

Wavelet 変換に基づく
画質劣化評価手法

2019年3月

佐賀大学大学院工学系研究科
システム創成科学専攻

大村 肇

目次

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 第 1 章 | はじめに | 1 |
| 1.1 | 研究の背景 | 1 |
| 1.2 | 研究目的と研究方法 | 3 |
| 1.3 | 論文の構成 | 4 |
| 第 2 章 | Wavelet 変換 | 5 |
| 2.1 | 連続 Wavelet 変換 | 5 |
| 2.2 | 離散 Wavelet 変換 | 5 |
| 2.3 | Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 | 7 |
| 2.3.1 | 1次元 Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 | 7 |
| 2.3.2 | 2次元 Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 | 8 |
| 第 3 章 | カラー画像のための画質劣化評価指標 | 13 |
| 3.1 | 画質劣化評価指標 | 13 |
| 3.1.1 | コントラスト | 13 |
| 3.1.2 | 鮮鋭度 | 13 |
| 3.1.3 | 粒状性 | 14 |
| 3.1.4 | ノルム誤差評価 | 14 |
| 3.2 | 実験 | 15 |
| 3.2.1 | 予備実験 | 16 |
| 3.2.2 | 実験結果 | 18 |
| 3.3 | まとめと次章への展開 | 23 |
| 第 4 章 | 提案した指標に基づく画質劣化評価法 | 24 |
| 4.1 | DT-CDWT に基づく画質劣化評価指標 | 24 |
| 4.1.1 | 鮮鋭度 | 24 |
| 4.1.2 | 粒状性 | 25 |
| 4.1.3 | ノルム誤差評価 | 25 |
| 4.2 | 画質劣化評価法について | 26 |
| 4.3 | 実験結果 | 27 |
| 4.4 | まとめと次章への展開 | 33 |
| 第 5 章 | 電子透かし入り画像のための画質劣化評価法 | 34 |
| 5.1 | 電子透かし入り画像のための画質劣化評価指標 | 34 |
| 5.1.1 | BGM (Bit-plane Geometric Mean) | 34 |
| 5.1.2 | FGM (Frequency Geometric Mean) | 36 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.1.3 | SGM (Sharpness Geometric Mean) | 36 |
| 5.2 | 電子透かし入り画像のための画質劣化評価法について | 36 |
| 5.2.1 | 画質劣化評価指標の基準 | 36 |
| 5.2.2 | 画質劣化評価法のアルゴリズム | 40 |
| 5.3 | 実験結果 | 45 |
| 5.4 | まとめと今後の課題 | 53 |
| 第6章 | まとめ | 54 |
| 6.1 | 結論 | 54 |
| 6.2 | 今後の課題 | 55 |
| | 参考文献 | 57 |

第1章 はじめに

本論文は，主に筆者らの研究業績 [7, 8, 10] に基づき，数値実験を追加するとともに，これらの内容を体系的にまとめたものである。

1.1 研究の背景

近年，デジタルカメラなどのデジタル映像機器による画像や動画のデジタル化とコンピュータの処理能力の向上に伴って，電子透かしの埋め込みや圧縮などの画像処理が容易に行えるようになった。これらの画像処理により，デジタル画像（画像や動画）の情報量（データ量）の削減や著作権の主張ができるようになる。しかしながら，一般的に，画像処理を適用することは，画質の劣化を引き起こす原因となるため，画質劣化がどの程度抑えられるかを評価することが求められる。画質を評価する方法は，主観評価法と客観評価法の2つに大別される。主観評価法は，評価対象の画像を人間が評価する方法であり，人間自身の感覚に基づいた評価結果が得られる。しかしながら，この方法は，10人以上の評価者を集めることや評価実験における環境の準備等，多くの時間と労力が必要とされる。一方，客観評価法は，コンピュータを用いて画質劣化を定量的に測り，主観評価と合うような評価を行う。客観評価法には，FR（Full Reference）型，NR（No Reference）型，RR（Reduced Reference）型の3種類のフレームワークが存在する。評価画像の画質を評価する際には，図1.1のように，各フレームワークにおいて，FR型は，原画像と評価画像を必要とし，NR型は，評価画像のみを必要とし，RR型は，原画像から抽出された特徴量と評価画像を必要とする。なお，本論文では，FR型の客観評価法を対象としているため，これ以降，画質劣化評価法といえば，FR型のフレームワークを意味するものとする。

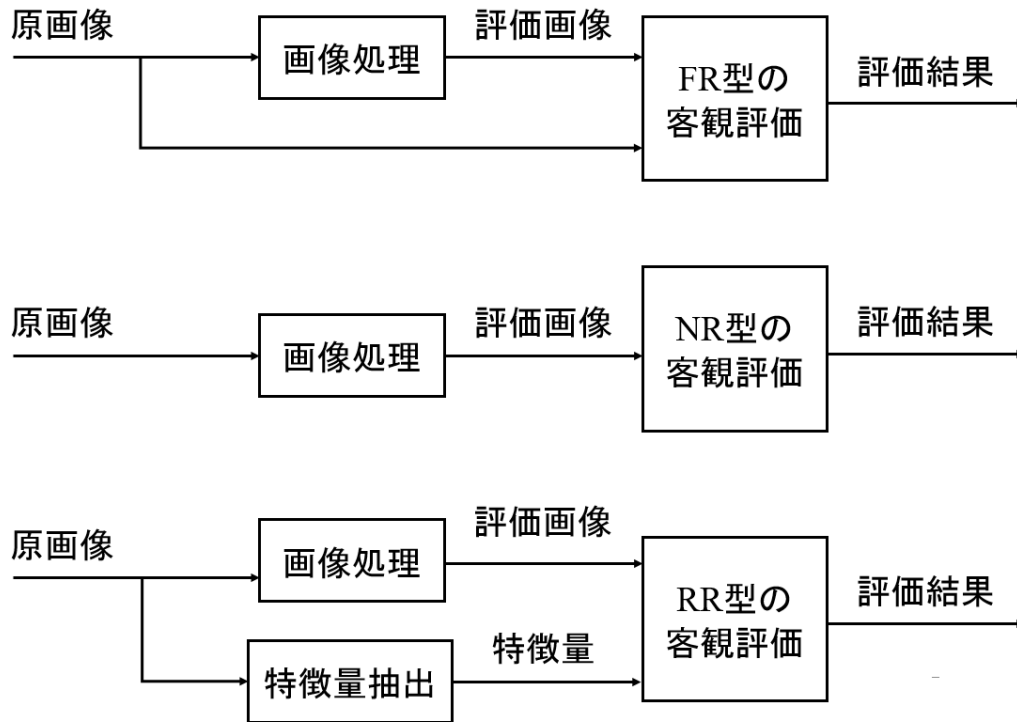


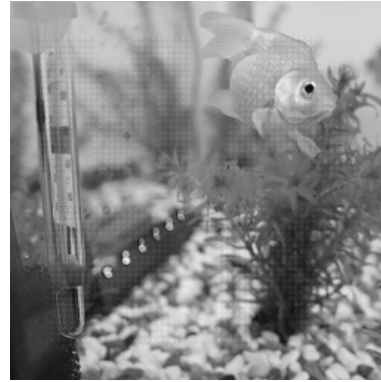
図 1.1: 客観評価法における3種類(上から, FR型, NR型, RR型)のフレームワーク

既存の客観的な画質劣化評価法として, PSNR (Peak signal to noise ratio) や SSIM (Structural similarity) [13] が広く使われている。PSNR は, 原画像と評価画像の最小二乗誤差に基づいた画質評価法であり, 一般に PSNR の値が 30.0 以上であれば, 評価画像が非劣化と評価される。しかし, 場合によっては, PSNR による評価と人間の視覚による評価が合わないことがある。PSNR よりも優れた画質評価法として, SSIM が開発された。SSIM は, 原画像と評価画像における「輝度」, 「コントラスト」, 「構造」の特徴量を抽出して, 総合的に画質の劣化を評価する。一般的に, SSIM の評価は, PSNR よりも主観評価に近い。また, SSIM の値が 0.90 以上であれば, 評価画像が非劣化と評価される。さらに, PSNR や SSIM 以外にも MS-SSIM (Multi-scale structural similarity) [14] や FSIM (Feature similarity) [15] などの画質劣化評価法も存在する。これまでに紹介した画質劣化評価法は, 空間領域のみの情報を用いて評価しているが, 周波数領域の情報を用いて評価している方法も存在する。例えば, 複素 Wavelet を用いて SSIM を拡張した CW-SSIM (Complex wavelet structural similarity) [16] や Haar Wavelet 変換を用いた HaarPSI (Haar wavelet based perceptual similarity index) [17] である。しかしながら, 図 1.2 のように, 人間には, 見づらく画質が劣化していると判断されるような 2 枚の画像に関して, 既存の画質劣化評価法における結果 (MSSIM, FSIM, CW-SSIM, HaarPSI の数値が, SSIM と同様に, 0.9 以上であれば, 評価画像は非劣化と評価される。) では, 主観評価と合うような評価が行えていないことが分かる。したがって, 画質劣化を定量的に測り, 主観評価と合うような画質劣化評価法が必要とされる。



ぼかし画像

(PSNR = 33.97, SSIM = 0.93,
MSSIM = 0.97, FSIM = 0.95,
CW-SSIM = 0.47, HaarPSI=
0.70)



電子透かし入り画像

(PSNR = 31.00, SSIM = 0.96,
MSSIM = 0.98, FSIM = 0.97,
CW-SSIM = 0.80, HaarPSI=
0.90)

図 1.2: 主観評価と既存の画質評価が合わない劣化画像の例

例えば、電子透かしには、空間領域を変換して行う方法 [22] や、最近では、周波数変換を用いた電子透かし法 [12, 21] などが存在している。それにもかかわらず、既存の画質評価法は、空間領域、または、周波数領域における特徴量のみを利用して評価するため、どちらかに関する情報だけに偏った評価となる。したがって、画像処理が施された画像に対して、主観評価と合うように画質劣化を評価するためには、空間領域と周波数領域の両方に関する情報を用いることが望ましい。

1.2 研究目的と研究方法

本研究の目的は、主観評価と合うような画質劣化評価法を提案することである。この目的を達成するために、Wavelet 変換を用いて、周波数領域における画質を評価するための指標を定義し、それらに基づいた画質劣化評価法を開発する。

離散 Wavelet 変換 (DWT) サブバンドは、人間の視覚特性に似ており、DWT によって得られる周波数成分は、人間の知覚に重要な情報を与える。この性質を利用して、DWT に基づいた画質評価法 [17, 18, 19] が提案されているが、我々が知る限りでは、連続 Wavelet 変換 (CWT) [20] や Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 (DT-CDWT) のような冗長な Wavelet 変換に基づいた画質評価法の研究例は少ない。しがしながら、CWT は、時間とスケールにおいて冗長な情報を提供するため、画質劣化の特徴を抽出することが効果的であると期待できる。実際、CWT は特徴抽出やエッジ検出、そして、パターン認識などに広く使用されている。また、DT-CDWT は、CWT よりも解析に利用する Wavelet の波形が長いため、より多くの情報で評価でき、計算量が少ないというメリットがある。

医用画像解析では、主に「コントラスト」、「鮮鋭度」、「粒状性」の 3 つの指標を用いて、X 線画像の画質を評価している [2]。医用目的のために使用されるデジタル画像

は，できるだけ品質の劣化を避けなければならない，これらの3つの指標は，画質を評価するために使用される．この点に着目し，医用画像で用いられている指標をデジタル画像の画質評価に使えるのではないかと考えた．

したがって，医用画像の画質評価で用いられている指標を周波数領域において利用できるように修正し，これらの指標に基づいて主観評価と合うような画質劣化評価法を開発した．

1.3 論文の構成

本論文の構成について説明する．まず第2章では，前処理として使用したCWT，DWT，そして，DT-CDWTについて説明する．第3章では，カラー画像のための画質劣化を評価する指標について述べる．続いて，第4章では，第3章で提案した指標に基づいた画質劣化評価法について説明する．そして，第5章では，電子透かし入り画像に特化した画質劣化評価法について述べる．最後に，第6章では，本研究の結論と今後の課題についてまとめる．

第2章 Wavelet 変換

第2章では、本論文で扱う連続 Wavelet 変換 (CWT) [20], 離散 Wavelet 変換 (DWT), そして, Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 (DT-CDWT) について, 簡単に説明する (文献 [11]).

2.1 連続 Wavelet 変換

CWT は, Mother Wavelet (MW) と呼ばれる関数 $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ を拡大・縮小, および, 平行移動させた関数と対象となる信号との内積を計算することによって, 信号を分解する手法である. ψ は, 式 (2.1) を満たす.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

ψ を拡大・縮小, および, 平行移動させることによって得られた関数を MV と区別するために, Wavelet 関数と呼ぶことにして, 次の式のように定義する.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.2)$$

ここで, $a \in \mathbb{R}^+$ は, 拡大・縮小のパラメータであり, $b \in \mathbb{R}$ は平行移動のパラメータである. 解析対象となる信号 $f \in L^2(\mathbb{R})$ に対する 1次元 CWT は, 以下のようになる.

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (2.3)$$

ここで, $Wf(a,b)$ は Wavelet 係数であり, $\psi_{a,b}^*(t)$ は, $\psi_{a,b}(t)$ の複素共役である. 本論文では, MW として Mexican hat wavelet を用いている.

また, 信号 $f \in L^2(\mathbb{R}^2)$ の 2次元 CWT は, 次式によって定義される.

$$Wf(s,u,v) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) \psi^*\left(\frac{x-u}{s}, \frac{y-v}{s}\right) dx dy \quad (2.4)$$

ここで, $Wf(s,u,v)$ は Wavelet 係数であり, $s \in \mathbb{R}^+$ は, 拡大・縮小のパラメータであり, $u, v \in \mathbb{R}$ は平行移動のパラメータである.

2.2 離散 Wavelet 変換

この節では, 離散 Wavelet 変換 (DWT) について説明する.

信号 x の DWT は、1組のフィルタを用いたフィルタリング処理を適用することによって計算される。このフィルタは、インパルス応答が g であるローパスフィルタと h であるハイパスフィルタである。連続信号 x を離散化した近似信号 c^j に対する、ダウンサンプリング型の1次元 DWT は、以下のような式で定義される。

$$c_k^{j-1} = \sum_{n \in F} a_{2k-n} c_n^j$$

$$d_k^{j-1} = \sum_{n \in F} b_{2k-n} c_n^j$$

ここで、 $\{a_k\}$ と $\{b_k\}$ は、それぞれ、ローパスフィルタとハイパスフィルタであり、 j は分解レベルを示している。また、 c_k^{j-1} は低周波成分、 d_k^{j-1} は高周波成分である。図 2.1 は、1次元 DWT の分解に関するフローチャートである。

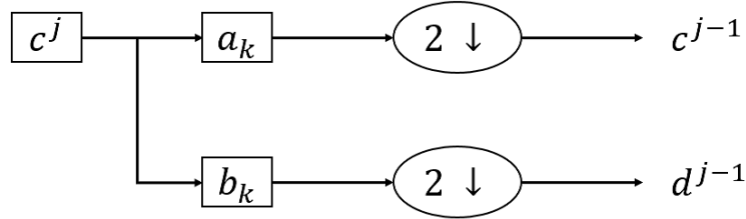


図 2.1: 1次元 DWT の分解

2次元データを I とする。2次元データに対するサポート長が $2M$ のダウンサンプリング型の Wavelet 分解は、次の式によって与えられる。

$$LL(i, j) = \sum_{m=0}^{2M-1} \sum_{n=0}^{2N-1} p_m p_n I(m + 2i, n + 2j),$$

$$LH(i, j) = \sum_{m=0}^{2M-1} \sum_{n=0}^{2N-1} p_m q_n I(m + 2i, n + 2j),$$

$$HL(i, j) = \sum_{m=0}^{2M-1} \sum_{n=0}^{2N-1} q_m p_n I(m + 2i, n + 2j),$$

$$HH(i, j) = \sum_{m=0}^{2M-1} \sum_{n=0}^{2N-1} q_m q_n I(m + 2i, n + 2j). \quad (2.5)$$

ここで、 i と j は、それぞれ、水平方向と垂直方向の位置である。 p_n と q_n は、それぞれ、ローパスフィルタ係数とハイパスフィルタ係数であり、これらは実パラメータであり、次のような関係が成り立つ。

$$q_n = (-1)^n p_{2M-1-n} \quad (2.6)$$

また、 LL は低周波成分、 LH は垂直方向の高周波成分、 HL は水平方向の高周波成分、 HH は斜め方向の高周波成分である。画像に対して、離散 Wavelet 分解を適用した場

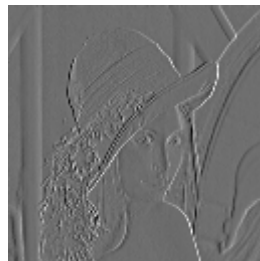
合、低周波成分は、原画像の近似情報であり、高周波成分は、原画像の輪郭や模様となる近似誤差である。本論文では、 $M = 1$ の Haar Wavelet を使用した。図 2.2 は、Lenna 画像に対して、2次元 Haar Wavelet 分解を適用して得られた各周波数成分である。各周波数成分のサイズは、式 (2.5) より、原画像のサイズの $1/4$ であることが分かる。



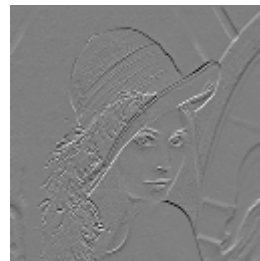
原画像 I



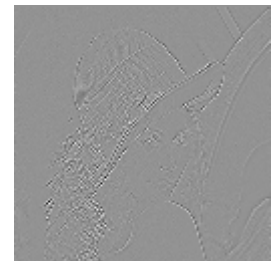
低周波成分 LL



高周波成分 LH



高周波成分 HL



高周波成分 HH

図 2.2: 原画像 I と離散 Wavelet 分解を適用して得られた 4 種類の周波数成分 LL , LH , HL , HH

2.3 Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換

この節では、本論文で扱う Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換 (DT-CDWT) について、説明する (文献 [11]) .

2.3.1 1次元 Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換

ここでは、1次元 DT-CDWT について説明する。まず、 $k \in \mathbb{Z}$ であり、実部のスケールリング関数 $\varphi^R(t - k)$ と虚部のスケールリング関数 $\varphi^I(t - k)$ をもつ 1次元の入力離散信

号 $\{f_l\}$ について説明する.

$$f(t) = \sum_k \{c_{0,k}^R \phi^R(t-k) + c_{0,k}^I \phi^I(t-k)\} \quad , \quad (2.7)$$

$$c_{0,k}^R = \frac{1}{2} \sum_l f_l \overline{\phi^R(l-k)}, \quad (2.8)$$

$$c_{0,k}^I = \frac{1}{2} \sum_l f_l \overline{\phi^I(l-k)}. \quad (2.9)$$

と表される. ここで, 関数 $f(t)$ は, 入力離散信号 $\{f_l\}$ を補間することを意味している, つまり, $n \in \mathbb{Z}$ であり, $f_n = f(n)$ であり, R と I は, それぞれ, "実部" と "虚部" を意味する. また, $\overline{\varphi(t)}$ は, $\varphi(t)$ の共役複素であり, \mathbb{Z} は, 整数の集合である. 次に, DT-CDWT は, 次の分解アルゴリズムを用いて計算される.

$$c_{j-1,n}^R = \sum_k a_{2n-k}^R c_{j,k}^R, \quad (2.10)$$

$$d_{j-1,n}^R = \sum_k b_{2n-k}^R c_{j,k}^R, \quad j = 0, -1, -2, \dots, \quad (2.11)$$

$$c_{j-1,n}^I = \sum_k a_{2n-k}^I c_{j,k}^I, \quad (2.12)$$

$$d_{j-1,n}^I = \sum_k b_{2n-k}^I c_{j,k}^I, \quad (2.13)$$

ここで, $\{a_n^R\}$ と $\{b_n^R\}$ は, 実部分解列を表し, $\{a_n^I\}$ と $\{b_n^I\}$ は, 虚部分解列を表す. $\{a_n^R\}$ と $\{a_n^I\}$ は, ローパスフィルタとしての役割を担い, $\{b_n^R\}$ と $\{b_n^I\}$ は, ハイパスフィルタとしての役割を担う. つまり, 1次元 DT-CDWT を適用することによって, 得られた分解列 $c_{j-1,n}^R$ と $c_{j-1,n}^I$ は, それぞれ, 実部スケーリング係数 (実部低周波成分) と虚部スケーリング係数 (虚部低周波成分) である. また, 分解列 $d_{j-1,n}^R$ と $d_{j-1,n}^I$ は, それぞれ, 実部 Wavelet 係数 (実部高周波成分) と虚部 Wavelet 係数 (虚部高周波成分) である. 入力離散信号のサイズを N とすると, これらの分解列のサイズは, $N/2$ となる.

2.3.2 2次元 Dual-Tree Complex Discrete Wavelet 変換

ここでは, 2次元 DT-CDWT について説明する. 2次元データの場合, 垂直方向と水平方向に対して, 式 (2.10) ~ (2.13) の1次元 DT-CDWT を適用する. DT-CDWT は, 実部と虚部から構成される2重ツリー構造であるため, 例えば, 2次元データの垂直方向に式 (2.12), 水平方向に式 (2.11) を適用することによって, 虚部 \times 実部 (RI) に関する垂直方向の高周波成分が得られることとなる. つまり, 2次元データに対して, 1次元 DT-CDWT を適用することによって, 16種類の周波数成分が得られて, それらは, 4種類の低周波成分 $C^{RR}, C^{RI}, C^{IR}, C^{II}$ と4種類の垂直方向における高周波成分 $D^{RR}, D^{RI}, D^{IR}, D^{II}$, 4種類の水平方向における高周波成分 $E^{RR}, E^{RI}, E^{IR}, E^{II}$, 4種類の斜め方向における高周波成分 $F^{RR}, F^{RI}, F^{IR}, F^{II}$ である. ここで, 前節と同様に, 実部を R , 虚部を I とすると, RR, RI, IR, II は, それぞれ, 実部 \times

実部, 実部 × 虚部, 虚部 × 実部, 虚部 × 虚部の組み合わせを示している. また, 低周波成分 (スケーリング係数) を L , 高周波成分 (Wavelet 係数) を H とする.

例えば, D^{IR} について簡単に説明する, ここで, $C_0[N_1, N_2]$ を 2次元入力離散信号, N_1 と N_2 は, それぞれ, 水平方向と垂直方向における画像サイズである. また, j はレベル, m, n は, それぞれ, 水平方向と垂直方向の要素の位置である. まず, 原画像 $C_0[m, n]$ に対して, 垂直方向に虚部に関する補間をする補間式 (2.9) を適用すると,

$$C_{j_1, j_2}^I[p, n] = \frac{1}{2} \sum_p C_{j_1, j_2}[m, n] \overline{\phi^I(m-p)} \quad (2.14)$$

が得られる. 続いて, 垂直方向に虚部に関する分解をする分解式 (2.12) を適用すると,

$$C_{j_1-1, j_2}^{IL}[m, n] = \sum_p a_{2m-p}^I C_{j_1, j_2}^I[p, n] \quad (2.15)$$

が得られる. また, 水平方向に実部に関する補間式 (2.8) を適用すると,

$$C_{j_1-1, j_2}^{IL,R}[m, q] = \frac{1}{2} \sum_q C_{j_1-1, j_2}^{IL}[m, n] \overline{\phi^R(n-q)} \quad (2.16)$$

が得られる. 最後に, 水平方向に実部に関する分解式 (2.11) を適用すると,

$$C_{j_1-1, j_2-1}^{IL,RH}[m, n] = \sum_q b_{2n-q}^R C_{j_1-1, j_2}^{IL,R}[m, q] = D_{j-1}^{IR}[m, n] \quad (2.17)$$

が得られる. つまり, D^{IR} は, 次のように書き換えられて

$$\begin{aligned} D_{j-1}^{IR}[m, n] &= \sum_q b_{2n-q}^R \left[\frac{1}{2} \sum_q \overline{\phi^R(n-q)} \left\{ \sum_p a_{2m-p}^I \left(\frac{1}{2} \sum_p \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \right) \right\} \right] \\ &= \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} a_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q]. \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$(2.19)$$

となる.

同様に, 16 種類の周波数成分は, 以下のようになる.

- 実部 × 実部に関する低周波成分 C^{RR}

$$C_{j-1}^{RR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} a_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.20)$$

- 実部 × 実部に関する垂直方向の高周波成分 D^{RR}

$$D_{j-1}^{RR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} a_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.21)$$

- 実部 × 実部に関する水平方向の高周波成分 E^{RR}

$$E_{j-1}^{RR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} b_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.22)$$

- 実部 × 実部に関する斜め方向の高周波成分 F^{RR}

$$F_{j-1}^{RR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} b_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.23)$$

- 実部 × 虚部に関する低周波成分 C^{RI}

$$C_{j-1}^{RI}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} a_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.24)$$

- 実部 × 虚部に関する垂直方向の高周波成分 D^{RI}

$$D_{j-1}^{RI}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^R \overline{\phi^R(n-q)} a_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.25)$$

- 実部 × 虚部に関する水平方向の高周波成分 E^{RI}

$$E_{j-1}^{RI}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^R \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.26)$$

- 実部 × 虚部に関する斜め方向の高周波成分 F^{RI}

$$F_{j-1}^{RI}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^R \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.27)$$

- 虚部 × 実部に関する低周波成分 C^{IR}

$$C_{j-1}^{IR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} a_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.28)$$

- 虚部 × 実部に関する垂直方向の高周波成分 D^{IR}

$$D_{j-1}^{IR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} a_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.29)$$

- 虚部 × 実部に関する水平方向の高周波成分 E^{IR}

$$E_{j-1}^{IR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.30)$$

- 虚部 × 実部に関する斜め方向の高周波成分 F^{IR}

$$F_{j-1}^{IR}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^R \overline{\phi^R(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.31)$$

- 虚部 × 虚部に関する低周波成分 C^{II}

$$C_{j-1}^{II}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} a_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.32)$$

- 虚部 × 虚部に関する垂直方向の高周波成分 D^{II}

$$D_{j-1}^{II}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} a_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.33)$$

- 虚部 × 虚部に関する水平方向の高周波成分 E^{II}

$$E_{j-1}^{II}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} a_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.34)$$

- 虚部 × 虚部に関する斜め方向の高周波成分 F^{II}

$$F_{j-1}^{II}[m, n] = \frac{1}{4} \sum_{p,q} b_{2n-q}^I \overline{\phi^I(n-q)} b_{2m-p}^I \overline{\phi^I(m-p)} C_j[p, q] \quad (2.35)$$

図 2.3(a) の Lenna 画像に対して、2 次元 DT-CDWT を適用して得られた周波数成分は、図 2.3(b)~図 2.3(q) となる。各周波数成分のサイズは、式 (2.20)~(2.35) より原画像のサイズの 1/4 であることが分かる。



(a) C_0 : 原画像



図 2.3: 原画像と DT-CDWT から得られた 16 種類の周波数成分 (分解後)

第3章 カラー画像のための画質劣化評価指標

本章では、カラー画像の画質劣化を測るための指標について説明する。[2]によれば、X線画像システムによって得られるデジタル画像の画質は、主に3つの要素（コントラスト、鮮鋭度、粒状性）によって決まる。医療目的で使用されるデジタル画像は、高画質でなければならない。これら3つの要素は、画質を評価するために使用される。Wavelet変換を適用して得られた周波数領域に関して、これらの要素を使用し、デジタル画像の画質を評価する。また、周波数領域に関する指標の有用性を確かめるために、空間領域に関する指標の結果と比較した。以下の指標の説明において、カラー画像を F 、グレースケール画像を F' とする。また、これ以降、カラー画像は、RGB色空間で構成されているとする。

3.1 画質劣化評価指標

3.1.1 コントラスト

カラー画像は、次式によって、輝度成分 (Y) に変換される。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (3.1)$$

ここで、 R , G , B は、それぞれ、赤成分、緑成分、青成分を表す。

コントラスト $C(F)$ は、以下によって定義される。

$$C(F) = \frac{1}{\mu(F_Y)} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{F_Y(i) - \mu(F_Y)\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

ここで、 F_Y は、 F の輝度値であり、 $\mu(F_Y)$ は、 F_Y の平均値である [3]。 $C(F)$ は、平均値を用いた標準偏差を正規化した値である。

3.1.2 鮮鋭度

Wavelet変換によって得られた高周波成分はエッジの特徴を含んでおり、各周波数成分において、絶対値が大きいほどエッジがより鮮明になることが期待される。ここで、エッジとは、画像中のピクセル値が急激に変化している部分であり、輪郭などを表現している。したがって、高周波成分における非0要素の個数は、画像の鮮鋭度を測定

するために重要である。また、空間領域に関する鮮鋭度は、ラプラシアンフィルタを適用することによって得られた成分に対して評価を行う。

まず、DWTに基づいた鮮鋭度 $S_{DWT}(F)$ を次のように定義する。

$$S_{DWT}(F) = \frac{\#_{DWT}(R) + \#_{DWT}(G) + \#_{DWT}(B)}{T_{DWT}} \quad (3.3)$$

ここで、 $\#_{DWT}(R)$, $\#_{DWT}(G)$, $\#_{DWT}(B)$ は、それぞれ、R成分、G成分、B成分における高周波成分の非ゼロ要素の総数であり、 T_{DWT} は、R成分、G成分、B成分の各高周波成分におけるピクセルの総数である。CWTに基づく鮮鋭度 $S_{CWT}(F)$ とラプラシアンフィルタに基づく鮮鋭度 $S_L(F)$ も $S_{CWT}(F)$ と同様に定義され、それぞれ、式(3.4)と式(3.5)となる。

$$S_{CWT}(F) = \frac{\#_{CWT}(R) + \#_{CWT}(G) + \#_{CWT}(B)}{T_{CWT}} \quad (3.4)$$

ここで、 $\#_{CWT}(R)$, $\#_{CWT}(G)$, $\#_{CWT}(B)$ は、それぞれ、R成分、G成分、B成分における高周波成分のピクセル値が20以上である個数であり、 T_{CWT} は、R成分、G成分、B成分の各高周波成分におけるピクセルの総数である。

$$S_L(F) = \frac{\#_L(R) + \#_L(G) + \#_L(B)}{T_L} \quad (3.5)$$

ここで、 $\#_L(R)$, $\#_L(G)$, $\#_L(B)$ と T_L は、式(3.4)と同じように扱う。

3.1.3 粒状性

粒状性は、画像内の粒度分布を推定するために使用される。画像の粒状性が高いほど、視覚的にざらつきを感じる。

グレースケール画像 F' の粒状性を計算するために、RMS (Root mean square) 粒状性を使用する。RMS 粒状性は、以下の式によって定義される。

$$G(F') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{F'(i) - \mu(F')\}^2}{N-1}} \quad (3.6)$$

カラー画像のRMS粒状性は、各色成分 R , G , B 成分に対して、式(3.6)を適用し、それらの結果を足し合わせて、3で割った。

3.1.4 ノルム誤差評価

原画像 I と評価画像 \tilde{I} 間の差を測るために、各小ブロックにおける2-ノルムと ∞ -ノルムを使用する。

簡単に説明するために、画像サイズが 256×256 のRGBカラー画像を用いると仮定する。 I と \tilde{I} を 16×16 のブロックに分割することによって、各色成分において、大き

さが 16×16 の 256 個のブロック $e_i (i = 1, 2, \dots, 256)$ を得る. 各小ブロックにおける ∞ -ノルムは, 次式のようにになる.

$$\|I - \tilde{I}\|_{e_i(k), \infty} = \max_{1 \leq m, n \leq 16} |I(m, n) - \tilde{I}(m, n)|_{e_i(k)} \quad (3.7)$$

ここで, $k = 1, 2, 3$ は, それぞれ, R 成分, G 成分, B 成分に対応する. それから, 次式によって各成分に関する ∞ -ノルムを定義する.

$$\|I - \tilde{I}\|_{k, \infty} = \left(\sum_{i=1}^{256} \|I - \tilde{I}\|_{e_i(k), \infty} \right) / 256 \quad (3.8)$$

そして, カラー画像の ∞ -ノルムは, 次式のように定義する.

$$\|I - \tilde{I}\|_{\infty} = \left(\sum_{k=1}^3 \|I - \tilde{I}\|_{k, \infty} \right) / 3 \quad (3.9)$$

2-ノルム $\|I - \tilde{I}\|_2$ は, ∞ -ノルムと同様に定義される.

3.2 実験

この節では, 予備実験と実験結果について記載する. 予備実験では, 前節で提案した各指標の有用性を確かめるために使用した主観評価とその結果について説明する. 実験結果では, 数枚の実験画像に関する各指標の値を示す. 予備実験と実験では, 25 枚の画像を使用した. それらの画像は, 図 3.1 にある画像サイズが 256×256 の 24 ビットカラー画像である.

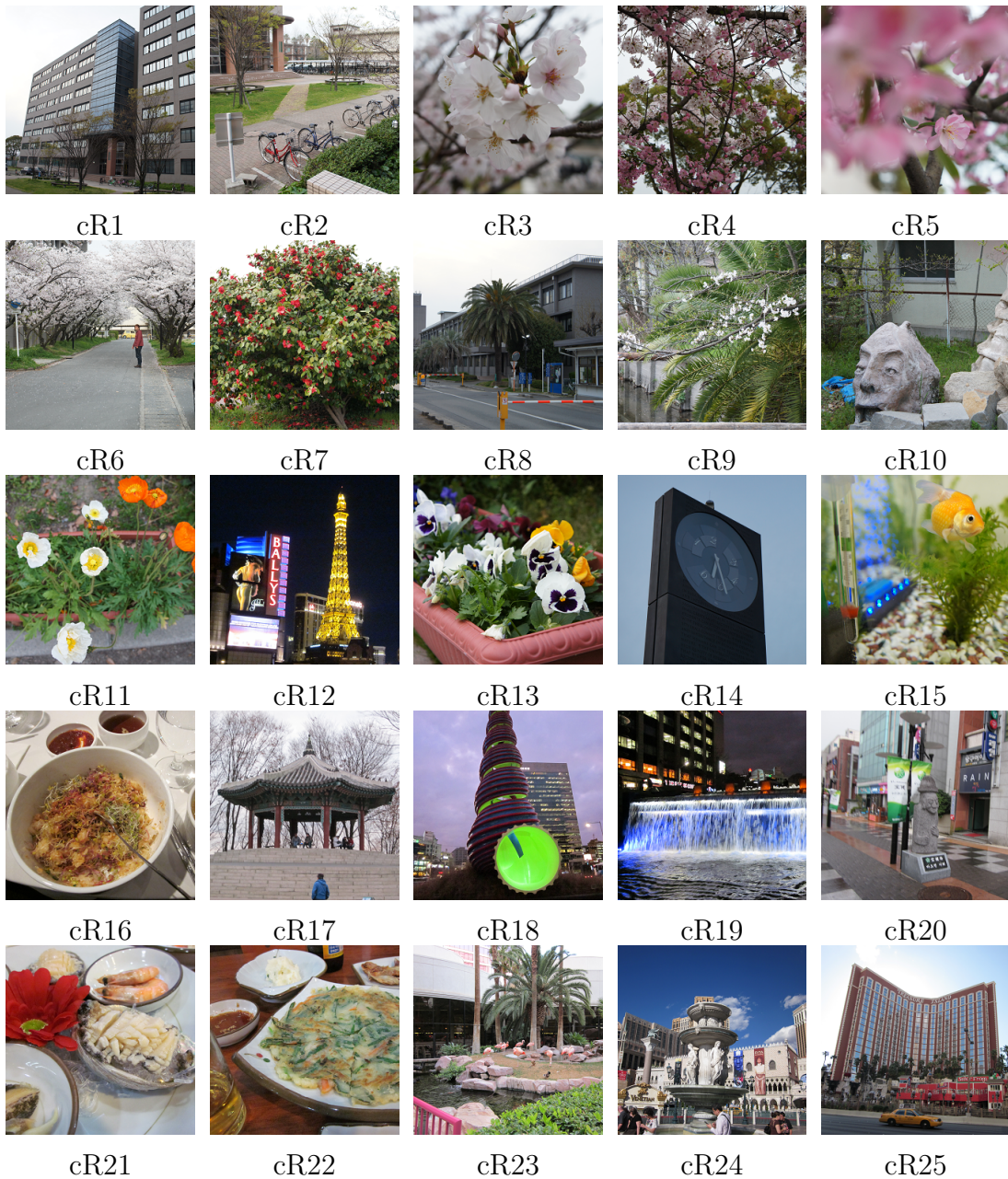


図 3.1: 予備実験と実験で使した原画像

3.2.1 予備実験

予備実験では、主観評価として DMOS (Degradation Mean Opinion Score) [1] を採用した DMOS を採用するために、実験の原画像 25 枚に対して、図 3.2 で示すように、ぼかし処理、コントラスト強調、エッジ強調、色反転、ごま塩ノイズの付加の 5 種類の画像処理を適用して、125 枚の実験画像を生成した。



図 3.2: 原画像とそれに対して画像処理を適用し得られた画像

DMOS では、観察者は、表 3.1 にある評価表を用いて、各予備実験画像を評価した。

表 3.1: DMOS の評価表

| score | 評語 |
|-------|-----------------|
| 5 | 劣化が全く認められない |
| 4 | 劣化が認められるが気にならない |
| 3 | 劣化がわずかに気になる |
| 2 | 劣化が気になる |
| 1 | 劣化が非常に気になる |

この予備実験では、特に視覚に異常のない 18 歳から 22 歳の男性 15 人に対して行った [8].

表 3.2 は、各画像処理に関する DMOS 値の平均を示している。表 3.2 において、DMOS 値の平均が 3 未満の数値を黒い太文字で表示している。この表より、コントラスト強調とエッジ強調は、比較的に許容できる劣化であることが分かり、一方、ぼかし処理、色反転、ごま塩ノイズの付加は、許容できない劣化であることが分かる。

表 3.2: DMOS の評価表

| | DMOS 値の平均 |
|----------|-------------|
| ぼかし処理 | 2.13 |
| コントラスト強調 | 1.67 |
| エッジ強調 | 3.47 |
| 色反転 | 2.13 |
| ごま塩ノイズ | 4.73 |

3.2.2 実験結果

本論文では、図 3.1 から 4 枚の画像に関する実験結果を示す。それらの画像は、図 3.3 ~ 3.6 である。予備実験における主観評価結果より、ぼかし処理、色反転、ごま塩ノイズの付加が許容できない劣化であったため、これらの画像処理に関する指標の値が強調される必要がある。



図 3.3: 実験画像 cR1 に対して、各画像処理を適用して得られた画像



図 3.4: 実験画像 cR5 に対して、各画像処理を適用して得られた画像



図 3.5: 実験画像 cR12 に対して、各画像処理を適用して得られた画像



図 3.6: 実験画像 cR14 に対して，各画像処理を適用して得られた画像

表 3.3 ~ 3.6 は，それぞれ，図 3.3 ~ 3.6 に関する CWT に基づいた各指標の値を表示している．これらの表において，実験で用いた各画像処理に関する各指標の値が著しく高い，もしくは低い値を黒い太文字で表示している．

表 3.3: 図 3.3 に関する CWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------------|---------------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.580 | 103.406 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.376 | 59.481 | 0.101 | 287.594 |
| コントラスト強調 | 0.588 | 129.002 | 0.041 | 146.084 |
| エッジ強調 | 0.627 | 134.996 | 0.028 | 108.805 |
| 色反転 | 0.580 | 103.406 | 0.226 | 576.888 |
| ごま塩ノイズ | 0.743 | 128.420 | 0.050 | 460.659 |

表 3.4: 図 3.4 に関する CWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------------|---------------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.228 | 33.919 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.175 | 28.116 | 0.022 | 58.768 |
| コントラスト強調 | 0.280 | 51.576 | 0.030 | 74.379 |
| エッジ強調 | 0.261 | 41.156 | 0.009 | 28.076 |
| 色反転 | 0.228 | 33.919 | 0.118 | 184.019 |
| ごま塩ノイズ | 0.608 | 82.180 | 0.046 | 382.093 |

表 3.5: 図 3.5 に関する CWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------------|---------------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.369 | 86.577 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.262 | 48.151 | 0.067 | 205.073 |
| コントラスト強調 | 0.312 | 96.532 | 0.037 | 113.818 |
| エッジ強調 | 0.411 | 107.793 | 0.026 | 76.162 |
| 色反転 | 0.369 | 86.577 | 0.176 | 449.297 |
| ごま塩ノイズ | 0.650 | 120.939 | 0.054 | 490.915 |

表 3.6: 図 3.6 に関する CWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------------|---------------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.154 | 39.101 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.113 | 34.066 | 0.025 | 53.398 |
| コントラスト強調 | 0.142 | 52.886 | 0.030 | 53.736 |
| エッジ強調 | 0.175 | 50.365 | 0.018 | 33.169 |
| 色反転 | 0.154 | 39.101 | 0.136 | 165.003 |
| ごま塩ノイズ | 0.570 | 89.354 | 0.050 | 423.186 |

表 3.3 ~ 3.6 より、ぼかし処理に関して、鮮鋭度と粒状性の値が他の画像処理の値と異なるため、鮮鋭度と粒状性は、ぼかし処理に関する劣化を評価するために有用である。さらに、色反転に関して、2-ノルムと ∞ -ノルムの値が他の値と異なり、ごま塩ノイズに関して、鮮鋭度と ∞ -ノルムの値が他の値と異なることが分かる。したがって、色反転の劣化を評価するために、2-ノルムと ∞ -ノルムが有用であり、ごま塩ノイズの劣化を評価するために、鮮鋭度と ∞ -ノルムが有用である。つまり、CWT に基づく指標は、ぼかし処理、色反転、ごま塩ノイズの付加の劣化を評価するために、有用であることが分かる。

表 3.7 ~ 3.10 は、それぞれ、図 3.3 ~ 3.6 に関する DWT に基づいた各指標の値を表示している。これらの表において、実験で用いた各画像処理に関する各指標の値が著しく高い、もしくは低い値を黒い太文字で表示している。

表 3.7: 図 3.3 に関する DWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|-------|---------------|-------|----------------|
| 原画像 | 0.861 | 24.214 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.657 | 9.918 | 0.050 | 66.323 |
| コントラスト強調 | 0.593 | 31.818 | 0.025 | 42.107 |
| エッジ強調 | 0.875 | 35.521 | 0.022 | 35.057 |
| 色反転 | 0.860 | 24.214 | 0.104 | 138.222 |
| ごま塩ノイズ | 0.880 | 40.743 | 0.047 | 122.847 |

表 3.8: 図 3.4 に関する DWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|-------|---------------|-------|----------------|
| 原画像 | 0.907 | 5.881 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.770 | 4.745 | 0.010 | 10.083 |
| コントラスト強調 | 0.453 | 9.263 | 0.011 | 13.377 |
| エッジ強調 | 0.937 | 7.758 | 0.006 | 6.506 |
| 色反転 | 0.906 | 5.881 | 0.030 | 29.678 |
| ごま塩ノイズ | 0.924 | 30.729 | 0.042 | 105.439 |

表 3.9: 図 3.5 に関する DWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|-------|---------------|-------|----------------|
| 原画像 | 0.944 | 18.680 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.668 | 9.220 | 0.040 | 41.302 |
| コントラスト強調 | 0.240 | 21.171 | 0.024 | 30.031 |
| エッジ強調 | 0.959 | 25.288 | 0.018 | 22.474 |
| 色反転 | 0.943 | 18.680 | 0.090 | 96.227 |
| ごま塩ノイズ | 0.953 | 39.971 | 0.049 | 128.239 |

表 3.10: 図 3.6 に関する DWT に基づく各指標の値

| | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|-------|---------------|-------|----------------|
| 原画像 | 0.851 | 7.080 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.395 | 5.777 | 0.012 | 10.615 |
| コントラスト強調 | 0.421 | 9.758 | 0.010 | 11.959 |
| エッジ強調 | 0.890 | 10.264 | 0.009 | 9.081 |
| 色反転 | 0.850 | 7.080 | 0.036 | 31.890 |
| ごま塩ノイズ | 0.878 | 33.172 | 0.046 | 112.366 |

表 3.7 ~ 3.10 より、ぼかし処理に関して、粒状性の値が他の画像処理の値と異なるため、粒状性は、ぼかし処理に関する劣化を評価するために有用である。さらに、ごま塩ノイズに関して、粒状性と ∞ -ノルムの値が他の値と異なることが分かる。したがって、ごま塩ノイズの劣化を評価するために、粒状性と ∞ -ノルムが有用である。DWT に基づく指標は、ぼかし処理、ごま塩ノイズの付加の劣化を評価するために、有用であることが分かる。しかしながら、色反転に関する劣化の評価では、使えないため、CWT に基づく指標の方が有用であることが分かる。

表 3.11 ~ 3.14 は、それぞれ、図 3.3 ~ 3.6 に関する空間領域における各指標の値を表示している。これらの表において、実験で用いた各画像処理に関する各指標の値が著しく高い、もしくは低い値を黒い太文字で表示している。

表 3.11: 図 3.3 に関する空間領域における各指標の値

| | コントラスト | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------|-------|--------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.601 | 0.925 | 79.103 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.567 | 0.843 | 75.789 | 0.030 | 94.340 |
| コントラスト強調 | 0.575 | 0.683 | 82.597 | 0.081 | 57.859 |
| エッジ強調 | 0.636 | 0.926 | 83.864 | 0.009 | 40.405 |
| 色反転 | 0.628 | 0.924 | 79.103 | 0.441 | 236.005 |
| ごま塩ノイズ | 0.595 | 0.942 | 82.145 | 0.018 | 223.176 |

表 3.12: 図 3.4 に関する空間領域における各指標の値

| | コントラスト | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------|-------|--------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.305 | 0.960 | 43.244 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.300 | 0.916 | 42.629 | 0.008 | 19.486 |
| コントラスト強調 | 0.319 | 0.624 | 59.918 | 0.168 | 68.094 |
| エッジ強調 | 0.311 | 0.973 | 44.091 | 0.002 | 9.198 |
| 色反転 | 0.334 | 0.960 | 43.244 | 0.225 | 132.188 |
| ごま塩ノイズ | 0.327 | 0.975 | 50.983 | 0.016 | 181.206 |

表 3.13: 図 3.5 に関する空間領域における各指標の値

| | コントラスト | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------|-------|--------|--------------|----------------|
| 原画像 | 1.144 | 0.976 | 69.709 | - | - |
| ぼかし処理 | 1.115 | 0.895 | 66.463 | 0.020 | 67.672 |
| コントラスト強調 | 1.063 | 0.321 | 72.672 | 0.039 | 44.255 |
| エッジ強調 | 1.201 | 0.986 | 71.684 | 0.008 | 28.467 |
| 色反転 | 0.347 | 0.976 | 69.709 | 0.629 | 239.641 |
| ごま塩ノイズ | 1.097 | 0.983 | 75.144 | 0.021 | 237.260 |

表 3.14: 図 3.6 に関する空間領域における各指標の値

| | コントラスト | 鮮鋭度 | 粒状性 | 2-ノルム | ∞ -ノルム |
|----------|--------|-------|--------|--------------|----------------|
| 原画像 | 0.596 | 0.955 | 63.076 | - | - |
| ぼかし処理 | 0.588 | 0.706 | 62.357 | 0.009 | 18.755 |
| コントラスト強調 | 0.712 | 0.408 | 92.309 | 0.137 | 45.504 |
| エッジ強調 | 0.603 | 0.967 | 63.884 | 0.004 | 12.904 |
| 色反転 | 0.406 | 0.955 | 63.076 | 0.475 | 157.203 |
| ごま塩ノイズ | 0.597 | 0.971 | 68.167 | 0.019 | 196.452 |

表 3.11 ~ 3.14 より，色反転に関して，2-ノルムと ∞ -ノルムの値が他の値と異なり，ごま塩ノイズに関して， ∞ -ノルムの値が他の値と異なることが分かる．したがって，色反転の劣化を評価するために，2-ノルムと ∞ -ノルムが有用であり，ごま塩ノイズの劣化を評価するために， ∞ -ノルムが有用である．空間領域における指標は，色反転とごま塩ノイズの付加の劣化を評価するために，有用であることが分かる．しかしながら，ぼかし処理に関する劣化の評価では，使えないため，CWT，もしくは，DWT に基づく指標の方が有用であることが分かる．

3.3 まとめと次章への展開

本章では，カラー画像のための画質劣化評価指標を開発した．これらの指標は，空間領域，もしくは，CWT か DWT で得られる周波数領域で評価を行う．実験結果より，空間領域における指標は，色反転とごま塩ノイズに関する劣化の評価では，有用であるが，ぼかし処理に関する劣化の評価では，使えないことが分かった．また，DWT に基づく指標は，ぼかし処理とごま塩ノイズに関する劣化の評価では，有用であるが，色反転に関する劣化の評価では，使えないことが分かった．CWT に基づく指標は，ぼかし処理，色反転，ごま塩ノイズに関する劣化の評価を行えることが期待できる．したがって，画質劣化を評価するためには，CWT で得られた周波数領域が重要である．しかしながら，CWT の問題点として，計算量が多いことが挙げられる．そのため，計算量を削減しつつ，CWT の性質を保つような Wavelet である DT-CDWT を用いる．

次章では，DT-CDWT に基づいた指標を定義し，それらに基づいた画質劣化評価法を開発する．また，簡単な問題にするために，グレースケール画像を対象とする．

第4章 提案した指標に基づく画質劣化評価法

この章では、第3章で提案した指標に基づく画質劣化評価法について説明する。ここでは、グレースケール画像を対象とする。第3章より、CWTに基づく指標が画質劣化を測るために、有用であることが分かった。しかしながら、CWTは、計算量が多いというデメリットがある。そこで、CWTよりも計算量が少なく、その性質をなるべく保てるようなWaveletであるDT-CDWTを用いた。これにより、画質評価の精度を保ったまま、計算時間を高速化にすることが期待できる。したがって、DT-CDWTと3.1節で定義した鮮鋭度、粒状性、2-ノルムと ∞ -ノルムを用いて、画質劣化評価法を提案した。

4.1 DT-CDWTに基づく画質劣化評価指標

この節では、DT-CDWTに基づいた鮮鋭度、粒状性、2-ノルムと ∞ -ノルムの順に説明する。

4.1.1 鮮鋭度

3.1節における鮮鋭度では、閾値を静的に決めていたが、ここでは、動的閾値を使用する。そこで、鮮鋭度を評価するために、DT-CDWTによって得られた12種類の各高周波成分 D^{rs} , E^{rs} , F^{rs} ($r = R, I$, $s = R, I$) に対して、次のような動的閾値を適用して二値画像を生成する。

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(i, j) > a(i, j) \\ 0 & \text{if } f(i, j) \leq a(i, j), \end{cases} \quad (4.1)$$

ここで、 f は入力画像、 g は出力画像であり、 a は画像の位置 (i, j) の近傍における局所平均値である。この二値画像における値1の比率を鮮鋭度とし、1の比率が高ければ高いほど、その画像は鮮鋭であることを意味する。

二値画像における非ゼロ要素の個数を用いて、DT-CDWTによって得られた高周波成分 D に関する鮮鋭度を以下のように定義する。

$$\#(D) = \frac{\#(D^{RR}) + \#(D^{RI}) + \#(D^{IR}) + \#(D^{II})}{4 \times T_{DT-CDWT}} \quad (4.2)$$

ここで、 $\#(D^{RR})$, $\#(D^{RI})$, $\#(D^{IR})$, $\#(D^{II})$ は、それぞれ、高周波成分 D^{RR} , D^{RI} , D^{IR} , D^{II} における二値画像の非ゼロ要素の総数であり、 $T_{DT-CDWT}$ は、高周波成分

D^{RR} , D^{RI} , D^{IR} , D^{II} における二値画像のピクセルの総数である。高周波成分 E と F に関しても同様に計算する。

DT-CDWT に基づく鮮鋭度 $S_{DT-CDWT}(L)$ を以下のように定義する。

$$S_{DT-CDWT}(L) = \frac{\#(D) + \#(E) + \#(F)}{3}. \quad (4.3)$$

4.1.2 粒状性

粒状性を評価するために、DT-CDWT によって得られた高周波成分の合成画像を生成する。DT-CDWT によって得られた水平方向の高周波成分に関する合成画像は、次のように計算される。

$$D_p(m, n) = \sqrt{(D^{RR}(m, n))^2 + (D^{RI}(m, n))^2 + (D^{IR}(m, n))^2 + (D^{II}(m, n))^2}. \quad (4.4)$$

高周波成分 E と F も同じ計算を行う。

2次元画像 L に関する RMS 粒状性を以下のように定義する。

$$G_{high} = \frac{1}{\mu(L)} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (L(i, j) - \mu(L))^2}{MN - 1}} \quad (4.5)$$

ここで、 $\mu(L) = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N L(i, j) \right) / MN$ である。DT-CDWT の粒状性は、式 (4.4) を用いて得られた D_p , E_p , F_p に式 (4.5) を適用した後、それらを足し合わせて、平均化した値である。

4.1.3 ノルム誤差評価

2-ノルムと ∞ -ノルムは、3.1 節で説明した計算手順と同様である。簡単に説明するために、サイズが 256×256 のグレースケール画像に対して、DT-CDWT を適用することによって得られた高周波成分を使用することを仮定する。

2-ノルムは、12 種類の高周波成分 D^{rs} , E^{rs} , F^{rs} ($r = R, I$, $s = R, I$) を用いて、原画像 H と評価画像 \tilde{H} の各ピクセルにおける差を計算する。各高周波成分における 2-ノルムを次のように定義する。

$$\|H - \tilde{H}\|_{k,2} = \frac{\left(\sum_{m=1}^{128} \sum_{n=1}^{128} |H(m, n) - \tilde{H}(m, n)|_{e(k)}^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{128 \times 128} \quad (4.6)$$

ここで、 $k = 1, 2, \dots, 12$ は、それぞれ、 D^{rs} , E^{rs} , F^{rs} ($r = R, I$, $s = R, I$) に対応する。それから、高周波成分を用いた 2-ノルムは以下のようになる。

$$\|H - \tilde{H}\|_2 = \left(\sum_{k=1}^{12} \|H - \tilde{H}\|_{k,2} \right) / 12. \quad (4.7)$$

∞ -ノルムは、各小ブロックにおいて計算される。原画像 H と評価画像 \tilde{H} の各高周波成分を 8×8 のブロックに分割し、256 個のブロック $e_i (i = 1, 2, \dots, 256)$ を得る。それから、各ブロックにおける ∞ -ノルムは、次のように定義される。

$$\|H - \tilde{H}\|_{e_i(k), bk} = \max_{1 \leq m, n \leq 16} |H(m, n) - \tilde{H}(m, n)|_{e_i(k)}, \quad (4.8)$$

ここで、 $k = 1, 2, \dots, 12$ は、それぞれ、 $D^{rs}, E^{rs}, F^{rs} (r = R, I, s = R, I)$ に対応する。256 個のブロック e_i における ∞ -ノルムの最大値によって、式 (4.8) を割る。つまり、次の 2 つの式を計算する。

$$\|H - \tilde{H}\|_{k, \max} = \max_{1 \leq i \leq 256} \|H - \tilde{H}\|_{e_i(k), bk} \quad (4.9)$$

$$\|H - \tilde{H}\|_{e_i(k), \infty} = \frac{\|H - \tilde{H}\|_{e_i(k), bk}}{\|H - \tilde{H}\|_{k, \max}}. \quad (4.10)$$

最後に、各高周波成分における ∞ -ノルムを次のように定義し、

$$\|H - \tilde{H}\|_{k, \infty} = \left(\sum_{i=1}^{256} \|H - \tilde{H}\|_{e_i(k), \infty} \right) / 256 \quad (4.11)$$

高周波成分における ∞ -ノルムを以下のように定義する。

$$\|H - \tilde{H}\|_{\infty} = \left(\sum_{k=1}^{12} \|H - \tilde{H}\|_{k, \infty} \right) / 12. \quad (4.12)$$

4.2 画質劣化評価法について

画質劣化を評価するために、原画像と評価画像間での各指標に関する値の差が重要である。つまり、各指標の値が原画像と近い場合、評価画像の劣化具合は低くなると予想する。

相対誤差は、ピクセル値のスケールに関して頑健であるため、鮮鋭度と粒状性の誤差を測るために、相対誤差を採用する。例えば、原画像 H と評価画像 \tilde{H} の鮮鋭度に関する相対誤差は、次式で定義される。

$$R_s = \frac{|S_{DT-CDWT}(H) - S_{DT-CDWT}(\tilde{H})|}{S_{DT-CDWT}(H)} \quad (4.13)$$

粒状性の相対誤差 R_g も同様に計算した。

前節で説明した指標と加重幾何平均を用いた画質劣化評価法 (IQDA) を次のように定義する。

$$IQDA = \sqrt[4]{(1 + aR_s)(a + bR_g)(1 + cE_2)(1 + dE_{\infty})} \quad (4.14)$$

ここで、 R_s と R_g は、それぞれ、鮮鋭度と粒状性の相対誤差である。 E_2 と E_{∞} は、それぞれ、式 (4.7) と式 (4.12) で定義される 2-ノルムと ∞ -ノルムである。パラメータ a ,

b, c, d は、値域が $[1, 10]$ の正の実数である。IQDAは、1以上の値となり、 H と \tilde{H} が同じ場合、値が1となる。したがって、式(4.14)の値が1より大きくなればなるほど、画質の劣化具合が大きいということになる。

図4.1は、式(4.14)を用いた画質劣化評価法の手順を示している。

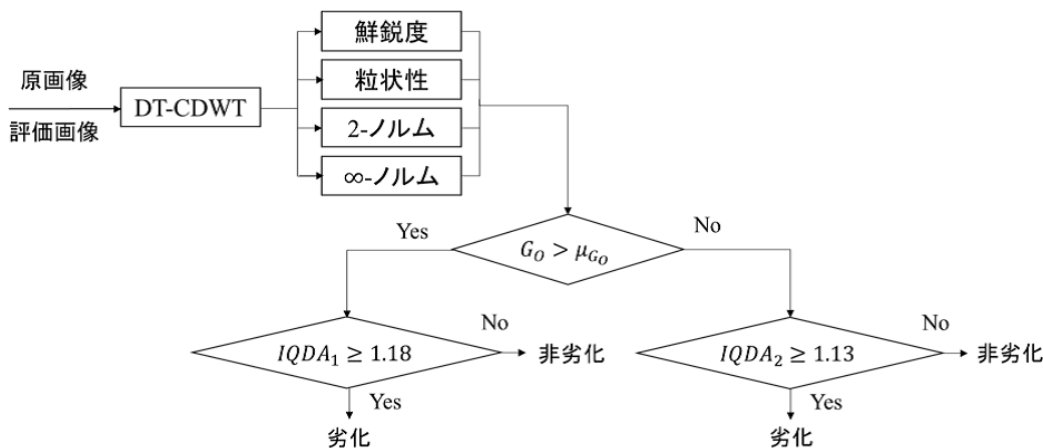


図 4.1: IQDA の手順

予備実験より、入力する原画像の粒状性によって、各指標の値に偏りが生じたため、2種類のパラメータと基準を設定した。入力画像の粒状性を G_O とすると、 $G_O > \mu_{G_O}$ の場合、各パラメータを $a = 10.0$, $b = 2.0$, $c = 10.0$, $d = 1.0$ に設定し、これらのパラメータにより構成されるIQDAを $IQDA_1$ とする。一方、 $G_O \leq \mu_{G_O}$ の場合、各パラメータを $a = 7.0$, $b = 5.0$, $c = 10.0$, $d = 1.0$ に設定し、これらのパラメータにより構成されるIQDAを $IQDA_2$ とする。この実験では、 $\mu_{G_O} = 5.73$ としている。 $IQDA_1 \geq 1.18$, または、 $IQDA_2 \geq 1.13$ であれば、評価画像は劣化していると判断する。これらのパラメータと基準は、ヒューリスティックに決めている。

4.3 実験結果

この節では、前節のIQDAに関する実験結果について記載する。実験の原画像として、図3.1をグレースケール化した画像を用いた。これらの画像は、図4.2である。また、主観評価では、DMOSを用いており、評価表と実験画像を生成するための画像処理（ぼかし処理、コントラスト強調、エッジ強調、色反転、ごま塩ノイズの付加）は、3.2.1項と同じである。つまり、実験画像は125枚である。この実験におけるDMOSでの観察者は、特に視覚に異常のない21歳から24歳の男性15人である[10]。

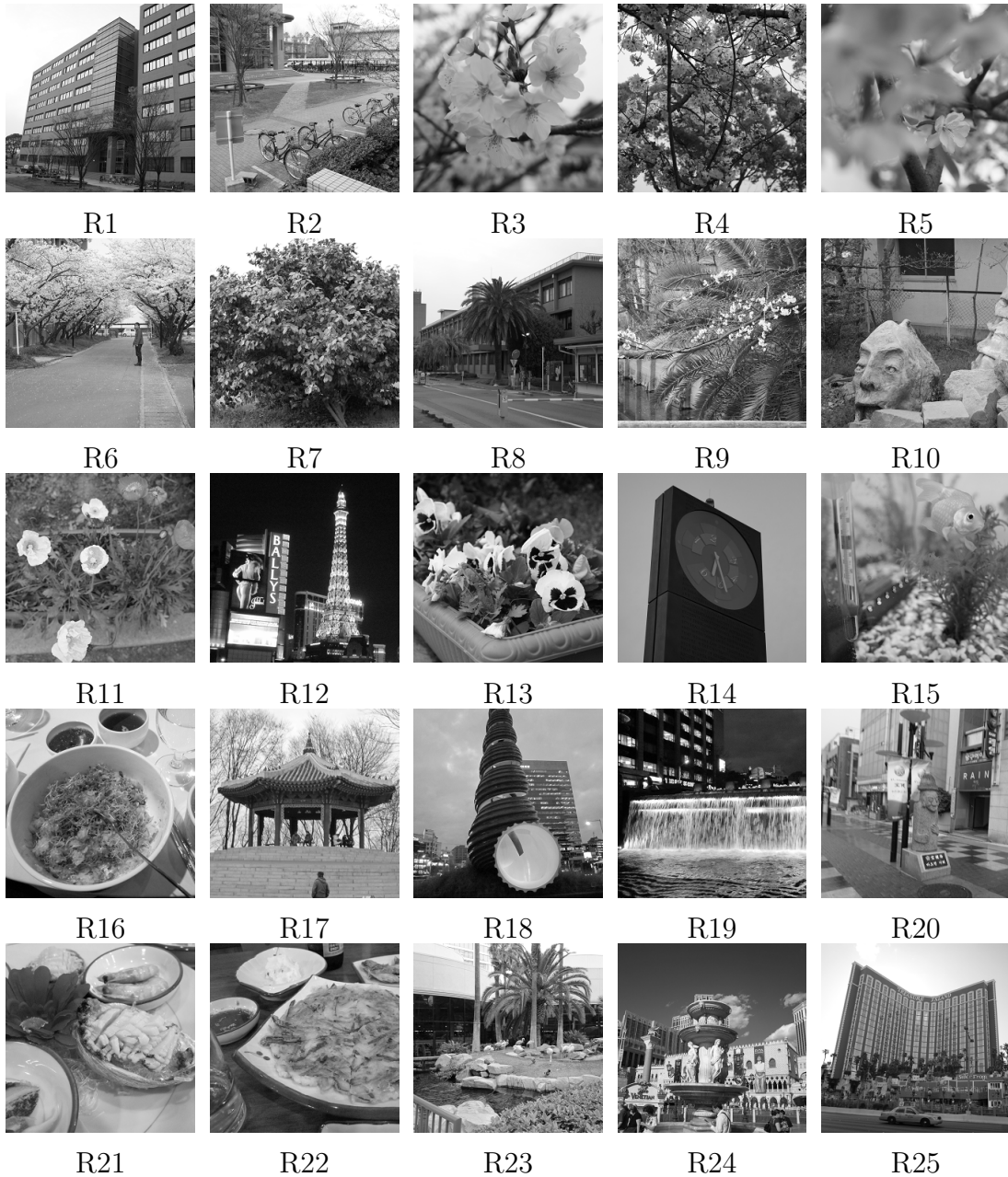


図 4.2: 実験で使った原画像

この実験では、IQDA の性能を確かめるために、DMOS の結果と表 4.1 を用いて、6 種類の既存の画質劣化評価法 (PSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM, CW-SSIM, HaarPSI) と比較した。今までの経験より、 $DMOS \geq 3.5$, $PSNR \geq 30.0$, $SSIM, MS-SSIM, FSIM, CW-SSIM, HaarPSI \geq 0.9$ であれば、評価画像は非劣化と判断する。

表 4.1: 点数表

| DMOS | 各画質劣化評価法 | 点数 |
|------|----------|----|
| 非劣化 | 非劣化 | 1 |
| 非劣化 | 劣化 | 0 |
| 劣化 | 非劣化 | 1 |
| 劣化 | 劣化 | 0 |

表 4.2 は、実験画像 125 枚に関して、各画質劣化評価法と DMOS の結果が一致した割合を示している。この表において、各画像処理に関する一致した割合が最も高い数値を黒い太文字で表示している。この割合の算出には、表 4.1 を用いている。

表 4.2: 各画質劣化評価法と DMOS との結果の一致率

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ぼかし処理 | 88% | 88% | 32% | 84% | 100% | 100% | 100% |
| コントラスト強調 | 88% | 88% | 84% | 88% | 88% | 88% | 88% |
| エッジ強調 | 28% | 100% | 100% | 100% | 96% | 4% | 60% |
| 色反転 | 100% | 100% | 100% | 0% | 0% | 72% | 68% |
| ごま塩ノイズ | 100% | 100% | 92% | 88% | 100% | 100% | 100% |
| 全て | 81% | 95% | 82% | 72% | 77% | 73% | 83% |

表 4.2 より、ぼかし処理に関して、IQDA と DMOS との結果の一致率は、PSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM よりも高く、コントラスト強調に関しては、MS-SSIM よりも高い。また、エッジ強調に関して、IQDA と DMOS との結果の一致率は、PSNR と HaarPSI よりも高く、色反転に関して、FSIM と CW-SSIM よりも高く、ごま塩ノイズに関しては、MS-SSIM と FSIM よりも高い。そして、今回の実験で用いた全ての画像処理に関する IQDA と DMOS との結果の一致率は、PSNR, MS-SSIM, FSIM, CW-SSIM, HaarPSI よりも高い。

次に、R5, R14, R24 の 3 枚の実験画像に関する各画質劣化評価法の結果を示す。これらの画像に関する数値結果をまとめた表 4.3 ~ 4.7 において、劣化と判断される数値を黒い太文字で表示している。

R5 と R14 の画像において、IQDA の値が 1.18 以上となれば劣化と判断し、R24 の画像において、IQDA の値が 1.13 以上となれば劣化と判断する。



図 4.3: ぼかし処理が施された実験画像の一部

表 4.3 は，図 4.3 のように，ぼかし処理が施された画像に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果を示している。

表 4.3: 図 4.3 に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA | DMOS |
|-----|--------------|-------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| R5 | 34.46 | 0.96 | 0.99 | 0.97 | 0.50 | 0.81 | 1.18(≥ 1.18) | 2.86 |
| R14 | 33.97 | 0.93 | 0.97 | 0.95 | 0.47 | 0.70 | 1.51(≥ 1.18) | 2.20 |
| R24 | 27.66 | 0.82 | 0.93 | 0.77 | 0.38 | 0.39 | 1.18(≥ 1.13) | 1.86 |

表 4.3 より，PSNR，SSIM，MS-SSIM，そして，FSIM の結果は，ぼかし処理が施された R5 と R14 の画質が劣化していないと判断している。しかしながら，IQDA，CW-SSIM，そして，HaarPSI と DMOS の結果は，劣化していると判断している。したがって，ぼかし処理が施された R5 と R14 に関して，IQDA，CW-SSIM，そして，HaarPSI は，DMOS の結果と合っていることが分かる。同様に，ぼかし処理が施された R24 に関しては，IQDA，PSNR，SSIM，MS-SSIM，FSIM，CW-SSIM，そして，HaarPSI は，DMOS の結果と合っていることが分かる。

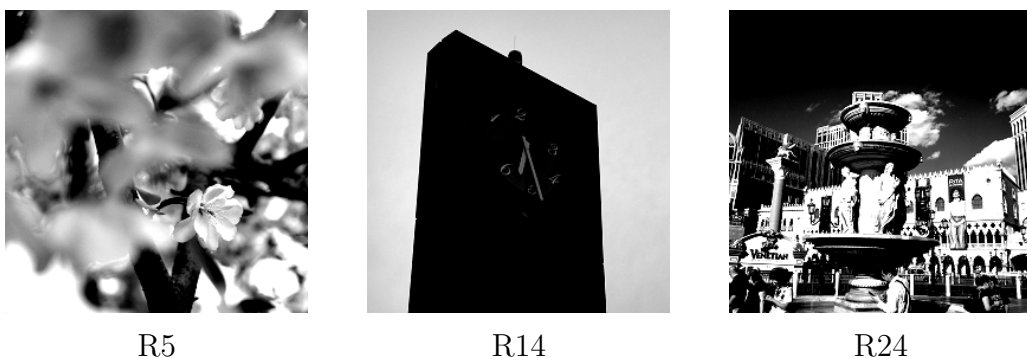


図 4.4: コントラスト強調が施された実験画像の一部

表 4.4 は，図 4.4 のように，コントラスト強調が施された画像に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果を示している。

表 4.4: 図 4.4 に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA | DMOS |
|-----|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| R5 | 16.49 | 0.71 | 0.76 | 0.79 | 0.66 | 0.48 | 1.09(≥ 1.18) | 4.00 |
| R14 | 14.10 | 0.47 | 0.67 | 0.87 | 0.41 | 0.46 | 1.62(≥ 1.18) | 1.66 |
| R24 | 13.33 | 0.62 | 0.85 | 0.75 | 0.70 | 0.45 | 1.19(≥ 1.13) | 3.06 |

表 4.4 より, PSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM, CW-SSIM, そして, HaarPSI の結果は, コントラスト強調が施された R5 の画質が劣化していると判断している. しかしながら, IQDA と DMOS の結果は, 劣化していないと判断している. したがって, コントラスト強調が施された R5 に関して, IQDA は, DMOS の結果と合っていることが分かる. 同様に, コントラスト強調が施された R14 と R24 に関しては, 各画質劣化評価法と DMOS の結果は合っていることが分かる.

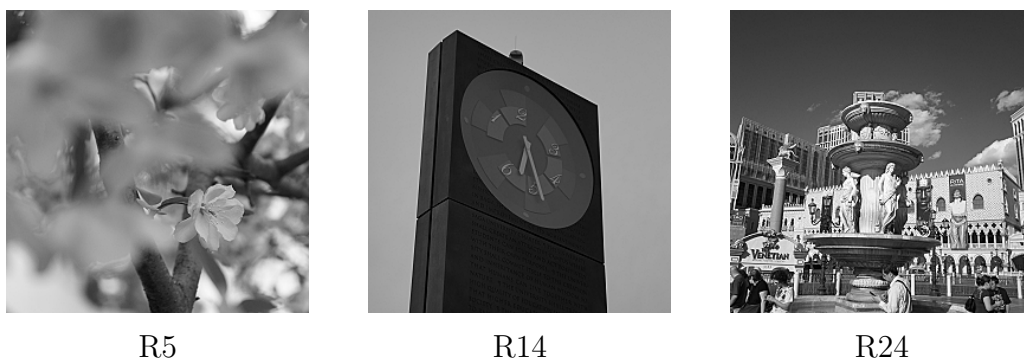


図 4.5: エッジ強調が施された実験画像の一部

表 4.5 は, 図 4.5 のように, エッジ強調が施された画像に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果を示している.

表 4.5: 図 4.5 に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA | DMOS |
|-----|-------|------|---------|------|-------------|-------------|-------------------------------------|------|
| R5 | 38.88 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.90 | 0.92 | 1.07(≥ 1.18) | 3.73 |
| R14 | 35.98 | 0.97 | 0.99 | 0.97 | 0.88 | 0.73 | 1.11(≥ 1.18) | 4.33 |
| R24 | 32.10 | 0.96 | 0.99 | 0.93 | 0.90 | 0.72 | 1.14(≥ 1.13) | 4.73 |

表 4.5 より, 各画質劣化評価法と DMOS の結果は, エッジ強調が施された R5 の画質が劣化していないと判断しているため, 各画質劣化評価法と DMOS の結果が合っていることが分かる. 同様に, エッジ強調が施された R14 に関して, IQDA, PSNR, SSIM, MS-SSIM, そして, FSIM は, DMOS の結果と合っていることが分かる. また, エッジ

強調が施された R24 に関して、PSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM, そして、CW-SSIM は、DMOS の結果と合っていることが分かる。

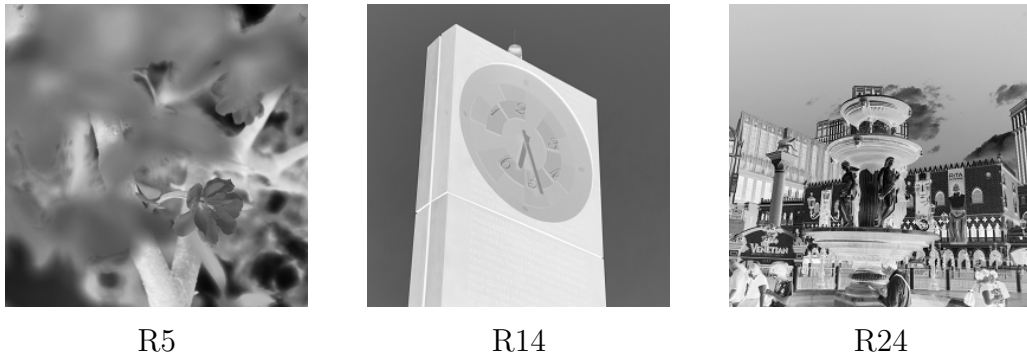


図 4.6: 色反転が施された実験画像の一部

表 4.6 は、図 4.6 のように、色反転が施された画像に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果を示している。

表 4.6: 図 4.6 に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA | DMOS |
|-----|-------------|--------------|--------------|------|---------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| R5 | 9.83 | 0.07 | -0.52 | 0.99 | 1.00 | 0.87 | 1.11(≥ 1.18) | 2.13 |
| R14 | 5.69 | 0.35 | -0.17 | 0.99 | 1.00 | 0.70 | 1.12(≥ 1.18) | 1.93 |
| R24 | 6.99 | -0.24 | -0.55 | 0.99 | 1.00 | 0.88 | 1.20(≥ 1.13) | 1.80 |

表 4.6 より、IQDA, FSIM, そして、CW-SSIM の結果は、色反転が施された R5 と R14 の画質が劣化していないと判断している。しかしながら、PSNR, SSIM, MS-SSIM, そして、HaarPSI と DMOS の結果は、劣化していると判断している。したがって、色反転が施された R5 と R14 に関して、PSNR, SSIM, MS-SSIM, そして、HaarPSI は、DMOS の結果と合っていることが分かる。同様に、色反転が施された R24 に関しては、IQDA, PSNR, SSIM, MS-SSIM, そして、HaarPSI は、DMOS の結果と合っていることが分かる。

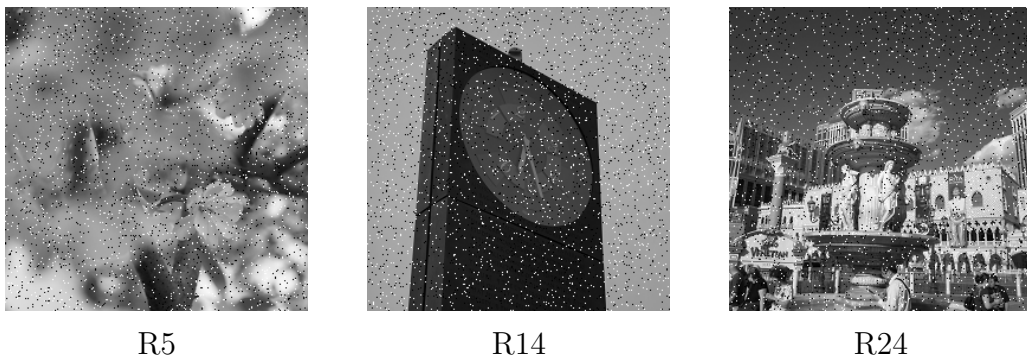


図 4.7: ごま塩ノイズの付加が施された実験画像の一部

表 4.7 は，図 4.7 のように，ごま塩ノイズの付加が施された画像に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果を示している。

表 4.7: 図 4.7 に関する各画質劣化評価法と DMOS の結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | IQDA | DMOS |
|-----|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| R5 | 18.57 | 0.30 | 0.77 | 0.72 | 0.13 | 0.43 | 1.72(≥ 1.18) | 1.33 |
| R14 | 18.03 | 0.27 | 0.66 | 0.69 | 0.12 | 0.32 | 1.75(≥ 1.18) | 1.33 |
| R24 | 18.29 | 0.41 | 0.82 | 0.86 | 0.47 | 0.50 | 1.45(≥ 1.13) | 1.40 |

表 4.7 より，各画質劣化評価法と DMOS の結果は，ごま塩ノイズの付加が施された R5, R14, そして，R24 の劣化していると判断しているため，各画質劣化評価法と DMOS の結果が合っていることが分かる。

4.4 まとめと次章への展開

本章では，3.1 節で定義した指標と DT-CDWT に基づく画質劣化評価法を開発した。全ての画像処理に関する DMOS との一致率において，今回の実験で用いた既存の画質劣化評価法と比較したところ，提案手法である IQDA は，SSIM に劣っていたが，その他の画質劣化評価法よりも優れていることが分かった。また，Wavelet ベースである CW-SSIM や HaarPSI よりも優れているため，画質劣化において DT-CDWT を用いることが有用である。各画像処理に関する DMOS との一致率において，IQDA は，ぼかし処理とコントラスト強調，そして，ごま塩ノイズの付加が施された画像の画質劣化を評価するために，有用であることが分かった。さらに，ぼかし処理においては，全ての画像処理に関する DMOS との一致率で劣っていた SSIM よりも，一致率が高かった。本章までの実験結果より，DT-CDWT に基づく画質劣化評価法の有用性を確かめることができた。このような主観評価と合う画質劣化評価法は，画質劣化を評価すると同時に，その画像処理の性能を評価していることを意味する。

次章では，DT-CDWT を用いて，電子透かし法の性能を測ることを目的とした電子透かし入り画像の画質劣化評価法を開発する。

第5章 電子透かし入り画像のための画質劣化評価法

この章では、本論文で提案する電子透かし入り画像のための画質劣化評価法について説明する。この方法の開発は、電子透かし法の性能を測ることを目的としている。電子透かし法の性能評価として、電子透かし入り画像の品質（画質）評価と透かしの耐性評価の2つがある。電子透かし入り画像の品質（画質）評価では、原画像に電子透かしを埋め込むことによって、生成された電子透かし入り画像の画質が劣化していないかどうかを評価する。透かしの耐性評価では、電子透かし入り画像に対する画像編集によって、透かしの情報が保たれているかを評価する。今回の研究は、電子透かし入り画像の品質（画質）評価を対象とした。

現在の電子透かし法は、空間領域、もしくは、周波数領域に電子透かしを埋め込んでいる。また、電子透かし入り画像を評価する場合、原画像に何らかの情報を埋め込むため、原画像と電子透かし入り画像間において誤差が生じると考えられる。

文献 [9] では、空間領域におけるビットプレーンの1-ノルム (BGM)、周波数領域の1-ノルム (FGM)、そして、鮮鋭度 (SGM) に関する指標を用いており、2段階評価で画質劣化評価法を構成していた。本研究では、これを5段階評価で画質劣化を評価できるように画質劣化評価法を構成する。

次の節以降では、電子透かし入り画像のための画質劣化評価指標、それらの指標を用いた画質劣化評価法と順を追って説明する。

5.1 電子透かし入り画像のための画質劣化評価指標

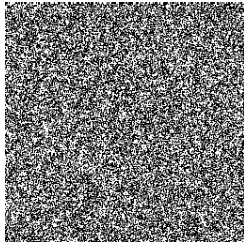
この節では、画質劣化評価指標である BGM, FGM, SGM の順に説明する。

5.1.1 BGM (Bit-plane Geometric Mean)

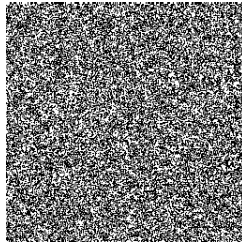
ここでは、ビットプレーンを用いた指標である BGM について説明する。まず最初に、ビットプレーンとは、1次元や2次元データを N ビット単位で分解した2値の N ビットデータである。例えば、あるデータを8ビット単位で分解するならば、8個のビットプレーンで表現できる。このとき、最下位ビットである1ビットを集めたビットプレーンが第1ビットプレーンとなり、最上位ビットである8ビットを集めたビットプレーンが第8ビットプレーンとなる。したがって、ビットプレーンは、 N ビット単位で画像分割するので、1枚の画像から N 枚の画像が得られる。図 5.1 は、Lenna 画像に対して、 $N = 8$ のビットプレーン分解を適用して得られたそれぞれのビット画像である。今回の実験では、 $N = 8$ のビットプレーン分解を用いた。



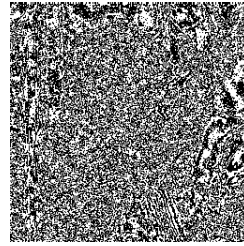
(a) Lenna 画像



(b) 第1ビット
プレーン



(c) 第2ビット
プレーン



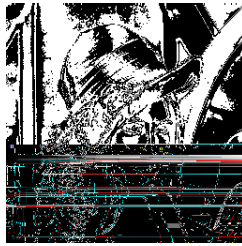
(d) 第3ビット
プレーン



(e) 第4ビット
プレーン



(f) 第5ビット
プレーン



(g) 第6ビット
プレーン



(h) 第7ビット
プレーン



(i) 第8ビット
プレーン

図 5.1: Lenna 画像に対してビットプレーン分解を適用して得られたそれぞれのビットプレーン

BGM では、原画像 O と評価画像 \tilde{O} を 8 ビットのビットプレーンに分解し、各ビットプレーンにおける 1-ノルムを測った。各ビットプレーンにおける 1-ノルムを以下のように定義する。

$$Bit_{(k)} = \sum_{m=1}^{M_1} \sum_{n=1}^{M_2} |O_{bit(k)}(m, n) - \tilde{O}_{bit(k)}(m, n)| \quad (5.1)$$

ここで、 M_1 と M_2 は、画像サイズを表しており、 $O_{bit(k)}$ と $\tilde{O}_{bit(k)}$ は、原画像と評価画像の各ビットプレーンである。 $k = 1, 2, \dots, 8$ は、それぞれ、第 1 ビットプレーンから第 8 ビットプレーンに対応している。

式 (5.1) の幾何平均を用いて、 BGM を以下のように定義する。

$$BGM = \sqrt[8]{\prod_{k=1}^8 Bit_{(k)}} \quad (5.2)$$

5.1.2 FGM (Frequency Geometric Mean)

ここでは、FGMについて説明する。FGMは、BGMと同様に定義される。話を簡単にするために、画像サイズが 256×256 のグレースケール画像に対して、DT-CDWTを適用することによって得られた高周波成分を用いると仮定する。

FGMでは、12種類の高周波成分 ($D^{RR}, D^{RI}, \dots, F^{II}$) を用いて、原画像 O と評価画像 \tilde{O} 間の各ピクセルにおける誤差を計算している。各高周波成分における1-ノルムを次のように定義する。

$$\|O - \tilde{O}\|_{l,1} = \sum_{m=1}^{128} \sum_{n=1}^{128} |O(m,n) - \tilde{O}(m,n)|_{e(l)}, \quad (5.3)$$

ここで、 $l = 1, 2, \dots, 12$ は、高周波成分 D^{rs}, E^{rs}, F^{rs} ($r = R, I, s = R, I$) のそれぞれに対応している。(5.3)の幾何平均を用いて計算するFGMは、以下である。

$$FGM = \sqrt[12]{\prod_{l=1}^{12} \|O - \tilde{O}\|_{l,1}} \quad (5.4)$$

5.1.3 SGM (Sharpness Geometric Mean)

ここでは、鮮鋭度に関する指標であるSGMについて説明する。DT-CDWTによって得られる各高周波成分に関する鮮鋭度を計算する方法は、4.1.1項と同様である。最初に、式(4.1)の動的閾値法に基づいて高周波成分の二値画像を生成した。次に、DT-CDWTによって得られた高周波成分の二値画像と幾何平均を用いて、SGMを次のように定義する。

$$SGM = \sqrt[12]{\prod_{p=1}^{12} |\#O_{(p)} - \#\tilde{O}_{(p)}|}, \quad (5.5)$$

ここで、 $p = 1, 2, \dots, 12$ は、高周波成分 D^{rs}, E^{rs}, F^{rs} ($r = R, I, s = R, I$) のそれぞれに対応しており、 $\#O$ と $\#\tilde{O}$ は高周波成分 D^{rs}, E^{rs}, F^{rs} の二値画像における非0要素の合計である。

5.2 電子透かし入り画像のための画質劣化評価法について

この節では、電子透かし入り画像のための画質劣化評価指標の基準と画質劣化評価法のアルゴリズムの順に説明する。

5.2.1 画質劣化評価指標の基準

ここでは、電子透かし入り画像の画質劣化を評価するBGM, FGM, SGMの基準を決める予備実験について説明する。予備実験では、提案手法による画質劣化の評価

と主観評価が適合するように基準を決めるため、主観評価の一つである MOS (Mean Opinion Score) [1] を用いた。また、電子透かし入り画像を作成する際の目安として、PSNR と SSIM を利用する。予備実験の原画像として、図 5.2 にあるように、標準画像データベース SIDBA の Airplane, Balloon, Cameraman, Elaine, Lenna を利用する。これらの画像は、サイズが 256×256 の 8 ビットグレースケールである。

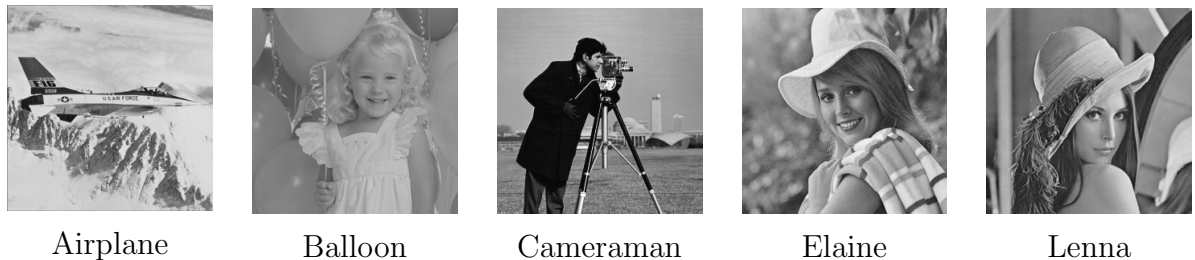


図 5.2: 予備実験で使った原画像

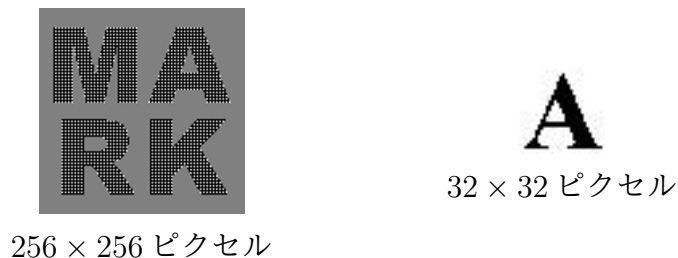


図 5.3: 電子透かし

図 5.2 の画像に電子透かしを埋め込んだ予備実験画像は、図 5.4 のように合計 25 枚作成した。なお、予備実験画像は、PSNR と SSIM の値より 4 つの種類 (i) $PSNR \geq 30.0$, かつ, $SSIM \geq 0.90$, (ii) $PSNR \geq 30.0$, かつ, $SSIM \leq 0.90$, (iii) $PSNR \leq 30.0$, かつ, $SSIM \geq 0.90$, (iv) $PSNR \leq 30.0$, かつ, $SSIM \leq 0.90$) に分かれるように作成している。また、4.3 節と同様に、 $PSNR \geq 30.0$, $SSIM \geq 0.90$, $MOS \geq 3.5$ であれば、評価画像は非劣化とみなす。これらの予備実験画像を作成するために用いた電子透かし法は、Dyadic Wavelet 変換 (DYWT) [6], DWT[4], 離散コサイン変換 (DCT) [5] に基づいた方法であり、予備実験画像に埋め込んだ電子透かし画像は、図 5.3 である。DYWT と DCT に基づいた電子透かし法は、周波数領域に電子透かしを埋め込む。また、DWT に基づいた電子透かし法は、低周波成分に電子透かしを埋め込んでいるが、これは、空間領域に埋め込むこととほぼ同じである。図 5.3 の左の電子透かし画像は、DYWT と DWT に基づいた電子透かし法、右の電子透かし画像は、DCT に基づいた電子透かし法で用いた。

MOS では、観察者は、表 5.1 にある評価表を用いて、各予備実験画像を評価した。

表 5.1: MOS の評価表

| score | MOS |
|-------|--------------------|
| 5 | 電子透かしが全く認められない |
| 4 | 電子透かしが認められるが気にならない |
| 3 | 電子透かしがわずかに気になる |
| 2 | 電子透かしが気になる |
| 1 | 電子透かしが非常に気になる |

この予備実験では、特に視覚に異常のない16歳から25歳の男性20人に対して行った。



図 5.4: 予備実験画像

表 5.2 は，図 5.4 の実験画像の各指標と MOS の値を示している。

表 5.2: 予備実験結果

| 画像 | <i>BGM</i> | <i>FGM</i> | <i>SGM</i> | <i>MOS</i> |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| Q1 | 108.97 | 124.28 | 158.29 | 3.55 |
| Q2 | 108.41 | 115.87 | 200.85 | 3.95 |
| Q3 | 107.72 | 198.21 | 115.12 | 4.4 |
| Q4 | 102.70 | 190.53 | 113.54 | 3.5 |
| Q5 | 99.84 | 180.04 | 147.69 | 4.4 |
| Q6 | 100.56 | 199.48 | 164.74 | 3.9 |
| Q7 | 84.20 | 174.26 | 110.10 | 4.5 |
| Q8 | 85.00 | 64.52 | 53.13 | 3.9 |
| Q9 | 125.81 | 64.52 | 77.54 | 4 |
| Q10 | 91.06 | 64.52 | 62.43 | 4.65 |
| Q11 | 98.05 | 64.52 | 31.42 | 4.8 |
| Q12 | 99.43 | 64.52 | 41.14 | 4.2 |
| Q13 | 99.48 | 87.65 | 45.07 | 2.25 |
| Q14 | 160.61 | 87.65 | 17.17 | 2.6 |
| Q15 | 110.20 | 87.65 | 53.98 | 2.7 |
| Q16 | 108.80 | 87.65 | 17.82 | 2.8 |
| Q17 | 179.69 | 109.64 | 29.70 | 2.25 |
| Q18 | 132.21 | 105.06 | 67.54 | 2.05 |
| Q19 | 130.06 | 146.11 | 51.71 | 2.35 |
| Q20 | 188.83 | 146.11 | 30.24 | 1.3 |
| Q21 | 144.88 | 146.11 | 65.62 | 1.9 |
| Q22 | 143.00 | 146.10 | 21.12 | 1.9 |
| Q23 | 168.32 | 146.11 | 19.57 | 1.95 |
| Q24 | 130.81 | 155.70 | 55.74 | 1.9 |
| Q25 | 171.06 | 175.37 | 29.09 | 1.7 |

提案手法は，MOS の結果と合うような 5 段階評価で確立することを目指す。予備実験では，*BGM* の値が大きくなればなるほど，MOS の値が小さくなる傾向にあった。そこで，この傾向から $BGM \geq 130$ の場合，評価する電子透かし入り画像の評点を '1' とする。 $BGM < 130$ であれば，*FGM* の値を用いて *SGM* の基準を 2 つに分けた。 $70 \leq FGM \leq 100$ の場合， $30 \leq SGM \leq 80$ であれば，電子透かし入り画像の評点を '2' とする。そうでなければ，電子透かし入り画像の評点を '3' とする。 $0 \leq FGM < 70$ で $100 < FGM$ の場合， $140 \leq SGM \leq 160$ であれば，電子透かし入り画像の評点を '4' とする。そうでなければ，電子透かし入り画像の評点を '5' とする。これらの基準を MOS の値との相関係数が高くなるように決めた。

5.2.2 画質劣化評価法のアルゴリズム

ここでは、電子透かし入り画像の画質劣化評価法のアルゴリズムについて説明する。BGM, FGM, そして, SGM を用いた画質劣化評価法 (wIQDA) の手順は次のようになっている。

1. $BGM \geq 130$ であれば、電子透かし入り画像の評点を '1' とする。そうでなければ、手順 2 へ向かう。
2. $70 \leq FGM \leq 100$ であれば、手順 3 へ向かう。そうでなければ、手順 4 へ向かう。
3. $30 \leq SGM \leq 80$ であれば、電子透かし入り画像の評点を '2' とする。そうでなければ、電子透かし入り画像の評点を '3' とする。
4. $140 \leq SGM \leq 160$ であれば、電子透かし入り画像の評点を '4' とする。そうでなければ、電子透かし入り画像の評点を '5' とする。

図 5.5 は、wIQDA の手順を示している。

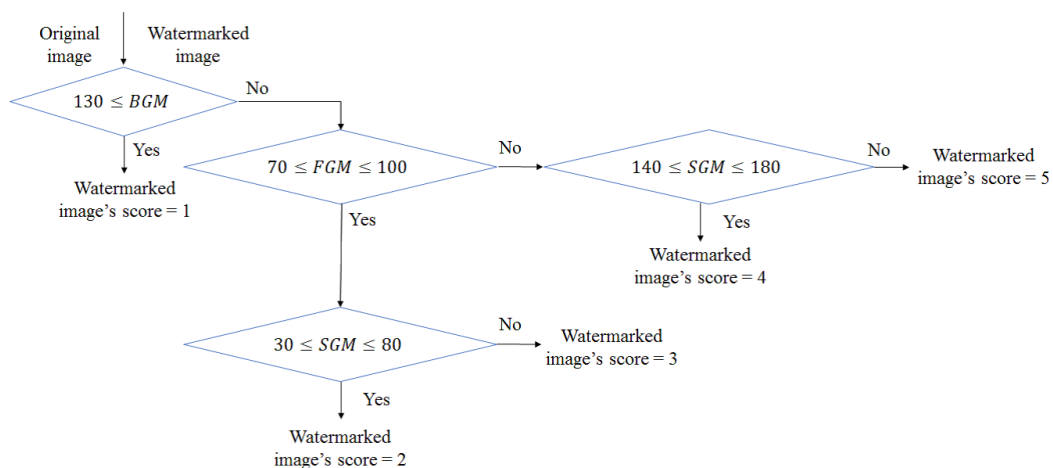


図 5.5: wIQDA の手順

表 5.3 は、図 5.4 の実験画像に関する wIQDA と 4.3 節で用いた 6 種類の既存の画質劣化評価法の評価結果を示している。

表 5.3: 予備実験画像の評価結果

| 画像 | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | wIQDA | MOS |
|-----|-------|------|---------|------|---------|---------|-------|------|
| Q1 | 31.59 | 0.77 | 0.98 | 0.97 | 0.72 | 0.83 | 4 | 3.55 |
| Q2 | 32.48 | 0.80 | 0.98 | 0.97 | 0.73 | 0.84 | 5 | 3.95 |
| Q3 | 29.91 | 0.80 | 0.98 | 0.95 | 0.76 | 0.77 | 5 | 4.4 |
| Q4 | 30.52 | 0.83 | 0.98 | 0.96 | 0.77 | 0.78 | 5 | 3.5 |
| Q5 | 31.15 | 0.85 | 0.98 | 0.96 | 0.78 | 0.79 | 4 | 4.4 |
| Q6 | 31.19 | 0.85 | 0.98 | 0.97 | 0.78 | 0.83 | 5 | 3.9 |
| Q7 | 33.58 | 0.92 | 0.99 | 0.97 | 0.81 | 0.86 | 5 | 4.5 |
| Q8 | 35.38 | 0.88 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 3.9 |
| Q9 | 35.38 | 0.84 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.96 | 5 | 4 |
| Q10 | 35.38 | 0.87 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 5 | 4.65 |
| Q11 | 35.38 | 0.92 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 5 | 4.8 |
| Q12 | 35.38 | 0.90 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 5 | 4.2 |
| Q13 | 31.00 | 0.95 | 0.98 | 0.97 | 0.84 | 0.90 | 2 | 2.25 |
| Q14 | 31.00 | 0.93 | 0.97 | 0.95 | 0.72 | 0.84 | 1 | 2.6 |
| Q15 | 31.00 | 0.93 | 0.97 | 0.96 | 0.78 | 0.88 | 2 | 2.7 |
| Q16 | 31.00 | 0.96 | 0.98 | 0.97 | 0.85 | 0.90 | 3 | 2.8 |
| Q17 | 28.92 | 0.90 | 0.96 | 0.93 | 0.68 | 0.79 | 1 | 2.25 |
| Q18 | 29.87 | 0.91 | 0.96 | 0.95 | 0.76 | 0.85 | 1 | 2.05 |
| Q19 | 26.75 | 0.90 | 0.95 | 0.94 | 0.78 | 0.82 | 1 | 2.35 |
| Q20 | 26.75 | 0.86 | 0.94 | 0.90 | 0.64 | 0.74 | 1 | 1.3 |
| Q21 | 26.76 | 0.86 | 0.94 | 0.93 | 0.72 | 0.79 | 1 | 1.9 |
| Q22 | 26.76 | 0.92 | 0.97 | 0.95 | 0.77 | 0.82 | 1 | 1.9 |
| Q23 | 26.75 | 0.91 | 0.97 | 0.95 | 0.75 | 0.82 | 1 | 1.95 |
| Q24 | 26.02 | 0.89 | 0.95 | 0.93 | 0.77 | 0.81 | 1 | 1.9 |
| Q25 | 25.34 | 0.88 | 0.96 | 0.93 | 0.72 | 0.78 | 1 | 1.7 |

さらに、各画質劣化評価法がMOSの結果との関係性を確かめるために、相関係数を採用した。変量 $\mathbf{x}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ と $\mathbf{y}(y_1, y_2, \dots, y_N)$ の場合、相関係数は、次の式によって計算される。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5.6)$$

ここで、 \bar{x} と \bar{y} は、変量 \mathbf{x} と \mathbf{y} の平均値である。表 5.4 は、25 枚の予備実験画像に関する各画質劣化評価法と MOS の結果との相関係数を示している。

表 5.4: 25 枚の予備実験画像における各画質劣化評価法と MOS との相関係数

| wIQDA | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI |
|-------------|------|-------|---------|------|---------|---------|
| 0.94 | 0.84 | -0.32 | 0.86 | 0.78 | 0.62 | 0.51 |

表 5.4 で示されるように、wIQDA は、既存の画質劣化評価法と比較して MOS の結果と強い相関関係にあることが分かる。図 5.6 ~ 5.12 は、各画質劣化評価法と MOS の散布図である。MOS と SSIM の相関係数が負の値になった理由は、図 5.8 のように、25 枚の各予備実験画像に関して、MOS の結果が高いかかわらず、SSIM の値は低く、逆に、MOS が低いにもかかわらず、SSIM は高いとなるような結果が多かったためである。

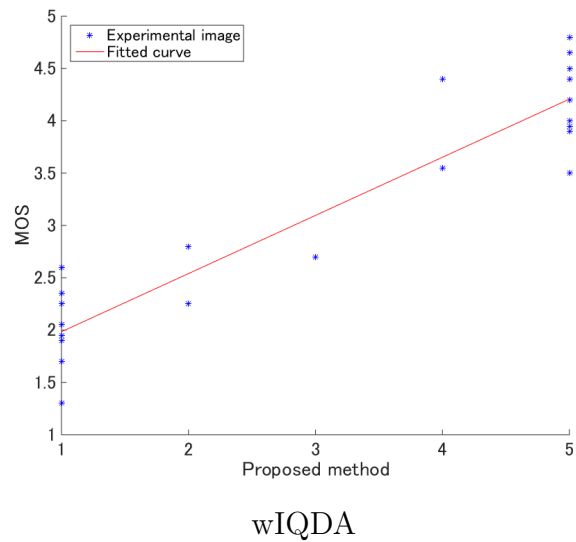


図 5.6: 予備実験画像における wIQDA と MOS の結果に関する散布図

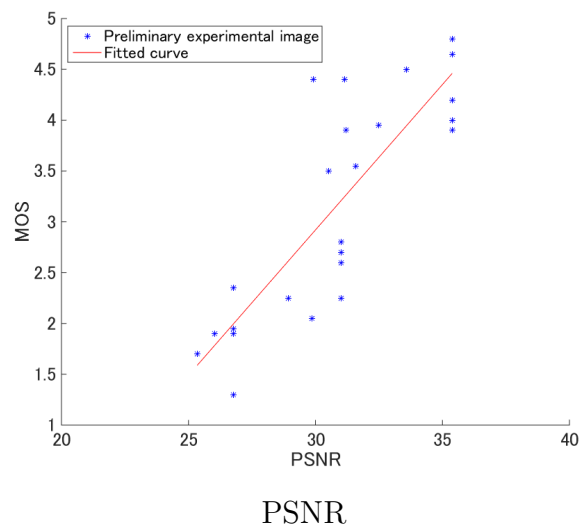


図 5.7: 予備実験画像における PSNR と MOS の結果に関する散布図

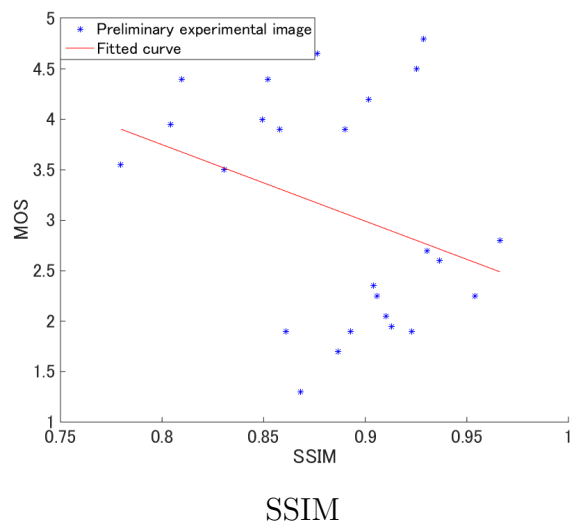


図 5.8: 予備実験画像における SSIM と MOS の結果に関する散布図

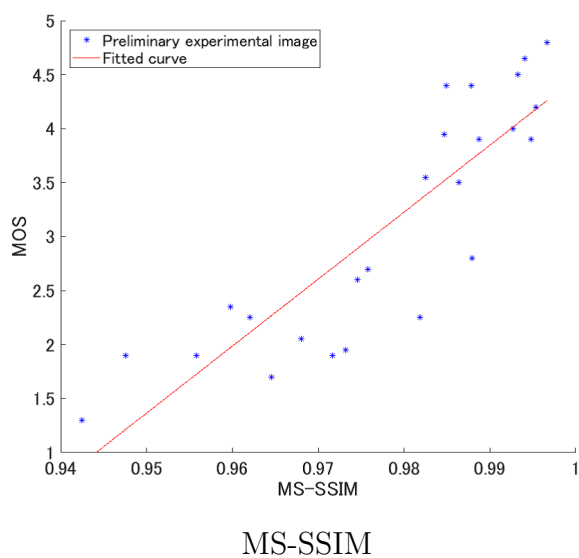


図 5.9: 予備実験画像における MS-SSIM と MOS の結果に関する散布図

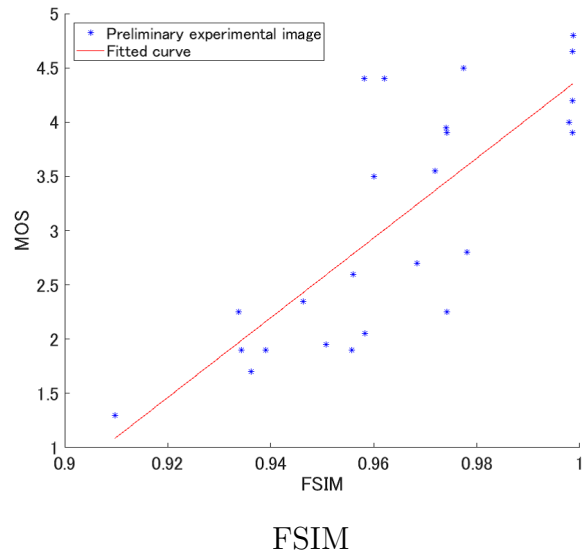


図 5.10: 予備実験画像における FSIM と MOS の結果に関する散布図

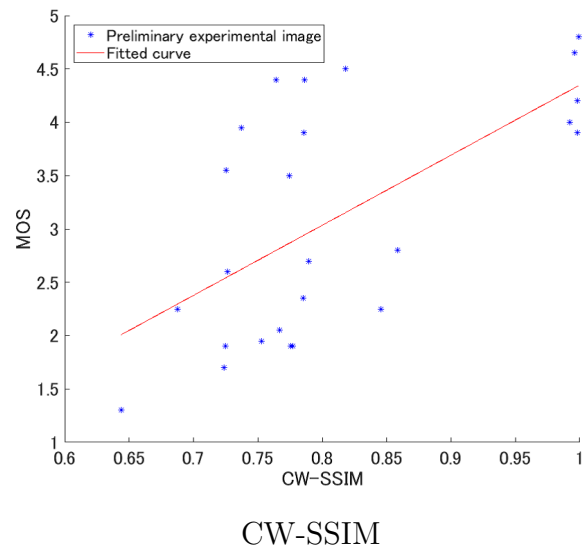


図 5.11: 予備実験画像における CW-SSIM と MOS の結果に関する散布図

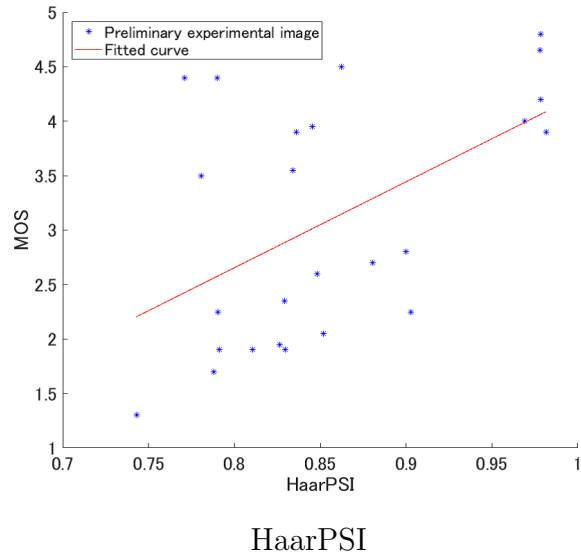


図 5.12: 予備実験画像における HaarPSI と MOS の結果に関する散布図

5.3 実験結果

ここでは、5.2.2 項にある提案手法が電子透かし入り画像を公正に評価できるかを確かめるために行った実験結果について示す。

この実験では、図 5.13 にある 256×256 サイズの 8 ビットグレースケールの原画像から 25 枚の実験画像を生成した。それらの画像は、図 5.14 であり、5.2.1 項と同様な方法で作成している。5.2.1 項で説明したように、評価する電子透かし入り画像の値が、 $MOS \geq 3.5$, $PSNR \geq 30.0$, $SSIM$, $MS-SSIM$, $FSIM$, $CW-SSIM$, $HaarPSI \geq 0.9$ であれば、評価画像は非劣化と判断する。また、wIQDA によって得られた値は、 $wIQDA \geq 4$ であれば、評価画像は非劣化と判断する。



Test1



Test2



Test3



Test4



Test5



Test6

図 5.13: 実験で使用した原画像



図 5.14: 実験画像

式 (5.6) と実験画像に関する MOS の結果を用いて, wIQDA と 7 種類の既存の画質劣化評価法を比較した。観察者は, 5.2.1 項で説明した観察者と同じである。

表 5.5: 実験結果

| 画像 | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | DSS | HaarPSI | wIQDA | MOS |
|------|-------|------|---------|------|------|---------|-------|------|
| Q'1 | 35.39 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.8 |
| Q'2 | 35.43 | 0.96 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.9 |
| Q'3 | 35.38 | 0.93 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.4 |
| Q'4 | 35.46 | 0.94 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.8 |
| Q'5 | 35.41 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.25 |
| Q'6 | 35.38 | 0.91 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.97 | 5 | 4.35 |
| Q'7 | 30.34 | 0.89 | 0.98 | 0.94 | 0.97 | 0.75 | 5 | 4.65 |
| Q'8 | 25.48 | 0.89 | 0.98 | 0.93 | 0.96 | 0.69 | 5 | 4.8 |
| Q'9 | 26.88 | 0.89 | 0.98 | 0.93 | 0.95 | 0.71 | 5 | 4.45 |
| Q'10 | 29.57 | 0.85 | 0.98 | 0.94 | 0.97 | 0.73 | 5 | 3.85 |
| Q'11 | 26.76 | 0.88 | 0.98 | 0.92 | 0.95 | 0.68 | 5 | 4.8 |
| Q'12 | 31.96 | 0.87 | 0.99 | 0.97 | 0.98 | 0.84 | 5 | 4.1 |
| Q'13 | 24.45 | 0.89 | 0.98 | 0.93 | 0.97 | 0.68 | 5 | 4.5 |
| Q'14 | 31.04 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.93 | 3 | 4.55 |
| Q'15 | 30.16 | 0.97 | 0.99 | 0.98 | 0.96 | 0.90 | 3 | 3.55 |
| Q'16 | 31.00 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.90 | 3 | 2.6 |
| Q'17 | 31.08 | 0.95 | 0.99 | 0.98 | 0.96 | 0.91 | 2 | 3.55 |
| Q'18 | 31.04 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.93 | 3 | 4.2 |
| Q'19 | 31.00 | 0.96 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.90 | 3 | 3.05 |
| Q'20 | 25.34 | 0.91 | 0.95 | 0.95 | 0.92 | 0.80 | 1 | 2.15 |
| Q'21 | 23.60 | 0.91 | 0.96 | 0.94 | 0.86 | 0.77 | 1 | 2.55 |
| Q'22 | 20.09 | 0.91 | 0.94 | 0.93 | 0.90 | 0.74 | 1 | 2.2 |
| Q'23 | 29.95 | 0.94 | 0.98 | 0.97 | 0.95 | 0.88 | 5 | 3.6 |
| Q'24 | 29.91 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.91 | 5 | 3.8 |
| Q'25 | 29.87 | 0.94 | 0.98 | 0.97 | 0.97 | 0.87 | 1 | 2.3 |

表 5.6 は、25 枚の実験画像に関する各画質劣化評価法と MOS との相関係数を示している。この表より、提案方法と MOS との相関係数は、各画質劣化評価法と MOS との

表 5.6: MOS と各画質劣化評価法との相関係数

| wIQDA | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | DSS | HaarPSI |
|-------------|------|-------|---------|------|------|---------|
| 0.84 | 0.47 | -0.05 | 0.68 | 0.14 | 0.60 | 0.10 |

相関係数より高いことが分かる。

図 5.15 ~ 5.21 は、実験画像に関する各画質劣化評価法と MOS の散布図である。

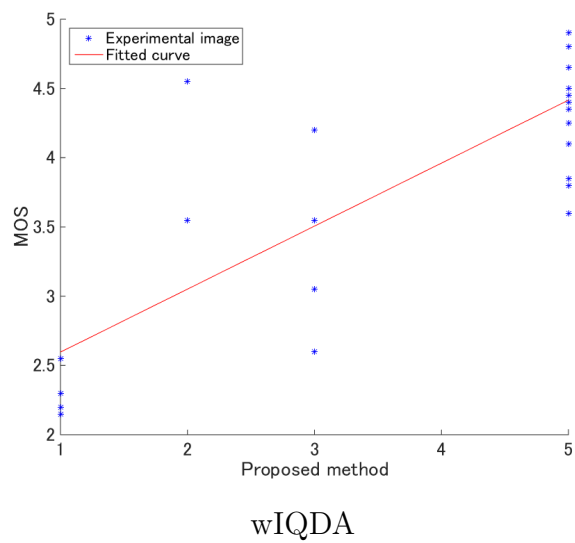


図 5.15: 実験画像における wIQDA と MOS の結果に関する散布図

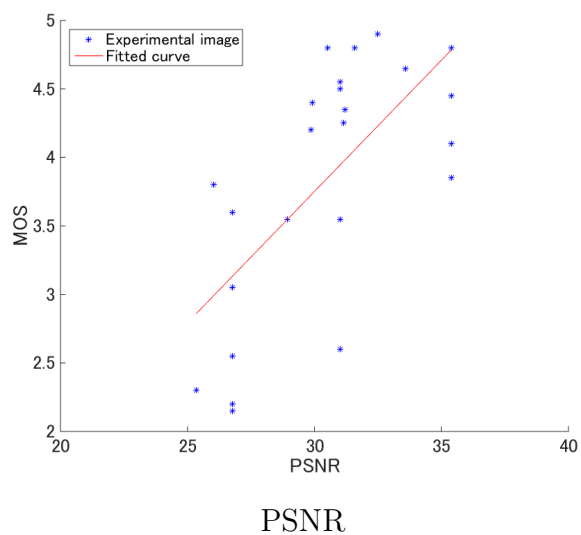


図 5.16: 実験画像における PSNR と MOS の結果に関する散布図

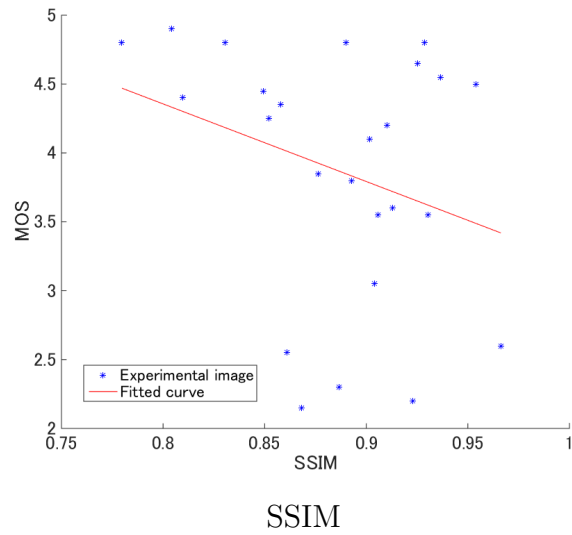


図 5.17: 実験画像における SSIM と MOS の結果に関する散布図

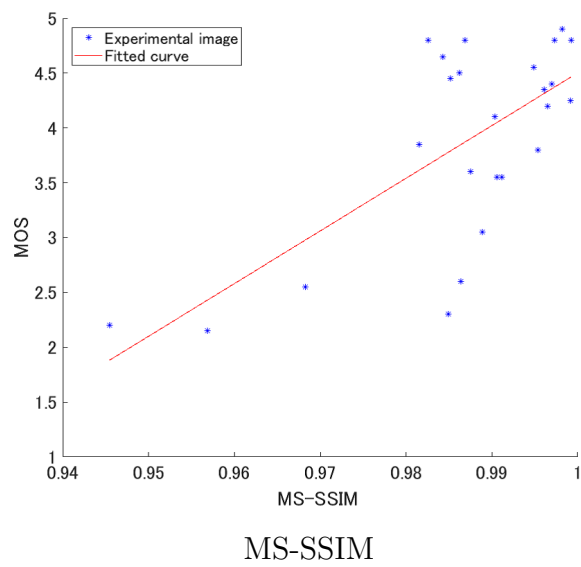


図 5.18: 実験画像における MS-SSIM と MOS の結果に関する散布図

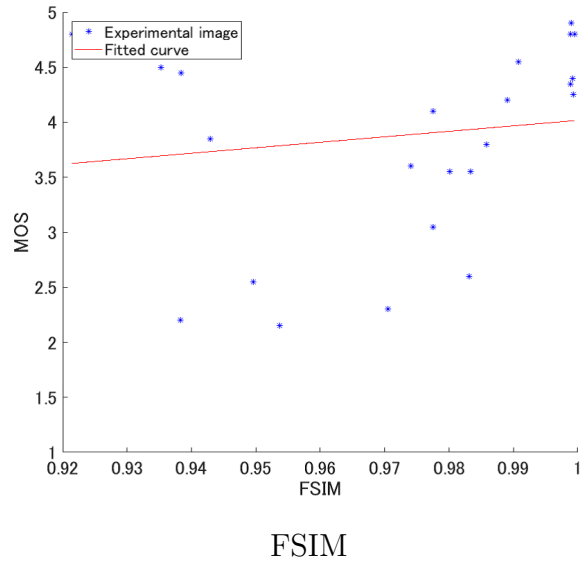


図 5.19: 実験画像における FSIM と MOS の結果に関する散布図

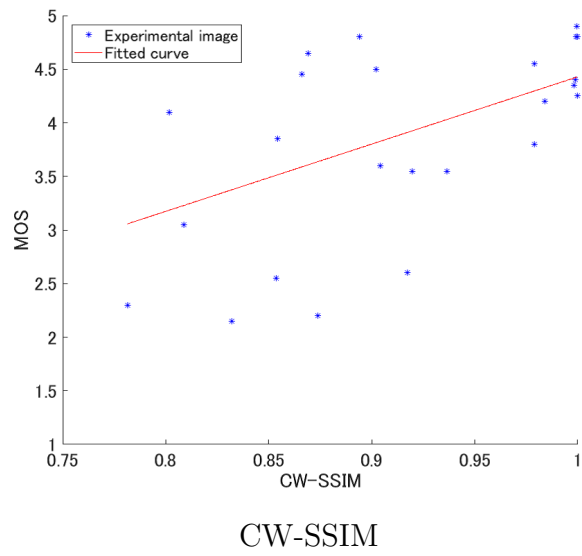


図 5.20: 実験画像における CW-SSIM と MOS の結果に関する散布図

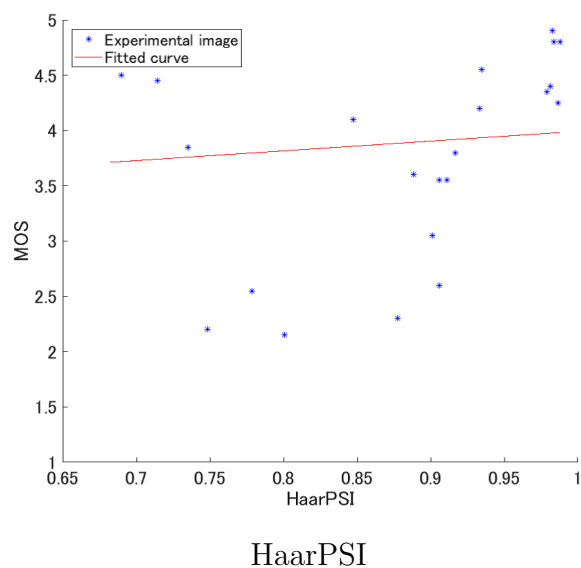


図 5.21: 実験画像における HaarPSI と MOS の結果に関する散布図

表 5.7 は、wIQDA と各画質劣化評価法を用いて、図 5.22 にある電子透かし入り画像を評価した結果を示している。この表において、劣化と判断される数値を黒い太文字で表示している。Q'1 は DCT によって生成された電子透かし入り画像であり、Q'9 は DYWT によって生成された電子透かし入り画像、Q'19 は DWT によって生成された電子透かし入り画像である。また、人間が電子透かしを認識しやすい領域をマークしている。

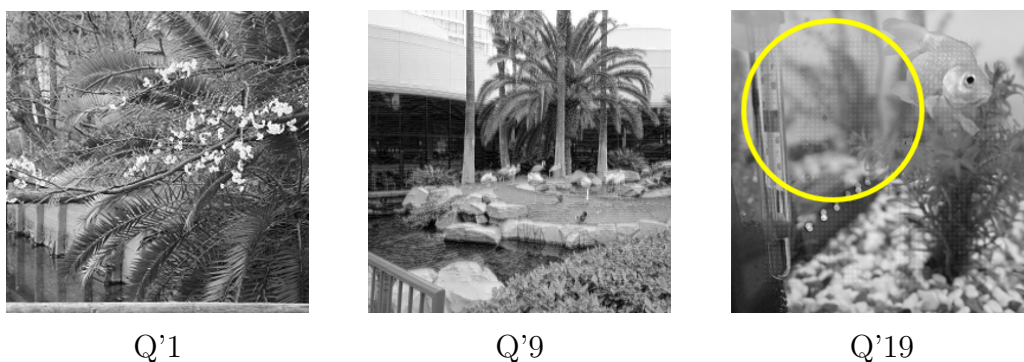


図 5.22: 実験画像の一部

表 5.7 より実験画像 Q'1 に関して、各画質劣化評価法と MOS の結果は、合っていることが分かる。PSNR, SSIM, CW-SSIM, そして、HaarPSI の結果は、実験画像 Q'9 の画質が劣化していると判断している。しかしながら、wIQDA, MS-SSIM, そして、FSIM と MOS の結果は、実験画像 Q'9 を劣化していないと判断している。したがって、実験画像 Q'9 に関して、wIQDA, MS-SSIM, FSIM は、MOS の結果と合っていることが分かる。PSNR, SSIM, MS-SSIM, FSIM, そして、HaarPSI の結果は、実験画像 Q'19 の画質が劣化していないと判断している。しかしながら、wIQDA, CW-SSIM,

表 5.7: 各画質劣化評価法を用いて図 5.22 を評価した結果

| | PSNR | SSIM | MS-SSIM | FSIM | CW-SSIM | HaarPSI | wIQDA | MOS |
|------|--------------|-------------|---------|------|-------------|-------------|----------|-------------|
| Q'1 | 35.39 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 5 | 4.8 |
| Q'9 | 26.88 | 0.89 | 0.98 | 0.93 | 0.86 | 0.71 | 5 | 4.45 |
| Q'19 | 31.00 | 0.96 | 0.98 | 0.97 | 0.80 | 0.90 | 3 | 3.05 |

そして、MOS の結果は、実験画像 Q'19 の画質が劣化していると判断している。したがって、実験画像 Q'9 に関して、wIQDA と CW-SSIM は、MOS の結果と合っていることが分かる。

5.4 まとめと今後の課題

本章では、電子透かし入り画像のための画質劣化評価法を開発した。この方法では、空間領域と周波数領域における評価指標に基づいた条件分岐によって、画質劣化を評価している。実験結果より、提案した画質劣化評価法が今回の実験で用いた既存の画質劣化評価法よりも優れていることを示した。まず、wIQDA の結果と主観評価である MOS の結果との相関係数は、既存の画質劣化評価法よりも高い。そして、既存の画質劣化評価法と MOS の結果が合わない電子透かし入り画像に対して、wIQDA は、MOS の結果と合うように評価が行えた。このことから、他の周波数変換に基づく電子透かしの埋め込み法で生成された電子透かし入り画像の画質を公正に評価する上で、DT-CDWT で得られた高周波成分が重要であることを明らかにした。また、wIQDA における BGM, FGM, SGM は、電子透かし入り画像の画質劣化を評価するために有用な指標であると結論づけることができる。

今後の課題として、カラー画像の電子透かし入り画像に関しても、画質評価が行えるように wIQDA を拡張することが挙げられる。

第6章 まとめ

6.1 結論

本研究では、Wavelet 変換に基づいた画質劣化評価法の開発を目的とした。この目的を達成するための過程として、まず最初に、画質劣化を評価するために、Wavelet 変換に基づいた指標が有用であることを確かめた。次に、Wavelet 変換に基づいた指標によって構成された画質劣化評価法を開発した。最後に、電子透かし法の性能を測るための画質劣化評価法を開発した。

第3章では、カラー画像のための画質劣化評価指標を開発した。開発した指標は、医用画像解析で用いられる指標と Wavelet 変換 (CWT, もしくは, DWT) に基づいている。実験結果より、Wavelet 変換に基づく指標は、空間領域における指標よりも、画質劣化を評価するために有用であることが分かった。さらに、CWT に基づく指標の方が、DWT に基づく指標よりも有用であることが分かった。これは、冗長な Wavelet 変換を用いることによって、画像の局所的な情報において画質評価するよりも画像全体の情報を拾って画質評価することが重要であることを意味する。しかしながら、CWT の問題点として、計算量が多いことが挙げられる。そのため、計算量を削減しつつ、CWT の性質を保つような Wavelet 変換である DT-CDWT に着目した。

第4章では、第3.1節で定義した指標と DT-CDWT に基づいた画質劣化評価法 (IQDA) を開発した。全ての画像処理に関する DMOS との一致率において、今回の実験で用いた既存の画質劣化評価法と比較したところ、IQDA は、SSIM に劣っていたが、その他の画質劣化評価法よりも優れていることが分かった。また、Wavelet ベースである CW-SSIM や HaarPSI よりも優れているため、画質劣化において DT-CDWT を用いることが有用である。各画像処理に関する DMOS との一致率において、IQDA は、ぼかし処理とコントラスト強調、そして、ごま塩ノイズの付加が施された画像の画質劣化を評価するために、有用であることが分かった。さらに、ぼかし処理においては、全ての画像処理に関する DMOS との一致率で劣っていた SSIM よりも、一致率が高かった。以上のことから、IQDA は、今回の実験で用いた既存の画質劣化評価法の中では、比較的の高い精度で主観評価と合うような評価が行えて、特に、ぼかし処理とごま塩ノイズの付加に関しては、かなり高い精度で主観評価と合う評価が行えることを示した。

第5章では、電子透かし法の性能を測ることを目的とした電子透かし入り画像のための画質劣化評価法 (wIQDA) について説明する。この方法では、空間領域と周波数領域における評価指標に基づいた条件分岐によって、画質劣化を評価している。実験結果における相関係数より、wIQDA が今回の実験で用いた既存の画質劣化評価法よりも優れていることを示した。また、既存の画質劣化評価法と MOS の結果が合わない電子透かし入り画像に対して、wIQDA は、MOS の結果と合うように評価が行えた。このことから、他の周波数変換に基づく電子透かしの埋め込み法で生成された電子透か

し入り画像の画質を公正に評価する上で、DT-CDWT で得られた高周波成分が重要であることを明らかにした。また、wIQDA における BGM, FGM, SGM は、電子透かし入り画像の画質劣化を評価するために有用な指標であると結論づけることができる。

第3～5章の実験結果から、冗長な Wavelet 変換や複数の指標を用いることが重要であることが分かる。これは、画質評価において主観評価と合うように精度を上げるためには、より多くの情報を用いて評価する必要があることを意味している。

6.2 今後の課題

前節の結論から本研究における今後の課題について述べる。

本研究で提案した IQDA では、原画像と評価画像の各指標に関する値の差を劣化具合と見なし、評価を行った。この考えによって、ぼかし処理やごま塩ノイズの付加に対しては、主観評価と合うような評価が行える。しかしながら、場合によって、各指標の単純な差では、主観評価と合うような評価が行えないこともある。例えば、本研究における色反転の場合、粒状性の値の差が限りなく0に近いため、色反転は劣化していないと判断される傾向となった。今後は、あらゆる画像処理に対応するために、各指標の単純な差を劣化具合として扱うのではなく、wIQDA のような条件分岐処理を加える必要がある。

次に、IQDA と wIQDA における各指標の基準値をヒューリスティックに決めていたが、今後は、劣化と判断されるような指標の値の分布などを解析することによって、理論づけて最適な基準値を設定したい。また、IQDA と wIQDA 共に、カラー画像にも対応できるように拡張したい。

最後に、画質劣化評価法で得られた知見から他分野への応用を検討したい。画質劣化評価法は、画質劣化を定量的かつ客観的に評価できる指標を基に開発される。つまり、目的に応じて、画像から特徴量を抽出することができるため、画像からの物体検出や認識などを行えることが考えられる。

謝辞

本論文の執筆ならびに研究活動全体を通して、温かくたくましく丁寧に、御教示、御指導を賜りました皆本晃弥教授に心より感謝致します。本研究を行うにあたり、御教示、御指導を賜りました奥村浩教授、廣友雅徳准教授、木村拓馬准教授に厚く感謝致します。また、研究の活発な意見交換の場である自主セミナーなどを通じて、多くの指導・助言して頂いた第2研究グループの先輩方・後輩の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) Recommendation P.800, <http://www.itu.int/rec/T-REC-P.800-199608-I/en>
- [2] 石田隆行, 桂川茂彦, 藤田修己: “医用画像ハンドブック”, オーム社, 2010, pp.493-531
- [3] R. C. Gonzalez and R. C. Woods , Digital Image Processing, Third Edition, Pearson Prentice Hall (2008)
- [4] MathWorks (Matlab Central Community), <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45051-color-dwt-image-watermarking>
- [5] MathWorks (Matlab Central Community), <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46866-watermark-dct>
- [6] T. Minamoto, and R. Ohura, A blind digital image watermarking method based on the dyadic wavelet transform and interval arithmetic, Appl. Math. Comput. 226(1), (2014), 306-319.
- [7] H. Omura and T. Minamoto, Image quality degradation assessment based on the dual-tree complex discrete wavelet transform for evaluating watermarked images International Journal of Wavelets, Int. J. Wavelets, Multiresolut. Inf. Process. 15(5) (2017), Article ID: 1750046, 18 pp.
- [8] T. Minamoto and H. Ohmura, Indices for image quality degradation evaluation based on wavelet transforms. Proceedings of the 2014 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Publisher: IEEE Computer Society (2014) pp.146-152
- [9] H. Omura and T. Minamoto, Image quality degradation assessment based on the dual-tree complex discrete wavelet transform for evaluating digital image watermarking. Proceedings of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Publisher: IEEE Computer Society, (2016), pp.270-275
- [10] H. Omura and T. Minamoto, Image Quality Assessment for Measuring the Degradation by Using the Dual-Tree Complex Discrete Wavelet Transform. Proceedings of the 12th International Conference on Information Technology: New Generations, Publisher: IEEE Computer Society, (2015), pp.323-328

- [11] H. Toda and Z. Zhang, Perfect translation invariance with a wide range of shapes of Hilbert transform pairs of wavelet bases, *Int. J. Wavelets, Multiresolut. Inf. Process.* 8(4), (2010), 501–520.
- [12] B. Tao and B. Dickinson, Adaptive watermarking in the DCT domain. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, (1997), pp. 2985-2988
- [13] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh and E. P. Simoncelli, Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity, *IEEE Trans. Image Proc.* 13(4), (2004), 600-612
- [14] Z. Wang, E. P. Simoncelli, and A. C. Bovik, Multiscale structural similarity for image quality assessment. *Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Publisher: IEEE Computer Society (2003), 2, pp.1398-1402
- [15] L. Zhang, L. Zhang, X. Mou and D. Zhang, FSIM: A feature similarity index for image quality assessment. *IEEE Trans. Image Proc.* 20(8), (2011), pp.2378-2386
- [16] M.P. Sampat, Z. Wang, S. Gupta, A. C. Bovik, and M. K. Markey, Complex wavelet structural similarity: A new image similarity index, *IEEE Trans. Image Proc.* 18(11), (2009), 2385-2401
- [17] R. Reisenhofer, S. Bosse, G. Kutyniok and T. Wiegand, A Haar wavelet-based perceptual similarity index for image quality assessment. *Signal Processing: Image Communication*, 61, (2018), pp.33-43
- [18] E. Dunic, S. Grgic, and M. Grgic, New image-quality measure based on wavelets, *Journal of Electronic Imaging*, 19(1), (2010), 011018, 18pages
- [19] Z. Wang and E. P. Simoncelli, Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model, *Human Vision and Electronic Imaging X*, Proc. SPIE , 5666, (2005), pp.149-159
- [20] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing* (Academic Press, 2009).
- [21] X. You, L. Du, Y. Cheung, and Q. Chen, A blind watermarking scheme using new nontensor product wavelet filter banks. *IEEE Trans. Image Proc.* 19(12), (2010) 3271-3284.
- [22] A.M. Zeki and A. A. Manaf, A novel digital watermarking technique based on ISB (Intermediate Significant Bit). *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 38, (2009) pp. 1080-1087