

## 静止画像の動的予測符号化における演算負荷の少ない予測器の選定法

黒木 祥光<sup>†</sup> 上繁 義史<sup>††</sup> 鎌田清一郎<sup>†††</sup>

あらまし デジタル画像データを無歪みで圧縮する手法として、一般に予測符号化が用いられる。予測符号化は符号化済みの画素を用いて符号化すべき画素を予測し、予測誤差をエントロピ符号化する手法である。線形予測における最適な予測係数は、予測誤差電力を最小化するという観点から、正規方程式により算出される。正規方程式の解は、実数で与えられるが、演算負荷の少ない予測器を実現するには、数回のシフト演算と加減算で算出可能な値、例えば  $\pm 1/2$ ,  $\pm 1/4$ ,  $\pm 3/4$  といった値が好ましい。本研究では、線形予測に用いる画素を、JPEG, JPEG-LS の可逆モードと同様に、着目画素の近傍 3 画素とし、予測係数の代数和は 1 であるとの条件の下、数回のシフト演算と加減算のみで算出可能な、演算負荷の少ない予測器に対する予測誤差電力の定量的評価を通じ、各予測器が最適となる条件を示す。また、11 種および 6 種類から成る予測器の組を提案し、ブロック適応予測に使用した場合の性能評価も示す。

### A selection method of low-complexity predictors for adaptive prediction coding of still images

Yoshimitsu KUROKI<sup>†</sup> Yoshifumi UESHIGE<sup>††</sup> Sei-ichiro KAMATA<sup>†††</sup>

**Abstract** Predictive coding is generally employed in lossless coding algorithms for digitized images. Pixel values to be coded in the predictive coding schemes are predicted from already-coded adjacent pixels, and then, an entropy coder encodes the resulting prediction residuals. This paper describes an estimate and a selection method of the simple predictors in a theoretical viewpoint, which constrained as follows: (1) The predicted values are computed by weighted summation of the neighboring three pixels identical to JPEG and JPEG-LS; (2) The predicted values are obtained with a small number of shift operations, additions, and/or subtractions; (3) The predictor coefficients sum up to 1. The comparison of the total squared error between the simple predictors and the optimum predictors obtained by solving the normal equations is discussed. With the results of the theoretical analysis, we propose a six-predictor and an eleven-predictor set predictors. The performance of the proposed predictors on actual images is also presented.

#### 1 まえがき

予測符号化は符号化済みの画素を用いて符号化すべき画素を予測し、予測誤差をエントロピ符号化する手法である。予測符号化では、この符号化処理が画素毎に行われるため、高品質な復号画像を必要とする場合に有効といわれており、実際、静止画像の国際標準 JPEG[1] および JPEG-LS[2] の可逆モードに採用されている。これらの国際標準で用いられる予測器は符号化すべき画素の直上、直左、及び左斜め上に位置する 3 画素を用いた線形予測であり、予測係数は予測値を導出する際の計算負荷を軽減するため、加減算と 1 回のシフト演算のみで実現できるように設定されている。

JPEG と JPEG-LS の差は、符号化処理の動的適応性に見出すことができる。つまり、JPEG では 8 種類 (予

測を行わない場合も含む) の予測器のうち、1 つを 1 枚の画像全域に亘って使用しているのに対し、JPEG-LS では、画素ごとに 3 種類の予測器の出力を計算し、中央値となる予測値を採用する事により、より高効率な圧縮を実現している。JPEG-LS はエントロピ符号化として、Golomb-Rice 符号 [3, 4] を採用し、符号化パラメータをもコンテキストによって動的に変化させ、更なる高効率符号化を達成しているが、本研究の対象は予測器の評価に留め、エントロピ符号化については、これ以上言及しない。

一般に、画像は局地的に統計的性質の変動する非定常な情報源と考えられるため、領域ごとに予測器を切り替えることにより、より高効率な符号化が実現される。予測器を動的に変化させる手法は、可逆符号化、非可逆符号化、双方において枚挙にいとまがないほど報告されているが、著者は、1) 符号化の進行に伴い、逐次予測器を設計・更新する手法 [5]、2) 符号化に先立ち、使用する複数の予測器を用意し、適宜最適なものを選択する手法、の 2 種類に大別出来ると認識している。また、後者で最適な予測器を選択する手法は、サイド情報として付加し、具体的に明示する方法 [6] と、符号化済みの画素を用いて推定する方法 [7]、に分けることができる。

<sup>†</sup> 久留米工業高等専門学校・  
Kurume National College of Technology

<sup>††</sup> 九州システム情報技術研究所・  
Institute of Systems & Information Technology/  
KYUSHU

<sup>†††</sup> 早稲田大学大学院情報生産システム研究科・  
Graduate School of Information,  
Production and Systems, Waseda University

ところで、線形予測において、予測誤差の2乗平均、即ち、予測誤差電力を最小化する予測係数は、正規方程式によって導出することが出来る [8]。この正規方程式にて求められた予測器を、本論文では最適な予測器と定義する。最適な予測器を符号化に使用した場合、既存の国際標準方式と比べて高効率な符号化が期待できるが、正規方程式の解は通常実数であるため、最適な予測器はJPEGやJPEG-LSのそれと比べて多くの演算を必要とする。そのため、国際標準方式と同程度の演算負荷、あるいは速度にて符号化効率の向上を図る場合、最適な予測器の使用は困難であり、従って、著者の分類した、1) 逐次予測器を設計・更新する手法、は採用し難く、2) 予め適切な予測器を設計する手法で、かつ、演算負荷の少ない予測器を用意する事が必要と考えられる。以下、演算負荷の少ない予測器とは、国際標準に倣い、少数回のシフト演算と加減算のみで構成される予測器を指す事にする。

本論文では、演算負荷の少ない予測器の予測誤差電力を定量的に評価し、幾つかの予測器を提案する。また、それらを複数用意した場合、最適となる一種を選択するための指標を示す。更に、提案する予測器とJPEGのそれをブロック適用予測に活用し、予測誤差電力の比較を行う。

## 2 線形予測の原理

第  $j$  ライン、第  $i$  サンプルにおける画素値を  $f_{i,j}$  と表記する。JPEG では、表 1 に示す 8 種類の予測器を採用しており、全て加減算と 1 回のシフト演算で実現できるようになっている。なお、SV: Selection-value が 1, 2, 4 の予測器は JPEG-LS においても使用されている。本論文で議論する予測器はこれらの国際標準と同様、符号化すべき画素の直左、直上及び左上に位置する 3 画素を用いた線形予測器である。従って、予測値  $\hat{f}_{i,j}$  は次式で定義される。

$$\hat{f}_{i,j} = a_1 f_{i-1,j} + a_2 f_{i,j-1} + a_3 f_{i-1,j-1} \quad (1)$$

任意の領域  $A$  において、予測誤差電力を最小化する予測係数  $a_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) を最適な予測係数と定義した場合、予測誤差電力

$$P = E [(f_{i,j} - \hat{f}_{i,j})^2] \quad (2)$$

を各  $a_k$  に関してそれぞれ偏微分し、0 とおくことにより、正規方程式が導かれる [8]。ここで、 $E[\cdot]$  は領域  $A$  に含まれる画素を対象とする期待値演算を表す。正規方程式を行列で表現する際、行列の各成分は画素値の自己相関関数

$$R_{ff}(a, b, c, d) = E [f_{i+a,j+b} f_{i+c,j+d}] \quad (3)$$

で与えられる。簡単のため、領域  $A$  内の画像信号は均質な確率場であると仮定すると、自己相関関数は移動に対して不変であるため、次に示すように、画素位置の差ベクトルのみに依存する。

$$R_{ff}(a, b, c, d) = R_{ff}(0, 0, c - a, d - b) \quad (4)$$

また、差ベクトルの逆ベクトルに対しても自己相関関数は不変であるため、

$$R_{ff}(0, 0, \alpha, \beta) = R_{ff}(\alpha, \beta) = R_{ff}(-\alpha, -\beta) \quad (5)$$

表 1: JPEG で使用される予測器

SV	予測器
0	no prediction
1	$f_{i-1,j}$
2	$f_{i,j-1}$
3	$f_{i-1,j-1}$
4	$f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1}$
5	$f_{i-1,j} + (f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1})/2$
6	$f_{i,j-1} + (f_{i-1,j} - f_{i-1,j-1})/2$
7	$(f_{i,j-1} + f_{i-1,j})/2$

が成立し、正規方程式は次式のようになる [10]。

$$\begin{pmatrix} R_{ff}(0, 0) & R_{ff}(1, -1) & R_{ff}(0, 1) \\ R_{ff}(1, -1) & R_{ff}(0, 0) & R_{ff}(1, 0) \\ R_{ff}(0, 1) & R_{ff}(1, 0) & R_{ff}(0, 0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{ff}(1, 0) \\ R_{ff}(0, 1) \\ R_{ff}(1, 1) \end{pmatrix} \quad (6)$$

式 (6) より、最適な予測器は、自己相関関数が算出されれば、一意に決定される。しかしながら、画像信号全体は均質な確率場ではないため、1 種類の予測器では、十分な予測効率を得ることが出来ない。従って、画像を均質と考えられる小領域に分割し、この小領域ごとに予測器を変更することにより、予測効率の向上を図る事が出来る。

## 3 予測器の選定法

### 3.1 変数の削減に用いる仮定

式 (1) を式 (2) に代入し、式 (3)、式 (5) を用いると、予測誤差電力  $P$  は予測係数  $a_k$  および自己相関関数  $R_{ff}$  の関数として表すことが出来る。しかし、そのままでは独立変数が多く、解析が困難であるため、以下に述べる仮定により、独立変数の低減を図る。画像信号の自己相関関数  $R_{ff}$  を表す近似値として、次式がしばしば用いられる。

$$R_{ff}(\alpha, \beta) = \{R_{ff}(0, 0) - \mu^2\} \rho_h^{|\alpha|} \rho_v^{|\beta|} - \mu^2 \quad (7)$$

ここで、 $\mu = E[f_{i,j}]$  であり、 $\rho_h, \rho_v$  はそれぞれ水平、垂直方向の相関の測度を表す。式 (7) は、予測器の設計のみならず、Karhunen-Loève (KL) 変換行列の導出 [10] や、殆どの非可逆符号化の国際標準にて使用されている離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform: DCT) と KL 変換の性能比較を論じる場合に採用される [11] 等、多くの場面に適用されている。また、予測符号化においても、 $\mu = 0$  のとき、即ち

$$R_{ff}(\alpha, \beta) = R_{ff}(0, 0) \rho_h^{|\alpha|} \rho_v^{|\beta|} \quad (8)$$

が成立する場合、正規方程式の解は次式で与えられる。

$${}^t(a_1 \ a_2 \ a_3) = {}^t(\rho_h \ \rho_v \ -\rho_h \rho_v) \quad (9)$$

ところで、一般のデジタル画像は非負の整数にて表現され、その期待値は 0 ではない。従って、式 (9) の予測器を用いる場合、広義のマルコフ確率場と推測される領域ごとに、予め各画素値から期待値を減ずる等の前処

理が必要となる．そのため，領域ごとに平均値を何らかの手法で符号化しなくてはならない．しかし，本論文では，平均値を別途符号化することは行わず，国際標準方式と同様に，符号化済みの3画素による単純な予測を想定したい．そこで， $\mu \neq 0$  においても式(8)が成立するとの仮定を設ける．この場合， $\rho_h = R_{ff}(1,0)/R_{ff}(0,0)$ ， $\rho_v = R_{ff}(0,1)/R_{ff}(0,0)$  であるため，式(8)の妥当性は  $\rho_{hv} = R_{ff}(1,1)/R_{ff}(0,0)$  とおくと

$$\rho_{hv} = \rho_h \rho_v \quad (10)$$

の妥当性によって検証することが出来る．著者らは幾つかの画像に対し， $8 \times 8$  画素の矩形ブロックにおける  $\rho_h$ ， $\rho_v$ ， $\rho_{hv}$  の値を3次元空間にプロットした結果と曲面  $\rho_{hv} = \rho_h \rho_v$  を比較した結果，良好な近似であるとの結果を得ている．なお，画素値は非負の整数であるため， $\rho_h$ ， $\rho_v$  の定義域  $D$  は次式で与えられる．

$$D = \{\rho_h, \rho_v : 0 \leq \rho_h \leq 1, 0 \leq \rho_v \leq 1\} \quad (11)$$

次に，予測係数に課す仮定を示す．JPEGの予測器がそうであるように，予測器の伝達関数が直流に零点を有する完全積分型[9]，即ち，予測係数の代数和を1とする条件を用いる．

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1 \quad (12)$$

### 3.2 最適な予測器の予測誤差電力

演算負荷の少ない予測器の予測誤差電力について解析する前に，最適な予測器における予測誤差電力  $P_{opt}$  を求める． $P_{opt}$  は，式(1)を式(2)に代入し，式(9)を活用すると，次式で表される．

$$P_{opt}(\rho_h, \rho_v) = R_{ff}(0,0)(1 - \rho_h^2)(1 - \rho_v^2) \quad (13)$$

以降，予測誤差電力を  $R_{ff}(0,0)$  で割った値を正規化予測誤差電力と称する．最適な予測器における正規化予測誤差電力  $V_{opt}$  は次式で与えられる．

$$V_{opt}(\rho_h, \rho_v) = (1 - \rho_h^2)(1 - \rho_v^2) \quad (14)$$

### 3.3 予測効率の評価

#### 3.3.1 $a_1 = 1$ あるいは $a_2 = 1$ とした予測器

式(9)に倣い，次の条件を採用する．

$$a_3 = -a_1 a_2 \quad (15)$$

式(12)および式(15)を満足する予測係数は以下の2通りに限定される．

$${}^t(a_1 \ a_2 \ a_3) = {}^t(1 \ s \ -s) \quad (16)$$

$${}^t(a_1 \ a_2 \ a_3) = {}^t(t \ 1 \ -t) \quad (17)$$

但し， $s$ ， $t$  は任意の実数である．この予測器は，JPEGの使用している1, 2, 4, 5, 6番の予測器を一般化したものと考えることが出来る．

以下，予測誤差電力は  $\rho_h$ ， $\rho_v$  を独立変数，予測関数を記述する変数(現時点では  $s$ ， $t$ ) をパラメータとする関数であると見なす．また，予測係数， $\rho_h$ ， $\rho_v$  等の値を示す場合，可能な限り既約分数で表す．パラメータ  $s$ ， $t$

によって表される予測器の正規化予測誤差電力  $V_1$  および  $V_2$  は，式(9)の代わりに式(16)および式(17)を代入することにより，次式で表される．

$$V_1(\rho_h, \rho_v, s) = 2(1 - \rho_h)(s^2 - 2s\rho_v + 1) \quad (18)$$

$$V_2(\rho_h, \rho_v, t) = 2(1 - \rho_v)(t^2 - 2t\rho_h + 1) \quad (19)$$

$V_1(\rho_h, \rho_v, s) = V_2(\rho_v, \rho_h, s)$  が成立するため， $s = t$  とした場合， $V_1$  と  $V_2$  は平面  $\rho_h = \rho_v$  において等値となる．従って，以下， $s = t$  として考察する．また，

$$V_1(\rho_h, \rho_v, s) - V_2(\rho_h, \rho_v, s) = 2(\rho_v - \rho_h)(s-1)^2 \quad (20)$$

より， $\rho_h \geq \rho_v$  の時  $V_1 \leq V_2$ ， $\rho_h < \rho_v$  の時  $V_1 > V_2$  が成立する．そのため，パラメータ  $s$  における予測効率  $\eta$  として，次式を定義する．

$$\eta(\rho_h, \rho_v, s) = \begin{cases} \frac{V_{opt}(\rho_h, \rho_v)}{V_1(\rho_h, \rho_v, s)} & (\rho_h \geq \rho_v) \\ \frac{V_{opt}(\rho_h, \rho_v)}{V_2(\rho_h, \rho_v, s)} & (\rho_h < \rho_v) \end{cases} \quad (21)$$

当然， $V_1$ ， $V_2$  は  $V_{opt}$  未満となる事はあり得ないので， $\eta$  の値域は  $0 \leq \eta \leq 1$  となる．平面  $\rho_h = \rho_v$  上における  $V_1$  と  $V_2$  の等価性から， $\eta$  は平面  $\rho_h = \rho_v$  に関して対称であるため，以降，次式に示す  $D$  内の領域  $D'$  について考察する．

$$D' = \{\rho_h, \rho_v : D, \rho_h \geq \rho_v\} \quad (22)$$

まず，与えられたパラメータ  $s$  に対する関数  $\eta$  の形状を明らかにし，続いて，複数のパラメータが与えられた場合，あるパラメータ  $s_k$  で表現される予測器が最も効果的となる  $\rho_h - \rho_v$  平面上の領域  $D_k$  を示す．

紙面の都合上，証明は省略するが，関数  $\eta$  の形状は， $\eta$  を  $\rho_h$ ， $\rho_v$  に関してそれぞれ偏微分することによって得られる．その結果， $\eta$  は領域  $D'$  において， $(\rho_h, \rho_v) = (1, s)$  を頂点とする凸関数であることが分かる．また，同時に，パラメータ  $s$  は  $0 \leq s \leq 1$  に限定されることも分かる．続いて，異なる複数のパラメータが与えられた場合，各パラメータが最適となる領域を求める．今，2種類のパラメータ  $s_k, s_l$  ( $s_k \neq s_l$ ) によって定義される予測器  $p_k, p_l$  が最も高効率となる領域(以下，最適領域と呼ぶ)を  $D_k, D_l$  とすると， $D_k, D_l$  の境界は， $\eta$  が凸関数であることから，境界線は単純に  $V_1(\rho_h, \rho_v, s_k) = V_1(\rho_h, \rho_v, s_l)$  で与えられ，整理すると

$$\rho_v = \frac{s_k + s_l}{2} \quad (23)$$

を得る． $p_k$  と  $p_l$  の予測効率は双方とも  $\rho_v$  軸方向に関し， $\rho_v = (s_k + s_l)/2$  において最小値になる．この最小値を新たなパラメータの追加によって改善する場合，境界線における最適パラメータの導出という視点から，式(18)を  $s$  に関して偏微分し，0とおくと

$$\frac{\partial V_x}{\partial s} = 2(1 - \rho_h)(s - \rho_v) = 0 \quad (24)$$

となり，境界線の方程式  $\rho_v = (s_k + s_l)/2$  において上式を満足する  $s$  は  $(s_k + s_l)/2$  によって与えられることが分かる．

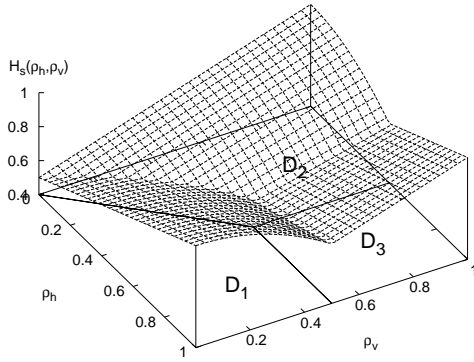


図 1: 3 種類の予測器  $p_1, p_2, p_3$  に対する予測効率と各予測器の最適領域

ここで、最も単純な例として、パラメータの集合  $S = \{0, 1\}$  とした場合、即ち、予測器

$$p_1: \hat{f}_{i,j} = f_{i-1,j} \quad (25)$$

$$p_2: \hat{f}_{i,j} = f_{i,j-1} \quad (26)$$

$$p_3: \hat{f}_{i,j} = f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1} \quad (27)$$

における予測効率および各予測器  $p_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) の最適領域  $D_k$  を図 1 に示す。ここで、予測効率  $H_s$  は複数のパラメータ  $s \in S$  で定義されるため、

$$H_s(\rho_h, \rho_v) = \max_{s \in S} \eta(\rho_h, \rho_v, s) \quad (28)$$

にて表す。なお、図 1 における  $p_1$  と  $p_2$  は  $s = 0$  に、 $p_3$  は  $s = 1$  にそれぞれ相当する。また、 $D_2$  は  $\rho_h < \rho_v$  の領域にある事に注意する必要がある。式 (23) より、予測効率が最も低下する箇所を改善するには、新たに  $s = 1/2$  を選択変数に追加し、 $S = \{0, 1/2, 1\}$  とすればよい。以下の考察にて逐次追加する予測器は、後に表 2 にまとめるため、そちらを参照されたい。なお、予測器  $p_i$  の添え字  $i$  は表 2 の SV に符合している。ここで、パラメータ  $s$  にて定義される予測器は、 $(\rho_h, \rho_v) = (1, s)$  或いは  $(s, 1)$  を頂点とする凸関数であるため、 $\rho_h = \rho_v$  付近で予測効率の低下が認められる。

### 3.3.2 $a_3 = 0$ とした予測器

我々は先の研究で、直上および直左の 2 画素を用いた線形予測器に関し、同様の考察を行っており、これら 2 画素による予測は  $\rho_h$  と  $\rho_v$  が近い場合、高い予測効率を示すとの結果を得ている [12]。従って上記予測器の欠点を補うため、直上、直左画素を用いた予測器を追加する。これは、 $a_3 = 0$  に設定することと等価であるため、パラメータ  $u$  を用い、 $a_1, a_2, a_3$  を以下のように設定する。

$${}^t(a_1 \ a_2 \ a_3) = {}^t(u \ 1 - u \ 0) \quad (29)$$

パラメータ  $u$  を用いた予測器は、JPEG の 1, 2, 7 番の予測器を一般化したものと考えられる。この時、正規化予測誤差電力  $V'$  は式 (29) を式 (2) に代入し、 $R_{ff}(0, 0)$  で割ることにより、次式で表される。

$$V'(\rho_h, \rho_v, u) = 2[u(u-1) + (1-u\rho_h)\{1 + (u-1)\rho_v\}] \quad (30)$$

従って、この時の予測効率  $\eta'$  は

$$\eta'(\rho_h, \rho_v, u) = \frac{V_{opt}(\rho_h, \rho_v)}{V'(\rho_h, \rho_v, u)} \quad (31)$$

で与えられる。

先程と同様、 $\eta'$  の形状を調べるため、 $\eta'$  を  $\rho_h, \rho_v$  に関してそれぞれ偏微分し、0 とおくと次式を得る。

$$u\{(1-u)\rho_v - 1\}(\rho_h^2 + 1) + 2\rho_h\{u^2 - u + 1 - (1-u)\rho_v\} = 0 \quad (32)$$

$$(1-u)(u\rho_h - 1)(\rho_v^2 + 1) + 2\rho_v(u^2 - u + 1 - u\rho_h) = 0 \quad (33)$$

$\eta'$  は、これら 2 式を満足する  $(\rho_h, \rho_v)$  を頂点とする凸関数ではあるが、平易な方程式で表現できないため、具体的な頂点の座標のみ後に示す。

続いて、2 種類のパラメータ  $u_m, u_n$  ( $u_m \neq u_n$ ) によって定義される予測器の最適領域  $D_m, D_n$  の境界を求める。定理 2 の場合と同様、 $V'(\rho_h, \rho_v, u_m) = V'(\rho_h, \rho_v, u_n)$  より、次式を得る。

$$\rho_v = \frac{\rho_h + 1 - u_m - u_n}{(1 - u_m - u_n)\rho_h + 1} \quad (34)$$

上式で与えられる境界を最大値へと転化するには、前述の場合と同様に  $\eta'$  を  $u$  に関して偏微分し、0 とした結果、 $(u_m + u_n)/2$  を新たなパラメータとして追加すればよいことが分かる。以降、予測器は 2 つのパラメータ  $s \in S$  と  $u \in U$  によって定義されるため、新たな予測効率として次式の  $H_{s,u}$  を定義する。

$$H_{s,u}(\rho_h, \rho_v) = \max_{s \in S} (\max_{u \in U} \eta, \max_{u \in U} \eta') \quad (35)$$

なお、 $s$  と  $u$  によって定義される予測器に対する予測効率の境界は  $V_1(\rho_h, \rho_v, s) = V'(\rho_h, \rho_v, u)$ 、あるいは  $V_2(\rho_h, \rho_v, s) = V'(\rho_h, \rho_v, u)$  によって与えられる。導出の手法は上記手法と同様であるため、結果のみ後で示すので、そちらを参照されたい。

### 3.4 予測器の例

以上の結果より、予測器の例として  $S = \{0, 1/2, 3/4, 1\}$ 、 $U = \{1/4, 1/2, 3/4\}$  とした場合の予測器を提案し、表 2 に示す。表 2 には、各予測器が最適となる座標  $(\rho_h, \rho_v)$  も示した。また、これらの予測器に対する予測効率および各予測器の最適領域を図 2 に、最適領域  $D_i$  と  $D_j$  の境界線を表す方程式  $b_{i,j}$  とその定義域を表 3 にそれぞれ示す。これらの予測器を用いた場合、予測効率の最小値は  $H_{s,u}(13/20, 13/20) = 0.811$  である。

表 2: 提案する予測器と最適座標

SV	予測器	最適座標
0	no prediction	(0,0)
1	$f_{i-1,j}$	(1,0)
2	$f_{i,j-1}$	(0,1)
3	$f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1}$	(1,1)
4	$(f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1})/2$	(1,1/2)
5	$(f_{i,j-1} + f_{i-1,j} - f_{i-1,j-1})/2$	(1/2,1)
6	$(f_{i-1,j} + f_{i,j-1} - f_{i-1,j-1})3/4$	(1,3/4)
7	$(f_{i,j-1} + f_{i-1,j} - f_{i-1,j-1})3/4$	(3/4,1)
8	$(f_{i-1,j} + f_{i,j-1})/2$	(0.439,0.439)
9	$(3f_{i-1,j} + f_{i,j-1})/4$	(0.691,0.214)
10	$(f_{i-1,j} + 3f_{i,j-1})/4$	(0.214,0.691)

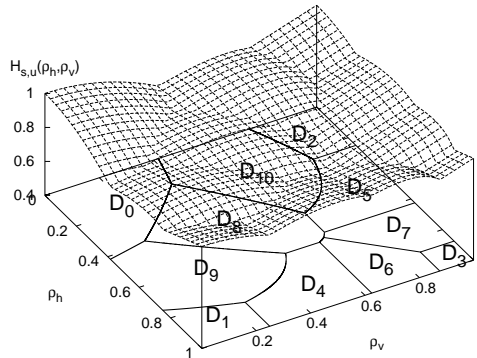


図 2: 提案する 11 種類の予測器における予測効率と各予測器の最適領域

#### 4 ブロック適応予測への適用

提案した予測器をブロック適応予測に使用し、その有効性について検証する。表 4 はテスト画像をそれぞれ (a)  $16 \times 16$ , (b)  $8 \times 8$ , (c)  $4 \times 4$  画素の矩形ブロックに分割し、ブロック毎に予測器を適応化した場合の予測誤差電力である。ここで、最適予測とはブロック毎に正規方程式を解き、予測係数を計算したものである。正規方程式の自己相関関数は式 (3) を用いて全て計算しており、画像が均質な確率場であるとの仮定は用いていない。また、JPEG とは、JPEG で使用されている 8 種類の予測器をブロック毎に適応化した場合である。一方、提案法では表 2 に示した 11 種類の予測器と、その中の 6 種類の予測器のみを使用する場合について測定を行った。後者は、一般的な自然画像の相関関数は 1 に近いいため、大多数のブロックにおいて、 $\rho_h, \rho_v$  は共に 0.5 以上の値であると仮定し、その領域にて最適予測器となる SV = 3, 4, ..., 8 のみを使用したものである。

最適な予測器の選択法として、用意された全予測器に対して予測誤差電力を計算した後、予測誤差電力が最小となる予測器を選択する手法を用いた。もちろん、表 3 を活用し、算出した  $\rho_h, \rho_v$  から最適な予測器を求める方法も考えられるが、何れの領域に属するかの判断が複雑であるため、ここでは上記の単純な手法を採用した。先ず、JPEG と提案する 11 種類の予測器を比較した

表 3: 図 2 に示した最適領域  $D_i, D_j$  の境界  $b_{i,j}$

	境界線を表す関数および定義域
$b_{0,8}$	$\rho_v = (2\rho_h - 1)/(\rho_h - 2)$ ( $0.146 \leq \rho_h \leq 0.382$ )
$b_{0,9}$	$\rho_v = (12\rho_h - 5)/(3\rho_h - 4)$ ( $0.382 \leq \rho_h \leq 5/12$ )
$b_{0,10}$	$\rho_v = (4\rho_h - 5)/(3\rho_h - 12)$ ( $0 \leq \rho_h \leq 0.146$ )
$b_{1,4}$	$\rho_v = 1/4$ ( $16/19 \leq \rho_h \leq 1$ )
$b_{1,9}$	$\rho_v = (-4\rho_h + 3)/(3\rho_h - 4)$ ( $3/4 \leq \rho_h \leq 16/19$ )
$b_{2,5}$	$\rho_h = 1/4$ ( $16/19 \leq \rho_v \leq 1$ )
$b_{2,10}$	$\rho_v = (4\rho_h + 3)/(3\rho_h + 4)$ ( $0 \leq \rho_h \leq 1/4$ )
$b_{3,6}$	$\rho_v = 7/8$ ( $7/8 \leq \rho_h \leq 1$ )
$b_{3,7}$	$\rho_h = 7/8$ ( $7/8 \leq \rho_v \leq 1$ )
$b_{4,6}$	$\rho_v = 5/8$ ( $2/3 \leq \rho_h \leq 1$ )
$b_{4,8}$	$\rho_h = 2/3$ ( $1/2 \leq \rho_v \leq 5/8$ )
$b_{4,9}$	$\rho_v = (-8\rho_h + 7)/(-13\rho_h + 12)$ ( $2/3 \leq \rho_h \leq 16/19$ )
$b_{5,7}$	$\rho_h = 5/8$ ( $2/3 \leq \rho_v \leq 1$ )
$b_{5,8}$	$\rho_v = 2/3$ ( $1/2 \leq \rho_h \leq 5/8$ )
$b_{5,10}$	$\rho_v = (12\rho_h - 7)/(13\rho_h - 8)$ ( $1/4 \leq \rho_h \leq 1/2$ )
$b_{6,7}$	$\rho_v = \rho_h$ ( $13/20 \leq \rho_h \leq 7/8$ )
$b_{6,8}$	$\rho_v = (-17\rho_h + 13)/(-20\rho_h + 16)$ ( $13/20 \leq \rho_h \leq 2/3$ )
$b_{7,8}$	$\rho_v = (-16\rho_h + 13)/(-20\rho_h + 17)$ ( $5/8 \leq \rho_h \leq 13/20$ )
$b_{8,9}$	$\rho_v = (4\rho_h - 1)/(-\rho_h + 4)$ ( $0.382 \leq \rho_h \leq 2/3$ )
$b_{8,10}$	$\rho_v = (4\rho_h + 1)/(\rho_h + 4)$ ( $0.146 \leq \rho_h \leq 1/2$ )

場合、(a)  $16 \times 16$  画素の画像「PM001」以外全ての画像において、本手法の方が有効との結果を得た。提案法は JPEG に比べ多くの予測器を有するため、この優位性は当然の結果といえる。画像「PM001」における劣位性は画像内に存在する斜め方向のテクスチャに因ると思われる。JPEG では斜め方向の画素を用いた予測を含んでいるが、提案法には無いため、この予測器の有無が影響したと考えられる。

次に、JPEG と提案する 6 種類の予測器の比較を行う。(a)  $16 \times 16$  画素の場合、6 種類の予測器は、JPEG に比べ、予測器の個数が少ないにも関わらず画像「PM001」を除く全ての画像で良好な結果を得ている。しかし、ブロックサイズが小さくなるほど、JPEG に対する優位性は見られなくなり、(c)  $4 \times 4$  画素に至っては画像「PA022」、「SA001」を除く全ての画像で、JPEG の方が優位な結果となっている。6 種類の予測器を選定する際、 $\rho_h, \rho_v$  が共に 0.5 以上であるとの条件を用いたが、小さなブロックでは、これを満足しないために生じた結果と考えられる。これは、画素数が多く、相関が高い「PA022」、「SA001」において、提案法が優位となる事からも想像できる。同様の理由より、提案する 6 種類の予測器が有効な場合、予測器の数を 11 に増加させても予測誤差電力の低下は比較的少ないと言える。

最後に、最適予測と提案法を比較する。提案法による予測効率、即ち、最適予測における予測誤差電力を各予測器で最適化した場合の予測誤差電力で割った値はブロックサイズが小さくなるほど、低下することが分かる。例えば、提案する 11 種類の予測器を使用した場合、予測効率は 0.811 以上を示すはずであるが、画像「PM001」の場合、(a)  $16 \times 16$  画素で 0.803, (c)  $4 \times 4$  画素で 0.558 まで低下している。式 (8) にて用いた仮定の不成立が原因と思われる。

#### 5 むすび

本研究では、直左、直上及び左上の画素を用いた線形予測器において、予測係数の代数和が 1 であるとの条件

表 4: 予測誤差電力の比較

(a) 16 × 16 画素ブロック				
画像	最適予測	JPEG	提案法	
			6 種類	11 種類
肌色チャート <sup>1</sup>	14.59	17.06	17.00	16.45
天気予報 <sup>1</sup>	37.57	46.65	46.50	44.66
チューリップ <sup>2</sup>	227.98	256.67	254.67	253.67
ヘアバンドの女性 <sup>2</sup>	29.59	34.76	33.81	32.98
スイスの山村 <sup>2</sup>	384.92	425.11	423.96	420.46
PA022 <sup>3</sup>	183.08	215.10	205.30	204.67
PM001 <sup>3</sup>	1298.44	1616.57	1659.49	1616.74
SA001 <sup>3</sup>	423.62	484.08	469.75	468.22

(b) 8 × 8 画素ブロック				
画像	最適予測	JPEG	提案法	
			6 種類	11 種類
肌色チャート <sup>1</sup>	13.08	16.00	16.21	15.48
天気予報 <sup>1</sup>	30.50	42.60	43.31	40.79
チューリップ <sup>2</sup>	213.24	240.91	238.63	235.55
ヘアバンドの女性 <sup>2</sup>	25.79	31.55	31.08	30.01
スイスの山村 <sup>2</sup>	354.53	395.73	395.62	386.67
PA022 <sup>3</sup>	166.43	205.16	195.58	194.04
PM001 <sup>3</sup>	1125.36	1544.54	1586.09	1535.97
SA001 <sup>3</sup>	366.62	468.36	442.21	439.32

(c) 4 × 4 画素ブロック				
画像	最適予測	JPEG	提案法	
			6 種類	11 種類
肌色チャート <sup>1</sup>	10.62	14.48	15.26	14.21
天気予報 <sup>1</sup>	22.17	37.99	39.94	36.60
チューリップ <sup>2</sup>	172.70	211.80	212.83	204.47
ヘアバンドの女性 <sup>2</sup>	19.36	27.64	28.06	26.33
スイスの山村 <sup>2</sup>	289.14	350.40	357.89	340.01
PA022 <sup>3</sup>	123.58	172.91	172.40	167.74
PM001 <sup>3</sup>	805.87	1391.14	1443.90	1389.15
SA001 <sup>3</sup>	253.28	414.30	386.65	378.79

<sup>1</sup>512×480 画素 256 階調, <sup>2</sup>512×472 画素 256 階調  
<sup>3</sup>4,096×4,096 画素 4,096 階調

の下, 少数回のシフト演算と加減算のみで実現可能な予測器の予測誤差電力について考察した. 同時に, 予測器の選定を行い, 6 種類, あるいは 11 種類から成る予測器を提案し, 各予測器が最適となる条件を示した. この条件は水平および垂直に隣接する画素間の相関から一意に求められるが, 提案する予測器に対しては複雑な処理が必要である事が判明したため, 最適な予測器の選択処理をも簡素化する予測器の設計が検討課題として残った.

提案する予測器と JPEG の予測器をブロック適応予測に用いて比較した結果, 画像の画素間相関が高い場合, 提案する 6 種類の予測器の方が予測器の個数が少ないにもかかわらず, 予測誤差電力が低いとの結果を得ることが出来た. また, 11 種類の予測器はほぼ全ての画像, 全ての条件で JPEG に比べ, 予測誤差電力の低下が見られた. しかし, 提案法では斜め方向の相関が高い場合, 予測誤差電力は JPEG より大きいとの結果を得た. 今後の課題として, 斜め方向の相関が高い場合への対応, 符号化への実装, 画素適応型予測への応用等が考えられる.

## 参考文献

[1] ISO/IEC 10918-1, Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements

and guidelines, 1994.

[2] ISO/IEC 14495-1, Lossless and near-lossless compression of continuous-tone still images: Baseline, 1999.

[3] S.W. Golomb, "Run-length encodings," IEEE Trans. Information Theory, vol.IT-12, pp.399-401, July 1966.

[4] R.F. Rice, "Some practical universal noiseless coding techniques," Tech. Rep. JPL-79-22, Jet Propulsion Lab., Pasadena, California, Mar. 1979.

[5] 例えば, G. Motta, J.A. Storer, and B. Carpentieri, "Lossless image coding via adaptive linear prediction and classification," Proc. IEEE, vol.88, no.11, pp.1970-1976, Nov. 2000.

[6] 例えば, 松田一郎, 森 弘史, 前田譲治, 伊東 晋, "可逆符号化のためのレートをもっとする予測器の設計と評価," 信学論 (D-II), vol.J85-D-II, no.3, pp.448-456, March 2002.

[7] 例えば, X. Li and M.T. Orchard, "Edge-directed prediction for lossless compression of natural images," IEEE Trans. Image Processing, vol.10, no.6, pp. 813-817, June 2001.

[8] J. Makhoul, "Linear Prediction: A Tutorial Review," Proc. IEEE, vol.63, no.4, pp.561-580, April 1975.

[9] 吹抜敬彦, "画像のデジタル信号処理 増補版", 日刊工業出版社, 東京, 1992.

[10] A. Rosenfeld and A.C. Kak, "デジタル画像処理," 長尾 真 (監訳), 近代科学社, 東京, 1978.

[11] K.R. Rao and P. Yip, "画像符号化技術 -DCT とその国際標準-", 安田 浩, 藤原 弘 (訳), オーム社, 東京, 1992.

[12] 黒木祥光, 上繁義史, "予測符号化における予測係数の量子化," 信学技報, vol. 100, no. 18, pp. 73-79, 2000.