

可逆 DCT における乗算器係数の最適語長配分法

西田 治[†] 岩橋 政宏^{†a)} 神林 紀嘉[†]

A Word Length Allocation Method for Multipliers of the Lossless DCT

Osamu NISHIDA[†], Masahiro IWAHASHI^{†a)}, and Noriyoshi KAMBAYASHI[†]

あらまし 可逆/非可逆・統合符号化の一手法としてリフティング構成された可逆 DCT (LDCT) が近年研究されている。例として、乗算器のない 4 点可逆アダマール変換を用いて LDCT の乗算器数を低減する手法や、非分離型 2 次元構成による丸め誤差の低減手法などが挙げられる。しかし、演算負荷の軽減を目的とした乗算器係数値の短語長化については、LDCT に関してはこれまであまり研究されていない。本論文では LDCT 内の乗算器係数値の短語長化による画質劣化の度合として「画質係数感度」を新たに定義し、これを用いた乗算器係数値の語長配分法を提案する。シミュレーション実験の結果、一様な語長配分を行った場合よりもおよそ 2 ビット程度短い平均語長で同等の画質を実現できること、及び、従来の実数乗算を、平均語長 3 [bit] 程度の整数乗算に置換できることが示された。本論文で述べた係数感度を考慮して従来の実数乗算を整数乗算に置換することで、例えばリアルタイムソフトウェアエンコーダのような応用における処理の高速化や、ハードウェア実現時の回路規模の縮小が期待できると考えられる。

キーワード 可逆, DCT, 感度, 語長, ラウンディング

1. ま え が き

マルチメディア技術の発展により、デジタル表現された静止画像や動画があらゆる分野で利用されている。これと同時に、膨大なデジタル画像データを圧縮・復号する高効率符号化技術の役割はますます重要となっている。

画像符号化方式の国際標準である JPEG アルゴリズムは、離散コサイン変換 (DCT) を用いた非可逆符号化として広く普及している。これに対し、効率の良い可逆 (Lossless) 符号化を実現するための直交変換 (以下、可逆変換) が、近年、いくつか報告されている [1]~[3]。これらは、実数表現されたフィルタ処理後の画素値を整数化するラウンディング処理をリフティング構成に内包するため、変換結果を直接エントロピー符号化することで効率の良い可逆符号化を可能とする。

こうした可逆変換に関する従来の研究は、乗算器数やラウンディング誤差の低減を主な目的としており、

例えば、乗算器のない可逆アダマール変換を応用した方法 [1]、非分離型 2 次元構成による方法 [2]、などが報告されている。また、個々の入力画像に適した基底を設計する可逆 KLT も提案されている [3]。しかし、演算負荷の軽減を目的とした乗算器係数の短語長表現法については、可逆 DCT についてはあまり研究されていない。また、順変換と逆変換との互換性を考慮した語長決定法については、文献 [4], [5] などに報告されているが、従来 of 非可逆符号化用の DCT を対象とし、乗算器係数の語長は一律同じ場合に限定されている。そこで本論文では、文献 [1] の可逆 DCT について、個々の乗算器係数に対してどのように語長を配分したらよいかについて考察する。まず、各乗算器係数の短語長化が、再生画像の画質にどのように影響するかを実験的に調べ、これに対する評価尺度として「画質係数感度」を新たに定義する。次に、この画質係数感度を用い、乗算器係数の語長配分問題を、拘束条件付き最小 2 乗問題に帰着させ、これをラグランジュの未定乗数決定法により解くことで、可逆 DCT に対する最適語長配分を導く。また、ラウンディングによる最大有効語長を考慮した語長配分も行う。最後に、シミュレーション実験により、全係数同一の語長を用いた場合に比べ、同等の画質を維持しつつも、提案法に

[†] 長岡技術科学大学工学部電気系, 長岡市
Department of Engineering, Nagaoka University of Technology,
Nagaoka-shi, 940-2188 Japan
a) E-mail: iwahashi@nagaokaut.ac.jp

より短語長表現が可能となることを確認する .

2. LDCT における乗算器とその係数語長

2.1 Lossless DCT (LDCT)

LDCT の構成を図 1 に示す . これは , 2.2 の可逆アダマール変換 (LH) と , 2.3 の可逆回転変換 (LR) より構成され , 整数表現された 8 点の入力信号 $x(n)$, ($n = 0, 1, \dots, 7$) を , 整数表現された出力信号 $y(n)$ に , DCT 基底により変換する . 整数表現された出力信号を量子化せずに直接エントロピー符号化すれば可逆符号化が , 量子化すれば従来の DCT と互換な符号化が , それぞれ可能となる .

2.2 可逆アダマール変換 (LH)

図 2 に示す可逆アダマール変換はリフティング構成に整数化処理 (ラウンディング処理 , 図中の \textcircled{R}) を内包したものであり , その入出力関係は , \mathbf{O}_2 と \mathbf{I}_2 を 2 行 2 列のそれぞれ零行列と単位行列として , 次式で表される .

$$\begin{pmatrix} y(0) \\ y(1) \\ y(2) \\ y(3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_2 & \mathbf{O}_2 \\ -\mathbf{J}_2 & \mathbf{I}_2 \end{pmatrix}$$

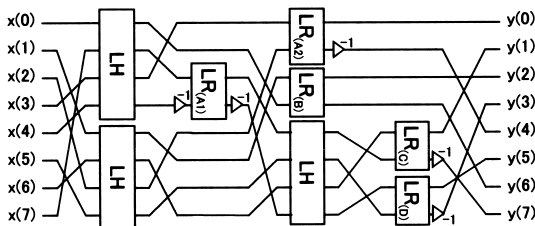


図 1 可逆 DCT (LDCT) の順変換回路
Fig. 1 Forward lossless DCT.

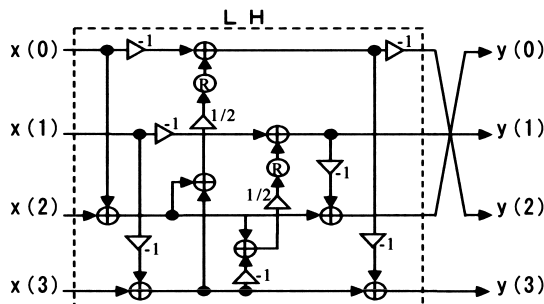


図 2 可逆アダマール変換 (LH) の順変換回路
Fig. 2 Forward lossless Hadamard transform.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I}_2 & \mathbf{W}_2 \\ -\mathbf{O}_2 & \mathbf{I}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\mathbf{I}_2 & \mathbf{O}_2 \\ -\mathbf{P}_2 & \mathbf{I}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし ,

$$\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \mathbf{J}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{W}_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

2.3 可逆回転変換 (LR)

図 3 に示す可逆回転変換の入出力関係は , 乗算器係数を $m_{1(i)}, m_{2(i)}, m_{3(i)}$, ただし , $i \in A1, A2, B, C, D$ として ,

$$\begin{pmatrix} y(0) \\ y(1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ m_{3(i)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & m_{2(i)} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ m_{1(i)} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(0) \\ x(1) \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表される . 図 1 の LDCT には LR が 5 個あり , 個々の LR は 3 個の乗算器をもつから , 合計 15 個の乗算器を LDCT はもつ . また , その値は ,

$$M_{(i)} = [m_{1(i)} \quad m_{2(i)} \quad m_{3(i)}] \quad (i \in A1, A2, B, C, D)$$

とおくと ,

$$M_{(A1)} = M_{(A2)} = \left[1 - \sqrt{2} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \quad 1 - \sqrt{2} \right]$$

$$M_{(B)} = \left[\frac{\sin(\pi/8) - 1}{\cos(\pi/8)} \quad \cos(\pi/8) \quad \frac{\cos(3\pi/8) - 1}{\cos(\pi/8)} \right]$$

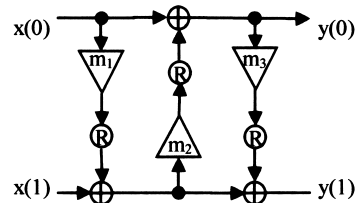


図 3 可逆回転変換 (LR) の順変換回路
Fig. 3 Forward lossless rotation transform.

$$M_{(C)} = \left[\frac{1 - \cos(3\pi/16)}{\sin(3\pi/16)} - \sin(3\pi/16) \frac{1 - \cos(3\pi/16)}{\sin(3\pi/16)} \right]$$

$$M_{(D)} = \left[\frac{\cos(\pi/16) - 1}{\sin(\pi/16)} \sin(\pi/16) \frac{\cos(\pi/16) - 1}{\sin(\pi/16)} \right] \quad (3)$$

である．再生画像の画質劣化を最小限に抑えつつ，これらの乗算器係数値をいかに短い語長で2進数表現するかが本論文の課題である．

2.4 乗算器係数の有限語長化

以下，式(2)，(3)の乗算器係数 $m_{j(i)}$ を，表1のように番号を振り直して $h_k, (k = 0, 1, \dots, 14)$ と表す．式(3)からわかるように，LDCTの場合， h_k の絶対値は1より小さい．そこで本論文では， h_k を以下のように2進数固定小数点表現する場合を考える．

$$h_k = (-1)^{B_0} \cdot \sum_{j=1}^{B_0} B_j 2^{-j} \quad (4)$$

ここで， $B_j, (j = 0, 1, \dots)$ は0または1の2値変数

表1 AR(1)に対するPSNRの測定結果
Table 1 Measured PSNR for AR(1) model.

k	i	j	$\rho = 0.0$	$\rho = 0.5$	$\rho = 0.95$
0	A1	1	47.00	47.17	51.45
1		2	51.76	51.40	55.76
2		3	46.99	49.29	57.85
3	A2	1	25.40	25.38	25.19
4		2	34.74	34.70	34.57
5		3	24.39	24.34	24.16
6	B	1	47.43	49.46	58.17
7		2	37.74	38.73	47.33
8		3	47.43	45.88	53.21
9	C	1	51.19	49.08	52.74
10		2	50.04	52.57	59.02
11		3	51.18	48.02	51.29
12	D	1	45.88	48.46	57.94
13		2	50.85	50.96	59.61
14		3	45.86	48.54	58.10

表2 乗算器係数の有限語長化の例
Table 2 An example of finite word length expression of the multiplier coefficients.

語長 W[bit]	係数値(10進数表現)		
	$m_{1(A1)}$	$m_{1(B)}$	$m_{1(C)}$
∞	-0.41421...	-0.66818...	0.30335...
4	-0.4375	-0.6875	0.3125
3	-0.375	-0.625	0.25
2	-0.5	-0.75	0.25
1	-0.5	-0.5	0.5

である．また，有限語長化については， W_k ビットで丸めることで，

$$h'_k = (-1)^{B_0} \cdot \sum_{j=1}^{W_k} B'_j 2^{-j} \quad (5)$$

により実施し，整数 W_k を乗算器係数 h_k の語長(単位はビット)と定義する．表2には式(3)のいくつかの値に対する有限語長化の例を示す．

3. 有限語長化の再生画像への影響

本論文では，乗算器係数の有限語長化，すなわち，式(4)の h_k を式(5)の h'_k に置換することが，再生画像の画質にどのように影響するかを調べ，その結果から式(3)の各係数値にそれぞれ何ビットの語長 W_k を割り当てたらよいかについて検討する．このため，以下の実験を行う．

3.1 実験1

図4に示すように，図1のLDCTを縦横両方向に用いることで，入力信号 $x(n_1, n_2)$ を2次元変換する．このとき，逆変換におけるある一つの乗算器 h_k のみを $W_k = 2[\text{bit}]$ で有限語長化し，それ以外のすべての乗算器係数 $h_m, (m \neq k, m = 0, 1, \dots, 14)$ を無限語長とみなせるほど十分長い語長とする．ただし，ラウンディング処理は行わず，順変換後も逆変換後もともに信号を整数化せず実数値のままとした．このような条件下で，以下の入出力間の2乗誤差を測定する．

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\Delta\sigma_k} \right) \quad (6)$$

ただし，

$$\Delta\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} \{y(n_1, n_2) - x(n_1, n_2)\}^2} \quad (7)$$

入力信号には，画素数 $N_1 = N_2 = 256$ ，輝度値 256

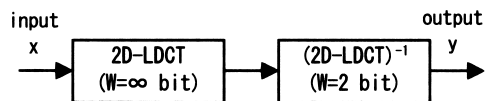


図4 有限語長化の評価実験法
Fig.4 An experiment for evaluation of the finite word length expression.

階調 (8 ビット整数) の画像を用いた .AR(1) モデル ($\rho = 0.0, 0.5, 0.95$) を用いた結果を表 1 に示す .

表 1 は , 例えば式 (3) における乗算器係数 $m_{3(A2)}$, すなわち h_5 のみを 2 ビットに有限語長化する ($W_5 = 2$ とする) ことで , $\rho = 0.95$ の場合 , $PSNR$ が 24.16 [dB] まで劣化することを意味する . 同表より , 係数ごとに画質への影響が異なることがわかる . これは , 逆変換回路における有限語長化誤差の伝播経路が係数ごとに異なるからである . 詳細については文献 [7] を参照願いたい . 同表より , 特に $LR_{(A2)}$ の乗算器係数を有限語長化すると画質が著しく劣化することがわかる . また , 異なる ρ の値に対しても同様の傾向が見られる .

特に係数感度の高い $LR_{(A2)}$ の三つの係数 $m_{1(A2)}$, $m_{2(A2)}$, $m_{3(A2)}$ を有限語長化したときの再生画像を

それぞれ図 5 (b) , (c) , (d) に示す . 同図中の数値は原画像との平均 2 乗誤差を $PSNR$ で表している . 係数感度の高い乗算器ほど顕著な画質劣化を招くことが確認できる . 特に同図 (b) や (d) では , 同図 (a) の原画像に比べ格子状の画質劣化が見られる . また , この格子の間隔は 4 画素となっている . これは , LDCT の逆変換回路において , $LR_{(A2)}^{-1}$ で発生した誤差が後段の二つの LH^{-1} に入力され , 一方の LH^{-1} ではプラスの誤差が , もう一方の LH^{-1} ではマイナスの誤差が発生するためと考えられる . 詳細については文献 [7] を参照願いたい .

3.2 実験 2

次に , 図 4 の方法を 1 次元の入力信号に適用し , 有限語長化誤差と $PSNR$ の関係を調べる . なお , 有限語長化誤差は次式で定義する .



図 5 $m_{1(A2)}$, $m_{2(A2)}$, $m_{3(A2)}$ の有限語長化による影響

Fig. 5 Influence of the finite word length expression of $m_{1(A2)}$, $m_{2(A2)}$ and $m_{3(A2)}$ on the decoded images.

$$\Delta h_k = h_k - h'_k \geq 0 \tag{8}$$

式 (4), (5) を代入することで,

$$\Delta h_k = 2^{-W_k} (a_k + b_k) \tag{9}$$

ただし,

$$a_k = \sum_{j=1}^{\infty} B_{(j+W_k)} \cdot 2^{-j}$$

$$b_k = 2^{W_k} \left(\sum_{j=1}^{W_k} B_j \cdot 2^{-j} - \sum_{j=1}^{W_k} B'_j \cdot 2^{-j} \right) \tag{10}$$

が得られる. 上式の a_k は最小値 0, 最大値 2 であるが, 具体的な値は式 (3) の個々の係数値ごとに, また語長 W_k ごとに異なる.

AR(1), $\rho = 0.95$ の場合の実験結果を図 6 に示す. 同図より $PSNR$ と有限語長化誤差の関係は, 以下の直線に帰帰できることがわかる.

$$PSNR = c_0 + c_1 \cdot \log_{10}(\Delta h_k) \tag{11}$$

同図は $k = 5, 8, 11$ なる三つの係数について例示しているが, 同様の実験をすべての係数について行い, 得られた直線の傾き c_1 と切片 c_0 を表 3, 表 4 に示す. 傾きはすべて -20 , 切片は係数ごとに異なることから, 切片 c_0 が有限語長化の再生画像への影響を示していることがわかる.

3.3 画質係数感度の定義

以上より, 有限語長化の再生画像への影響が, 個々の乗算器ごとに異なること, 特に $LR_{(A_2)}$ は影響が大きいことがわかった. そこで, この影響の度合を定量的に評価するために, 本論文では画質係数感度を, 式 (9), (10) より, 次式で定義する.

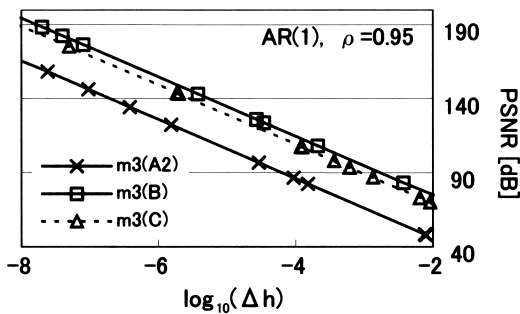


図 6 有限語長化誤差と画質の関係

Fig. 6 Relation between finite word length error and image quality.

$$S_k = \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta h_k}, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \tag{12}$$

また, 画質係数感度の乗算器間での相対的な比較のため, 画質係数感度比を次式で定義する.

$$SR_k = \frac{S_k}{\prod_{p=0}^{14} \sqrt[15]{S_p}}, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \tag{13}$$

上式において, 右辺分母は全係数の画質係数感度の相乗平均を表す.

ここで, 式 (12) を式 (6) に代入すると,

$$PSNR = 20 \log_{10} \frac{255}{S_k \Delta h_k}$$

表 3 AR(1), $\rho = 0.95$ に対する画質係数感度

Table 3 Sensitivity of the coefficients to the decoded image quality in case of AR(1) with $\rho = 0.95$.

k	i	j	傾き c_1	切片 c_0	画質係数 感度	画質係数 感度比
0	A1	1	-20	33.46	5.42	0.72
1		2	-20	31.57	6.73	0.89
2		3	-20	39.78	2.62	0.35
3	A2	1	-20	8.85	92.01	12.19
4		2	-20	12.83	58.19	7.71
5		3	-20	5.85	129.96	17.22
6	B	1	-20	39.32	2.76	0.37
7		2	-20	35.44	4.31	0.57
8		3	-20	34.50	4.81	0.64
9	C	1	-20	30.67	7.64	0.99
10		2	-20	37.20	3.52	0.47
11		3	-20	29.09	8.96	1.19
12	D	1	-20	41.28	2.20	0.29
13		2	-20	37.50	3.40	0.45
14		3	-20	41.28	2.20	0.29
相乗平均			-	-	7.55	1.00

表 4 Lenna に対する画質係数感度

Table 4 Sensitivity of the coefficients to the decoded image quality in case of "Lenna".

k	i	j	傾き c_1	切片 c_0	画質係数 感度	画質係数 感度比
0	A1	1	-20	31.08	7.12	0.76
1		2	-20	29.53	8.51	0.90
2		3	-20	37.17	3.53	0.38
3	A2	1	-20	8.79	92.70	9.85
4		2	-20	12.72	58.99	6.27
5		3	-20	5.78	131.13	13.93
6	B	1	-20	37.10	3.56	0.38
7		2	-20	32.71	5.91	0.63
8		3	-20	31.30	6.94	0.74
9	C	1	-20	28.10	10.04	1.07
10		2	-20	35.40	4.33	0.46
11		3	-20	26.58	11.95	1.27
12	D	1	-20	39.62	2.66	0.28
13		2	-20	34.55	4.78	0.51
14		3	-20	39.44	2.72	0.29
相乗平均			-	-	9.41	1.00

$$= 20 \log_{10} \frac{255}{S_k} - 20 \log_{10}(\Delta h_k) \quad (14)$$

となることから，式 (11) と比較することで，

$$c_0 = 20 \log_{10} \frac{255}{S_k}, \quad c_1 = -20 \quad (15)$$

となることがわかる．すなわち，ここで定義した画質係数感度 S_k は，先の実験 2 における回帰直線の切片 c_0 と，

$$S_k = 255 \cdot 10^{-\frac{c_0}{20}} \quad (16)$$

なる関係にある．表 3，表 4 には，式 (16) により実験 2 の c_0 から得られた画質係数感度と感度比の値をまとめる．

これまでの考察から，有限語長化の再生画像への影響は各乗算器ごとに異なることがわかった．また，同じ係数でも，有限語長化誤差の値そのものは選択する語長に依存することを式 (9)，(10) は示している．しかし，その期待値については，図 6，式 (11) の切片 c_0 により見積もることができる．すなわち，式 (16) の画質係数感度は，ある乗算器に対する有限語長化が引き起こす再生画像での画質劣化の MSE の期待値を評価する指標と解釈することができる．

4. LDCT における乗算器係数の語長配分法

4.1 語長配分問題とその解

式 (12) より，一つの係数値を有限語長化したときの再生画像に重畳する誤差は，

$$\Delta \sigma_k = S_k \cdot \Delta h_k, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \quad (17)$$

なので，すべての係数を有限語長化したときの誤差の総和は，

$$\sigma_{total} = \sum_{k=0}^{14} \Delta \sigma_k = \sum_{k=0}^{14} S_k \cdot \Delta h_k \quad (18)$$

となる．上式に式 (9)，(10) を代入することで，

$$\sigma_{total} = \sum_{k=0}^{14} S_k \cdot 2^{-W_k} \quad (19)$$

となる．ただし，式 (10) の値としては，その期待値である 1 を代入した．以上より，本論文の目的とする問題は，拘束条件付最小 2 乗問題として，

$$\text{minimize } \sigma_{total} = \sum_{k=0}^{14} S_k \cdot 2^{-W_k} \quad (20)$$

$$\text{subject to } \sum_{k=0}^{14} W_k = 15 \cdot \bar{W}$$

と定式化される．すなわち，与えられた平均語長 \bar{W} のもとで，有限語長化誤差の総和 σ_{total} を最小化する．

この問題はラグランジュの未定乗数決定法により解くことができ，結果として次式の最適語長配分法を得る．

$$\frac{2^{W_k}}{2^{W_0}} = \frac{S_k}{S_0}, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \quad (21)$$

すなわち，

$$W_k = \log_2 \frac{S_k}{S_0} + W_0, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \quad (22)$$

となる．あるいは上式を，

$$W_k = \log_2 S_k - \log_2 \bar{S} + \bar{W} \quad (23)$$

ただし，

$$k = 0, 1, \dots, 14$$

$$\bar{W} = \frac{1}{15} \sum_{k=0}^{14} W_k, \quad \bar{S} = \prod_{k=0}^{14} \sqrt[15]{S_k}$$

と表現することもできる．また，式 (13) の感度比 SR_k を用いれば，

$$\begin{aligned} \Delta W_k &= W_k - \bar{W} \\ &= \log_2 \frac{S_k}{\bar{S}} \\ &= \log_2 SR_k, \quad k = 0, 1, \dots, 14 \end{aligned} \quad (24)$$

として乗算器係数相互の語長差 ΔW_k を決定できる．

4.2 語長の配分結果

AR(1) に対して実験 2 より得られた式 (24) の値を表 5 に示す．表中の $[\Delta W_k]$ は ΔW_k を整数化したものである．同表より， $LR_{(A2)}$ には長い語長を， $LR_{(D)}$ には短い語長を，それぞれ割り当てる必要があることがわかる．また，相関係数 ρ の値が変わっても，1 [bit] 程度の差はあるものの， $[\Delta W_k]$ の値はほぼ同じとなっている．これをもとにした語長配分の例を表 6 に示す．また，標準画像に対する結果を表 7 に示す． $[\Delta W_k]$ の値については，1 [bit] 程度の差はあるもののほぼ同じであり，やはり $LR_{(A2)}$ には長い語長を， $LR_{(D)}$ には短い語長を，それぞれ割り当てることで画質が向上することが示されている．

表 5 AR(1) に対する最適語長配分の結果
Table 5 A result of the optimum allocation for AR(1).

		$\rho = 0.0$		$\rho = 0.1$		$\rho = 0.5$		$\rho = 0.8$		$\rho = 0.95$	
		W_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$
$LR_{(A1)}$	m_1	-0.71	-1	-0.70	-1	-0.64	-1	-0.54	-1	-0.48	0
	m_2	-0.50	0	-0.45	0	-0.36	0	-0.29	0	-0.17	0
	m_3	-0.69	-1	-0.77	-1	-0.99	-1	-1.33	-1	-1.53	-2
$LR_{(A2)}$	m_1	2.56	3	2.52	3	2.64	3	3.18	3	3.61	4
	m_2	1.92	2	1.89	2	2.00	2	2.53	3	2.95	3
	m_3	3.06	3	3.02	3	3.14	3	3.68	4	4.11	4
$LR_{(B)}$	m_1	-0.69	-1	-0.76	-1	-0.98	-1	-1.30	-1	-1.45	-1
	m_2	-0.17	0	-0.23	0	-0.30	0	-0.54	1	-0.81	-1
	m_3	-0.69	-1	-0.59	-1	-0.35	0	-0.48	0	-0.65	-1
$LR_{(C)}$	m_1	-0.70	-1	-0.62	-1	-0.30	0	-0.10	0	-0.02	0
	m_2	-0.56	-1	-0.65	-1	-0.94	-1	-1.08	-1	-1.10	-1
	m_3	-0.71	-1	-0.56	-1	-0.11	0	0.14	0	0.25	0
$LR_{(D)}$	m_1	-0.71	-1	-0.73	-1	-1.07	-1	-1.45	-1	-1.78	-2
	m_2	-0.70	-1	-0.64	-1	-0.64	-1	-0.93	-1	-1.15	-1
	m_3	-0.71	-1	-0.73	-1	-1.08	-1	-1.49	-1	-1.78	-2
相加平均		0.00	-0.13	0.00	-0.13	0.00	0.07	0.00	0.13	0.00	0.00

表 6 最適語長配分の例: AR(1), $\rho = 0.95$ に対する $[\Delta W_k]$ の値

Table 6 Examples of the optimum word length allocation. Values of $[\Delta W_k]$ for AR(1), $\rho = 0.95$.

k	i	j	例 1	例 2	例 3	例 4	例 5	例 6
0	A1	1	3	4	5	6	7	8
1		2	3	4	5	6	7	8
2		3	1	2	3	4	5	6
3	A2	1	7	8	9	10	11	12
4		2	6	7	8	9	10	11
5		3	7	8	9	10	11	12
6	B	1	2	3	4	5	6	7
7		2	2	3	4	5	6	7
8		3	2	3	4	5	6	7
9	C	1	3	4	5	6	7	8
10		2	2	3	4	5	6	7
11		3	3	4	5	6	7	8
12	D	1	1	2	3	4	5	6
13		2	2	3	4	5	6	7
14		3	1	2	3	4	5	6
相加平均			3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00

4.3 提案法の効果

図 7 には、提案法により語長配分を行った場合 (図中の ○印) と、語長配分せずすべての係数で同じ語長を用いた場合 (図中の ×印) との比較結果を示す。縦軸は図 4 の方法で得られた PSNR, 横軸は平均語長を示す。同図より、同じ PSNR で比較した場合は平均語長にして 2 ビット程度短く、一方、同じ語長で比較した場合は PSNR で 15 [dB] 程度画質が向上することが確認できる。また、提案法の語長配分を実施した場合、平均語長を 3 [bit] にしても 40 [dB] 程度の画質を維持できる。このときの再生画像を図 8 に示

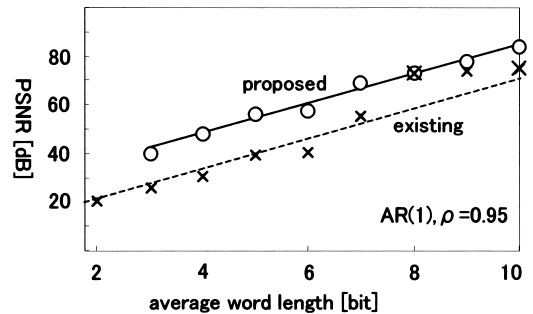


図 7 提案法の効果

Fig. 7 Effectiveness of the proposed method.



(a) Existing (b) Proposed

図 8 画質による比較 (平均語長 = 3 [bit])

Fig. 8 Comparison with decoded images. (Average word length = 3 bit)

す。同図より、提案法を適用した場合、画質劣化はほとんど知覚できないことがわかる。

以上より、本論文で述べた語長配分を適用することで、乗算器係数の平均語長を 3 [bit] で表しても、再生画像の画質劣化はほとんど認知できないことがわかつ

表 7 標準画像に対する最適語長配分の結果
Table 7 A result of the optimum allocation for images.

		LENNA		BARBARA		GIRL		AERIAL		CHURCH	
		ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$	ΔW_k	$[\Delta W_k]$
$LR_{(A1)}$	m_1	-0.40	0	-0.31	0	-0.22	0	-0.27	0	-0.57	-1
	m_2	-0.15	0	-0.02	0	-0.11	0	-0.04	0	-0.13	0
	m_3	-1.41	-1	-1.44	-1	-1.52	-2	-1.46	-1	-1.24	-1
$LR_{(A2)}$	m_1	3.30	3	3.22	3	2.81	3	2.71	3	2.80	3
	m_2	2.65	3	2.58	3	2.17	2	2.09	2	2.16	2
	m_3	3.80	4	3.73	4	3.31	3	3.22	3	3.30	3
$LR_{(B)}$	m_1	-1.40	-1	-1.37	-1	-1.28	-1	-1.37	-1	-1.20	-1
	m_2	-0.67	-1	-0.39	0	-0.50	-1	-0.35	0	-0.39	0
	m_3	-0.44	0	-0.07	0	-0.23	0	-0.17	0	-0.10	0
$LR_{(C)}$	m_1	0.09	0	0.24	0	0.29	0	0.19	0	-0.05	0
	m_2	-1.12	-1	-1.20	-1	-0.98	-1	-1.09	-1	-1.35	-1
	m_3	0.34	0	0.49	0	0.55	1	0.45	0	0.21	0
$LR_{(D)}$	m_1	-1.82	-2	-2.28	-2	-1.76	-2	-1.55	-2	-1.49	-1
	m_2	-0.98	-1	-0.67	-1	-0.93	-1	-0.76	-1	-0.42	0
	m_3	-1.79	-2	-2.50	-2	-1.81	-2	-1.68	-2	-1.51	-2
相加平均		0.00	0.07	0.00	0.13	0.00	-0.07	0.00	0.00	0.00	0.07

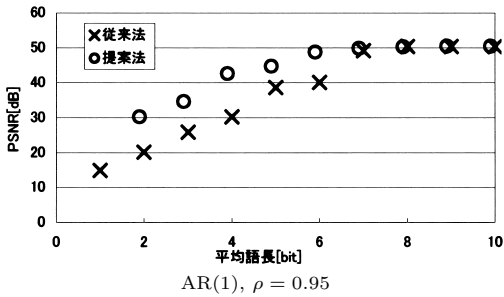


図 9 ラウンディング処理の影響
Fig. 9 Influence of the rounding operations on PSNR.

た．これにより，従来の実数型乗算は，平均語長 3 [bit] 程度の 2 のべき乗との整数乗算と左シフト演算に置換できる．すなわち，本論文で述べた係数感度を考慮して，従来の実数乗算を整数乗算に置換することで，例えばリアルタイムソフトウェアエンコーダのような応用における処理の高速化や，ハードウェア実現時の乗算器回路の規模縮小が期待できると考えられる．

4.4 ラウンディング処理と最大有効語長

これまでの考察では，ラウンディング処理を取り除いて実験を行ってきた．そこで，最後にラウンディング処理を含めた場合の結果を図 9 に示す．図 7 との比較から，ラウンディング処理の導入により PSNR が 50 [dB] 付近で飽和していることがわかる．このため，提案法における有効平均語長は，6 ビットであり，それ以上の語長を用いても，再生画像の画質の面では意味がないことがわかる．よって，ラウンディングに

表 8 各種入力信号に対する最大有効語長
Table 8 The maximum effective word length for input signals.

INPUT	最大有効語長 [bit]		
	従来法	提案法	差分
AR(1), $\rho = 0.0$	8	7	1
AR(1), $\rho = 0.1$	8	7	1
AR(1), $\rho = 0.5$	8	6	2
AR(1), $\rho = 0.8$	8	6	2
AR(1), $\rho = 0.95$	8	6	2
LENNA	8	7	1
BARBARA	8	7	1
GIRL	7	5	2
AERIAL	8	7	1
CHURCH	8	7	1

よる最大有効語長は 6 ビットとなる．このような方法で得られた各入力信号に対する最大有効語長を表 8 に示す．また，最大有効語長を考慮した場合の語長配分例を表 9 に示す．例 5, 6 について表 6 と比較すると，平均語長 7 [bit] 以上は不必要であることがわかる．これは，ラウンディング処理を内包する LDCT に特有の現象である．

5. む す び

本論文では，LDCT において乗算器係数の短語長化による画質劣化への影響を調べ，係数ごとに異なる語長を配分することで，符号化性能を向上させる方法を提案した．実験の結果，PSNR で 15 [dB]，平均語長で 2 [bit] 程度の語長配分による効果が確認できた．また，従来の実数乗算を平均語長 3 [bit] 程度の整数乗算に置換しても，これによる画質劣化はほとんど認知で

表 9 最大有効語長を考慮した最適語長配分

Table 9 Examples of the optimum word length allocation under the maximum effective word length.

k	i	j	例 1	例 2	例 3	例 4	例 5	例 6
0		1	3	4	5	6	6	6
1	A1	2	3	4	5	6	6	6
2		3	1	2	3	4	4	4
3		1	7	8	9	10	10	10
4	A2	2	6	7	8	9	9	9
5		3	7	8	9	10	10	10
6		1	2	3	4	5	5	5
7	B	2	2	3	4	5	5	5
8		3	2	3	4	5	5	5
9		1	3	4	5	6	6	6
10	C	2	2	3	4	5	5	5
11		3	3	4	5	6	6	6
12		1	1	2	3	4	4	4
13	D	2	2	3	4	5	5	5
14		3	1	2	3	4	4	4
相加平均			3.00	4.00	5.00	6.00	6.00	6.00

きないことが示された。

今回は画質係数感度を実験データの直線回帰により計算したが、今後は実験をせずに解析的に求める方法を導き、画像への依存性を調べる必要がある。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学技術研究費補助金(若手 B 課題番号:14750284)の助成を受けて実施された。

文 献

- [1] 福間慎治, 大山公一, 岩橋政宏, 神林紀嘉, “ロスレスアダマール変換を応用したロスレス 8 点高速離散コサイン変換”; 信学技報, DSP99-103, 1999.
- [2] 小松邦紀, 瀬崎 薫, “2 次元ロスレス変換とその画像符号化への応用”; 信学技報, IE2000-65, 2000.
- [3] 鷹合大輔, 武部 幹, “可逆 WT・KLT を用いるマルチスベクトル画像の情報圧縮”; 信学論(A), vol.J84-A, no.3, pp.298-308, March 2001.
- [4] 望月孝志, “逆 DCT 有限語長演算の演算誤差解析”; 信学論(A), vol.J77-A, no.3, pp.357-368, March 1994.
- [5] 菊地義池, 赤嶺政巳, “DCT を用いた画像符号化における完全再生可能な演算精度の決定法”; 信学論(A), vol.J74-A, no.7, pp.1116-1120, July 1991.
- [6] 川又政征, 田口 亮, 村岡輝雄, “2 次元信号と画像処理”; 計測自動制御学会, pp.161-167, コロナ社, 1996.
- [7] 杉森 新, デルゲルマ, 岩橋政宏, “整数 DCT における乗算器係数の最適語長配分法”; 信学技報, DSP2002-181, Jan. 2003.

(平成 14 年 9 月 6 日受付, 12 月 27 日再受付,
15 年 2 月 21 日最終原稿受付)



西田 治

平 12 長岡技科大・工・電気系卒。平 14 同大大学院修士課程了。平 14 ソニー(株)入社。在学中は、画像符号化に関する研究に興味をもつ。



岩橋 政宏 (正員)

昭 63 都立大・工・電気卒。平 2 同大大学院修士課程了。同年新日本製鐵(株)エレクトロニクス研究所。平 3 郵政省プロジェクト・ジー・シー・テクノロジー(株)へ派遣。この間 MPEG2 国際標準化アルゴリズムの研究に従事。平 5 長岡技科大・工・電気系助手。現在。同助教授。平 10~11 タイ王国タマサート大学工学部に JICA 派遣専門家として駐在。工博。デジタル画像圧縮の研究に従事。IEEE, 画像電子学会各会員。



神林 紀嘉 (正員)

昭 38 信州大・工・通信卒。昭 42 東工大・工・電子物理助手。昭 53 長岡技科大・工・電気系助教授。現在, 同教授。工博。電子回路, デジタル信号処理とその応用に関する研究に従事。著書「フィルタの理論と設計」, 「基礎回路工学」(共著)など。