Publishers, Inc., 1992.
- [10] R.J. Clarke, “Digital Compression of Still Images and Video,” Academic Press, 1995.
- [11] V. Bhaskaran and K. Konstantinides, “Image and Video Compression Standards - Algorithm and Architectures,” Kluwer Academic Publishers, Inc., 1995.
- [12] W. Kou, “Digital Image Compression - Algorithms and Standards,” Kluwer Academic Publishers, Inc., 1995.
- [13] B.V. Dasarathy, “Image Data Compression - Block Truncation Coding,” IEEE Computer Society Press, 1995.
- [14] K. Sayood, “Introduction to Data Compression,” Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1996.
- [15] 大町隆夫, 小野文孝, “カラー静止画像符号化国際標準方式(JPEG)の概説(その1),” 画像電子学会誌, vol.20, no.1, pp.50-58, 1991.
- [16] 小野文孝, “カラー静止画像符号化国際標準方式(JPEG)の概説(その2:算術符号化),” 画像電子学会誌, vol.20, no.2, pp.113-120, 1991.
- [17] 安田浩, 藤原洋 訳, “画像符号化技術 - DCTとその国際標準,” オーム社, 1992.
- [18] W.B. Pennebaker and J.L. Mitchell, “JPEG Still Image Data Compression Standard,” Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [19] 山崎泰弘, 小野文孝, 吉田正, 遠藤俊明, “2値画像階層型符号化方式 - JBIGアルゴリズム -,” 画像電子学会誌, vol.20, no.1, pp.41-49, 1991.
- [20] ISO/IEC 11544, “Progressive Bi-level Image Compression Standard,” 1993.
- [21] R.B. Arps and T.K. Truong, “Comparison of International Standards for Lossless Still Image Compression,” Proc. IEEE, vol.82, no.6, pp.889-899, June 1994.
- [22] M.J. Weinberger, J.J. Rissanen, and R.B. Arps, “Applications of Universal Context Modeling to Lossless Compression of Gray-Scale Images,” IEEE Trans. Image Processing, vol.5, no.4, pp.575-586, April 1996.
- [23] 北田茂, 森田啓義, 有本卓, “デジタル濃淡画像の動的適応符号化法,” 信学論 (D), vol.J68-D, no.4, pp.639-646, Apr. 1985.
- [24] 小松邦紀, 瀬崎薫, 安田靖彦, “濃淡画像の可逆的なサブバンド符号化法,” 信学論 (D-II), vol.J78-D-II, no.3, pp.429-436, March 1995.
- [25] 小松邦紀, 瀬崎薫, “濃淡画像の可逆的な変換符号化,” 信学論 (A), vol.J79-A, no.4, pp.981-990, Apr. 1996.
- [26] 張, 河野隆二, 今井秀樹, “MDL規準を導入した高階調濃淡画像の算術符号化法,” 信学論 (A), vol.J77-A, no.8, pp.1157-1166, Aug. 1994.
- [27] J. Rissanen, “Universal Coding, Information, Prediction, and Estimation,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol.30, no.4, pp.629-636, July 1984.
- [28] 横尾英俊, “MDL規準による適応型データ圧縮法のモデリング,” 信学論 (A), vol.J69-A, no.8, pp.974-982, Aug. 1986.
- [29] 有村光晴, 山本博資, 有本卓, “Bitplane Tree Weighting法による多階調画像データの圧縮,” 第18回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, pp.373-376, Oct. 1995.
- [30] F.M.J. Willems, Y.M. Shtarkov, and T.J. Tjalling, “The Context-Tree Weighting Method: Basic Properties,” IEEE Trans. Inform. Theory, vol.41, no.3, pp.653-664, May 1995.
- [31] 加藤茂夫, 平田隆, “改良型多値算術符号の提案とその符号化効率に関する考察,” 画像電子学会誌, vol.24, no.6, pp.744-750, Dec. 1995.
- [32] 水野昇治, “中間調画像の予測順位符号化,” 信学論 (B-I), vol.J73-B-I, no.6, pp.554-560, June 1990.
- [33] N.D. Memon and A. Venkateswaran, “On Ordering Color Maps for Lossless Predictive Coding,” IEEE Trans. Image Processing, vol.5, no.11, pp.1522-1527, Nov. 1996.
- [34] 植松友彦, “文書データ圧縮アルゴリズム入門,” CQ出版社, 1995.
- [35] J.J. Rissanen and G.G. Langdon, “Arithmetic Coding,” IBM Journal of R&D, vol.23, No.2, pp.149-162, March 1979.
- [36] G.G. Langdon and J.J. Rissanen, “Compression of Black-White Images with Arithmetic Coding,” IEEE Trans. on Commun. vol.29, no.6, pp.858-867, June 1981.

- [37] G.G. Langdon, "An Introduction to Arithmetic Coding," IBM Journal of R&D, vol.28, No.2, pp.135-149, March 1984.
- [38] 特集, "Q-Coder Adaptive Binary Arithmetic Coder," IBM Journal of R&D, vol.32, No.6, Nov. 1988.
- [39] T.C. Bell, J.G. Cleary, and I.H. Witten, "Text Compression," Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1990.
- [40] M. Nelson, "The Data Compression Book," M&T Publishing Inc., New York, 1992.
- [41] M. Nelson 著, 萩原剛志, 山口英 訳, "データ圧縮ハンドブック," トッパン, 1994.
- [42] H.G. Musmann, P. Pirsch and H-J. Grallert, "Advances in Picture Coding," Proc. IEEE, vol.73, no.4, pp.523-548, April 1985.
- [43] 柳谷太一, 上野幾朗, 木村智広, 吉田雅之, 田部直人, 小野文孝, "適応予測を用いたロスレス符号化," 第149回研究会講演予稿, pp.1-4, 画像電子学会, Nov. 1995.
- [44] 小野文孝, "静止画符号化の標準化動向," 画像電子学会誌, vol.25, no.3, pp.200-206, June 1996.
- [45] P.G. Howard and J.S. Vitter, "Arithmetic Coding for Data Compression," Proc. IEEE, vol.82, no.6, pp.857-865, June 1994.
- [46] JIS X 9201, "高精細カラーデジタル標準画像," 日本規格協会, Oct. 1995.
- [47] N. Ranganathan, S.G. Romaniuk, and K.R. Namuduri, "A Lossless Image Compression Algorithm Using Variable Block Size Segmentation," IEEE Trans. Image Processing, vol.4, no.10, pp.1396-1406, Oct. 1995.

本研究に関する著者の学会発表

学会論文

- ・ 加治佐清光, 村島定行, “修正縮退差分によるビットプレーン画像の算術符号化,” 信学論 (B-I), vol.J79-B-I, no.11, pp.757-761, Nov. 1996.
- ・ 加治佐清光, 中村博文, 村島定行, “平均予測差分を状態とするマルコフモデルによる階調画像の可逆符号化,” 信学論 (A), 条件付採録.
- ・ 加治佐清光, 村島定行, “2予測法による階調画像の可逆符号化,” 信学論 (D-II), 投稿中.
- ・ 加治佐清光, 中村博文, 村島定行, “可変ブロックサイズセグメンテーションを用いた画像の可逆符号化の考察,” 信学論 (D-II), 投稿中.

国際会議

- ・ Kiyomitsu Kajisa and Sadayuki Murashima, “Arithmetic Coding of Bit-Plane Images with Modified Reduced Differences,” Proc. IEEE Int'l. Symp. on Inform. Theory and Its Appl., pp.100-103, Victoria, Canada, Sept. 1996.
- ・ Kiyomitsu Kajisa and Sadayuki Murashima, “Image Compression using 1st-Order Markov Model with Reduced Prediction Differences,” Proc. IEEE Int'l. Symp. on Inform. Theory and Its Appl., pp.93-96, Victoria, Canada, Sept. 1996.

学会大会, 研究会

- ・ 加治佐清光, 栗園貢, 村島定行, “階調画像へのJBIGの適用に関する一考察,” 平7九州連大, p.502, Sep. 1995.
- ・ 加治佐清光, 中村博文, 村島定行, “階調画像の可逆ブロック符号化に関する一考察,” 平8九州連大, p.448, Oct. 1996.
- ・ 中村博文, 加治佐清光, 村島定行, “ベースオフセット符号化に基づいた可逆階調画像圧縮,” 平8九州連大, p.447, Oct. 1996.
- ・ 加治佐清光, 村島定行, “2予測法による階調画像の算術符号化,” 信学技報, IE96-75, pp.9-16, Nov. 1996.
- ・ 加治佐清光, 中村博文, 村島定行, “可変ブロックサイズセグメンテーションを用いた画像の可逆符号化の考察,” 信学技報, IE96-74, pp.1-8, Nov. 1996.

本研究の動機となった著者の学会発表

学会論文

- ・ K.Kajisa, S.Shimizu, S.Wakabayashi and K. Sekiya, “Advanced 256-Color Kanji/Image Display System,” Proceedings of SID (Society of Information Display), vol.28, no.3, pp.291-295, 1987.

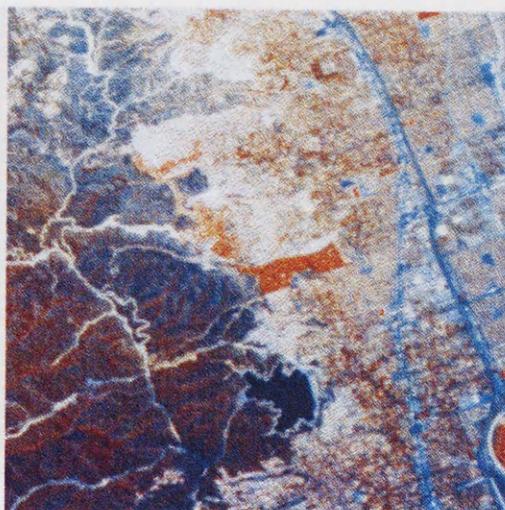
国際会議

- ・ K.Kajisa, S.Shimizu, S.Wakabayashi and K. Sekiya, “Advanced 256-Color Kanji/Image Display System,” Proceedings of The 6th International Display Research Conference, pp.412-415, Tokyo, Oct. 1986.

付 録

フルカラーSIDBA標準画像

- ・ Standard Image DataBase (東京大学生産技術研究所), RGB各8ビット.
- ・ CASIO カラーページプリンタ N4 で印刷.
- ・ 512x512画素の画像は 256x256画素へ 1/2 に縮小して印刷.
- ・ 800x600画素の画像は 320x240画素へ 40%に縮小して印刷.



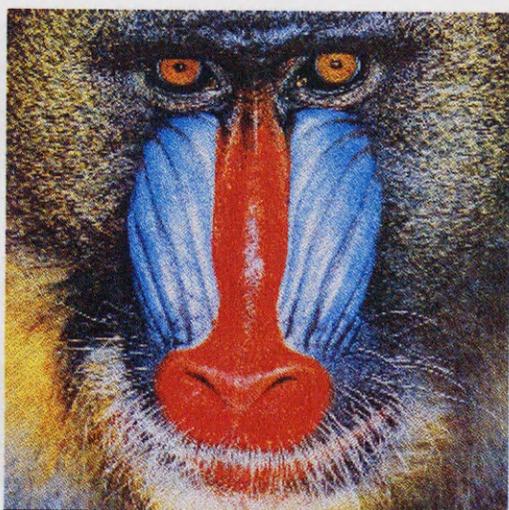
aerial (256x256画素)



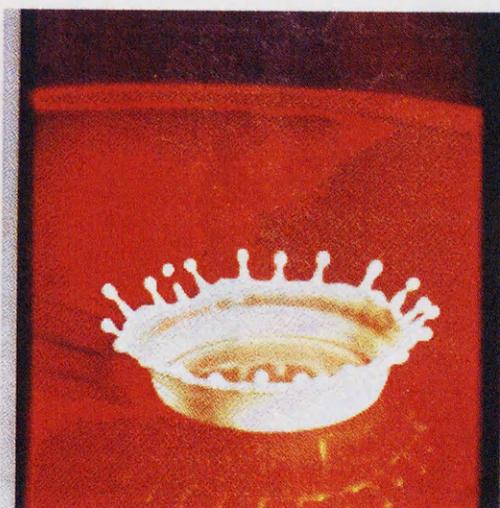
couple (256x256画素)



girl (256x256画素)



mandrill (256x256画素)



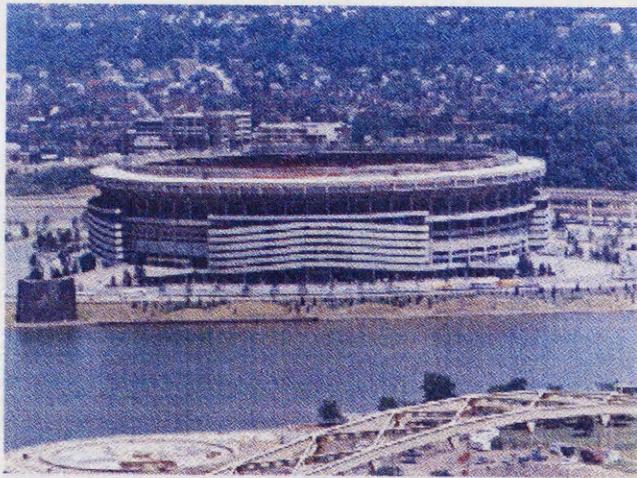
milkdrop (512x512画素)



auto1 (800x600画素)



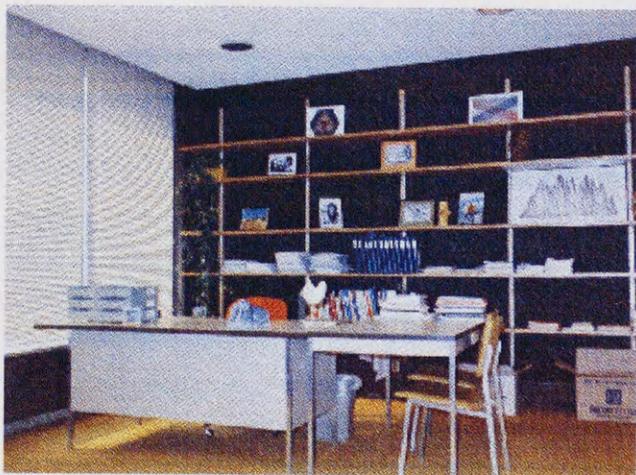
bear1 (800x600画素)



city1 (800x600画素)



city2 (800x600画素)



desk1 (800x600画素)



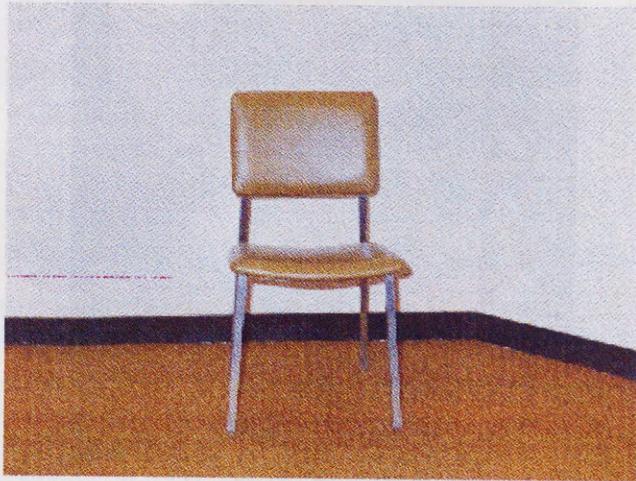
face1 (800x600画素)



home3 (800x600画素)



home4 (800x600画素)



room1 (800x600画素)



room7 (800x600画素)



椅子の識別記号: 112
椅子の名前: 椅子(木製)
椅子のバリエーション: 1200x1200画素



ソファの識別記号: 114
ソファの名前: ソファ(黄色)
ソファのバリエーション: 1200x1200画素

高精細カラーデジタル標準画像データ

- Graphic technology - Prepress digital data exchange - Standard Color Image Data (SCID).
- 次の画像は、ISO/JIS-SCID（日本規格協会）の印刷サンプルの画像である。
- SCID 画像データ（CMYK 各 8bit/pel, TIFF 形式）を 240x300 画素あるいは 300x240 画素へ 8x8 画素の平均値で 1/8 に縮小した後に、画面表示用ビットマップデータ（BMP 形式）へ変換し、CASIO カラーページプリンタ N4 で印刷。



画像の識別記号 N1
画像の名称 ポートレイト
portrait (2048x2560画素)



画像の識別記号 N2
画像の名称 カフェテリア
cafeteria (2048x2560画素)



画像の識別記号 N3
画像の名称 果物かご(籠)
fruit basket (2560x2048画素)



画像の識別記号 N4
画像の名称 ワインと食器
wine and tableware (2560x2048画素)



画像の識別記号 N5
画像の名称 自転車
bicycle (2048x2560画素)



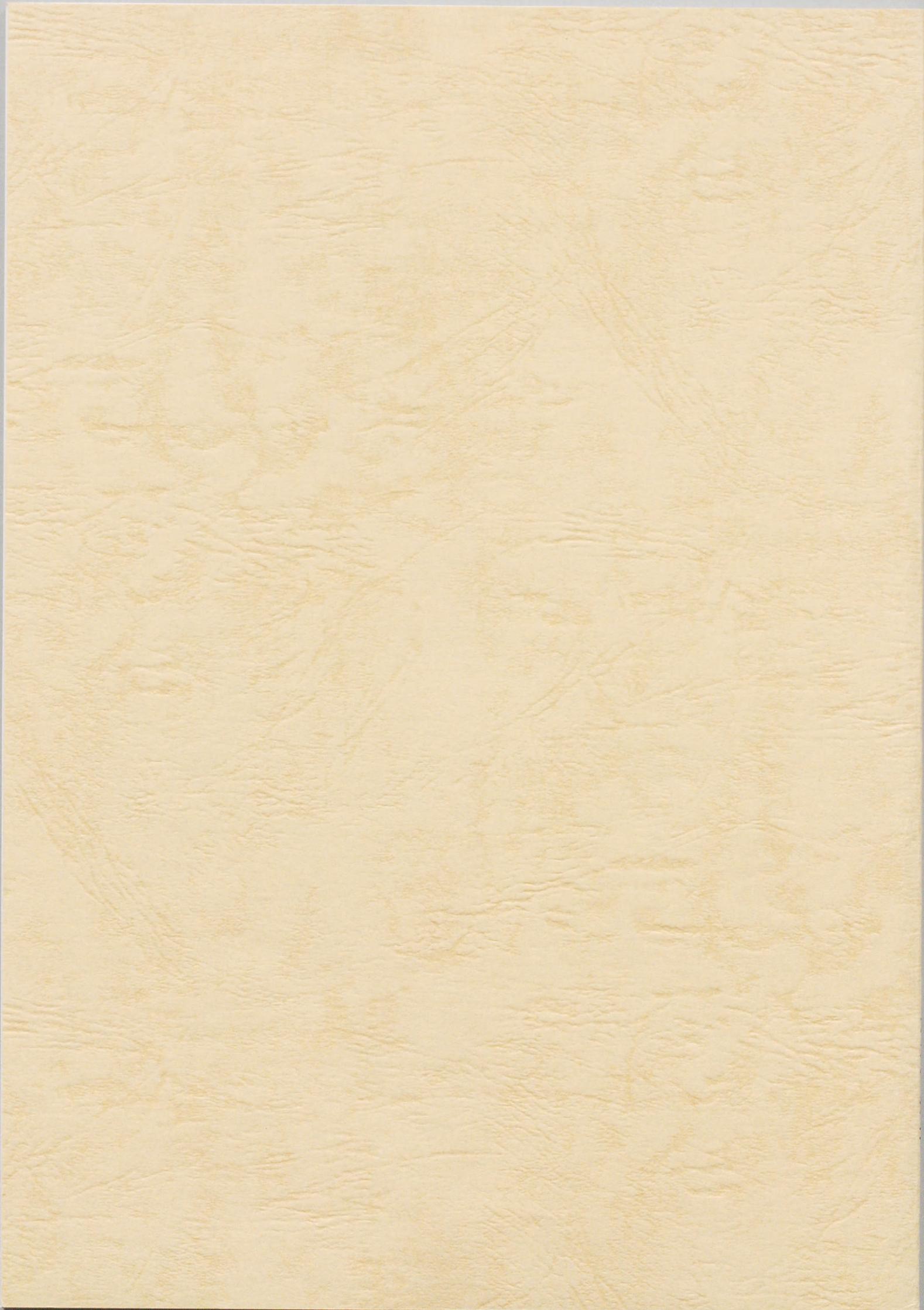
画像の識別記号 N6
画像の名称 欄
orchid (2560x2048画素)



画像の識別記号 N7
画像の名称 ミュージシャン
musicians (2560x2048画素)



画像の識別記号 N8
画像の名称 キャンドル
candle (2560x2048画素)

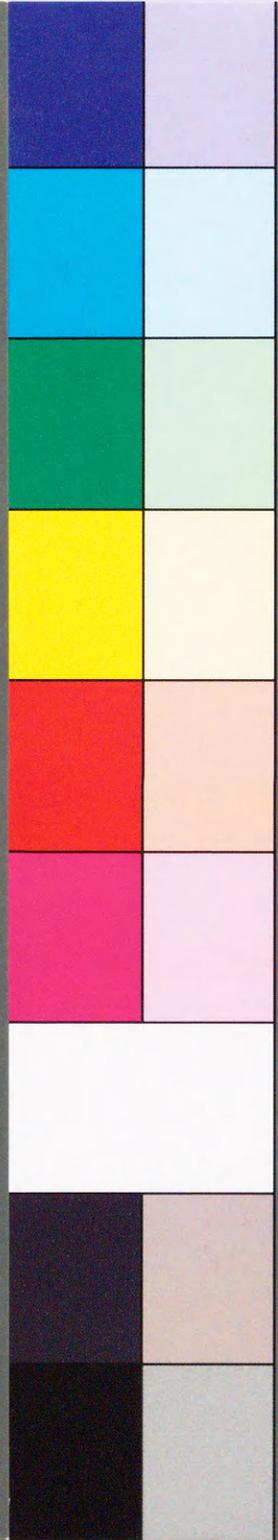


Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

