

カラー画像における視覚特性を考慮した 画質の定量的評価法

日大生産工 (院) ○櫻井 博也
日大生産工 目黒 光彦

1 はじめに

画質の判定を行う際、ユーザ視認による定性的な評価ではなく、アルゴリズムによる定量的な評価を行いたい。代表的な画質の定量的評価法としては平均二乗誤差 (MSE) があるものの、人の視覚特性を考慮している評価法とは言い難い。そこでウェーブレット変換を用いることで人の視覚特性を考慮した画質評価法として WNMSE が提案された [1][2]。この評価法は、まず画像を低周波域、縦方向高周波域、横方向高周波域、斜め方向高周波域の四つの帯域に分け、それぞれで視覚特性に応じた異なる荷重をかける。その後、その荷重により算出した MSE を用いることによって、人の目に適した定量的な画質評価法を実現している。本論文では、WNMSE をカラー画像に適用することによってカラー画像の新しい画質評価法を実現する。RGB 空間と YCrCb 空間における、平均化フィルタとガウシアンフィルタをかけた MSE が等しく WNMSE の異なる画像を比べることにより、視覚特性に適した処理を行っていることを証明する。

2 ウェーブレット変換

この章では、ウェーブレット変換による多重解析度表現について説明する。ウェーブレット変換とは、画像による多重解像度表現である。この変換を行うことで、画像を低周波域、高周波縦、高周波横、高周波斜めの四つに分けることができる。周波数帯域ごとに分け、それぞれの帯域で異なる荷重をかけることによって、視覚特性に適した評価法を行うことができる。

人の視覚特性は、低周波域に敏感で、高周波域に鈍感ということが研究結果で示されている [3]。画

像のほとんどは低周波域で構成されていて、高周波域は非常に少ない。この特性を生かして、画像にウェーブレット変換をかけ、低周波域に荷重を重く、高周波域に荷重を軽くすることにより視覚特性に適した評価法が提案されている [1][2]。ウェーブレット変換を行うために、次の式 (1) を示す。これは横方向のウェーブレット変換である。

$$\begin{aligned} s_{m,n}^{j+1,t} &= \sum_k \overline{p_{k-2m}} s_{k,n}^{(j)}, \\ w_{m,n}^{j+1,t} &= \sum_k \overline{q_{k-2m}} s_{k,n}^{(j)}. \end{aligned} \quad (1)$$

$s_{k,l}^{(j)}$ はレベル j の低周波帯域の係数であり、 $j = 1$ のときは原画像の信号を表す。 p_k は表 1 で示すドベシ数列を用いる。このドベシ数列は、 N が大きくなるほど低周波域と高周波域の分離の度合いが良い。今回は一般的な $N = 2$ を用いている。

表 1 ドベシ数列

N=2	N=3	N=4
0.48296291314	0.33267055295	0.23037781330
0.83651630373	0.80689150931	0.71484657055
0.22414386804	0.45987750211	0.63088076792
-0.12940952255	-0.13501102001	-0.02798376941
	-0.08544127388	-0.18703481171
	0.03522629188	0.03084138183
		-0.01059740178

さらに、 $s_{m,n}^{(j+1,t)}$ と $w_{m,n}^{(j+1,t)}$ を縦軸方向にウェーブレット変換を行う。

$$\begin{aligned} s_{m,n}^{j+1} &= \sum_l \overline{p_{l-2n}} s_{m,l}^{(j+1,t)}, \\ w_{m,n}^{j+1,h} &= \sum_l \overline{q_{l-2n}} s_{m,l}^{(j+1,t)}, \\ w_{m,n}^{j+1,v} &= \sum_l \overline{p_{l-2n}} s_{m,l}^{(j+1,t)}, \\ w_{m,n}^{j+1,d} &= \sum_l \overline{q_{l-2n}} s_{m,l}^{(j+1,t)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Evaluation of Color Image Quality Based on Human Visual Systems

Hiroya SAKURAI and Mitsuhiko MEGURO

$s_{m,n}^{(j+1)}$ はレベル j に比べ 1 つ上位のレベルにおける低周波域であり, $w_{m,n}^{(j+1,v)}$ は縦成分, $w_{m,n}^{(j+1,h)}$ は横成分, $w_{m,n}^{(j+1,d)}$ は斜め成分である. 式 (1), 式 (2) をまとめると式 (3) になる.

$$\begin{aligned} s_{m,n}^{j+1} &= \sum_l \overline{p_{k-2m}} \overline{p_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}, \\ w_{m,n}^{j+1,h} &= \sum_l \overline{q_{k-2m}} \overline{q_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}, \\ w_{m,n}^{j+1,v} &= \sum_l \overline{p_{k-2m}} \overline{p_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}, \\ w_{m,n}^{j+1,d} &= \sum_l \overline{q_{k-2m}} \overline{q_{l-2n}} s_{k,l}^{(j)}. \end{aligned} \quad (3)$$

ウェーブレット変換式 (3) の低周波域, 高周波域縦, 横, 斜め四つに対応するものが, 下の図 1 であり, 図 2 の goldhill 原画像を, レベルごとのウェーブレット変換をしたものが図 3 である.

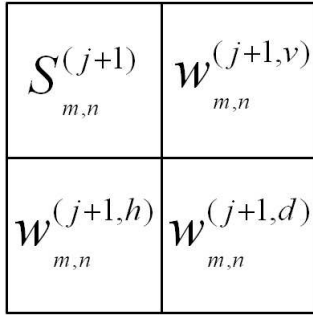
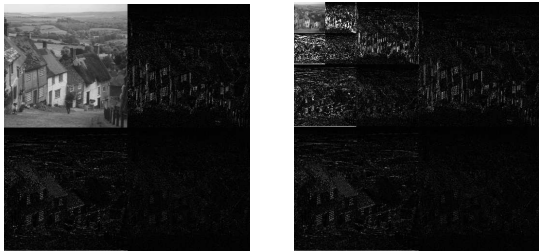


図 1: ウェーブレット変換



図 2: goldhill 原画像



(a) レベル 1 (b) レベル 3

図 3: レベル別ウェーブレット変換

ウェーブレット変換により周波数分析したものは式 (4) で逆変換をすることで画像を再構成することができる.

$$\begin{aligned} s_{m,n}^j &= \sum_k \sum_l [p_{m-2k} p_{n-2l} s_{k,l}^{j+1} \\ &+ p_{m-2k} q_{n-2l} w_{k,l}^{j+1,h} \\ &+ q_{m-2k} p_{n-2l} w_{k,l}^{j+1,v} \\ &+ q_{m-2k} q_{n-2l} w_{k,l}^{j+1,d}]. \end{aligned} \quad (4)$$

3 定量的評価法

本章では, 画像評価法である MSE, MSE を正規化した NMSE, ウェーブレット変換後画像に用いる WNMSE 評価法について説明する.

3.1 MSE

MSE (Mean Square Error) とは, 原画像 $I(x, y)$ と処理画像 $I'(x, y)$ の二乗誤差の平均によって算出される. 式 (5) により示す.

$$MSE = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I'(x, y) - I(x, y))^2. \quad (5)$$

MSE の値が小さいほど原画像に近い画像となる. この値を算出することにより, 画像を定量的に評価することができる.

3.2 NMSE

NMSE (Normalised Mean Square Error) は, MSE を正規化した値である. 式 (6) により示す.

$$NMSE = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I'(x, y) - I(x, y))^2}{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y I'(x, y)} \quad (6)$$

3.3 WNMSE

WNMSE (Weighted Normalized Mean Square Error) は, 正規化された MSE に荷重をかけることによって, 視覚特性に適した画像評価法を行うものである. まず, 処理画像にウェーブレット変換をかける. 次にウェーブレット変換をかけた画像に, 視覚特性に適した荷重を用いた評価法

である WNMSE を計算する。適切な荷重を用いることによって、MSE より視覚特性に適した画像評価法になる。荷重の式を式 (7) に、 $J = 3$ の場合を図 4 に示す。

$$W_{J,f_{w_j}} = \sqrt{4^{(J-1)} \cdot 2^{f_{w_j}/2}}. \quad (7)$$

$8\sqrt{2}$	8	$2\sqrt{2}$	1
8	4	2	
$2\sqrt{2}$	2		$\frac{1}{\sqrt{2}}$
1			

図 4: WNMSE 算出に用いる $J = 3$ 時の荷重

J 回行ったウェーブレット変換によって、低周波域と高周波域に分解された各帯域とウェーブレット係数のレベルごとで正規化された $NMSE_{w_j}$ は、式 (8) により算出される。

$$NMSE_{w_j} = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I'_{w_j,x,y} - I_{w_j,x,y})^2}{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I'_{w_j,x,y})}. \quad (8)$$

各帯域の重要度を表す荷重を各帯域の $NMSE_{w_j}$ にかけることで $WNMSE_1$ を式 (9) により算出する。

$$WNMSE_1 = \sqrt{4^{(J-1)} \cdot 2^{f_{s_j}/2}} \cdot NMSE_{s_j} + \sum_{w \in \{h,v,d\}} \sum_{j=1}^L \sqrt{4^{(J-1)} \cdot 2^{f_{w_j}/2}} \cdot NMSE_{w_j}. \quad (9)$$

最後に $WNMSE_1$ を対数計算した式により、 $WNMSE$ が算出される。

$$WNMSE = 20 \cdot \log_{10} \frac{100}{WNMSE_1}. \quad (10)$$

4 ボケ劣化のモデル

シミュレーションを行うために、ボケ画像を作成する必要がある。本章では、ボケ画像を作成するために FIR フィルタである、平均化フィルタ、ガ

ウシアンフィルタについて説明する。平均化フィルタとは、任意の窓数の総和の平均を求めるフィルタである。ガウシアンフィルタは、ガウス分布に従った係数を用いた FIR フィルタである。FIR フィルタの式は (11) により求められ、 h_n の係数を変えることによりフィルタを変えることができる。

$$Y_{FIR} = \sum_{n=1}^N h_n x_n \quad (11)$$

ガウシアンフィルタのフィルタ係数は式 (12) により算出できる。

$$Y_{gauss} = (1/2\pi\sigma^2) \exp \{-(x^2 + y^2)/(2 * \sigma^2)\} \quad (12)$$

5 シミュレーション結果

本章では、MSE が等しく WNMSE が異なる画像を比較し、視覚的にも異なっていることで WNMSE が視覚特性に適した評価法であることを示す。シミュレーション結果は、カラー画像で比較した。カラー画像の MSE, WNMSE の計算法は、モノクロ画像処理を三次元で行い、それぞれの平均を求める手法を用いた。RGB 空間の場合、RGB をそれぞれ別個に処理している。また、YCrCb 空間の Y 成分でも計算をしている。Y 成分とは、画像の輝度である。Y 成分は、式 (13) で示す。

$$\begin{aligned} Y &= 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \\ Cr &= 0.500 * R - 0.419 * G - 0.081B \\ Cb &= -0.169 * R - 0.332 * G + 0.500B \end{aligned} \quad (13)$$

表 2 は、いくつかの窓数を用いた平均化フィルタをかけた画像の MSE を算出し、その MSE に合わせた画像を窓数を変化させながらガウシアンフィルタで作成する。その作成した平均化フィルタとガウシアンフィルタの MSE が等しい時の画像における、WNMSE の違いを表している。カラー画像の比較は、RGB 空間と YCrCb 空間の輝度である Y のみで比較した。

表 2 ガウシアンフィルタ WNMSE(RGB)

	ガウシアンフィルタ WNMSE					
	3*3	5*5	7*7	9*9	11*11	13*13
3*3	25.04	24.85	24.85	24.85	24.85	24.85
5*5	-	18.48	18.08	18.00	17.98	17.98
7*7	-	-	15.61	15.31	15.23	15.23
9*9	-	-	-	14.02	13.82	13.78
11*11	-	-	-	-	13.06	12.94
13*13	-	-	-	-	-	12.48

表 3 平均値フィルタ WNMSE(RGB)

WNMSE	3*3	5*5	7*7	9*9	11*11	13*13
		27.10	19.95	16.54	14.53	13.38

表 4 ガウシアンフィルタ WNMSE(Y)

	ガウシアンフィルタ WNMSE					
	5*5	7*7	9*9	11*11	13*13	15*15
3*3	27.75	27.49	27.48	27.48	27.48	27.48
5*5	-	20.27	19.80	19.70	19.67	19.67
7*7	-	-	17.02	16.68	16.58	16.56
9*9	-	-	-	15.17	14.96	14.89
11*11	-	-	-	-	14.00	13.87
13*13	-	-	-	-	-	13.25

表 5 平均値フィルタ WNMSE(RGB)

	3*3	5*5	7*7	9*9	11*11	13*13
WNMSE	30.31	21.89	18.01	15.72	14.32	13.46

RGB空間で処理をした図5と図6はMSEが等しくWNMSEが異なり、視覚的にも異なっている。またYCrCb空間のY成分で比較した図7と図8でも同様の結果が得られている。



図 5:平均フィルタ 5 × 5 窓, MSE=289
WNMSE=19.95 の画像



図 6:ガウシアンフィルタ 15 × 15 窓, MSE=289
WNMSE=18.00 の画像

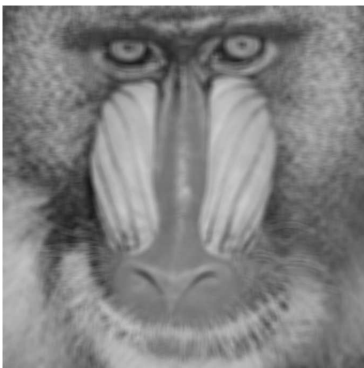


図 7:Y 成分比較平均フィルタ 9 × 9 窓,
MSE=619 WNMSE=15.72 の画像



図 8:Y 成分比較ガウシアンフィルタ 13 × 13 窓,
MSE=619
WNMSE=14.96 の画像

6 おわりに

MSE が等しく、WNMSE が異なり視覚的にも異なる画像を比較することにより、WNMSE が視覚特性に適した画像であることが証明できた。また、カラー空間で輝度値である Y のみでも同様の結果が得られたため、カラー画像は Y 成分のみで評価できることも証明した。今後は、WNMSE を求める際に用いる荷重を変更したり、色空間の荷重を変更することによりさらにカラー画像の評価に適した評価法を提案できると考えられる。また今回はボケの劣化に対してのみ処理をしたが、ノイズやその他の劣化に対する処理は今後の課題としたい。

7 参考文献

1. Z.Gao and Y.F.Zheng “Quality Constrained Compression Using DWT-Based Image Quality Metric”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.18, No.7 ,pp.910 – 922, July, 2008.
2. S.Grgic, M.Grgic and B.Zovko-cihlar: “Performance Analysis of Image Compression Using Wavelet”, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol.48, No.3, pp.682 – 695, June, 2001.
3. 内川恵二:視覚心理入門, オーム社, 2010