

画像の可変ブロック符号化における 双 1 次曲面パッチの最小 2 乗推定

長谷川 誠† 山崎 一生††

濃淡画像を逐次十字型に 4 等分割し、ブロック内の輝度値を双 1 次曲面パッチによって近似して符号化する。ブロック歪みが発生しないようにパッチを連続に保ちながら最小 2 乗推定し、近似誤差を最小化する方法を提案する。この方法で符号化すると、ブロックの頂点輝度値でパッチを固定する従来の復号化が適用できる。また、近似画像の構成要素である基底画像は互いに Cauchy の関係を満たし、ブロックの頂点輝度値を制御して画像全体の輝度値を変換することが可能である。最小 2 乗推定によって各種標準画像の画質をいずれも約 1.0 dB 向上させる。量子化が及ぼす最小 2 乗推定への影響は小さいことを示す。

Estimation of Bilinear Patch by the Least Squares Method for Image Coding Based on Non-uniform Blocks

MAKOTO HASEGAWA† and ISSEI YAMASAKI††

A gray-scale image is subdivided into non-uniform blocks and a bilinear patch approximates block luminance values. In order to minimize approximation errors without block distortions, it is proposed that these patches which continue to connect together are estimated by the least squares method. In the decoder, the conventional method of fitting patches through luminance values on vertices is useful. As basis-images which are components of an image have Cauchy's relation, luminance values can be converted with control of vertex values. Simulation results show that the least squares method provides better quality (PSNR: +1.0 dB) for the test images. The proposed method has little influence on quantization.

1. はじめに

濃淡画像を効率良く蓄積、伝送するためには、データ量を圧縮する符号化技術が必要である。筆者らは、濃淡画像を 3 次元空間内の立体的な面としてとらえ、画像が与えられた 2 次元平面上の領域を逐次十字型に 4 等分割(可変ブロック分割)し、ブロック内の輝度値を双 1 次曲面パッチによって近似して符号化する方法を検討してきた^{1)~5)}。この方法は画像の局所的な性質(エッジ部、平坦部)を考慮し、領域を可変サイズのブロックに区分して符号化することが可能である。人物像などの比較的単調な画像を低ビットレートで符号化する場合、国際的に標準化されている符号化方式(JPEG)よりも圧縮効率が高くなる。JPEG やベク

トル量子化など、画像を領域分割して符号化する方法にはブロック歪み—ブロックの境界における画質の劣化—が発生するが、本方法ではパッチを連続に接続することによって歪みを補正することができる³⁾。

これまで、ブロックの 4 隅における原画像の輝度値(3 次元空間内の点)で固定される双 1 次曲面パッチを用いてきたが、ここでは、パッチを最小 2 乗推定して近似誤差を最小化することを考える。ところで、パッチをブロックごとに個別に推定する方法が安易に考えられるが、パッチが不連続に接続されるためにブロック歪みが発生する。また、画像を格子状に分割し、輝度値をスプライン曲面で最小 2 乗近似してブロック歪みを抑える方法が提案されているが、これを可変ブロック分割に応用することはできない⁶⁾。そこで、可変ブロックのパッチを連続に保ちながら最小 2 乗推定する方法を検討する。各パッチを複数の基底パッチに分解し、基底パッチによって構成される基底画像で画像を表現して最小 2 乗推定する。なお、大きさの異なるブロックの境界で輝度値の段差が生じるため、基底

† 新潟大学総合情報処理センター
Integrated Information Processing Center, Niigata University

†† 新潟大学工学部情報工学科
Faculty of Engineering, Niigata University

画像の基底パッチを連続に補正する方法を提案する。

ここで述べる基底パッチの補正方法を導入すると、基底画像の線形和で画像を再構成しなくても、従来の復号化によって同様な再生画像が得られること、また、基底画像は互いに Cauchy の関係を満たし、ブロックの頂点輝度値を制御して再生画像全体の輝度値が変換できることを示す。

次の 2 章では可変ブロック符号化の概要を示し、3 章ではブロックの頂点における原画像の輝度値でパッチを固定する従来の方法を述べる。パッチを最小 2 乗推定する方法を 4 章で提案する。また、推定に要する時間を短縮する方法を述べる。5 章で提案法の付加機能について述べる。6 章では標準画像 (ITE 肌色チャート, Lena) を用いて実験し、次の 5 点について考察する。(1) 推定に要する時間を短縮する効果を示す。(2) 符号化の際に輝度値の量子化が必要となるが、量子化歪みによって最小 2 乗推定の効果が軽減されることが懸念される。量子化ステップ数を変動させながら量子化歪みが及ぼす影響について考察する。(3) パッチを個別に最小 2 乗推定する方法と従来法との近似画像を比較し、ブロック歪みについて考察する。(4) ブロックの頂点輝度値を最小 2 乗推定する効果を示す。(5) 本方法と JPEG との性能を比較する。

2. 可変ブロック符号化の概要^{1)~5)}

3次元の直交座標系 xyz 空間を考え、2次元 xy 平面内の座標をベクトル r で表記し、 z 軸方向に輝度値をとる。濃淡画像を 3次元空間内の立体的な面としてとらえて $f(r)$ と書き表す。画像を逐次十字型に 4 等分割し、分割された各ブロックの輝度値を双 1 次曲面パッチで近似する。なお、双 1 次曲面パッチをあてはめる方法については次章で述べる。各ブロックの近似精度がある限界値以上になるまで領域分割を繰り返す (付録参照)。輝度値の変化の大きな領域 (エッジなど) は小さなブロックに、輝度値の変化の穏やかな領域 (背景など) は大きなブロックに分割される。双 1 次曲面パッチによる近似画像 $g(r)$ を次の 4 種類のデータで符号化する¹⁾。(1) 領域分割の状態を 4 分木で表現し、枝葉を深さ優先探索によって符号化した後、ハフマン符号化する。(2) ブロックの頂点輝度値を予測符号化する。なお、このとき予測誤差を Lloid-Max の方法で量子化し⁷⁾、さらにハフマン符号化する。量子化レベルの各代表値は Lloid-Max のアルゴリズムに

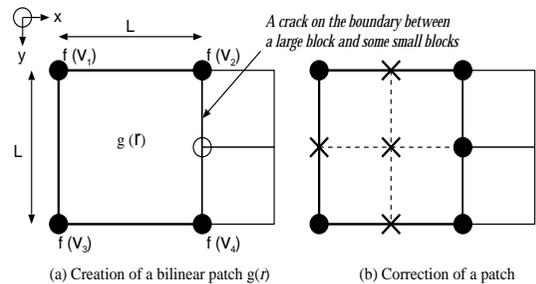


図 1 ブロックの頂点における原画像の輝度値によってパッチを固定する方法 (a) とブロック歪みを補正する方法 (b)

Fig. 1 (a) Fitting a patch through luminance values on vertices, (b) correcting a patch to reduce cracks.

よって導出されるが、このとき、(3) 予測誤差の分散と、(4) レベル数とが必要となる。これら 2 つの値をそれぞれ実数型、整数型で記憶する。

3. ブロックの頂点における原画像の輝度値でパッチを固定する方法 (従来法)¹⁾

双 1 次曲面 $g(r)$ は、一般的に 4 つの変数 a, b, c, d を用いて

$$g(r) = axy + bx + cy + d \quad (1)$$

と定義される。たとえば、図 1(a) に示す一辺の長さが L の正方形ブロックに双 1 次曲面を張ることを考える。ブロックの左上、右上、左下、右下の頂点における原画像の輝度値をそれぞれ $f(v_1), f(v_2), f(v_3), f(v_4)$ とすると、4 つの輝度値を通る条件から 4 つの変数 a, b, c, d を解き、

$$g(r) = \frac{f(v_1) - f(v_2) - f(v_3) + f(v_4)}{L^2}xy + \frac{f(v_2) - f(v_1)}{L}x + \frac{f(v_3) - f(v_1)}{L}y + f(v_1) \quad (2)$$

となる。なお、図のように大きさの異なるブロックが隣接する場合、隣り合うパッチが不連続に接続してブロック歪みとなるため、図 1(b) に示すようにブロックを細分割してパッチが連続になるように補正する。なお、新たに必要となる \times 印の輝度値については、補正前のパッチの輝度値を用いることにする。補正の必要性はブロックの辺上に隣接ブロックの頂点があるか否かを調べればよく、すなわち、ブロックの内部における情報だけでパッチを独立に生成していくことが可能である。

4. 双 1 次曲面パッチの最小 2 乗推定 (提案法)

4.1 双 1 次曲面パッチによる近似画像の表現 原画像と近似画像との 2 乗誤差が最小となるように

予測誤差データの確率分布を分散が等しいラプラス分布で近似し、レベル数に応じてステップ幅や代表値を決めていくアルゴリズムである。

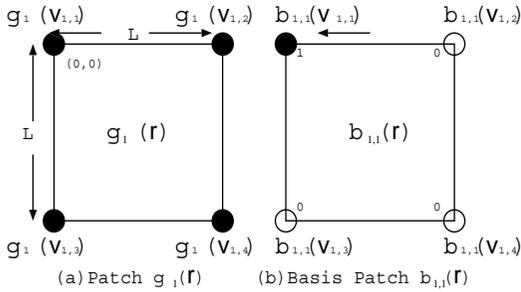


図2 双1次曲面パッチ (a) とその基底パッチ (b)
Fig. 2 (a) Bilinear patch and (b) basis patch.

双1次曲面パッチをあてはめる方法について述べる。パッチを各ブロックで個別に最小2乗推定する方法が安易に考えられるが、パッチが不連続となりブロック歪みが発生する。そこで、パッチを連続に保ちながら推定する方法を考える。

まず、画像が M 個のブロック B_i ; ($1 \leq i \leq M$) で分割されている場合、図2(a)に示すブロック B_i の双1次曲面パッチ $g_i(r)$ は、式(2)より、

$$g_i(r) = \frac{g_i(v_{i,1}) - g_i(v_{i,2}) - g_i(v_{i,3}) + g_i(v_{i,4})}{L_i^2} xy + \frac{g_i(v_{i,2}) - g_i(v_{i,1})}{L_i} x + \frac{g_i(v_{i,3}) - g_i(v_{i,1})}{L_i} y + g_i(v_{i,1}) \quad [r \in B_i] \quad (3)$$

$$= 0 \quad [\text{otherwise}] \quad (4)$$

となる。式(3)は座標 r がブロック B_i の内部にある場合を示し、ブロックの外部については0とする。 $g_i(v_{i,1})$, $g_i(v_{i,2})$, $g_i(v_{i,3})$, $g_i(v_{i,4})$ はブロック B_i の頂点におけるパッチ $g_i(r)$ の輝度値であり、最小2乗推定によって定めることにする。

ここで、図2(b)に示すように、

$$b_{i,1}(v_{i,1}) = 1, \\ b_{i,1}(v_{i,2}) = b_{i,1}(v_{i,3}) = b_{i,1}(v_{i,4}) = 0 \quad (5)$$

となる双1次曲面パッチを基底パッチ $b_{i,1}(r)$ と定義し、同様に $b_{i,2}(r)$, $b_{i,3}(r)$, $b_{i,4}(r)$ を定義すると、双1次曲面パッチ $g_i(r)$ は

$$g_i(r) = \sum_{j=1}^4 g_i(v_{i,j}) b_{i,j}(r) \quad (6)$$

となる。また、近似画像 $g(r)$ は M 個の双1次曲面パッチ $g_i(r)$; ($1 \leq i \leq M$) によって構成されるので、

$$g(r) = \sum_{i=1}^M g_i(r) \quad (7)$$

となり、式(6)より

$$g(r) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^4 g(v_{i,j}) b_{i,j}(r) \quad (8)$$

となる。

ところで、隣接し合うブロックは互いに同じ頂点を共有する場合があるので、頂点の座標 $v_{i,j}$ の表記—ブロック B_i の頂点 j における座標—を改め、ブロックに関係なく画像全体をラスタ走査し、座標 v_k ; ($1 \leq k \leq N$) と再表示する。なお、 N はブロックの頂点数である。ある座標 v_k に着目し、 $b_{i,j}(v_k) = 1$ となる基底パッチ $b_{i,j}(r)$ の総和、すなわち

$$h_k(r) = \sum_{(i,j) \in \{(i,j) | b_{i,j}(v_k) = 1\}} b_{i,j}(r) \quad (9)$$

を基底画像 $h_k(r)$ と定義する。式(8)は基底画像 $h_k(r)$ を用いて

$$g(r) = \sum_{k=1}^N g(v_k) h_k(r) \quad (10)$$

と書き換えられる。

4.2 基底画像の補正

基底画像においても輝度値の段差が発生し、近似画像にブロック歪みが発生することがある。たとえば、図3、図4に示す基底画像 $h_5(r)$ において、ブロック B_3 とブロック B_4 との境界で輝度値の段差が発生している。そこで、図3(b)に示すようにブロック B_3 を十字型に4等分割し、基底パッチ $b_{3,2}(r)$ を4つの基底パッチ $b_{3,2,i}(r)$; ($1 \leq i \leq 4$) によって

$$b'_{3,2}(r) = \sum_{i=1}^4 b_{3,2,i}(r) \quad (11)$$

と張り替える。なお、 $b_{3,2,i}(r)$ を張るためには、図3(b)の×印で示す輝度値 $b_{3,2}(v_a)$, $b_{3,2}(v_b)$, $b_{3,2}(v_c)$, $b_{3,2}(v_d)$ が必要となり、これらの値は補正前の基底パッチ $b_{3,2}(r)$ の輝度値

$$b_{3,2}(v_a) = 0.5 \quad b_{3,2}(v_b) = 0 \\ b_{3,2}(v_c) = 0.25 \quad b_{3,2}(v_d) = 0 \quad (12)$$

とする。また、図中の $b_{3,2}(v_e)$ については

$$b_{3,2}(v_e) = 0 \quad (13)$$

とする。すなわち、基底画像 $h_5(r)$ は図4(b)のように補正される。ブロック B_3 の双1次曲面パッチ $g_3(r)$ は、図3の(b)から(f)に示す5枚の基底パッチ $b'_{3,i}(r)$; ($1 \leq i \leq 5$) によって分解されることになる。

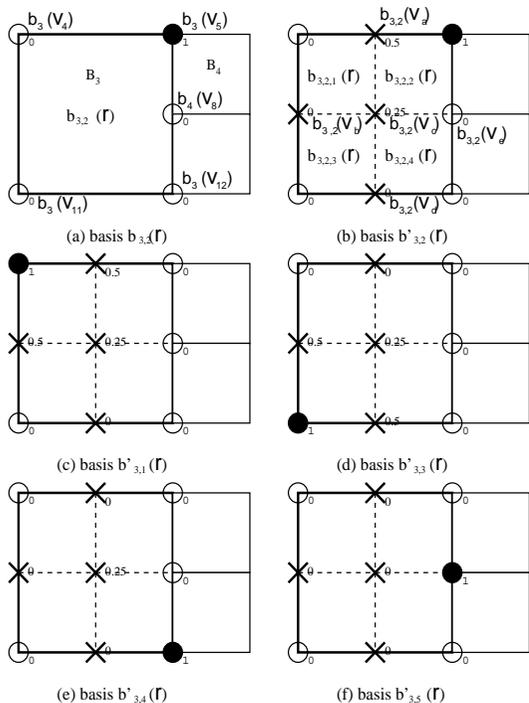


図3 基底パッチの補正

Fig. 3 Correction of basis patch.

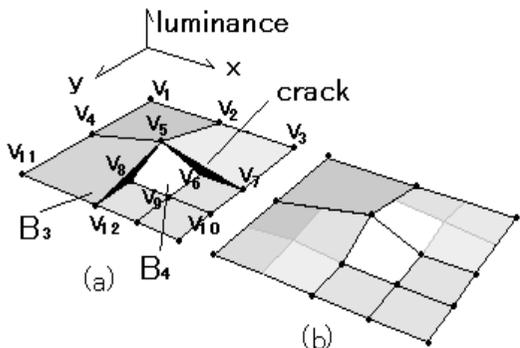


図4 基底画像 $h_5(r)$ における輝度値の段差 (a) とその補正 (b)
 Fig. 4 (a) Luminance cracks in the basis image $h_5(r)$,
 (b) corrected version of image in (a).

4.3 最小2乗推定によるパッチのあてはめ

画素数 R のデジタル濃淡画像を $f(r_i); (1 \leq i \leq R)$, 近似画像を $g(r_i); (1 \leq i \leq R)$ とし, 式 (10) を用いて 2 乗誤差を

$$E^2 = \sum_{i=1}^R (f(r_i) - g(r_i))^2 = \sum_{i=1}^R (f(r_i) - \sum_{k=1}^N g(v_k) h_k(r_i))^2 \quad (14)$$

と定義する. 式 (14) を任意の頂点輝度値 $g(v_l)$ について偏微分すると

$$\frac{\partial E^2}{\partial g(v_l)} = -2 \sum_{i=1}^R \{f(r_i) - \sum_{k=1}^N g(v_k) h_k(r_i)\} h_l(r_i) \quad (15)$$

となり, 左辺を 0 とすると

$$\sum_{i=1}^R f(r_i) h_l(r_i) = \sum_{k=1}^N g(v_k) \sum_{i=1}^R h_k(r_i) h_l(r_i) \quad (16)$$

となる. N 個の頂点輝度値 $g(v_l); (1 \leq l \leq N)$ のそれぞれについて式 (16) が得られ, これらの式を

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & \cdots & h_{M,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g(v_1) \\ \vdots \\ g(v_M) \end{bmatrix} \quad (17)$$

と表す. なお, $f_l, h_{l,k}$ は, それぞれ

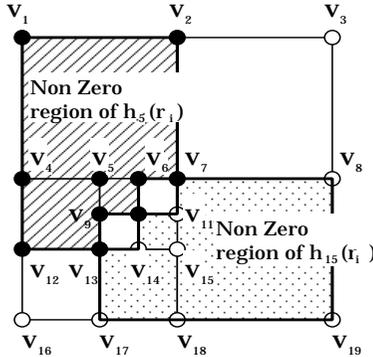
$$f_l = \sum_{i=1}^R f(r_i) h_l(r_i) \\ h_{l,k} = \sum_{i=1}^R h_k(r_i) h_l(r_i) \quad (18)$$

である. 式 (17) で示す連立方程式を $g(v_k)$ について解く.

ところで, 領域が細かく分割されてブロックの頂点数が多くなると, 式 (17) の正方行列 H の次数は高くなり, 行列 H の算出, および, 連立方程式を解く操作に長時間を要する. そこで, ここでは行列 H を効率的に算出する方法を述べる.

(1) $h_{a,b} = h_{b,a}$ であり, 行列 H は対称行列である. 行列 H の上三角要素を式 (18) で算出し, 下三角要素へコピーする.

(2) 非ゼロの領域が互いに重ならない 2 つの基底画像 $h_a(r_i)$ と $h_b(r_i)$ との内積は 0 となり, 要素 $h_{a,b}$ は 0 である. たとえば, $h_{5,k}$ について考える. $h_5(r_i)$ の非ゼロの領域は v_5 を含むブロックの集合 (図 5 の斜線領域) である. この領域に含まれない頂点 $v_k; (k = 3, 8, 11, 14 \sim 19)$ に関する基底画像 $h_k(r_i)$ と $h_5(r_i)$ との非ゼロの領域は重ならない (図 5 に $h_{15}(r_i)$ と $h_5(r_i)$ との関係を示す). 要素 $h_{5,k}$ を式 (18) で算出せず, ただちに 0 とする.

図5 基底画像 $h_5(r_i)$, $h_{15}(r_i)$ の非ゼロ領域Fig. 5 (a) Non-zero region of basis image $h_5(r_i)$, $h_{15}(r_i)$.

5. 提案法の付加機能

5.1 従来法による復号化

最小2乗推定されたブロックの頂点輝度値と補正された基底画像とを用いて式(10)で画像を再生することが一般的に考えられるが、3章で述べた従来法によって復号化しても同様な再生画像が得られる。

たとえば図3に示すブロック B_3 のパッチを前者の方法で再生する場合、図3(b)から(f)までの基底パッチにそれぞれ $g(v_5)$, $g(v_4)$, $g(v_{11})$, $g(v_{12})$, $g(v_8)$ を乗じて総和するため、 $g(v_a)$ の値は

$$\begin{aligned} g(v_a) &= 0.5g(v_5) + 0.5g(v_4) + 0g(v_{11}) \\ &\quad + 0g(v_{12}) + 0g(v_8) \\ &= 0.5g(v_5) + 0.5g(v_4) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。一方、従来法で再生する場合、 $g(r_a)$ は $g(v_5)$, $g(v_4)$, $g(v_{11})$, $g(v_{12})$ による双1次曲面の値となり、式(2)より

$$g(v_a) = \frac{g(v_5) + g(v_4)}{2} \quad (20)$$

であり、式(19)と式(20)との結果は等しい。 $g(v_b)$, $g(v_c)$, $g(v_d)$ についても同様な結果が得られ、ブロック B_3 に張られる4枚のパッチは方法によらず等しい。すなわち、2つの方法の再生画像は等しいのである。従来法による復号化は、基底画像を生成する必要がなく、ブロックごとに順次パッチを再生することが可能であり効率的である。

5.2 Cauchy の関係と輝度値の変換

各ブロックにおける基底パッチの総和は、式(3)、式(5)により

$$\begin{aligned} b_{i,1}(r) &= \frac{1}{L^2}xy - \frac{1}{L}x - \frac{1}{L}y + 1 \\ b_{i,2}(r) &= -\frac{1}{L^2}xy + \frac{1}{L}x \end{aligned}$$

$$b_{i,3}(r) = -\frac{1}{L^2}xy + \frac{1}{L}y$$

$$b_{i,4}(r) = +\frac{1}{L^2}xy$$

$$\sum_{j=1}^4 b_{i,j}(r) = 1 \quad (21)$$

となる。基底画像 $h_k(r)$ についても、

$$\sum_{k=1}^N h_k(r) = 1 \quad (22)$$

であることは明らかである。また、図3(b)から(f)までの5つの基底関数の総和が1になることから、補正後であっても同様な性質がある。この性質は形状処理工学の分野で Cauchy の関係と呼ばれ、曲線・曲面の座標変換に対して形状不変性があることが知られている¹⁰⁾。ここでは、ブロックの頂点輝度値を制御して再生画像全体の輝度値が変換できることを示す。

ブロックの頂点における輝度値 $g(v_k)$; ($1 \leq k \leq N$) を A 倍し B を加えて $Ag(v_k) + B$ に変換することを考える。式(10)の右辺は、Cauchy の関係を示す式(22)により

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^N \{Ag(v_k) + B\} h_k(r) \\ &= A \left\{ \sum_{k=1}^N g(v_k) h_k(r) \right\} + B \left\{ \sum_{k=1}^N h_k(r) \right\} \\ &= Ag(r) + B \end{aligned} \quad (23)$$

となる。再生画像全体の輝度値が同様に変換されていることが分かる。

6. 実験

6.1 実験用の画像

映像情報メディア学会から提供されている標準画像「肌色チャート(carnation)」、「天気予報」、「スイスの山村」、「チューリップ」、および、SIDBA 標準画像「woman」、画像処理の実験で一般的に用いられている画像「Lena」を実験に用いる(図6)。これらの画像は、縦256×横256画素によって構成され、各画素は3原色 R, G, B の信号を持つカラー画像である。3原色 R, G, B の信号を次の式

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (24)$$

で輝度信号 Y に変換し、さらに256階調(8 bits)に均等量子化して実験に用いる。

6.2 符号化・復号化に要する時間

標準画像を符号化して処理時間を計測し、4.3節で述べた行列 H を効率的に算出する方法(1)、(2)の効

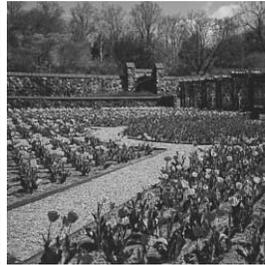


(a) carnation

(b) weather forecast



(c) Switzerland



(d) tulip



(e) woman



(f) Lena

図6 実験で用いる標準画像

Fig. 6 Test chart.

果を検証する．ここでは，クロック周波数が 750 MHz のプロセッサを用いて肌色チャートのビットレートを 0.058 bpp にデータ圧縮し，処理に要した時間を表 1 に示す．なお，ビットレートとは符号化データの記憶容量 C (bits) を画素数 R で割った値，すなわち

$$B = C/R \quad [\text{bpp}] \quad (25)$$

である．ブロック数は 553，ブロックの頂点数は 689 であり，行列 H は 689 次元の正方行列となる．パッチを最小 2 乗推定によって最適化しない場合，符号化に要する時間は 7 秒である．行列 H を効率的に算出する方法 (1)，(2) を適用せずにパッチを最小 2 乗推定すると 11 時間以上も必要となる．方法 (1) によって処理時間は約半分となり，方法 (2) によって 12 分程度となる．2 つの方法を適用することによって処理時間は 7 分程度となる．すなわち，処理時間を 2% 以下に短縮させることが可能である．なお，パッチの最適化は符号化で行う処理であり，復号化に要する時間はともに 1 秒未満である．画像を符号化して長期間保存

表 1 符号化・復号化に要する時間
Table 1 Processing time for codec.

処理	方法	演算時間
符号化	パッチを最適化しない場合	7 秒
	方法 (1)，(2) を適用しない場合	11 時間 1 分 32 秒
	方法 (1) を適用する場合	5 時間 32 分 12 秒
	方法 (2) を適用する場合	11 分 51 秒
	方法 (1)，(2) を適用する場合	7 分 28 秒
復号化	方法によらず	1 秒未満

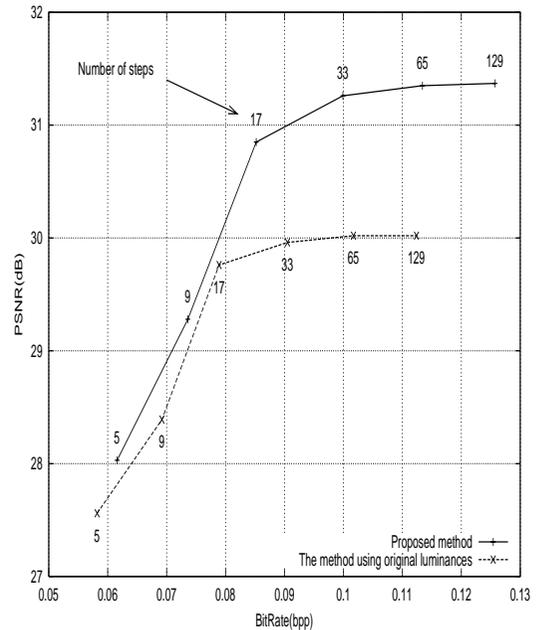


図7 量子化による圧縮効率への影響 (肌色チャート)

Fig. 7 Quantization influence on coding performance (ITE chart).

する用途では，符号化に多少の時間を要しても大きな問題とはならない場合も多いが，これらの工夫によって符号化時の利便性が飛躍的に向上する．

6.3 頂点輝度値の量子化による影響

ブロックの頂点における輝度値は最小 2 乗推定によって実数となり，この値をそのまま符号化すると膨大なデータ量となるために量子化が必要である．ここでは，予測符号化で一般的に利用されている Lloid-Max の量子化⁷⁾を適用するが，量子化歪みによって最小 2 乗推定の効果が打ち消されてしまうことが懸念される．そこで，量子化ステップ数を変動させながら量子化の影響を考察する．なお，ステップ幅を調節した方が量子化歪みを考察するのに好ましいが，Lloid-Max の量子化は非線形量子化であるために，ここではステップ数を変動させる．

図 7 の + 印は，領域分割におけるブロックの近似精度 (付録参照) を 4 に設定して肌色チャートを符号



(a) Proposed method.
(Bitrate 0.085 bpp, PSNR 30.85 dB)



(b) Least squares method in each block.
(Bitrate 0.084 bpp, PSNR 29.51 dB)

図8 各種方法におけるブロック歪み(肌色チャート)
Fig. 8 Block distortion of each method (ITE chart).

化した場合のビットレートと画質(信号対雑音比)との関係を示している。なお、信号対雑音比は、式(14)と輝度値の最大値 I によって

$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{E^2}{R \cdot I^2} \quad [\text{dB}] \quad (26)$$

と定義される。印に添えられた数字は量子化ステップ数である。量子化ステップ数を少なくしていくと、ビットレートが削減され、量子化歪みによって画質が低下する結果が示されている。量子化ステップ数を17未

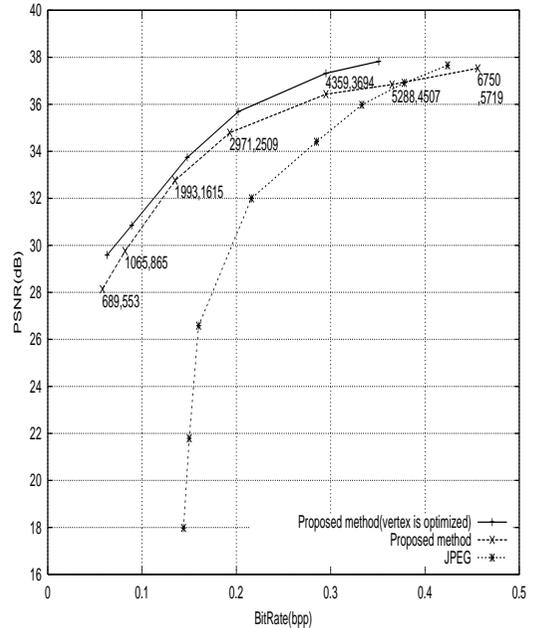


図9 「肌色チャート」の圧縮効率
Fig. 9 Coding performance of ITE chart.

満にすると画質が急激に低下する。したがって、肌色チャートの場合、量子化の効果が最も高くなる量子化ステップ数は17であるといえる。

ブロックの頂点における原画像の輝度値でパッチを固定する方法(従来法)の結果を図7の×印で示し、提案法(+印)の結果と比較する。図の範囲において提案法は従来法よりも全体的に高画質であり、量子化しても最小2乗推定の効果が明確に現れている。特に、量子化ステップ数を17に設定する場合、最小2乗推定によって画質が約1.0 dB向上している。量子化歪みが最小2乗推定に及ぼす影響は小さいといえる。

6.4 双1次曲面パッチの連続性とブロック歪み

双1次曲面パッチを各ブロックで個別に最小2乗推定する方法(ブロック別推定法),および、提案法の再生画像を図8(a),(b)にそれぞれ示す。いずれも領域分割における近似精度(付録参照)を4に設定して肌色チャートを符号化した場合の結果であり、ビットレートはそれぞれ0.085 bpp, 0.084 bppである。ブロック別推定法の場合,図8(b)に示すように双1次曲面パッチが不連続に接続し,ブロックの境界で輝度値の段差が発生する場合があります。顔や鼻などに顕著なブロック歪みが発生している。しかし,輝度値の相関が高い領域(単色の背景)では量子化ステップサイズが同一,もしくは非常に近い値になる可能性は高く,そのような場合にはパッチの不連続による輝度値の段差は発生しない,または視覚的に目立つほど発生しない。

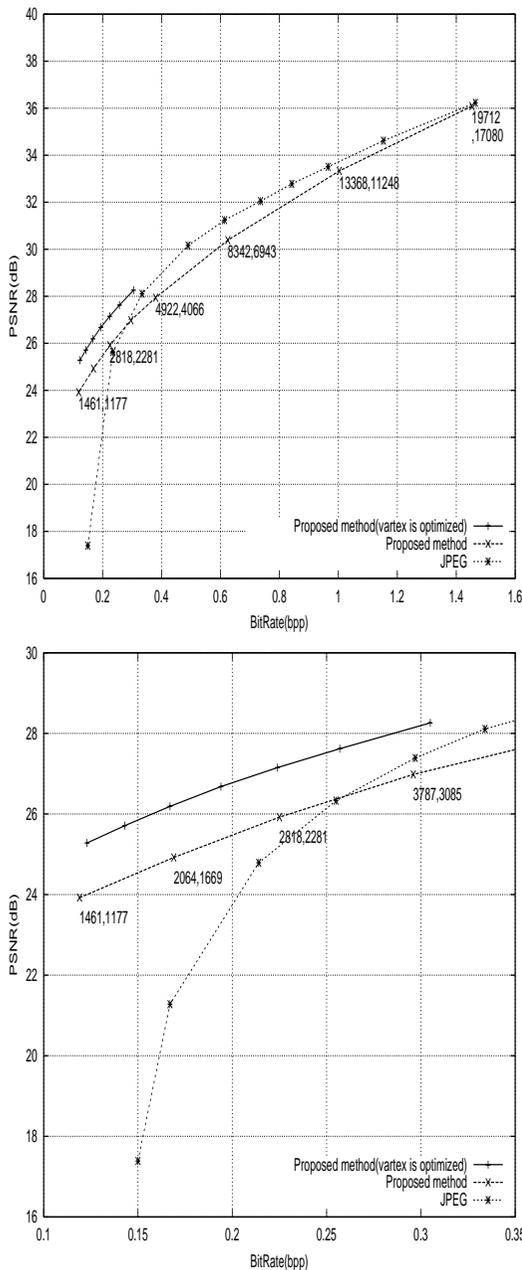


図 10 「Lena」の圧縮効率
Fig. 10 Coding performance of Lena.

一方、提案法の場合、パッチの連続性を保ちながら最小 2 乗推定するので、図 8 (a) に示すようにブロック歪みが軽減される。なお、輝度値の段差による歪みは発生しないが、量子化歪みは発生するので、ブロック歪みが完全に削除されるわけではない。図 8 (a), (b) の画質を信号対雑音比で評価すると、それぞれ 30.85 dB, 29.51 dB であり、提案法の方が高画質である。パッチを個別に推定した方が自由度が高く高画質になると一

見考えられるが、提案法は 4.2 節の補正によって隣接ブロックの輝度値も利用し、さらにパッチを細分割してより複雑な近似が可能となり、ブロックの輝度値を 1 枚のパッチで近似するブロック別推定法よりも近似能力が高くなるのである。

6.5 最小 2 乗推定の効果

ブロックの頂点における原画像の輝度値によってパッチを固定する方法 (従来法) と提案法との圧縮効率を比較し、最小 2 乗推定の効果を考察する。従来法と提案法とで肌色チャートを符号化した場合のビットレートと画質との関係を図 9 の × 印と + 印とにそれぞれ示す。× 印に添えられている 2 つの数値は、左側がブロック頂点数、右側がブロック数を示している。なお、提案法については、ブロックの頂点数が 5000 を超えると 4.3 節で述べた行列 H がメモリ不足によって確保できず、測定の限界を迎えることとなった。実験の範囲内 (ビットレート 0.05 ~ 0.35 bpp) において、提案法の方が従来法よりも画質が 0.7 ~ 1.1 dB 高く、最小 2 乗推定によって画質が向上していることが分かる。同様に、Lena を符号化した結果を図 10 に示す。実験の範囲内において、提案法の方が従来法よりも画質が 1.0 ~ 1.2 dB 高くなっている。また、図 11 に示すスイスの山村についても画質が 1.0 ~ 1.2 dB 高くなっている。すなわち、最小 2 乗推定によって画質がビットレートに影響されず一様に約 1.0 dB 向上すること、この効果は画像の種類によらないことが分かる。

6.6 JPEG との性能比較

人物像などの比較的単調な画像を低ビットレートで符号化する場合、本方法は JPEG よりも圧縮効率が高くなることを先に述べた。ここでは、各標準画像を符号化し、JPEG との圧縮効率を比較することによって本方法の適用範囲を明らかにしよう。図 9, 図 10, 図 11 より、いずれの方法も特性曲線は変曲点を 1 つ持つ右上がりの形状をとる。変曲点付近ではいずれの画像も JPEG の方が 1 ~ 2 dB 程度高画質である。一方、低ビットレートの場合、本方法の方が高画質であり、肌色チャートを 0.15 bpp にデータ圧縮する場合、本方法の方が JPEG よりも 10 dB 以上も高くなる。また、高ビットレートの場合も本方法の方が高画質である。

ところで、視覚で劣化を感じない程度の画質を 35 dB とし、この画質におけるビットレートと条件付きエントロピーとの関係を図 12 に示す。なお、ここで用いる条件付きエントロピーとは、ある注目している画素

ここでは 750 MB のメモリを搭載した計算機、および、行列の各要素が倍精度 (64 ビット) の数値計算ライブラリを用いた。

7. む す び

濃淡画像の可変ブロック分割符号化において、ブロック歪みが発生しないように、パッチを連続に保ちながら最小 2 乗推定する方法を提案した。大きさの異なるブロックの境界で輝度値の段差が生じるため、基底画像を補正する方法を示した。ここで述べた補正方法を適用すると、ブロックの頂点輝度値でパッチを固定する従来法によって復号化できること、また、基底画像は互いに Cauchy の関係を満たし、ブロックの頂点輝度値を制御して画像全体の輝度値が変換できることを明らかにした。実験によって、(1) 符号化に要する時間を短縮する方法によって、処理時間が 2% 以下になること、(2) 量子化歪みの影響は小さく、最小 2 乗推定の効果があること、(3) パッチを個別に推定するとブロックの境界で輝度値の段差が発生すること、提案法では輝度値の段差によるブロック歪みは発生しないこと、なお、量子化歪みは発生するため、ブロック歪みは完全に削除されるわけではないこと、(4) 最小 2 乗推定によって画質が約 1.0dB 向上すること、この効果は画像の種類やビットレートによらないこと、(5) 条件付きエントロピーが 4.0 bits 以下の単調な画像を 0.20 bpp 以下にデータ圧縮する場合、本方法の方が JPEG よりも高画質が得られることを示した。

ところで、双 1 次曲面パッチを用いて濃淡画像を可変ブロック分割符号化する方法は、先に述べたように低ビットレートにおける圧縮効率が JPEG に比べて高い特性がある。また、画像を格子状に領域分割してスプライン曲面で近似する符号化も同様な性質がある。そこで、画像を低周波成分と高周波成分とに分解し、前者をスプライン曲面で近似し、後者を離散コサイン変換して符号化する方法が提案されている¹³⁾。この提案では、スプライン曲面の制御点を不等間隔にすると、これらの座標を記憶するために膨大なデータ量が必要となり、そのため固定ブロック分割を採用している。本方法を低周波成分の符号化に導入することは面白い課題であり、スプライン曲面による符号化との比較を含め、稿を改めて述べることにする。

参 考 文 献

- 1) 長谷川誠, 山崎一生: 可変ブロック分割と双 1 次曲面パッチ近似による画像データの圧縮, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1399-1408 (2001).
- 2) 長谷川誠, 山崎一生: 双 1 次曲面パッチを用い

た濃淡画像データの圧縮における予測符号化の適用, 電子情報通信学会技術報告, IE97-64, pp.1-6 (1997).

- 3) 山崎一生, 長谷川誠, 五十嵐智, 岡田貞実: 三角平面パッチを用いた多階調画像データの圧縮, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-D-II, No.6, pp.1038-1047 (1992).
- 4) 長谷川誠, 山崎一生, 岡田貞実: 三角平面パッチを用いたカラー画像の圧縮, 電子情報通信学会技術報告, IE91-107, pp.1-16 (1992).
- 5) 大島 透, 長谷川誠, 古川貴雄, 山崎一生: 濃淡画像の区分線形近似におけるブロック分割方法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J78-D-II, No.5, pp.776-782 (1995).
- 6) 渡辺敏明: B-spline 曲面を用いた画像符号化方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J77-B-I, No.4, pp.216-226 (1994).
- 7) Sayood, K.: *Introduction to Data Compression*, pp.194-205, Morgan Kaufmann Publishers (1996).
- 8) Samet, H.: Data Structure for Quadtree Approximation and Compression, *Comm. ACM*, Vol.28, No.9, pp.973-993 (1985).
- 9) Samet, H.: *Application of Spatial Data Structure*, pp.22-26, Addison Wesley Publishing Company (1989).
- 10) 山口富士夫: 形状処理工学 (I), 日刊工業新聞社, pp.20-24 (1982).
- 11) 伊東 晋: 画像情報処理の基礎, 東京理科大学出版会, pp.117-137 (1986).
- 12) 岡田貞美, 芝田博之, 渋谷嗣晴, 山崎一生: 可変長ブロック DCT 符号化法におけるブロック分割方法の一検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J75-D-II, No.8, pp.1386-1396 (1992).
- 13) 柳原英孝, 河上雅範, 工藤峰一, 外山 淳, 新保勝: スプライン曲面を用いた画像の 2 チャンネル符号化, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J83-D-II, No.5, pp.1266-1273 (2000).

付 録

A.1 領域分割における近似精度の評価⁵⁾

ブロック B における累積 2 乗誤差を

$$ASE = \sum_B (f(\mathbf{r}) - g(\mathbf{r}))^2 \quad (28)$$

と定義する。なお、ここでの \sum_B はブロック B 内のすべての画素についての総和を意味する。累積 2 乗誤差を用いてブロック内の近似精度を

$$SNR_a = -10 \log_{10}(ASE/p^2) \quad (29)$$

と定義する。なお、ここでの p は輝度値の最大値である。近似精度 SNR_a でブロック内の近似精度を評価することによって、式 (26) に示した信号対雑音比を

用いる場合よりも人間の視覚特性に適合した領域分割が可能となる。

(平成13年5月2日受付)

(平成13年11月14日採録)



長谷川 誠 (正会員)

平成3年新潟大学工学部情報工学科卒業。同大学大学院工学研究科修士課程修了。同大学大学院自然科学研究科情報理工学専攻(博士後期課程)在学中。平成10年新潟大学講師(総合情報処理センター)。画像データ圧縮に興味を持っている。電子情報通信学会, 画像電子学会各会員。



山崎 一生 (正会員)

昭和36年電気通信大学電波工学科卒業。同年通産省電気試験所(現電子技術総合研究所)入所。文字認識, 印字品質評価等の研究に従事。昭和54年新潟大学教授(工学部情報工学科)。文字・図形・画像に興味を持っている。工学博士(東京工業大学)。電子情報通信学会員。