

空間／変換領域量子化に基づくウェーブレット画像符号化

北 蘭 圭 基*・岩 橋 政 宏**

Wavelet Image Compression Technique based on Spatial / Transform Domain Quantization

Keiki KITAZONO* and Masahiro IWAHASHI**

概要：リフティング構成と丸め器（ラウンディング）から構成される可逆ウェーブレット変換は、高圧縮な非可逆符号化と高画質な可逆符号化を同一のアルゴリズムで実現するための（可逆・非可逆統合符号化の）有効な手段として、近年、盛んに研究されている。しかし、可逆ウェーブレット変換にはラウンディングが含まれるため、非可逆符号化時にはその影響が誤差として現れ、特に高ビットレートにおいては無視できないものとなる。この問題に対処する方法として、「空間領域量子化」を新たに導入することで、このラウンディング誤差を低減する方法を提案する。この「空間領域量子化」はこれまでの変換領域での量子化とは異なり、変換を行う前に量子化を実施するものであり、出力が整数値である可逆ウェーブレット変換との組み合わせにおいて始めて可能となるものである。とくに「低域では空間領域量子化を、高域では変換領域量子化を」行う方法を提案し、これがラウンディング誤差の低減すなわち高ビットレートでの符号化効率改善に有効であることを示している。

キーワード：画像、圧縮、ウェーブレット、誤差

1. まえがき

静止画像符号化の国際標準として広く普及しているJPEG方式では、高い圧縮率が求められる場合は離散コサイン変換（DCT）と量子化に基づく非可逆方式（base line system）を、画像を無歪で圧縮したい場合は予測処理（DPCM）に基づく可逆方式を（independent system）、それぞれ別々に用意する必要がある^[1]。

これに対し次期国際標準であるJPEG-2000では、検討の初期段階では可逆と非可逆を統合した新しい方式が要求されており^[2]、現在でもこの機能を実現することが望ましいとされている^[3]。こうした要求に応えるべく、可逆ウェーブレット変換^[4-7]に基づく可逆・非可逆統合符号化方式が近年盛んに研究されている^[8-10]。

可逆ウェーブレット変換（図1）では変換後の信号が入力信号と同程度のビット数の整数値で表現される。このため、変換後の信号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が可能となる。また、エントロピー符号化の前に量子化を導入するだけで圧縮率の高い非可逆符号化を実現できる。

しかし、この量子化の導入により可逆ウェーブレット変換に含まれるラウンディング処理（フィルタ処理後の実数値表現された信号値を整数化する処理）が再

生画像に影響を及ぼし、特に高ビットレートでのSNRの低下を招く。すなわち、可逆・非可逆統合符号化においては、通常の量子化誤差とは別にラウンディング誤差についても注意する必要がある。

「空間領域量子化」を新たに導入することで、ラウンディング誤差を低減する方法を提案する。この「空間領域量子化」とは、これまでの変換領域での量子化（図2 a）とは異なり、ウェーブレット変換を行う前に量子化を実施するものであり（図2 b）、出力が整数値である可逆ウェーブレット変換との組み合わせにおいて始めて可能となる。この量子化によりラウンディング誤差がエンコーダとデコーダの間でキャンセルされるが、全ての帯域に導入した場合、圧縮性能が悪くなってしまう。

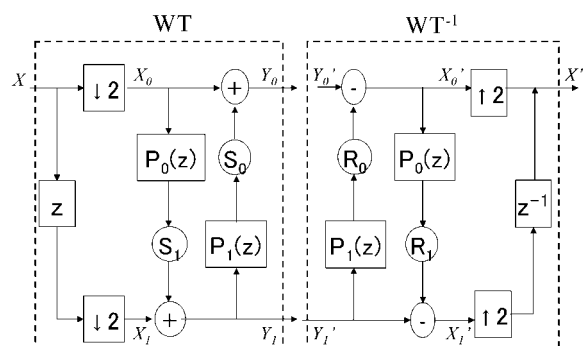


図1 可逆ウェーブレット変換。WTとWT⁻¹は順変換と逆変換、ⓇとⓈはラウンディング処理、P₀(z)とP₁(z)はフィルタ処理をそれぞれ表す。

原稿受付：平成15年5月19日

*大学院電気電子工学専攻修士2年

**工学部電気系

これに対して、「低域では空間領域量子化を、高域では変換領域量子化を」行う方法を提案し、これが非可逆符号化時の符号化効率改善に有効であることを示す。また、従来法（図3）に対する提案法（図4や図5）の有効性を実験的に示す。

2. 可逆・非可逆統合符号化

2. 1 統合符号化における信号処理

可逆ウェーブレットに基づく従来の可逆・非可逆統合符号化について簡単に説明する。図1は信号 X から低域信号 Y_0 と高域信号 Y_1 を生成する可逆ウェーブレット変換 WT を示しており、この1次元変換を画像の縦方向と横方向に、かつ、低域を再分割するように再帰的に使うことで帯域が分割される。図3は2次元10帯域分割の例であり、画像の水平方向の変換 $WT(V)$ と垂直方向の変換 $WT(H)$ が3ステージにわたって適用されている。次に、得られた帯域信号が量子化器 Q により量子化された後、算術符号化やゴロムライス符号化のようなエントロピ符号化を経ることで、画像信号のデータ量が圧縮される。ここで、量子化のステップサイズが1より大きければ非可逆符号化、1であれば可逆符号化となるため、この構成により可逆・非可逆統合符号化が実現される。

2. 2 可逆ウェーブレット変換

可逆ウェーブレット変換における信号処理について図1をもとに説明する。まず、入力信号数列 X は遅延器 z とダウンサンプラ $\downarrow 2$ により、偶数列 X_0 と奇数列 X_1 に分離される。次に、FIRフィルタ $P_0(z)$ により偶数列から内挿予測値が生成され、これがラウンディング処理⑧と⑨を経て実数値から整数値に丸められた後、奇数列に加算される。この処理はリフティング処理と呼ばれ、奇数列から偶数列へも同様に処理されることで、低域信号 Y_0 と高域信号 Y_1 が生成される。

以上の順変換に対応する逆変換は、図1の右半分に示されるように、順変換時とは逆順のリフティング処理において、順変換時に加算したラウンディング後の値を逆変換時には減算することで、再生信号 X' が得られる。なお、FIRフィルタ $P_0(z)$ 、 $P_1(z)$ については種々提案されているが^[4-7]、本論文では伝達関数が、

$$\begin{pmatrix} P_0(z) \\ P_1(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 \\ 0 & 1/4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1+z \\ 1+z^{-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される 5×3 フィルタを例として用いる^[11]。

2. 3 従来法の問題点

図3に示す従来法では、量子化処理はウェーブレット変換を実施した後に施される。量子化のステップサイズが1である可逆符号化時には、順変換時に発生したラウンディング処理による丸め誤差（ラウンディング誤差）が逆変換時のそれとキャンセルするため、再生画像 X' は入力画像 X と完全に一致する。しかし、非可逆符号化時にはキャンセルされず、再生画像には量子化誤差のほかにラウンディング誤差が重畳する。その結果、量子化誤差がラウンディング誤差に比べて小さな高ビットレートでの非可逆符号化時には、ラウンディング誤差による再生画像の画質劣化が無視できなくなる^[12, 13]。

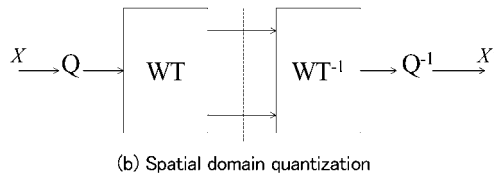
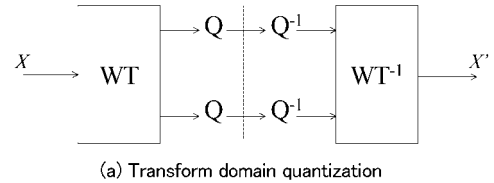


図2 2つの量子化手法。(a) 変換領域量子化。(b) 空間領域量子化。 WT は可逆ウェーブレット変換、 Q は量子化、 X と X' は原信号と再生信号をそれぞれ表す。

3. 提案法

3. 1 空間領域量子化の導入

従来法では図2 (a)に示すように変換領域において量子化が行われる（変換領域量子化）。これに対し、可逆ウェーブレット変換ではラウンディング処理により帯域信号が整数値となるため、空間領域量子化の導入が可能となる。そこで本論文では、2. 3に述べた問題に対して図2 (b)に示すような空間領域での量子化（空間領域量子化）を新たに導入する方法を提案する。

3. 2 提案法における信号処理

空間領域量子化の導入方法には種々のバリエーションが考えられるが、本論文では図4や図5に示すよう

な、「低域では空間領域量子化を、高域では変換領域量子化を行う」方法を提案する。

図4の提案法1（方式B）では、第2ステージと第3ステージの間に量子化を導入することで、同図点線枠内にあるラウンディング誤差が全てキャンセルされる。このため、従来法の問題点であるラウンディング誤差の低減が可能となる。

また、提案法1のバリエーションとして、第3ステージの水平方向フィルタ処理WT(H)と垂直方向フィルタ処理WT(V)の間に量子化を導入する方法も考えられ、これは方式B2と呼ぶことにする。

図5の提案法2（方式C）では、第1ステージと第2ステージの間に量子化を行う。また、方式B2と同様なバリエーションを方式C2と呼ぶ。

このような各種方式を単にラウンディング誤差のみにより比較した場合、図6に示すような全帯域で空間領域量子化を用いる方法（方式D）が最も良いことになる。しかしこれでは、ニアロスレス符号化^[14,15]のような超高ビットレートでの実用的な符号化は可能だが、低～中ビットレートではマッハバンドのような視覚的に顕著な画質劣化が発生するなど符号化効率が低下するという欠点がある。

従って、実用的な面での比較はレート歪み曲線を用いて実施する必要がある。

4. レート歪み曲線による評価

そこで、レート歪み曲線による評価を用いて上記のバリエーションを比較する。歪みとしては再生画像に重畳する誤差の分散値 σ^2_E により次式で定義されるPSNRを用いる。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\sigma_E^2} \quad (2)$$

但し、上式の誤差には量子化誤差とラウンディング誤差の両方が含まれる。また、レートとしては、第*i*帯域のエントロピーを B_i として、これらの画素数による重み和である次式を用いる。

$$B_{total} = \sum_{i=0}^9 w_i B_i \quad (3)$$

により評価した^[19]。更に、各帯域の量子化には最適量子化ステップサイズ^[20]を用いる。

実験の結果として得られたレート歪み曲線を図8, 9, 10, 11に示す。それぞれ、入力画像として、

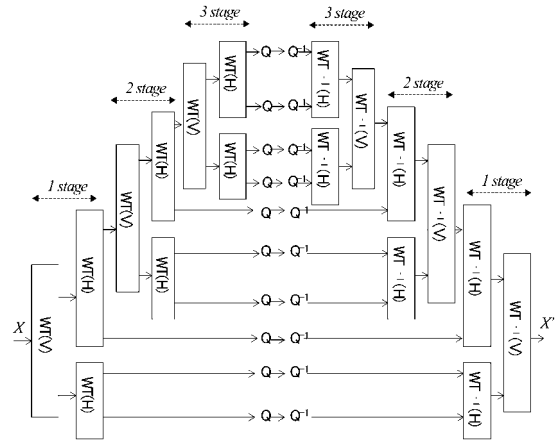


図3 従来法（方式A）の構成図。全ての帯域において量子化は変換領域で施される。

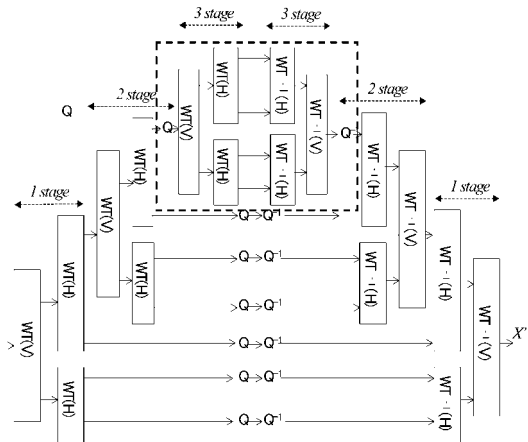


図4 提案法1（方式B）の構成図。高域（図の下部）では変換領域量子化が、低域（図の上部）では2ステージと3ステージの間で空間領域量子化がそれぞれ施される。

"Lenna", "Aerial", "Barbara", "Boat"を用いた。これらの図より、高ビットレートではラウンディングが全てキャンセルされる方式Dの特性が最も良いことが分かる。しかし、方式Dは低ビットレートでは特性が悪い。

そこで、方式B, B2, C, C2, D, D2それぞれのPSNR値から方式AのPSNR値を差し引いた差分特性により各方式を比較する。具体的にはまず、方式A, B, B2, C, C2, D, D2それぞれのレート歪み曲線を次式の2次曲線に回帰する。

$$y = a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (4)$$

このときの係数値は表3, 4, 5, 6にそれぞれ示す。次

に、 N は $\{B, B2, C, C2, D, D2\}$ のいずれかとして、方式 N の回帰曲線 y_N と方式 A の回帰曲線 y_A との差分から次式の積分値 I を計算する。

$$I = \frac{1}{B_{\max} - B_{\min}} \int_{B_{\min}}^{B_{\max}} (y_N - y_A) dx \quad (5)$$

こうして計算された積分値 I をレート歪み曲線で評価した場合のトータルの特性とみなして、方式 $\{B, B2, C, C2, D, D2\}$ のいずれが良いかを選定する。具体的な積分値 I は表3, 4, 5, 6に示す。

どの画像においても、方式 D は中ビットレートから低ビットレートでの性能が悪いため、積分値 I は負の値となり全体の特性は良くない。

積分値 I が最大となる方式は、"Lenna", "Barbara", "Boat" では方式 $C2$ 、"aerial" では方式 C となった。以上の実験から、画像の種類に依存するとはいえ方式 C あるいは $C2$ が良いようである。少なくとも、従来法である方式 A に対し、図4, 5のようなステージの間で量子化を行う方法が効果的であることが分かる。

5. むすび

本論文では、可逆・非可逆統合符号化の非可逆符号化時におけるラウンディング誤差の影響を軽減する方法として、「低域では空間領域量子化を、高域では変換領域量子化を」を行う方法を提案した。

レート歪み曲線による評価では、従来法に対し非可逆符号化において SNR 向上が確認された。また、画像により効果的な量子化手法が異なることが確認された。

今後は、最適な方式が画像依存となる原因の究明などが必要である。

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（課題番号14750284）の助成を受けて実施された。

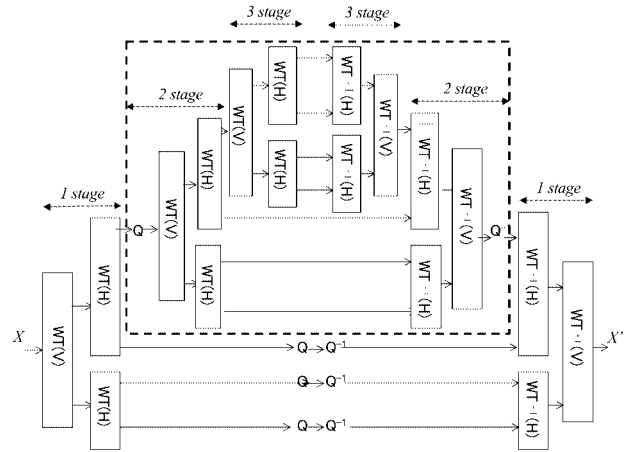


図5 提案法2（方式C）の構成図。高域（図の下部）では変換領域量子化が、低域（図の上部）では1ステージと2ステージの間で空間領域量子化がそれぞれ施される。

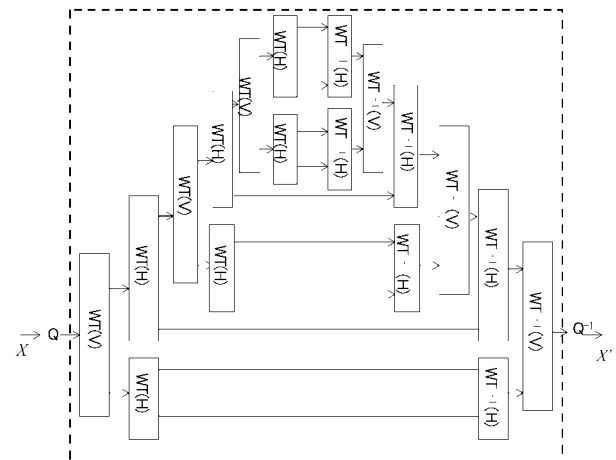


図6 空間量子化法の構成図（方式D）。全帯域において変換前に量子化される。

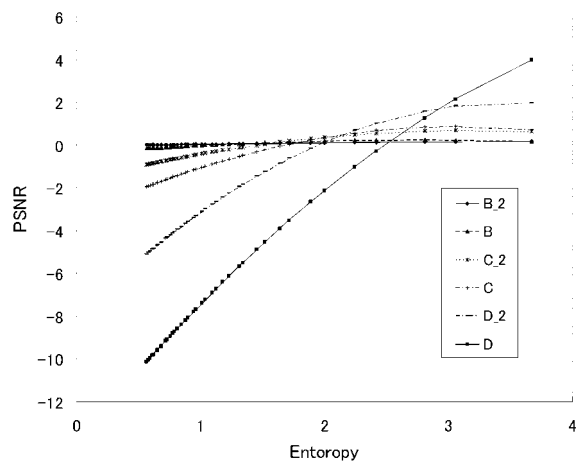


図8 “Lenna” に対するレート歪み特性

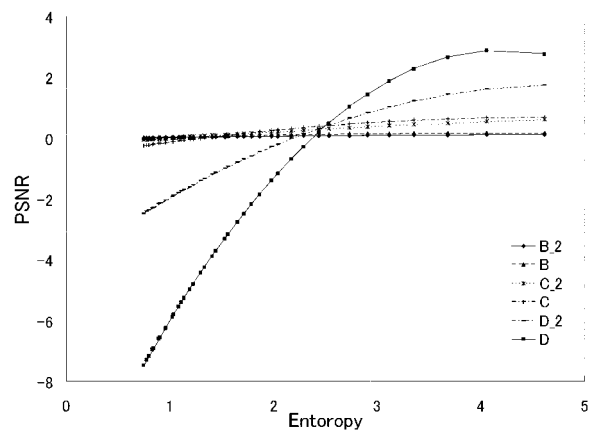


図9 “aerial” に対するレート歪み特性

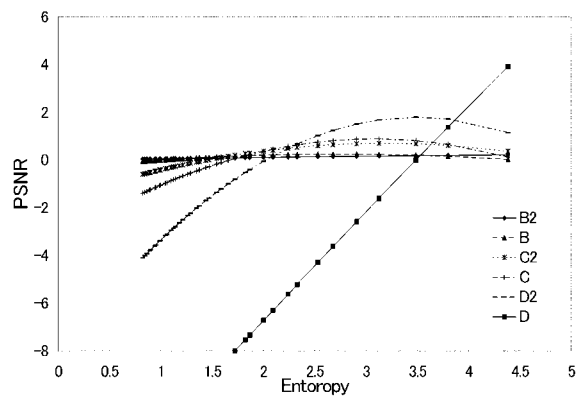


図10 “Barbara” に対するレート歪み特性

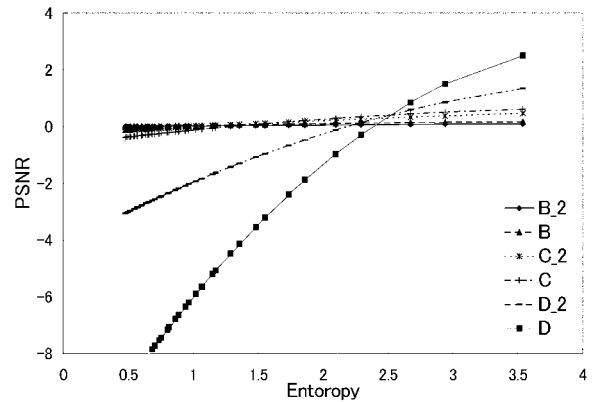


図11 “Boat” に対するレート歪み特性

表3 “Lenna” に対するレート歪み特性の評価

	a2	a	a0	積分値 I
方式 B2	-0.0062	0.0819	-0.032	0.108777
方式 B	-0.0842	0.4629	-0.385	0.150304
方式 C2	-0.2325	1.4819	-1.662	0.247943
方式 C	-0.4478	2.7589	-3.364	0.112631
方式 D2	-0.8241	5.7659	-8.091	-0.2331
方式 D	-0.6195	7.1749	-14.009	-2.08054

表4 “aerial” に対するレート歪み特性の評価

	a2	a	a0	積分値 I
方式 B2	-0.0056	0.0572	-0.032	0.074099
方式 B	-0.0135	0.1156	-0.069	-0.06732
方式 C2	-0.0135	0.2475	-0.232	0.31763
方式 C	-0.0616	0.572	-0.635	0.378732
方式 D 2	-0.2567	2.4681	-4.169	0.28186
方式 D	-0.8646	7.276	-12.418	-0.20681

表5 “Barbara” に対するレート歪み特性の評価

	a2	a	a0	積分値 I
方式 B2	-0.0062	0.0819	-0.032	0.132671
方式 B	-0.0842	0.4629	-0.385	0.160581
方式 C2	-0.2325	1.4819	-1.662	0.374893
方式 C	-0.4478	2.7589	-3.364	0.311037
方式 D2	-0.8241	5.7659	-8.291	0.265262
方式 D	-0.0615	4.8539	-16.182	-4.02547

表6 “Boat” に対するレート歪み特性の評価

	a2	a	a0	積分値 I
方式 B2	-0.0265	0.1712	-0.136	0.080191
方式 B	-0.1095	0.5728	-0.523	0.100004
方式 C2	-0.294	1.6194	-1.6	0.236325
方式 C	-0.5563	3.1724	-3.693	-0.00105
方式 D2	-0.6622	4.6984	-6.426	-0.17960
方式 D	-0.1894	5.4604	-12.231	-2.17792

参考文献

- [1] JPEG CD10918-1, Digital compression coding of continuous-tone still images, JPEG-9-R6, Jan.1991.
- [2] ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 N505, Call for contributions for JPEG 2000 (JTC 1.29.14, 15444) , March 1997
- [3] D. S. Taubman, M. W. Marcellin, "JPEG 2000 - Image compression fundamentals, standards and practice", Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [4] W. Sweldens, "The lifting scheme: a construction of second generation wavelets," Tech. Rep. 1995:6, Industrial Math. Initiative, Dept. of Math., Univ. of South Carolina, 1995.
- [5] H. Kiya H. Kobayashi O. Watanabe, " Design of Integer Wavelet Filters for Image Compression", IEICE Trans. on Fundamentals, vol.E83-A, no.3, pp.487-491, March 2000.
- [6] 小松、瀬崎、安田、"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.
- [7] M. D. Adams, F. Kossentini, "Reversible Integer-to-Integer Wavelet Transform for image Compression: Performance Evaluation and Analysis," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 9, pp 1010 - 1024, no. 6, June 2000.
- [8] S. Chokchaitam, M. Iwahashi, P. Zavorsky, N. Kambayashi, "Integrated Lossy and Lossless Image Coding based on Lossless Wavelet Transform and Lossy-Lossless Multi Channel Prediction", IEICE Trans. on Fundamentals, E84-A (5) pp.1326-1338, May,2001
- [9] F. Sheng, A. Bilgin, P. J. Sementilli, M. W. Marcellin, "Lossy and Lossless Image Compression using Reversible Integer Wavelet Transform," IEEE ICIP 98, vol.3, pp.876-880, Oct. 1998.
- [10] A. Said, W. Perlman, "Reversible Image Compression via Multiresolution Representation and Predictive Coding", IEEE Trans. on Image Processing, vol.5, no.9, pp.1303-1310, Sept.1996.
- [11] 岩橋、福岡、神林、"可逆ウェーブレット変換の客観的評価尺度としての可逆符号化利得の提案",信学論 A J83-A.No.10,pp.1197-1206,Oct.2000
- [12] 小松、瀬崎、"2次元ロスレス変換とその画像符号化への応用",信学技法,DSP2000-120, pp.19-26, Oct. 2000.
- [13] 福岡、岩橋、今城、西村、"ロスレスDCTを用いた画像信号のロスレス／ロシー変換符号化",信学技法, IE2000-44, pp.15-22, Sept. 2000.
- [14] L. Karray, P. Duhamel, O. Rioul, "Image Coding with an L^∞ Norm And Confidence Interval Criteria", IEEE Trans. Image Processing, Vol.7, No.5, Pp.621-631, May 1998.
- [15] T. Nakachi, T. Fujii, J. Suzuki, " A Unified Coding Algorithm of Lossless and Near-Lossless Color Image Compression", IEICE Trans. on Fundamentals, vol.E83-A no.2, pp.301-310, Feb. 2000.
- [16] J. Reichel, G. Menegaz, M. J. Nadenau and M. Kunt, "Integer Wavelet Transform for Embedded Lossy to Lossless Image Compression," IEEE Transactions on Image Compression, vol. 10, no. 3, pp.383-392, March 2001.
- [17] 貴家仁志、"マルチレート信号処理", 昭晃堂, 1995.
- [18] P. P. Vaidyanathan, "Multirate Systems and Filter Banks", Prentice Hall Signal Processing Series, 1992.
- [19] N. S. Jayant, P. Noll, "Digital coding of wave forms", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984.
- [20] J. Katto, Y. Yasuda, "Performance Evaluation of Subband Coding and Optimization of Its Filter Coefficients," in Proc. SPIE Visual Communications and Image Processing, vol. 1605, pp. 95 - 106, 1991.