

Wavelet 変換符号化に対応したカラー静止画像の 画質評価モデル

大西 淳一 堀田 裕弘 村井 忠邦
富山大学 工学部 電気電子システム工学科

930-8555 富山市五福 3190

TEL:076-445-6758

E-mail:horita@ecs.toyama-u.ac.jp

あらまし 先に提案されているカラー静止画像のブロックベース符号化に対する画質評価モデルと、白黒静止画像の Wavelet 変換符号化に対する画質評価モデルを組み合わせることでカラー静止画像の Wavelet 変換符号化に対する画質評価モデルを構築し、その性能評価と問題点について検討を行なった。これは、CIE $L^*a^*b^*$ 色空間の各成分ごとにおける 4 種類の歪み要因、11 種類のテクスチャ特徴量と 6 種類のサブバンド毎に求めた Wavelet 変換領域の誤差を算出し、ロジスティック曲線を考慮した非線形重回帰モデルで画質評価モデルを構成した。その結果、オープンデータで評価した場合でも、相関係数が 0.965 と高く、MOS の推定誤差の平均値も 0.26、最大誤差も 0.96 と良好な結果を得た。

キーワード 画質評価, 視覚特性, Wavelet 変換符号化, JPEG2000

Quality evaluation model of Wavelet transform coding

Jun'ichi OHNISHI Yuukou HORITA Tadakuni MURAI

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Toyama University

3190, Gofuku, Toyama-shi, 930-8555 Japan

TEL:076-445-6758

E-mail:horita@ecs.toyama-u.ac.jp

Abstract We construct the quality evaluation model of Wavelet transform coding of color still picture. This model is based on the evaluation models of the block-based coding and Wavelet transform coding. This model consists of the non-linear combination model whose components are 4 kinds of distortion factors in $L^*a^*b^*$ color space, 11 kinds of texture features and 6 kinds of subband errors of Wavelet transform domain. This model achieves the good estimation of the subjective picture quality in case of the open data.

key word picture quality evaluation, human visual system, wavelet transform coding, JPEG2000

1 まえがき

静止画像の情報圧縮技術である JPEG 方式は画像情報の高圧縮率を実現できるが、DCT ベースで画像をブロック分割して符号化するために、再生画像にはこの方式特有のブロックノイズが生じる欠点があった。

そこで、DCT をベースにした JPEG 符号化の次期バージョンとして、JPEG2000 方式の国際標準化作業が行なわれている。この核となる変換技術として Wavelet 変換が採用されている。これは、DCT のようなブロックベースではなく、画像データを連続的な波形として記述する数式表現であるために、DCT 特有のブロックノイズは生じにくい利点がある。

一方、我々が画像情報をネットワークを介して配信したり、CD-ROM 等に保存したりする場合、圧縮された画像の品質をどのように設定すればよいか困惑してしまうことが多い。これは、画像品質を定量的に評価できる画質評価技術の確立が符号化技術の確立よりも遅れているからである。したがって、多くの場合、人間が介入してその品質を主観的に評価する人が多い。よって、画像品質を人間の主観に頼らずに、コンピュータで計算することのできる客観的な画質評価技術の確立が切望されている。

これまでに、我々は静止画像における画質評価モデルを実用化レベルまで改良した [1, 2]。また、白黒 Wavelet 変換符号化に対する画質評価モデルも検討した [3]。近い将来、JPEG2000 にも対応した画質評価モデルの構築が切望されてくる。そこで、本稿では、カラー画像に対して Wavelet 変換符号化された画像品質を定量的に評価できる画質評価モデルについて、白黒画像の Wavelet 変換符号化における画質評価モデルをカラー画像に対応するように拡張し、その性能評価と問題点について検討を行った。

2 画質評価モデルの基本構成

カラー静止画像に対する画質評価モデルは、静止画像に妨害を与えている歪みをその特徴に基づいて基礎歪み要因に分類して表される。各歪み要因は CIE L*a*b* 色空間における誤差を基本として求められる。画質評価モデルの基礎歪み要因は画像全体にわたる global な妨害だけでなく local feature を考慮したものであり、次の 4 種類が定義されている。

- F1: 誤差の平均値
- F2: 符号化サブブロック間の誤差変化量
- F3: 誤差の自己相関係数
- F4: 輪郭近傍の visibility を考慮した平均 2 乗誤差

次に、画像依存性を緩和するために、基礎歪み要因に加えて、11 種類の画像のテクスチャ特徴量を考慮している。このテクスチャ特徴量は、輝度値における同時生起行列を基にして算出されている。

これらを定量的に求め、各歪み要因間および特徴量間の相関性を削除するために主成分分析を行い、得られた主成分と主観評価実験で得られた 5 段階の平均オピニオン評点 (MOS) との重回帰分析により画質評価モデルを構成する。

さらに、画質評価モデルを線形重回帰モデルのみで計算すると、高品質な画像では評点が 5 を超えたり、劣化のひどい画像では 1 より小さくなるという問題があるので、ロジスティック関数を導入した非線形重回帰モデルを考慮している。この画質評価モデルによる評価値 Q は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{4}{1 + \exp\{-\beta(Q^* - 3)\}} + 1 \\ Q^* &= b_0^* + \sum_{n=1}^J b_n^* Z_n + \sum_{m=1}^K b_{J+m}^* Y_m \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 β は $Q^* = Q = 3$ の点での傾きを表す。また、 Z_n は基礎歪み要因の主成分を表し、 Y_m はテクスチャ特徴量の主成分を表している。さらに、 b_n^* 等はロジスティック関数を考慮した非線形パラメータの最小 2 乗推定により得られる偏重回帰係数である。

3 JPEG2000 符号化への対応

JPEG 符号化画像に対応した画質評価モデルを、ただ単に Wavelet 変換符号化に適用しただけでは良好な推定を行うことができないため、Wavelet 変換符号化特有の歪み要因を検討した [3]。

今回はカラー静止画像に対してこれらの歪み要因を導入し、その効果を検討する。

導入する内容は以下の通りである。

1. 符号化サブブロック間の誤差変化量
2. 原画像と符号化誤差画像の相関
3. Wavelet 変換領域における visibility
4. Wavelet 変換領域における誤差

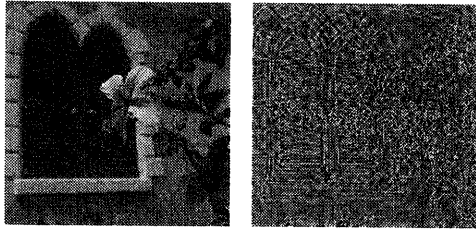


図 1: 原画像

図 2: 誤差画像

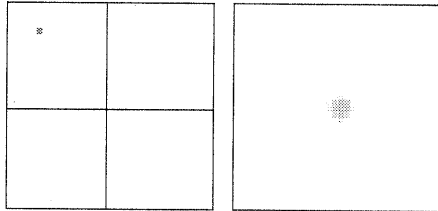


図 3: Wavelet 変換領域 図 4: 図 3 を逆変換した画像
域で発生した歪み

3.1 符号化サブブロック間の誤差変化量

JPEG 符号化では、画像を 8 画素毎のサブブロックに分割し、各サブブロック毎に独立に符号化するため、サブブロックの境界が現われたり、輪郭部分が不連続になるような劣化 (ブロック歪み) が生じる。従来提案された画質評価モデルではこのブロック歪みを基礎歪み要因 F2 として用いている。

しかし、Wavelet 変換では、画像データを連続的な波形として記述する表現であるために、このようなブロック歪みは生じにくい。そこで、この F2 を除外することによる効果を検討する。

3.2 原画像と符号化誤差画像の相関

Wavelet 変換符号化において、圧縮率が高くなると高周波成分が削られるため、誤差画像に輪郭などの細かい部分が現われてくる。図 1 は原画像、図 2 はそれを Wavelet 変換符号化し、情報量を 1/16 に削減した場合の誤差画像を示している。この例からも明らかなように、誤差画像には原画像の輪郭部分である窓枠の部分が明確に現われているのが分かる。そこで、符号化誤差と原画像にはかなりの相関があると考えられるので、これらの相関値の評価モデルに与える効果について検討する。

3.3 Wavelet 変換領域における visibility

Wavelet 変換された領域で図 3 のように歪みが発生した場合、それを逆変換すると図 4 のような歪み

表 1: 閾値のパラメータ

	a	k	f_0	g_1	g_4	$g_2 \& g_3$
Y	0.495	0.466	0.401	1.501	0.534	1.000
Cr	0.944	0.521	0.404	1.868	0.516	1.000
Cb	1.633	0.353	0.209	1.520	0.502	1.000

表 2: 振幅のパラメータ $A_{\lambda, \theta}$

Level λ	Orient θ		
	HH	HL&LH	LL
1	0.62171	0.67234	0.72709
2	0.34537	0.41317	0.49428
3	0.18004	0.22727	0.28688
4	0.09140	0.11792	0.15217
5	0.045943	0.059758	0.077727
6	0.023013	0.030018	0.039156

となる。この歪みの大きさが閾値を超えると知覚されるようになる。

これは、式 (2) により、この逆変換画像に現われる Wavelet 歪みの視覚的な閾値を求めることができる。

$$Threshold(\lambda, \theta) = a10^{k(\log(2^\lambda f_{0g_0}/\gamma))^2} \quad (2)$$

式 (2) において、 λ は Wavelet level、 g_0 は場所による係数、 γ はディスプレイ解像度を表し、各パラメータの値は表 1 のように与えられている。

しかし、Wavelet 変換された領域での閾値 $Threshold_w$ を求めなければならない。これは式 (3) により求まる。

$$Threshold_w(\lambda, \theta) = \frac{Threshold}{A_{\lambda, \theta}} \quad (3)$$

ここで、 $A_{\lambda, \theta}$ は Wavelet 変換された領域で発生した歪みが逆変換された時に、歪みの発生場所によってどれだけの大きさになるかを示すパラメータである。これは表 2 のように与えられている。

よって、式 (3) により求めた閾値 $Threshold_w$ により、見えない部分を取り除く。

これらを、YCbCr 色空間でフィルタリング処理を行い、歪み要因を求める。

3.4 Wavelet 変換領域における誤差

図 1 の原画像に Wavelet 変換を施した結果を Wavelet 変換領域で観察すると図 5 のようになる。一方、情報圧縮された画像に同様な Wavelet 変換を施すと、Wavelet 変換領域では図 6 のようになる。図 5 に比べて図 6 では左下 (HL) の領域や右上 (LH) の領域のデータが削られている様子がうかがえる。

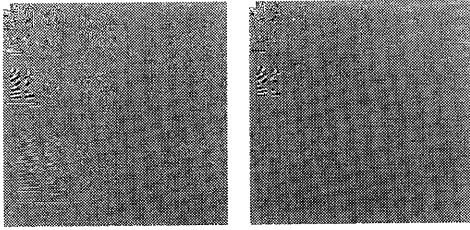


図 5: 原画像の Wavelet 変換領域での画像
図 6: 情報圧縮された場合の画像

よって、この Wavelet 変換領域での誤差を、サブバンド毎にその総和を求め、これを評価モデルに考慮する。

4 主観評価実験

4.1 評価条件

前述の画質評価モデルを用いて、Wavelet 変換符号化された画像品質の評価を行なうために、実際に符号化された画像に対して主観評価実験を行った。このときの評価実験の条件及び評価語を表 3、表 4 に示す。

本研究では画像符号化に JPEG2000 CODEC (β)[5] を使用した。この符号化プログラムでは画像圧縮のパラメータとして、圧縮率を指定する。たとえば、圧縮率として 4 を指定すると、データ量は $\frac{1}{4}$ になる。

4.2 評価のばらつき

評価モデルの推定精度を議論するために、評価実験データのばらつきについて議論する。そのため、既に評価の安定している 10 人の評定者に対して、全画像を 8 回評価してもらった。

一般に、ある妨害を受けた画像をある評定者に提示しその評価を繰り返し求めると、同一評定者でもその評価値 (評点) は常に一定ではなく、時と場合により変動する (個人内ばらつき)。一方、ある妨害を受けた画像を各評定者に提示し、その評価を求めると評定者間でその評価は異なる (評定者間ばらつき)。また、評定者 n 人が一回評価して得られる MOS も繰り返すごとに異なる (MOS のばらつき)。よって、評価実験データには、これら 3 種類のばらつきが関与する。

本研究では評点分布が正規分布であると仮定し、評価実験データから得られた各ばらつきに対する検

表 3: 主観評価実験の条件

評価画像	24 種類 (ITE 標準画像 5 枚, Barbara, Kodak Photo-CD:18 枚)
符号化方式	JPEG2000 符号化 (Wavelet 変換符号化)
視距離	4H(H:画像の高さ)
照明	なし (準暗室)
最大輝度	75(cd/m ²)
評定者数	10 名 (各自 8 回評価)
評価尺度	5 段階妨害尺度

表 4: 5 段階妨害尺度

品質	評価語
5	劣化が分からない
4	劣化が分かるが気にならない
3	劣化が気になるが邪魔にならない
2	劣化が邪魔になる
1	劣化が非常に邪魔になる

表 5: 評価データの実験値と推測値の比較

個人内ばらつきの標準偏差の平均		0.409
評定者間ばらつきの標準偏差の平均	実験値	0.581
	推測値	0.632
MOS の標準偏差の平均	実験値	0.154
	推測値	0.151

定を行った。ともに未知の μ と σ^2 をもつ正規分布から抽出した大きさ n の標本の平均と分散を各々 \bar{x} , s^2 とすれば式 (4) が平均 μ に対する $100(1-\alpha)\%$ の信頼区間となる。

$$\bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

MOS のばらつきに対しては、評価回数 $n = 10$ (延べ人数は 80 人である)、標準偏差 $s = 0.154$ となるので、これらを式 (4) に代入し、母集団の正規性を仮定して μ に対する 95% 信頼区間を求めてみると、 $\mu = \pm 0.11$ が得られた。この MOS のばらつきから得られた 95% 信頼区間から、任意の 2 種類の MOS の差が 0.22 以下のものは有意差がないことになる。

また、個人内ばらつきでは同様に、評価回数 $n = 8$ 、標準偏差 $s = 0.409$ となるので、 $\mu = \pm 0.34$ が得られた。よって、本実験で得られた評価結果に対しては ± 0.34 程度の誤差があるので、本研究で議論する MOS 推定においては推定誤差として 0.4 程度が目標となる。

5 実験結果

主観評価実験を行なった 168 枚の画像に対して、従来の基礎歪み要因 F1~F4、テクスチャ特徴量 T1~T11 を求めた。さらに、原画像と符号化誤差画像の相関係数を基礎歪み要因の F5 とし、Wavelet 変換領域における符号化誤差を各サブバンドごとに求めこれを W1~W16 とした。これらをそれぞれ主成分分析し、累積寄与率が 99% 以上となる主成分を用いて画質評価モデルを検討する。

また、構築したモデルの評価はクロズドデータでの推定性能にほとんど差が無いため、オープンデータでの推定性能を評価する。

5.1 画質評価モデルの推定性能

評価実験で用いた 24 枚の画像のうち、23 枚を用いて評価モデルを構築し、残りの 1 枚の画像の評価をオープンデータとして行なった。これを 24 枚の画像全てに対して行う。

評価実験で用いた画像に対する画質評価モデルを検討する。まず、基礎歪み要因の組合せによるモデルを構築し、その中で良好なものをテクスチャ特徴量や、Wavelet 領域における符号化誤差と組み合わせる。

5.1.1 基礎歪み要因の組み合わせ

基礎歪み要因 F1~F5 の組合せとして、以下のものを構築した。

- F1~F4 全てを用いたもの (従来モデル)
- F1~F4 の内、F2 を除いたもの
- F1~F5 全てを用いたもの
- F1~F5 の内、F2 を除いたもの

これらに対し、Wavelet 変換領域における visibility を考慮した場合としない場合 (従来モデル) について検討した。この結果を表 6 に示す。

その結果、ブロック歪みを評価していた F2 を除くことにより、推定誤差の最大値が改善された。また、Wavelet 変換領域における visibility を考慮す

表 6: 歪み要因の組合せによる各モデルの性能評価

モデルの構成	相関係数	誤差の平均値	誤差の最大値
visibility の考慮なし			
F1~F4	0.966	0.26	1.44
F1~F4-F2	0.962	0.27	1.13
F1~F5	0.964	0.26	1.73
F1~F5-F2	0.959	0.29	1.31
visibility の考慮あり			
F1~F4	0.967	0.26	1.35
F1~F4-F2	0.962	0.27	1.11
F1~F5	0.965	0.26	1.47
F1~F5-F2	0.959	0.28	1.24

表 7: 各モデルの性能評価

モデルの構成	相関係数	誤差の平均値	誤差の最大値
F1~F4+T33	0.940	0.29	2.19
D	0.962	0.27	1.13
D+T33	0.948	0.30	1.73
D+T11	0.965	0.26	1.29
D+Wa	0.946	0.30	1.54
D+Wb	0.965	0.26	0.96
D+T11+Wa	0.956	0.27	2.60
D+T11+Wb	0.949	0.28	2.88
D+Wb (CLOSED)	0.977	0.21	0.86

ることにより、推定精度が多少向上した。しかし、白黒画像を対象とするモデルでは有効であった原画像と符号化誤差画像の相関である F5 を用いることによる推定精度の向上は見られなかった。

5.1.2 テクスチャ特徴量および Wavelet 歪みとの組合せ

前項の結果より、F1~F4 のうち、F2 を除いたものを基礎歪み要因の代表として D で表す。また、以下は Wavelet 変換領域における visibility を考慮したものについて検討する。

テクスチャ特徴量を T で表し、CIE L*a*b* 色空間の L* 成分の 11 個のデータを使用した場合と、3 成分全てを使用した 33 個のデータの場合について検討する。さらに、Wavelet 歪みを Wa で表し、

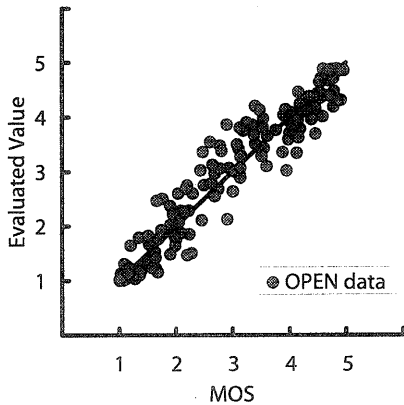


図 7: D+Wb(OPEN DATA)

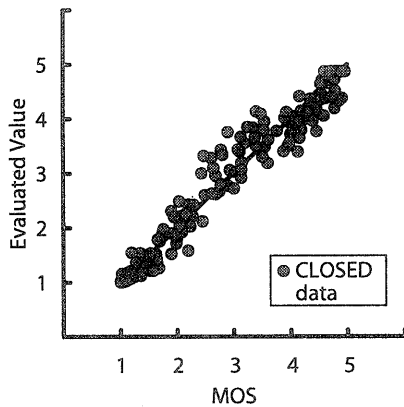


図 8: D+Wb(CLOSED DATA)

CIE $L^*a^*b^*$ 色空間の3成分を使用した48個のデータについて検討する。また、Wavelet歪みをWavelet level毎にまとめて6つにしたものをWbとし、CIE $L^*a^*b^*$ 色空間の3成分を使用した18個のデータについて検討する。

これらの組合せでは17通りがあるが、推定性能の良かった代表的なモデルの結果を表7に示す。また、一番推定性能の良かったモデルのMOSと推定値のオープンデータの場合とクローズドデータの場合の関係を図(7),(8)に示す。なお、従来のモデルであるF1~F4+T33も比較のため併せて示してある。

テクスチャ特徴量やWavelet歪みを組み合わせることにより、従来のモデルであるF1~F4+T33より推定精度が若干向上した。テクスチャ特徴量

はCIE $L^*a^*b^*$ 色空間の3成分を使用する場合より L^* 成分のみの方が推定性能が良好であった。Wavelet領域における誤差はサブバンドごとにまとめたWbのモデルが推定精度が良好であった。

また、相関係数がどのモデルも0.96を超えており、誤差の平均値も0.3以下と、MOSのバラツキより小さくなった。しかし、最大誤差は1.0程度ある。

6 まとめ

本稿では、先に提案されているカラー静止画像のブロックベース符号化に対する画質評価モデルと、白黒静止画像のWavelet変換符号化に対する画質評価モデルを組み合わせることでカラー静止画像のWavelet変換符号化に対する画質評価モデルを構築し、その性能評価と問題点について検討を行なった。これは、CIE $L^*a^*b^*$ 色空間の各成分ごとにおける4種類の歪み要因、11種類のテクスチャ特徴量と6種類のサブバンド毎に求めたWavelet変換領域の誤差を算出し、ロジスティック曲線を考慮した非線形重回帰モデルで画質評価モデルを構成した。その結果、オープンデータで評価した場合でも、相関係数が0.965と高く、MOSの推定誤差の平均値も0.26、最大誤差も0.96と良好な結果を得た。

今後の課題として、さらなる特性改善があげられる。

参考文献

- [1] 堀田裕弘, 宮原 誠, 村井忠邦, “白黒静止画像における客観的画質評価尺度の推定改善の検討,” 信学論(B-I), **J80-B-I**, 6, pp.505-514, June 1997.
- [2] 押田 他, “Texture特徴量を考慮したカラー静止画像の画質評価法”, 電気関係学会北陸支部連合大会, F-33, p.336(Oct.1998)
- [3] 大西淳一, 堀田裕弘, 村井忠邦, “Wavelet変換符号化に対応した画質評価モデル”, 信学技報, IE2000-13, pp.33-40, (June.2000)
- [4] A.B.Watson, “Visibility of Wavelet Quantization Noise”, IEEE Trans. on Image Proc., vol. 6, pp. 1164-1175, month 1997.
- [5] “JPEG2000 CODEC Console Application, <http://www.imagepower.com>