

卒業論文

Multiple Description 符号化を用いた
画像伝送のパケット欠落補償に関する研究

東北大学工学部 通信工学科 牧野研究室 4年

2007年3月30日

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	本論文の構成	2
第 2 章	Multiple Description 符号化	4
2.1	Multiple Description 符号化	4
2.2	相関変換法	5
2.3	符号化手順	6
2.3.1	基本画像符号化	7
2.3.2	Multiple Description 符号化	8
2.4	復号化手順	10
2.4.1	Multiple Description 復号化	10
2.4.2	基本画像復号化	11
第 3 章	相関変換法	13
3.1	相関変換行列	13
3.2	欠落パケットの予測	14
3.3	冗長情報の容量	14
第 4 章	評価実験	16
4.1	評価方法	16
4.2	実験	17
4.2.1	冗長性と無欠落時の評価	17
4.2.2	欠落補償の効果	20
4.3	検討	21

4.3.1	相関変換行列の改善	24
4.3.2	整数 DCT	26
第 5 章	結論	30
5.1	結論	30
5.2	課題	30
謝辞		32
参考文献		33

目次

2.1	分割パケット x_1, x_2 の相関変換	5
2.2	相関変換法による Multiple Description 符号化の手順	6
2.3	DCT 係数の分割	9
2.4	符号化手順	9
2.5	分割パケットの結合	11
2.6	相関変換法による Multiple Description 復号化の手順	11
2.7	復号化手順	12
4.1	Multiple Description 符号化の有無によるビットレートと PSNR の関係	18
4.2	Multiple Description 符号化無し	19
4.3	Multiple Description 符号化有り	19
4.4	Multiple Description 符号化による欠落補償	21
4.5	Multiple Description 符号化無し + 欠落無し	22
4.6	Multiple Description 符号化無し + 欠落有り (50%)	22
4.7	Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_0)	23
4.8	Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_1)	23
4.9	Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_2)	24
4.10	θ とビットレートおよび PSNR の関係	25
4.11	D_0, D_1, D_2 のビットレートと PSNR の関係	26
4.12	$D_0, \theta = 12.0$	27
4.13	$D_1, \theta = 12.0$	27
4.14	$D_2, \theta = 12.0$	28
4.15	DCT の違いによる D_0, D_1, D_2 のビットレートと PSNR の関係	29

表目次

2.1	RGB から YCbCr への変換	7
2.2	YCbCr から RGB への変換	12
3.1	冗長情報に割り振るビット数	15
3.2	Lena 画像を処理した場合の冗長情報容量	15
4.1	実験条件	18
4.2	実験条件	20
4.3	実験条件	26
4.4	実験条件	29

第 1 章

序論

1.1 背景

近年発展が激しいインターネットの世界において、画像を伝送することは日常茶飯事であり、またそれと共に様々な画像符号化法と通信符号化法が考案されてきた。一般的に、画像を符号化して伝送する際に重要とされる点としては次のような点を挙げる事ができる。

- 受信側で復号化した画像が十分に綺麗である事。
- 画像伝送に必要な通信容量が少ない事。
- 伝送途中にエラーがあった場合に受信側で対処して復号化できる事。

数ある画像符号化法は、複合化した画像の綺麗さと伝送に必要な通信容量の大きさはトレードオフの関係にあるのが普通で、そのバランスが比較的優れている JPEG 方式が一般的によく使われている。しかし、JPEG 方式には伝送途中に発生し得るエラーに受信側で対処できる仕組みが無い。それにも関わらずインターネット等を介した画像伝送において画素の抜け落ちが無く復号化できているのは画像符号化法とは別の通信符号化法、特に TCP/IP 等の技術に含まれているエラー訂正やパケット再送の仕組みを利用しているためである。しかし TCP/IP のように、パケット伝送途中に発生したエラーによりパケットが欠落してしまった場合に欠落パケットの再送を送信側にリクエストする方式を取っていると、余分なパケット伝送が発生するため画像伝送に遅延が生じる原因となる。

そこで本研究では，パケット伝送途中に発生したエラーによって欠落パケットが生じた場合に，予測と補完によって受信側で対処する Multiple Description 符号化 [1] を画像符号化法に適用した場合の効果について研究を行う．Multiple Description 符号化を用いると，伝送途中に欠落パケットが発生した場合，受信側で欠落パケットに対して予測と補完を行う事ができるため，送信側に再送をリクエストする必要がなくなり遅延の解消に繋げることができる．また，UDP 等のエラー訂正やパケット再送の仕組みがない通信符号化を介して画像を伝送しなければならない場合でも，従来より高品質な画像の伝送が可能となる．動画のストリーミング配信に応用すれば，現在よりもより高品質な動画を配信できるようになると考えられる．

1.2 目的

本研究では，Multiple Description 符号化を画像符号化法に適用する事により，画像伝送途中に欠落パケットが発生した場合の復号画像の品質改善を目的とする．これにより通信環境が劣悪な環境でも従来より高品質な画像を復号可能となる．

また，Multiple Description 符号化には欠落パケットの予測のために，一般的な画像符号化に加えて多少の冗長情報を付与する必要があるが生じる必要がある [2]．これら冗長情報の大きさは Multiple Description 符号化の手法により異なるが，いずれの場合でも可能な限り容量が少ない方が望ましいと言える．そこで本研究では冗長情報の容量についての検討も行う．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである．

第 1 章 序論

本研究の背景，目的および本論文の構成について述べる．

第 2 章 Multiple Description 符号化

まず，Multiple Description 符号化の意義とその手法について述べる．次に，Multiple Description 符号化を画像符号化に適用するに当たり，本研究で用いた基本となる画像符号化と Multiple Description 符号化の具体的な符号化，復号化手法とその手順について述べる．

第 3 章 相関変換法

本研究で用いる Multiple Description 符号化の相関変換法について述べる。また、欠落パケットが発生した場合に Multiple Description 符号化を利用して予測補完する手法についても述べる。さらに、Multiple Description 符号化により付与される冗長情報の容量についての検討を行う。

第 4 章 評価実験

Multiple Description 符号化を画像符号化法に適用した場合の効果について評価実験を行い、その結果と考察を述べる。また、改善のためにいくつかの検討を行い、その結果も述べる。

第 5 章 結論

本研究により得られた結果をまとめて結論を述べ、課題についても述べる。

第 2 章

Multiple Description 符号化

2.1 Multiple Description 符号化

Multiple Description 符号化とは、通常の符号化法で得られる 1 つのパケットを 2 つ以上のパケットに分割する符号化である。Multiple Description 符号化より分割された 2 つ以上のパケットは、受信側で全てを受信できた場合はもちろん、最低 1 つのパケットさえ受信できればそこから残りの受信できなかったパケットを予測して元に近いデータを復号化できる事が Multiple Description 符号化の最大の特徴である。また、Multiple Description 符号化は符号化済みのデータに対して予測のための冗長情報を付与してパケット分割を行うものであり自身に符号化の仕組みは無いため、画像符号化法以外にも様々な符号化に対して適用可能である。本研究では Multiple Description 符号化を画像符号化法に適用するために、多くの画像符号化で一般的な DCT 係数に適用する形を取っている。

Multiple Description 符号化には手法の違いによりいくつかの種類がある。代表的なものを挙げると次のようになる。

- スカラ量子化法
- ラティスベクトル量子化法
- 相関変換 (Correlating Transform) 法

本研究ではこれらの中から相関変換法について検討を行う。

2.2 相関変換法

相関変換法による Multiple Description 符号化では、まず適当な符号化により得られた1つのパケットから成るデータを次の2つの条件を満足するよう分割して分割パケット x_1, x_2 を得る。分割数は2つ以上なら制限は無いが、本研究では2つとしている。

1. x_1 と x_2 は独立した0平均のガウス分布。
2. $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$

ここで σ_1^2, σ_2^2 は x_1, x_2 の分散である。 x_1, x_2 は独立している必要があるため、画像符号化に適用する場合、通常は離散コサイン変換やカルーネン・レーベ変換により得られる係数が用いられる事が多い。また、この条件を満足して得られた x_1, x_2 は予め一樣な値で量子化されている必要がある。

次に、 x_1, x_2 に対して (2.1) 式に示すように 2×2 行列 T による演算を行い、Multiple Description パケット y_1, y_2 を得る。この行列 T による行列演算が相関変換と呼ばれ、無相関関係にある x_1, x_2 に対して任意の相関関係を持たせるものである。つまり、この行列 T は Multiple Description パケット y_1, y_2 の間の相関関係を制御する事ができる。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

行列 T による相関変換を幾何的に示すと図 2.1 のようになり、 x_1, x_2 座標空間にある分割パケットを回転させて y_1, y_2 座標空間へと写像する事を意味する。行列 T は直交行列

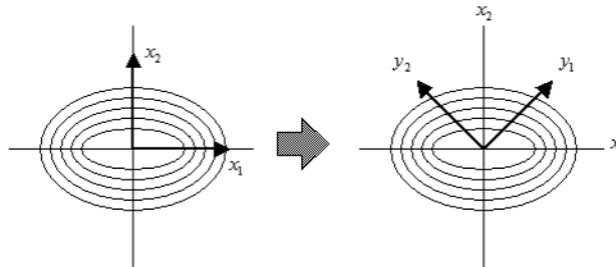


図 2.1: 分割パケット x_1, x_2 の相関変換

である必要は無いが、逆変換のために行列式を持つ必要があり、かつ1でなければならない。また、行列 T は相関変換後の Multiple Description パケットの分布範囲も変える事ができるため、Multiple Description 符号化で付与される冗長情報の大きさの制御も行え

る．相関変換法による Multiple Description 符号化の場合は，この行列 T の取り方が重要であり，様々な手法が提案されている．

ただし，相関変換による歪を最小限に抑えるため，行列 T を介した変換，逆変換は整数から整数へを行い，誤差の発生をできるだけ抑える必要がある．そのため，行列 T が

$$T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad \det T = 1 \quad (2.2)$$

であるとするとき，

$$T = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & (a-1)/c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & (d-1)/c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

のような上三角行列と下三角行列の積 $T_1 T_2 T_3$ に変形し，

$$\hat{T}(x) = [T_1 [T_2 [T_3 x]_{\Delta}]_{\Delta}]_{\Delta} \quad (2.4)$$

となる離散版相関変換行列 \hat{T} を用いる [5]．先の行列 T は連続版相関変換行列と呼ばれる．ここで $[\cdot]_{\Delta}$ は丸め込みと量子化を意味する．ただし，ここでの量子化は小数点以下を切り捨てる離散化の意味であり，JPEG 方式で用いられる量子化の意味ではない．

最後に Multiple Description パケット y_1, y_2 に対してエントロピー符号化^{*1}を行い，それぞれ独立に伝送する．

以上の手順を図にまとめると図 2.2 のようになる．



図 2.2: 相関変換法による Multiple Description 符号化の手順

2.3 符号化手順

本研究では相関変換法による Multiple Description 符号化を画像符号化に適用するために，入力画像に対し JPEG 方式と類似の画像符号化（以下，基本画像符号化）を行った後に相関変換法による Multiple Description 符号化を行う方式を取った．

^{*1} 本研究では zlib を利用した． (<http://zlib.net/>)

2.3.1 基本画像符号化

基本画像符号化では，まず 8bit フルスケール RGB データで記録されている入力画像を読み込み，YCbCr データに変換を行う．RGB→YCbCr への変換は ITU-R BT.601 で規定されている変換式 [6] を YC 伸張して，輝度信号の値域を符号無しから符号付きへ変換した (2.5) 式を用いている．

$$\begin{aligned} Y &= 0.29891R + 0.58661G + 0.11448B - 127 \\ Cb &= -0.16874R - 0.33126G + 0.50000B \\ Cr &= 0.50000R - 0.41869G - 0.08131B \end{aligned} \quad (2.5)$$

これにより 8bit フルスケール RGB データは表 2.1 に示すように符号付 8bit フルスケール YCbCr データへ変換される．

表 2.1: RGB から YCbCr への変換

	RGB			YCbCr		
	R	G	B	Y	Cb	Cr
下限	0	0	0	-128	-128	-128
上限	255	255	255	127	127	127

次に，得られた YCbCr データについて各々を 8×8 画素でブロックに区切り，ブロック毎に (2.6) 式に示す離散コサイン変換 (DCT) を行う．

$$X_b(u, v) = \frac{1}{4}C(u)C(v) \left[\sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^7 x_b(i, j) \cos \frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2j+1)v\pi}{16} \right] \quad (2.6)$$

ただし

$$C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (u = 0) \\ 1 & (u \neq 0) \end{cases}, C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (v = 0) \\ 1 & (v \neq 0) \end{cases} \quad (2.7)$$

ここで $x_b(i, j)$ は Y, Cb, Cr の b 番目のブロックにおける i 行 j 列目の画素値を示し， $X_b(u, v)$ は Y, Cb, Cr の b 番目のブロックにおける u 行 v 列目の DCT 係数を示す．本研究では，DCT の計算に Ooura's Mathematical Software Packages^{*2}を用いた．

^{*2} 京都大学数理研究所助手 大浦拓哉先生 (<http://momonga.t.u-tokyo.ac.jp/~ooura/>)

2.3.2 Multiple Description 符号化

相関変換による Multiple Description 符号化では Y,Cb,Cr 各々について全ての処理をブロック単位で行う．まず，DCT 係数に対して量子化を行う．量子化は基本画像符号化の DCT により得られた全ての DCT 係数 X_b に対して一様の値 Q を (2.8) 式に示す演算を行い，量子化された DCT 係数 \overline{X}_b を得る．

$$\overline{X}_b = \left[\frac{X_b}{Q} \right] \quad (2.8)$$

ここで $[\cdot]$ は小数点以下の丸め込みを意味する．

次に，基本画像符号化で得られた DCT 係数 \overline{X}_b について (2.9) 式に示すように 1 ブロック当たり 64 個の DCT 係数について全ブロックの平均 m_n を求める．

$$m_n = \frac{\sum_{b=0}^{N-1} \overline{X}_b(u, v)}{N} \quad (n = 0, \dots, 63) \quad (2.9)$$

ただし u は $n/8$ の商， v はその剰余である．また， N は入力画像の全ブロック数を示し，入力画像の幅 (width) と高さ (height) に対して (2.10) 式で与えられる．

$$N = \frac{width \times height}{8 \times 8} \quad (2.10)$$

本研究では評価用の入力画像として標準画像の Lena 画像 (512×512) を用いるため N は整数となるが，入力画像によっては整数とならない場合がある．その場合，本研究では簡単のために小数点以下を切り捨てるようにしている．

次に，(2.11) 式に示すように 1 ブロック当たり 64 個の DCT 係数について全ブロックの分散 σ_n^2 を求める．

$$\sigma_n^2 = \frac{\sum_{b=0}^{N-1} (\overline{X}_b(u, v) - m_n)^2}{N} \quad (n = 0, \dots, 63) \quad (2.11)$$

ただし u は $n/8$ の商， v はその剰余である．

次に，(2.12) 式に示すように \overline{X}_b から得られた m_n を引き， \overline{X}_b' を得る．

$$\overline{X}_b'(u, v) = \overline{X}_b(u, v) - m_n \quad (u, v = 0, \dots, 7 \quad b = 0, \dots, N-1) \quad (2.12)$$

この結果を得られた $\overline{X}_b'(u, v)$ は平均するとほぼ 0 になり，(2.1) 式の x_1, x_2 の条件の一つを満足する．

次に，(2.11) 式で得られた 64 個の分散 σ_n^2 を降順にソートし，その並び替え順と同じにブロック内の $\overline{X}_b'(u, v)$ も並べ替える．本研究では分散のソートにコムソートを用いた．並び替えられたブロック内の $\overline{X}_b'(u, v)$ について，図 2.3 のように分割を行い，分割パケット p_1, p_2 を得る．これにより得られた分割パケット p_1, p_2 は (2.1) 式の x_1, x_2 のも



図 2.3: DCT 係数の分割

う一つの条件を満足する．

次に，分割パケット p_1, p_2 に対して (2.13) 式に示すように行列 \hat{T} による相関変換を行い，Multiple Description パケット md_1, md_2 を得る．

$$\begin{bmatrix} md_1 \\ md_2 \end{bmatrix} = \hat{T} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

最後に Multiple Description パケット md_1, md_2 に対してエントロピー符号化を行い，それぞれ独立に伝送する．

以上の手順を図にをまとめると図 2.4 のようになる．なお，図中の Multiple Description 符号化部分は図 2.2 をまとめたものである．

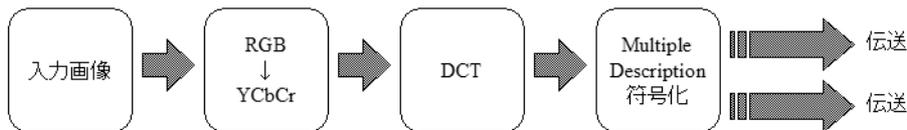


図 2.4: 符号化手順

2.4 復号化手順

復号化では，まず Multiple Description パケットを Multiple Description 符号化と逆の手順を踏んで復号化して 1 つのパケットを得た後に，基本画像符号化と逆の手順を踏んで復号画像を得る．

2.4.1 Multiple Description 復号化

Multiple Description 符号化では，まず受信した 2 つの Multiple Description パケット $\hat{m}d_1, \hat{m}d_2$ に対し，(2.14) 式に示す \hat{T}^{-1} を (2.15) 式に示すように行列演算する事により相関変換する前の分割パケット \hat{p}_1, \hat{p}_2 を得る．

$$\hat{T}^{-1}(x) = [T_3^{-1}[T_2^{-1}[T_1^{-1}x]_{\Delta}]_{\Delta}]_{\Delta} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \end{bmatrix} = \hat{T}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{m}d_1 \\ \hat{m}d_2 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ただし，伝送途中に 2 つの Multiple Description パケットの内，どちらか片方が欠落してしまった場合は欠落しなかったパケットからもう片方のパケットを予測する必要がある．欠落パケットの予測は，相関変換により 2 つの Multiple Description パケットに相関関係を持たせた事を利用して行う．具体的な予測法は (2.1) 式の相関変換行列 T により異なる．

次に，得られた分割パケット \hat{p}_1, \hat{p}_2 に対して図 2.5 に示すように結合を行い，分散の大きさを降順に並び替え済みの量子化された DCT 係数 $\widehat{X}_b(u, v)$ を得る．

次に，(2.11) 式で得られた 64 個の分散 σ_n^2 を基に降順に並び替えられている DCT 係数 $\widehat{X}_b(u, v)$ を元の順番に戻す．この作業のために Multiple Description パケットを伝送する際には降順で並び替えた時の順番を記憶したデータも同時に送る必要がある．

次に，(2.1) 式の x_1, x_2 の条件である 0 平均のガウス分布とするために (2.12) 式で引いていた m_n を (2.16) 式に示すように加算する．

$$\widehat{X}_b(u, v) = \widehat{X}_b(u, v) + m_n \quad (u, v = 0, \dots, 7 \quad n = 0, \dots, N - 1) \quad (2.16)$$

最後に，量子化された DCT 係数 \widehat{X}_b について (2.17) 式に示すように逆量子化を行い， \hat{X}_b を得る．

$$\hat{X}_b = \widehat{X}_b Q \quad (2.17)$$

以上の手順を図にをまとめると図 2.6 のようになる．



図 2.5: 分割パケットの結合

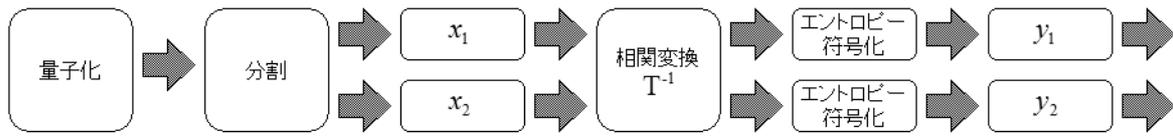


図 2.6: 相関変換法による Multiple Description 復号化の手順

2.4.2 基本画像復号化

基本画像符号化では，Multiple Description 復号化で得られた DCT 係数 \hat{X}_b に対して (2.18) 式に示す逆離散コサイン変換 (IDCT) をブロック毎に行い，YCbCr データを得る．

$$\hat{x}_b(i, j) = \sum_{u=0}^7 \frac{C(u)}{2} \sum_{v=0}^7 \frac{C(v)}{2} \hat{X}_b(u, v) \left[\cos \frac{(2i+1)u\pi}{16} \cos \frac{(2j+1)v\pi}{16} \right] \quad (2.18)$$

ただし

$$C(u) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (u = 0) \\ 1 & (u \neq 0) \end{cases}, C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & (v = 0) \\ 1 & (v \neq 0) \end{cases} \quad (2.19)$$

次に，YCbCr データを (2.20) 式を用いて YCbCr \rightarrow RGB へと変換を行う．

$$\begin{aligned} R &= 1.00000(Y + 127) + 1.40200Cr \\ G &= 1.00000(Y + 127) - 0.34414Cb + 0.71414Cr \\ B &= 1.00000(Y + 127) - 1.77200Cb \end{aligned} \quad (2.20)$$

これにより符号付 8bit フルスケール YCbCr データは表 2.2 に示すように 8bit フルスケール RGB へ変換される。ただし、量子化誤差や Multiple Description 符号化の欠落パ

表 2.2: YCbCr から RGB への変換

	YCbCr			RGB		
	Y	Cb	Cr	R	G	B
下限	-128	-128	-128	0	0	0
上限	127	127	127	255	255	255

ケット予測誤差により (2.20) 式の演算途中で 0 ~ 255 をオーバーフローまたはアンダーフローする可能性があるため、丸め込む処理が必要となる。

以上により復号画像が得られる。手順を図にまとめると図 2.7 のようになる。

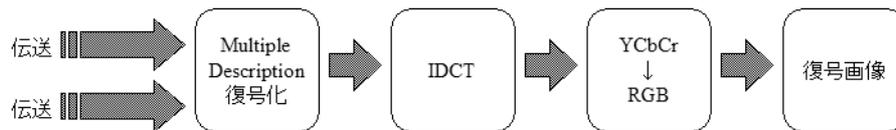


図 2.7: 復号化手順

第 3 章

相関変換法

3.1 相関変換行列

本研究では相関変換行列として (3.1) 式に示す行列式 T を用いる。この行列式 T は、欠落発生時の復号画像の歪を低くすると共に、Multiple Description 符号化により付与される冗長情報の容量も抑えたもの [5] であり、バランスが取れた優れた相関変換行列の一つとされている。

$$T = \begin{bmatrix} \theta & (2\theta)^{-1} \\ -\theta & (2\theta)^{-1} \end{bmatrix} \quad \theta \text{は非零の任意の整数} \quad (3.1)$$

θ は相関変換で分割パケット x_1, x_2 間に与える相関関係の強さを制御するファクターであり、欠落発生時の復号画像の歪に影響を与えると共に、相関変換によって付与される冗長情報の容量にも影響を与える。

本研究では、まず例として $\theta = 6/5$ とする。この場合、(3.1) 式は (3.2) 式に示すような上三角行列と下三角行列の積に変形する事ができ、(3.3) 式に示す離散版相関変換行列 \hat{T} が得られる。

$$T = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1/6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -6/5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 35/72 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\hat{T}(x) = [T_1 [T_2 [T_3 x]_{\Delta}]_{\Delta}]_{\Delta} \quad (3.3)$$

θ の値に対する検討については、評価実験の中で行う。

3.2 欠落パケットの予測

Multiple Description パケットの伝送途中で欠落が発生した場合は、受信側で欠落した Multiple Description パケットを予測し補完する必要がある。

本研究で用いる (3.1) 式の相関変換行列 T を用いる場合、(3.4) 式、(3.5) 式に示す線形の予測式 [5] を用いて欠落パケットの補完を行う。量子化（離散化）は無視されている。

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \frac{2\theta}{4\theta^4\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \begin{bmatrix} 2\theta^2\sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \end{bmatrix} md_1 \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \frac{2\theta}{4\theta^4\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \begin{bmatrix} -2\theta^2\sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \end{bmatrix} md_2 \quad (3.5)$$

ここで σ_1^2, σ_2^2 はそれぞれ x_1, x_2 の分散である。この予測のために、Multiple Description パケットを伝送する際には (2.11) 式で得た全ブロックの分散も冗長情報として伝送する必要がある。

この予測式は受信側で正しく受信できた片方の Multiple Description パケットから、欠落の有無に関わらず 2 つのパケット両方を予測して補完するものである。このため、正しく受信できた方の Multiple Description パケットは捨てて予測補完により得られた値を利用する。また、この予測式を用いると正しく受信できた Multiple Description パケットから直接 2 つの分割パケットの値を予測する事ができるため、得られた値に対して (2.14) 式に示す逆相関変換を行う必要はない。

3.3 冗長情報の容量

本研究の相関変換法を用いた Multiple Description 符号化の場合、Multiple Description 符号化自体によって Multiple Description パケットに付与される冗長情報以外に、復号化と欠落パケットの予測補完のために必要な冗長情報も合わせて送る必要がある。

Multiple Description パケットに付与される冗長情報の容量は相関変換行列 (3.1) 式の θ により制御する事ができる。一方、復号化と欠落パケットの予測補完のために付与して伝送する必要がある冗長情報は本研究では次の 3 つである。

- 復号化過程の (2.16) 式で利用される平均値 m_n
- 復号化過程で並び替えを戻すために利用される並び順情報
- 欠落パケット予測で利用される分散値 σ_n^2

これらは、ブロック毎に処理を行う Multiple Description 復号化と欠落パケットの予測補完の過程において不変であり、各々 64 個のデータから成る。ゆえにこれらの冗長情報の容量は予め最小値にしておくが良い。

冗長情報の容量は、プログラム内で各々の冗長情報に割り振るビット数に大きく影響を受けるため、本研究では Multiple Description 復号化と欠落パケットの予測補完に影響が無い範囲の最小ビット数として表 3.1 に示すように割り振っている。ただし、これらの冗

表 3.1: 冗長情報に割り振るビット数

冗長情報	ビット数	数
平均値	符号付き 16bit 整数	64
分散値	符号付き 32bit 浮動小数	64
並び順情報	符号無し 8bit 整数	64

長情報は Y , C_b , C_r の各々について必要であるため、実際の容量はこれに 3 倍される。本研究では、これらの冗長情報をさらに削減するために、Multiple Description パケット伝送の際には zlib を用いて圧縮を行っている。

以上の条件で Lena 画像を処理したところ、冗長情報容量は表 3.2 のようになった。本

表 3.2: Lena 画像を処理した場合の冗長情報容量

	圧縮前	圧縮後
冗長情報サイズ	1344Byte	875Byte

研究ではこの冗長情報を Multiple Description パケットの伝送開始前にヘッダ情報として伝送するようにしている。

第 4 章

評価実験

4.1 評価方法

本研究では，相関変換による Multiple Description 符号化の評価として PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) による客観的評価を用いた．PSNR とは，画像符号化などの際に一般的に用いられる客観評価基準であり，(4.1) 式，(4.2) 式によって求められ，単位は dB で表される．

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{\text{全画素}} (\text{処理前画素値} - \text{処理後画素値})^2}{\text{画素数}} \quad (4.1)$$

$$\text{PSNR [dB]} = 10 \log_{10} \frac{\text{maxval}^2}{\text{MSE}} \quad (4.2)$$

ここで MSE は平均二乗誤差を示し，*maxval* は各画素が取り得る値の最大値である．本研究では，PSNR 算出に用いる画素値は処理前，処理後共に 8bit フルスケール RGB に対して行っている．ゆえに *maxval* = 255 である．

ただし，(4.1) 式，(4.2) 式によって求められる PSNR は RGB それぞれの色についての PSNR であり，カラー画像としての PSNR ではない．そこで本研究では，(4.3) 式，(4.4) 式に示すように拡張することによりカラー画像の PSNR を算出している．

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{\text{全画素}} ((A_r - B_r)^2 + (A_g - B_g)^2 + (A_b - B_b)^2)}{\text{画素数}} \quad (4.3)$$

$$\text{ColorPSNR [dB]} = 10 \log_{10} \frac{3 \times \text{maxval}^2}{\text{MSE}} \quad (4.4)$$

ここで, A_r は R 色における処理前画素値, B_r は R 色における処理後画素値である. G 色, B 色についても同様である.

PSNR は数値が高いほど処理前後の画像における差異が少ないという事であり, 全く等しい場合は無限大である. 一般的に 40dB を超えると人間の視覚ではその差異が知覚できず, 逆に 30dB 以下になると劣化が目立つようになると言われている. PSNR は特にビットレートに対して顕著に変化が現れ, また実際の利用環境においては通信容量の観点からビットレートが重視されるため, 本研究ではビットレートと PSNR の関係で主に評価を行っている. ビットレートの算出は (4.5) 式に示すとおりである.

$$\text{bitrate [bpp]} = \frac{\text{width} \times \text{height}}{\text{datasize} \times 8} \quad (4.5)$$

ここで width は入力画像の横幅, height は縦幅, datasize は Multiple Description パケットのサイズ (Byte) を示す.

4.2 実験

4.2.1 冗長性と無欠落時の評価

Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する事で付与される冗長情報によって, 画像全体のビットレートが大幅に増加してしまう場合, 欠落パケット発生時の復号画像品質が向上するとはいえあまり望ましいとは言えない. また, Multiple Description 符号化自体による演算誤差の影響により, Multiple Description 符号化の効果が無い, 欠落パケット非発生時における復号画像の品質が基本画像符号化のみの場合の復号画像の品質と比べて低下する可能性がある.

本研究では, Multiple Description 符号化を行わない場合 (基本画像符号化のみ) と Multiple Description 符号化を行い, 欠落パケット非発生時の 2 つを比較対象とし, ビットレートと PSNR の関係を見ることでこれらの点についての評価を行った. ビットレートの制御は (2.8) 式, (2.17) 式の Q の値を変化させる事で行っている. なお, Multiple Description 符号化を行い, 欠落パケット非発生時の状態を本研究では D_0 と呼ぶ. その他の実験条件は表 4.1 に示すとおりである.

実験結果を図 4.1 に示す. 図 4.1 中の Baseline は Multiple Description 符号化を行わない場合の変化を意味する. 図 4.1 を見ると, Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する事により, 演算誤差と冗長情報の増加によるビットレートの増加のために PSNR の全体的な低下が認められる. しかしながら, 同ビットレートで見るとその差は 1

表 4.1: 実験条件

処理画像	カラー Lena 画像
色深度	RGB 24bit
解像度	512pixel × 512pixel
比較対象	Multiple Description 符号化無し Multiple Description 符号化有り (D_0)

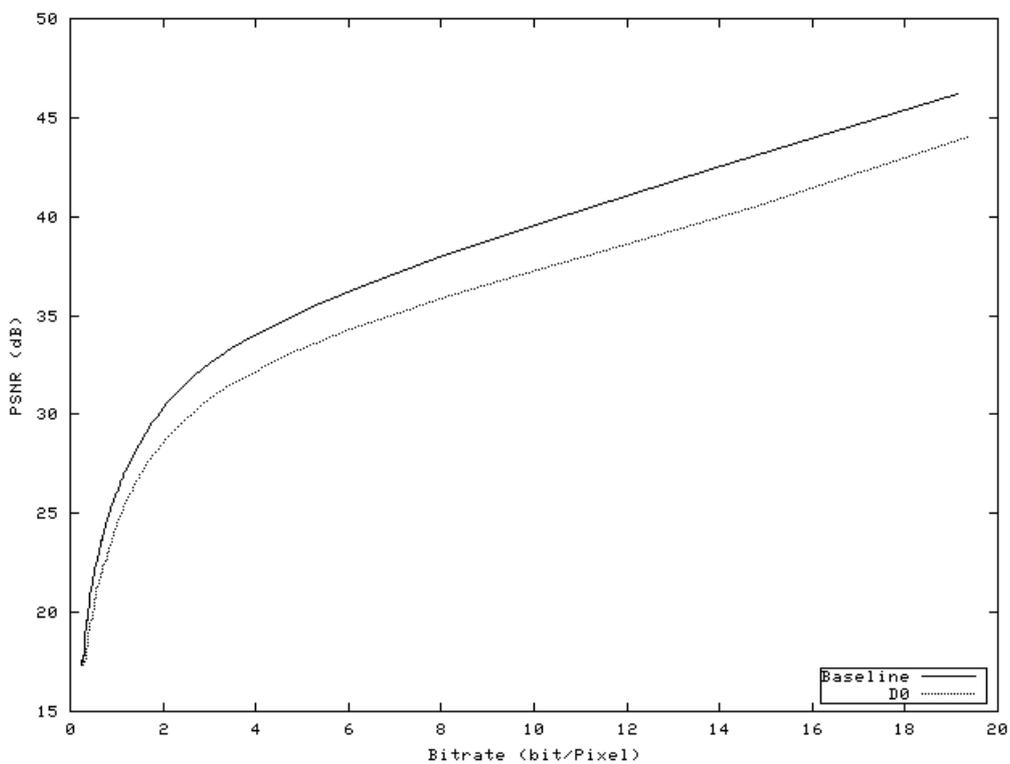


図 4.1: Multiple Description 符号化の有無によるビットレートと PSNR の関係

~2dB 程度であり，実用上は十分な PSNR を確保できている事から許容範囲ではないかと考えられる．

実際に Lena 画像を処理したものを図 4.2，図 4.3 に示す．量子化の値 Q を 4.0 とし，Multiple Description 符号化を行わないものと Multiple Description 符号化を行ったものである．ビットレートの増加がやや大きい PSNR の差は小さく，目立った劣化は知覚できない．



図 4.2: Multiple Description 符号化無し
(37.947240dB, 7.956238bpp)

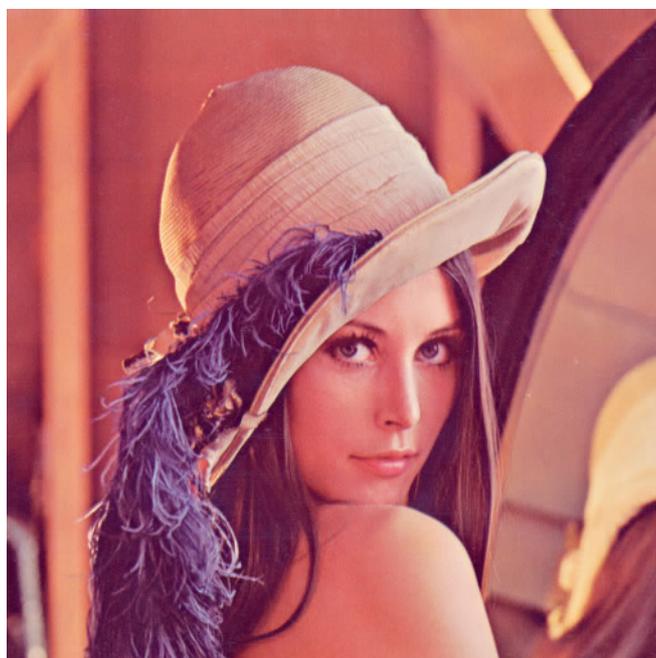


図 4.3: Multiple Description 符号化有り
(37.075668dB, 9.711243bpp)

4.2.2 欠落補償の効果

Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する事により，Multiple Description パケットの伝送途中に欠落が発生した場合に，受信側で欠落パケットを予測補完することによりどの程度復号画像の PSNR が改善されるか評価を行う．欠落パケットの予測補完による復号画像品質が欠落パケット非発生時の品質に近いものであるほど望ましいと言える．

本研究では，欠落パケット非発生時と発生時の各々について Multiple Description 符号化の有無を比較対象とし，ビットレートと PSNR の関係を見ることで Multiple Description 符号化による欠落補償の効果についての評価を行った．ビットレートの制御は (2.8) 式，(2.17) 式の Q の値を変化させる事で行っている．なお，本研究では Multiple Description 符号化を行い，2 つの Multiple Description パケットの 1 つ目が欠落した状態を D_1 ，2 つ目が欠落した状態を D_2 と呼ぶ．Multiple Description パケットの欠落発生には片方の全パケットデータを 0 に置き換える方法を取った．Multiple Description 符号化無しの場合の欠落パケットの発生には，ランダムで Y, Cb, Cr の各々の全パケットの 50% のデータを 0 に置き換える方法を取った．その他の実験条件は表 4.2 に示すとおりである．

表 4.2: 実験条件

処理画像	カラー Lena 画像
色深度	RGB 24bit
解像度	512pixel × 512pixel
比較対象	Multiple Description 符号化無し + 欠落無し Multiple Description 符号化無し + 欠落有り (50%) Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_0) Multiple Description 符号化有り + 欠落有り (D_1) Multiple Description 符号化有り + 欠落有り (D_2)

結果を図 4.4 に示す．図 4.4 を見ると，Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する事により，欠落パケット発生時の復号画像品質が Multiple Description 符号化無しの場合と比べて大幅に向上している事が認められる．Multiple Description 符号化無しの場合はビットレートを増加させても PSNR が約 13.0dB で飽和傾向を示しているが，

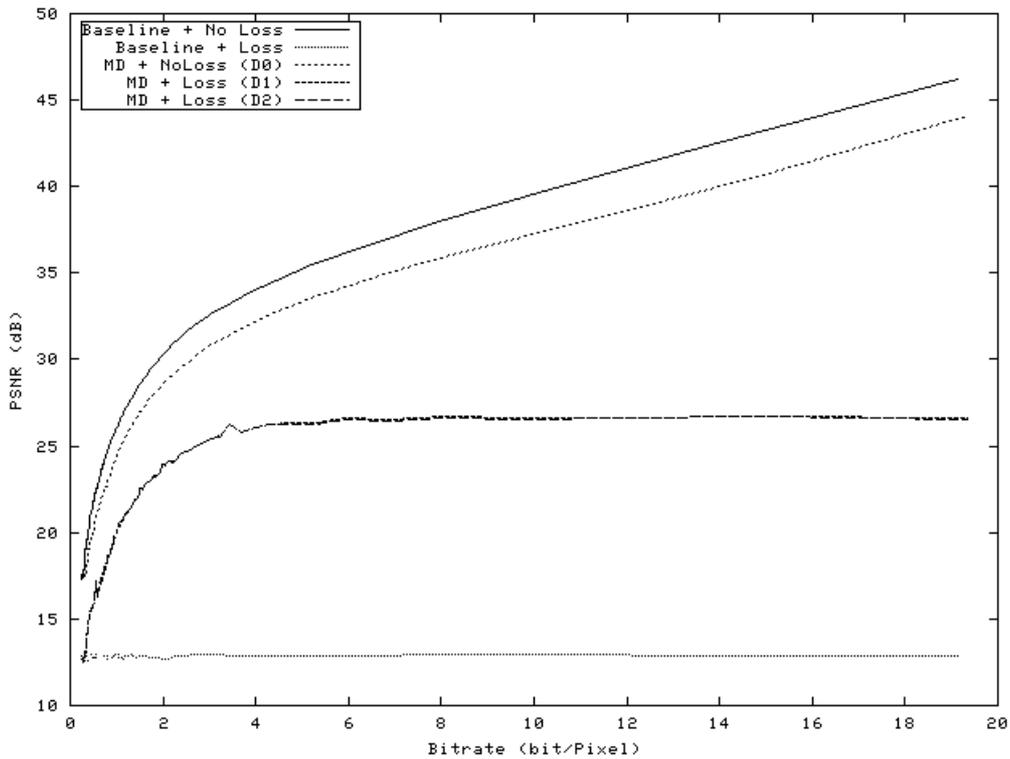


図 4.4: Multiple Description 符号化による欠落補償

Multiple Description 符号化を行う事で最大約 26.5dB まで PSNR が改善された。しかし、パケット欠落非発生時と比較すると PSNR の差はやや大きい。

実際に Lena 画像を処理したものを図 4.5 ~ 図 4.9 に示す。いずれの場合も量子化の値 Q は 4.0 としている。Multiple Description 符号化による欠落パケットの予測補完により、見た目にも大きく改善している事が分かる。特に図 4.6 と図 4.8 や図 4.9 を比較するとその差は一目瞭然である。しかし、Multiple Description 符号化による欠落パケットの予測補完で改善された PSNR は最大でも 26.5dB と低いため、図 4.7 と図 4.8 や図 4.9 を比較すると、ノイズなどの劣化がやや目立つ。

4.3 検討

Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する事により、欠落パケット発生時の復号画像品質の改善には一定の効果をもたらしたが、欠落パケット非発生時の PSNR 低下や予測補完による PSNR 向上が低いなどやや不十分なところもある。そこで本研究では改善のためにいくつか検討を行う。

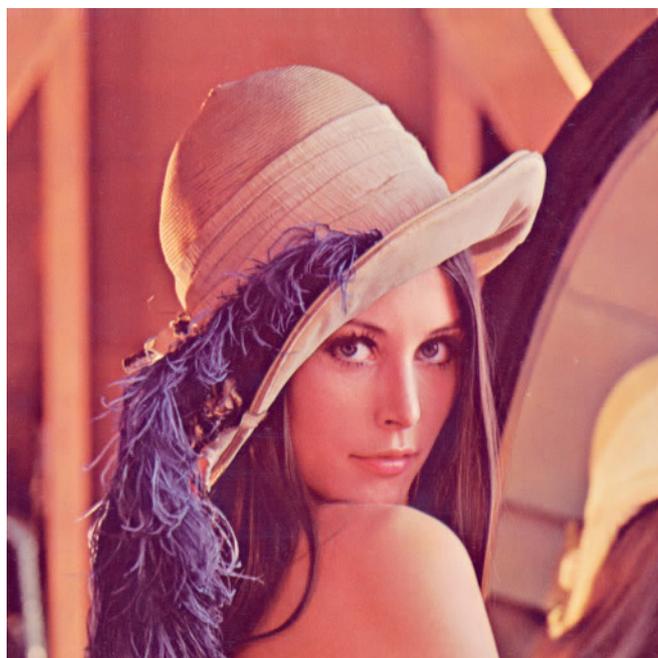


図 4.5: Multiple Description 符号化無し + 欠落無し
(37.947240dB, 7.956238bpp)

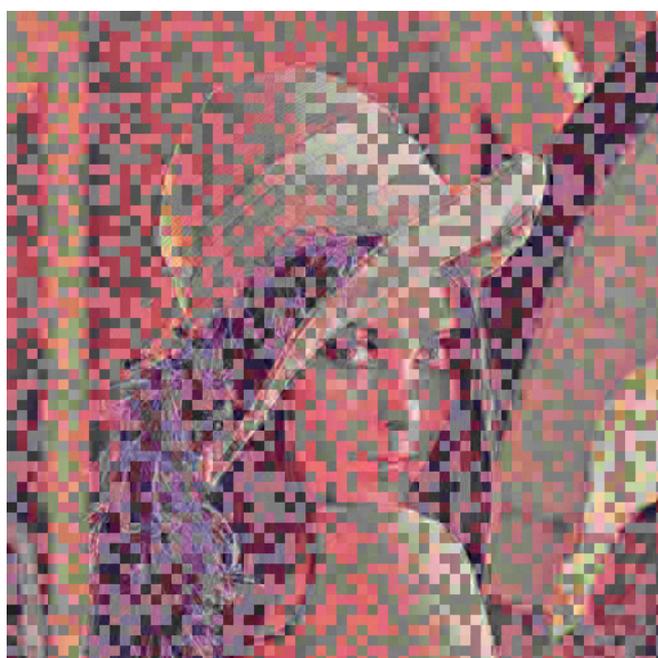


図 4.6: Multiple Description 符号化無し + 欠落有り (50%)
(12.790508dB, 7.956238bpp)

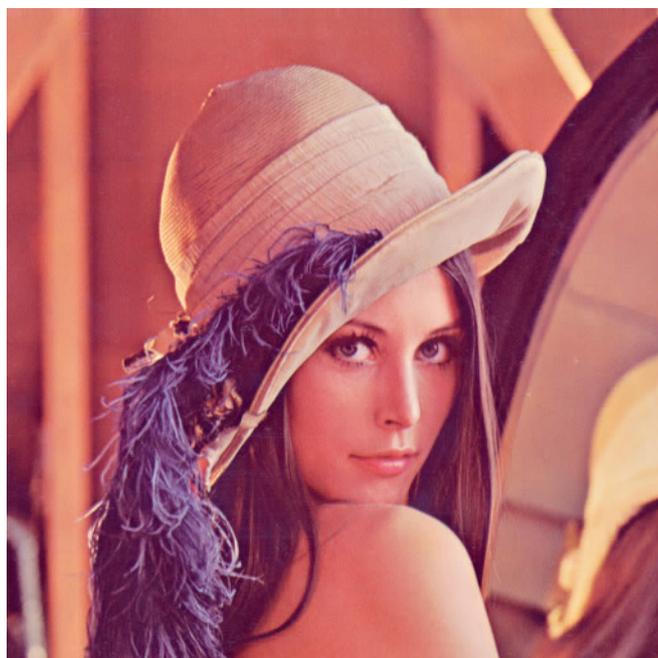


図 4.7: Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_0)
(37.075668dB, 9.711243bpp)

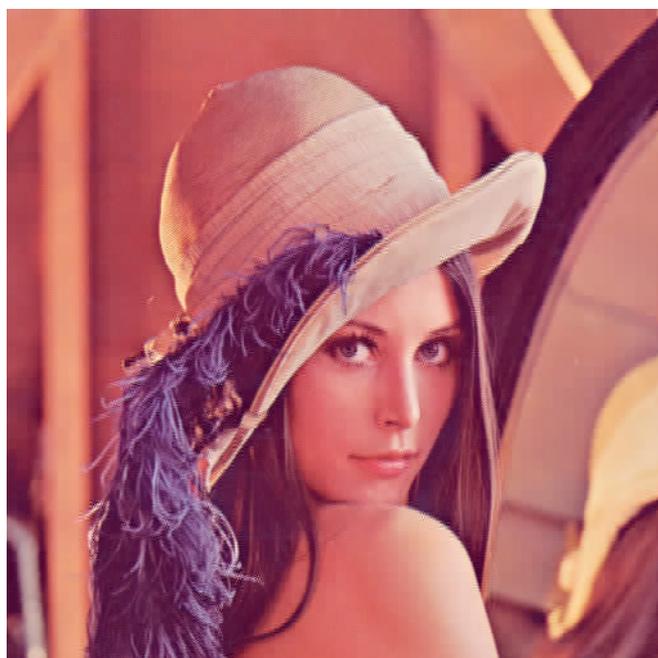


図 4.8: Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_1)
(26.588324dB, 9.711243bpp)

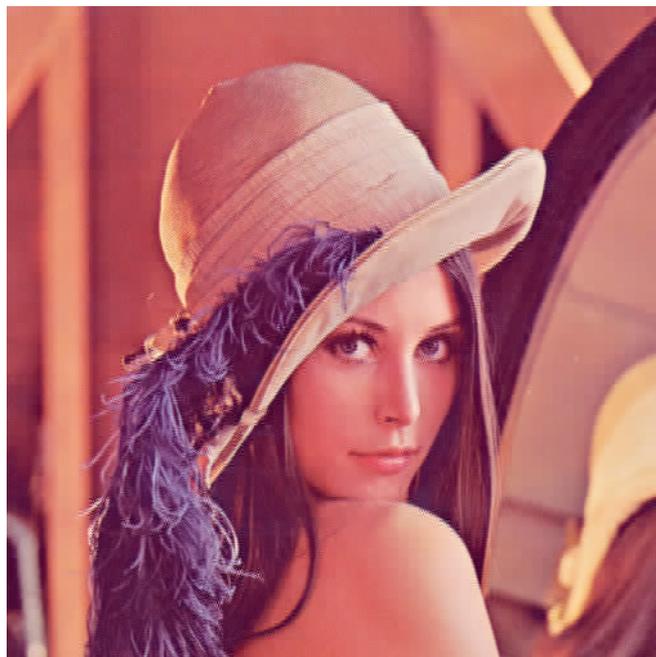
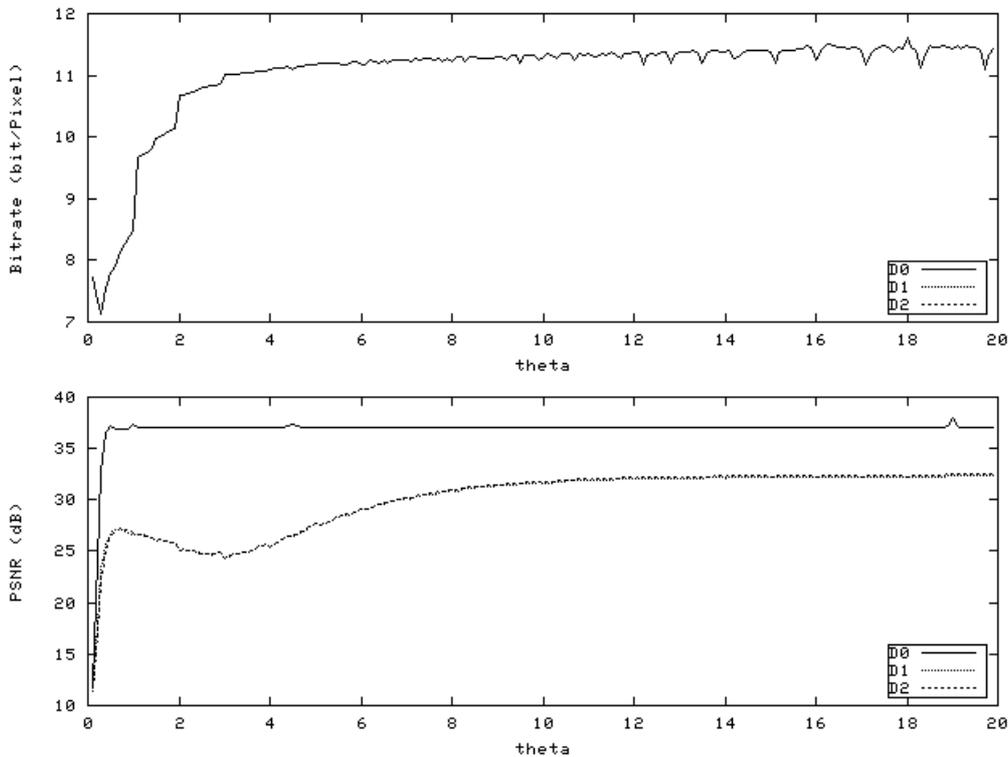


図 4.9: Multiple Description 符号化有り + 欠落無し (D_2)
(26.526590dB, 9.711243bpp)

4.3.1 相関変換行列の改善

(3.1) 式で表される相関変換行列 T は θ の値により相関関係の強さを制御できるものである。一般に、Multiple Description パケット間の相関関係が強いほど予測がしやすくなるため、 θ の最適値を探して適用するとさらに良い結果が得られると考えられる。ただし相関関係が強くなる事で逆に冗長性も高くなるため、ビットレートが大きく増加する可能性がある。そこでまず、 θ の値とビットレートおよび PSNR の関係について調査を行った。その結果を図 4.10 に示す。

図 4.10 は上のグラフが θ とビットレートの関係を見たものである。 D_0, D_1, D_2 の 3 状態について θ の値を 0.1 ~ 20.0 の範囲で変化させている。いずれの場合も量子化の値 Q は 4.0 としている。図中で変化が 1 本に見えるのは 3 本の線が重なっているためである。図 4.10 上を見ると、 $\theta = 8.0$ 付近より飽和傾向にある事が認められ、ビットレートは約 11.3bit/Pixel であった。また、ビットレートの最小値は $\theta = 0.3$ の約 7.1bit/Pixel であった。4.10 の下のグラフは θ と PSNR の関係を見たものである。条件はビットレートの場合と同じである。図 4.10 下を見ると、 D_0 については $\theta = 1.2$ 付近よりほぼ飽和

図 4.10: θ とビットレートおよび PSNR の関係

している事が分かり，PSNR は約 37.0dB であった．また， D_1, D_2 については変化が等しく， $\theta = 0.6$ 付近で一旦ピークを迎えた後に下がり， $\theta = 3.0$ 付近から再び上がり始め $\theta = 12.0$ 付近から飽和傾向にある事が分かる．その場合の PSNR は約 32.2dB であった．

以上から， $\theta = 12.0$ 以上にすればビットレートの増加はあるものの最大の PSNR が得られると考えられる．しかし，ビットレートの増加によりビットレートと PSNR の関係で見た場合に $\theta = 1.2$ の場合と比べて劣ってしまう可能性も考えられる．そこで，両者についてビットレートと PSNR の関係について比較をする実験を行った．実験条件は表 4.3 に示すとおりである．

結果を図 4.11 に示す．図 4.11 を見ると， D_0 についてはビットレートが約 10bit/Pixel 以下であれば差はほとんど無いが，それ以上の場合にはビットレートの増加が影響し若干の PSNR 低下が認められる． D_1, D_2 については，ビットレートが約 3bit/Pixel 以上の場合， $\theta = 1.2$ の場合と比べて同ビットレートでも PSNR が大きく向上している事が分かる．特に 7.5bit/Pixel 以上の場合には 30dB を超えている．

以上の結果から， θ の値を 12.0 とすることで，欠落発生時の品質をさらに改善できたとと言える．実際に $\theta = 12.0$ として Lena 画像を処理したものを図 4.12～図 4.14 に示す．

表 4.3: 実験条件

処理画像	カラー Lena 画像
色深度	RGB 24bit
解像度	512pixel × 512pixel
比較対象	$\theta = 1.2 + D_0, D_1, D_2$ $\theta = 12.0 + D_0, D_1, D_2$

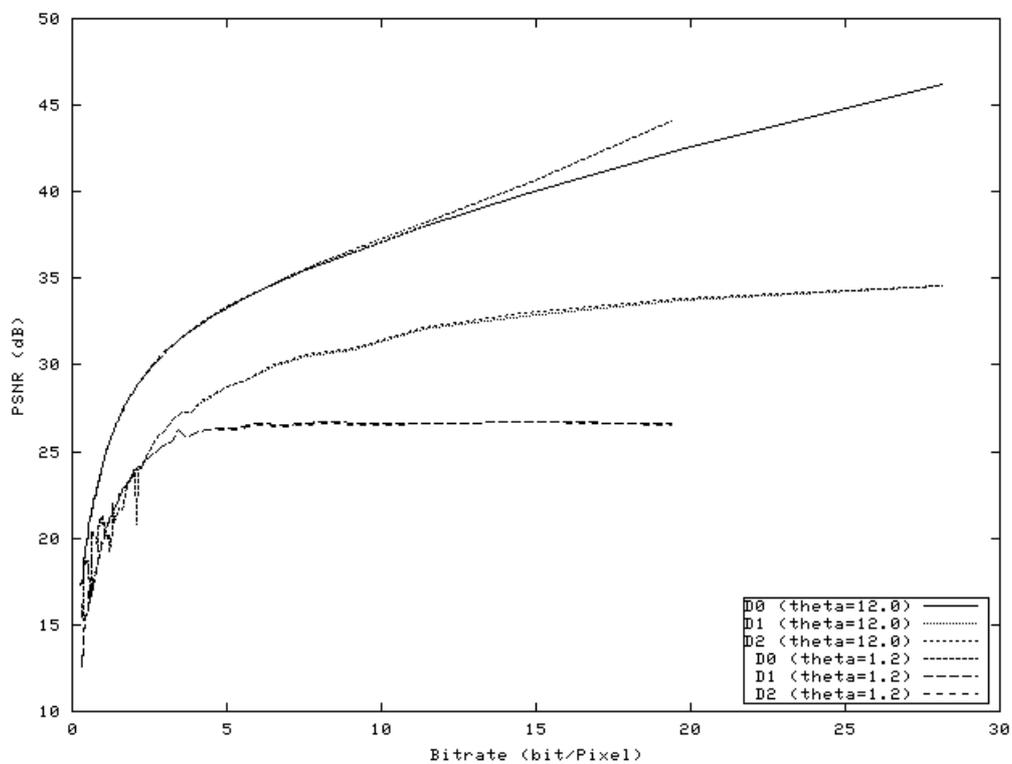
図 4.11: D_0, D_1, D_2 のビットレートと PSNR の関係

図 4.8 や図 4.9 と図 4.13 や図 4.14 を比較すると, $\theta = 1.2$ の場合に見られたノイズなどの劣化を抑える事ができている事が分かる.

4.3.2 整数 DCT

Multiple Description 符号化を基本画像符号化に適用する場合, 本研究では離散版相関変換行列と量子化 (離散化) を用いる事で整数から整数への写像とし, 行列演算中の演算誤差の発生を抑えている. しかし, 通常の離散コサイン変換で得られる DCT 係数は小数



図 4.12: $D_0, \theta = 12.0$
(37.947240dB, 11.340027bpp)

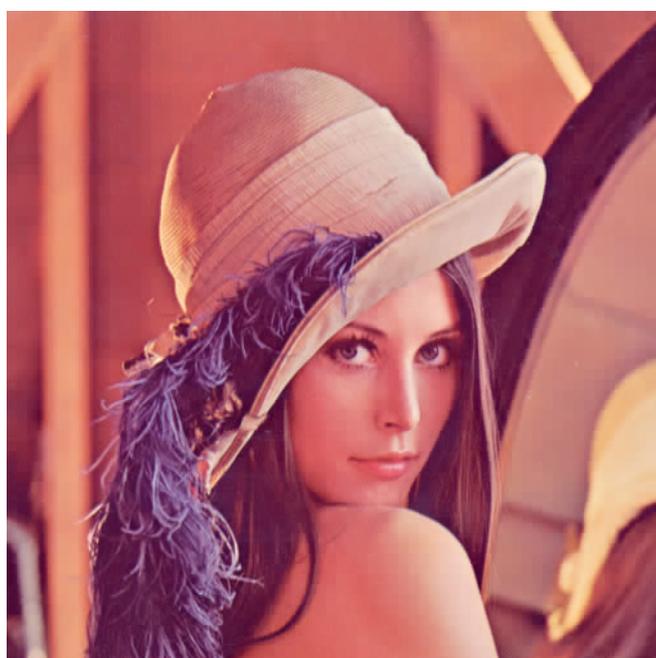


図 4.13: $D_1, \theta = 12.0$
(32.055869dB, 11.340027bpp)



図 4.14: $D_2, \theta = 12.0$
(32.195253dB, 11.340027bpp)

であるため、予め量子化を行っており、量子化誤差が大きな演算誤差の原因となっている。

そこで、離散コサイン変換で得られる DCT 係数が整数となる整数 DCT と呼ばれる手法を用いることで、量子化を行うことなく離散版相関変換行列を用いた行列演算が可能となり、Multiple Description 符号化の欠落補償の効果が向上する可能性がある。ただし、量子化を行わないためにビットレートが大幅に増加する。整数 DCT はロスレスの画像圧縮に用いられる手法でもあり、DCT \leftrightarrow IDCT 間で演算誤差が生じないものである。本研究では、整数 DCT として IJG^{*1}の JPEG ライブラリに含まれる整数 DCT ルーチンを利用した。整数 DCT を用いたものと通常の DCT を用いたものについて、 D_0, D_1, D_2 を比較する実験を行った。なお、相関変換行列 T の θ は 1.2 にしている。実験条件は表 4.4 に示すとおりである。

結果を図 4.15 に示す。図 4.15 を見ると、 D_0 については整数 DCT を利用した場合にやや大きな PSNR の低下が認められる。一方、 D_1, D_2 については整数 DCT を利用した事による差はほとんど生じていない事が分かる。これより、整数 DCT を用いる事による演算誤差の低減は Multiple Description 符号化にはほぼ効果が無いと言える。

^{*1} Independent JPEG Group (<http://www.ijg.org/>)

表 4.4: 実験条件

処理画像	カラー Lena 画像
色深度	RGB 24bit
解像度	512pixel × 512pixel
比較対象	DCT+ D_0, D_1, D_2 整数 DCT+ D_0, D_1, D_2

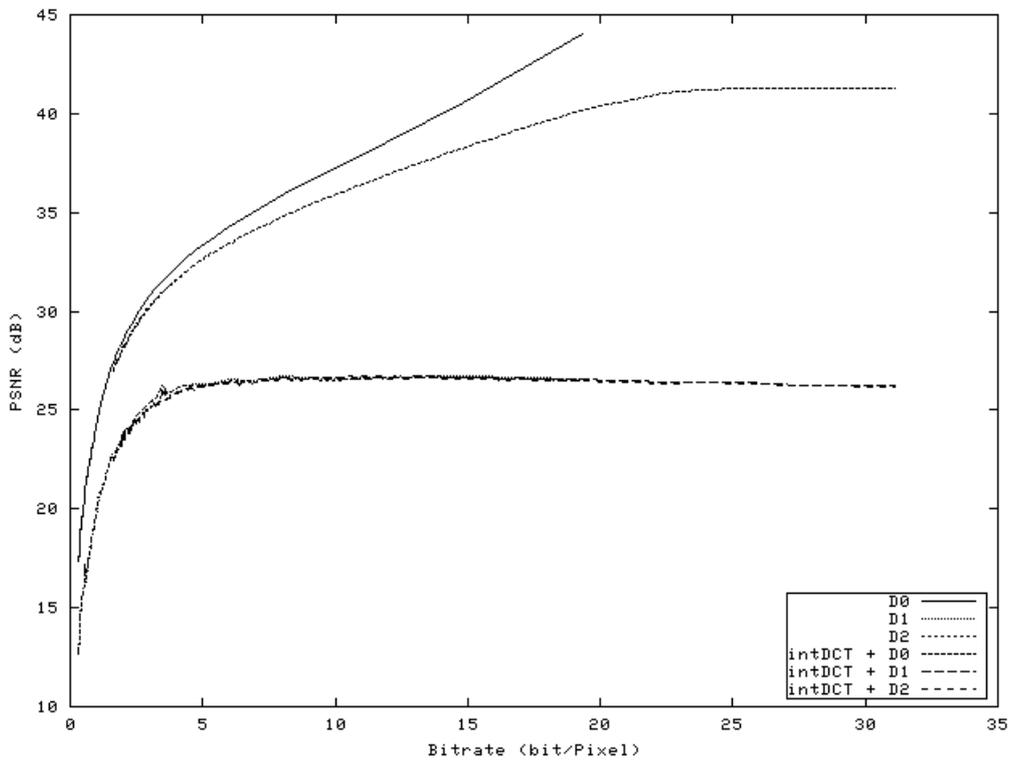


図 4.15: DCT の違いによる D_0, D_1, D_2 のビットレートと PSNR の関係

第5章

結論

5.1 結論

Multiple Description 符号化を画像符号化に適用する事によりパケットの冗長性が高まったために、欠落パケット非発生時においても基本画像符号化に比べてビットレートが全体的に増加する事が認められた。しかしながら、欠落パケットが発生した場合の Multiple Description 符号化による予測補完の効果は非常に大きく、復号画像の品質が大幅に改善された。また、相関変換行列を変更することにより、更に欠落パケット発生時の復号画像品質を改善することができた。

以上から、Multiple Description 符号化を画像符号化に適用する事は欠落パケット発生時の品質向上に非常に有効的であると言える。Multiple Description 符号化を適用する事で欠落パケットの再送が必要なくなり、伝送途中の欠落率が高い環境で画像データを伝送する場合には通常の画像符号化法と比べて伝送に要する時間を大幅に短縮する事が可能となる。また、この事は欠落パケット再送の仕組み自体を持たない通信路において特に有効であると言える。

5.2 課題

Multiple Description 符号化を画像符号化に適用した事で欠落パケット発生時の復号画像の品質は大幅に向上したが、欠落パケット非発生時の復号画像の品質がやや低下した。

これは主に Multiple Description 符号化により付与された冗長情報による全体的なビットレートの増加によるものであり，Multiple Description 符号化による効果を保持しつつ如何にして冗長情報を削減するか検討する余地があると言える．

また，欠落パケット発生時の復号画像の品質は向上したが，欠落パケット非発生時と比べると大きな開きがあり，特に高ビットレート領域になるほど飽和傾向にある．欠落パケット発生時の復号画像の品質は Multiple Description 符号化の手法と予測補完の方法に依存しているため，更なる品質向上のために Multiple Description 符号化の手法をさらに検討する余地があると言える．

最後に，Multiple Description 符号化は欠落率が高い伝送路を通す場合に非常に有効的であるが，有線通信はもとより無線通信も現在では比較的安定してきており，少なくとも画像データ 1 枚を伝送するに当たり欠落が発生する可能性はさほど高くない．ゆえに実際の利用環境において Multiple Description 符号化を画像符号化に適用する必要性はあまり高くないのが実情であると言える．しかし，最近では欠落パケット再送の仕組みを利用しない映像や音楽のストリーミング配信が流行であり，これらに対して Multiple Description 符号化を適用する事で現状よりも品質を大幅に改善できる可能性がある．これも検討する余地は十分あると言える．

謝辞

本研究を行うに当たり，機会と貴重なご意見ご指導を頂きました，東北大学大学院工学研究科教授 牧野正三氏に深く感謝致します。

また，日頃よりゼミ等を通じて貴重なご意見ご助言を頂きました，東北大学大学院工学研究科教授 伊藤彰則氏，東北大学大学院工学研究科助手 鈴木基之氏に深く感謝致します。

最後に，研究生活を共にした牧野研究室の皆様へ感謝致します。

参考文献

- [1] V.K.Goyal : "Multiple Description Coding:Compression Meets the Network", *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.74-93, September 2001
- [2] Y.Wang, M.T.Orchard, V.Vaishampayan, and A.R. Reibman : "Multiple description coding using pairwise correlating transforms", *IEEE Trans. Image Processing*, vol.10, pp.351-366, March 2001.
- [3] V.K.Goyal, J.Kovacevic, R.Arean, and M.Vetterli : "Multiple description transform coding of images", *IEEE Int. Conf. Image Processing (ICIP'98)*, Chicago, IL, October 1998.
- [4] G.Romano, P.S.Rossi, F.Palmieri : "Multiple Description Image Coder Using Correlating Transforms", *European Signal Processing Conf. (EUSIPCO 2004)*, Vienna, Austria, pp.1321-1324, September 6-10 2004.
- [5] V.K. Goyal and J. Kovačević, "Generalized multiple description coding with correlating transforms," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 47, Sept. 2001.
- [6] "Recommendation BT.601-6", ITU, Jan. 2007.