

TR-AC-0031

006

高次元アルゴリズムによる
JPEG量子化テーブル最適化

平田 和貴、新上 和正
山田 順一、齋藤 茂

1999. 4.21

ATR環境適応通信研究所

目次

第 1 章	概論	4
1.	背景	4
2.	本研究の位置付けと目的	4
3.	JPEG 量子化テーブルと高次元アルゴリズムの概説	5
3.1.	JPEG 画像圧縮方式と JPEG 量子化テーブル	5
3.2.	高次元アルゴリズム	7
第 2 章	高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への適用	9
1.	高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化	9
1.1	高次元アルゴリズムの設計方法	9
1.2	反復公式	10
1.3	JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成	11
1.4	処理手順	12
2.	検証実験	14
2.1.	検証方法	14
2.2.	参照画像	14
2.3.	検証実験の態様	15
3.	結果	16
3.1.	SNR でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合	16
3.2.	SNR でポテンシャル関数を構成し、スキャン入力画像を参照画像とする場合	18
3.3.	SNR または平均色差でポテンシャル関数を構成し、医療用超音波画像を参照画像とする場合	18
3.4.	平均色差でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合	19
3.5.	視覚特性と画像の劣化特性を考慮した画像品質尺度でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合	20
4.	考察	21
4.1.	得られた量子化テーブルの値の傾向	21
4.2.	最適化可能な画像	22
4.3.	ポテンシャル関数の構成	22
4.4.	ミキシングなしとシステム・パラメータ γ	23
4.5.	ポテンシャル関数のパラメータと初期値	23
5.	結論	23
第 3 章	画像品質評価基準	25
1.	従来の画像品質評価尺度	25
2.	JPEG 量子化テーブル最適化のための画像品質評価尺度	28
3.	主観評価実験と画像品質評価尺度の正当性の検証	29
3.1.	主観評価実験	29
3.2.	画像品質評価尺度の正当性の検証	30
3.3.	考察	32
4.	まとめと課題	33
第 4 章	高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への適用 2	34
1.	高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化	34
1.1	高次元アルゴリズムの設計方法	34
1.2	反復公式	35
2.	検証実験	37
3.	結果	37
4.	考察	39
4.1.	得られた量子化テーブルの値の傾向	39
4.2.	ポテンシャル関数の構成	40
4.3.	ミキシングとシステム・パラメータ γ	40
5.	結論	40

第5章	まとめ	42
付録 2-1.	反復公式についての補足	43
付録 2-2.	高次元アルゴリズムの実装についての補足	44
	A2-2.1. 実行モジュールのバージョン	44
	A2-2.2. 量子化テーブルの更新方法	44
付録 2-3.	符号化および復号化画像と JPEG 量子化テーブルの取得方法	45
付録 2-4.	検証実験結果のデータ	47
付録 2-5.	表 2-2 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブル	48
付録 2-6.	表 2-4 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル	50
付録 2-7.	表 2-5 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル	51
付録 2-8.	表 2-6 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル	53
付録 2-9.	表 2-7 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル	55
付録 2-10.	参照画像と復号化画像	57
付録 2-11.	参照画像と復号化画像	59
付録 2-12.	参照画像と復号化画像	61
付録 2-13.	参照画像と復号化画像	63
付録 2-14.	参照画像と復号化画像	65
付録 2-15.	国際標準例示と最適化された JPEG 量子化テーブルの違い	67
付録 2-16.	仮想粒子の運動量と位置の初期値	69
付録 3-1.	符号化のための量子化テーブル	70
付録 3-2.	主観評価実験の詳細	73
付録 3-3.	平均主観評点(MOS)	74
付録 3-4.	オープン・データに対する検証	75
付録 3-5.	画像品質劣化特徴量抽出モジュール	76
	A3-5-1. 全体の構成	76
	A3-5-2. 画像劣化特徴量を計量する関数	77
	A3-5-2.1. jfifMeanOfColorDifference 関数	77
	A3-5-2.2. jfifMeanOfBlockNoise 関数	77
	A3-5-2.3. jfifMeanOfAutoCorrelation 関数	77
	A3-5-2.4. jfifMeanOfMaskedEdgeError 関数	77
	A3-5-3. ソース・コードの保管ディレクトリ	77
付録 3.6.	各画像の種類における固有のベクトル	78
付録 4-1.	ミキシングとシステム・パラメータを考慮した高次元アルゴリズムの実装	79
	A4-1-1. 機能と入出力ファイル	79
	A4-1-2. 構成	80
	A4-1-3. ポテンシャル関数	81
	A4-1-4. 入出力ファイルのフォーマット	82
	A4-1-5. 実行前に準備すべきファイル	82
	A4-1-6. 実行方法	83
	A4-1-7. メイン関数の構成	83
付録 4-2.	仮想粒子の位置と運動量に対する初期値	84
付録 4-3.	hamiltonC10 関連のデータ処理	85
付録 4-4.	データの保管ディレクトリと発見回数	89
付録 4-5.	表 4.1 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブル	90
付録 4-6.	表 4.1 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブル	92
付録 4-7.	復号化画像	93
付録 4-8.	参照画像と復号化画像	96
付録 4-9.	参照画像と復号化画像	98
付録 4-10.	国際標準例示と最適化された JPEG 量子化テーブルの違い	100
付録 4-11.	ミキシングの失敗事例	104
参考文献		105

本書の構成

第1章 概論

本研究の背景、位置付けおよび目的についての説明し、JPEG 量子化テーブルと高次元アルゴリズムについて概説する。

第2章 高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化に対する有用性の検証

高次元アルゴリズムが JPEG 量子化テーブルの最適化手法として有用であるか否かを検証する。最適化手法の方法論と検証実験について述べる。

第3章 JPEG 量子化テーブル最適化のための画像品質評価基準

最適化のための評価関数を構成する画像品質評価基準をいかに構成すべきかについて論じる。

第4章 高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化に対する有用性の検証 2

ミキシングとシステム・パラメータ γ を考慮した場合の高次元アルゴリズムが JPEG 量子化テーブルの最適化手法として有用であるか否かを検証する。

第5章 まとめ

本報告をまとめる。

第1章 概論

本報告では、環境適応通信研究所が提案している高次元アルゴリズムを JPEG 量子化テーブルの最適化に応用することを検討する。また、視覚特性および JPEG 復号画像の劣化特性を考慮した画像品質評価基準を最適化のための評価関数に導入することを検討する。以下に、本研究の背景、位置付けおよび目的並びに基礎事項について述べる。

1. 背景

近年パーソナル・コンピュータや通信機器などの高速化や低廉化にともなって、国内でもインターネットが急速に普及している。インターネットの利用者は、これまで商用サイトなどのホームページに掲載されている画像データを閲覧することによって、特別意図しないうちに画像データを取得してきたが、今日では、デジタル・カメラの普及と相俟って、インターネットの利用者自身によるホームページへの画像データの掲載、画像データの電子メールへの添付などが一般的になってきている。また最近では、ビデオ・メールと呼ばれるビデオ・データを添付した電子メールも登場してきた。このように、画像データの積極的な利用が増大してきている状況において、通信コストや画像データを保存するディスク・スペースを削減したいという要求がある。

インターネットを通じた画像データ通信やデジタル・カメラなどでの静止画像データの記録では、ベースライン・システムに分類される JPEG 画像圧縮符号化形式^[1]が主に利用される。この JPEG 画像圧縮符号化形式は、画像の品質の劣化を伴う圧縮符号化方式であるが、オリジナルの画像(原画像)のデータ・サイズを 16 分の 1~24 分の 1 に圧縮しても、視覚的な劣化を伴わないと言われている。

一般的に、画像圧縮符号化形式では、画像の圧縮率と画像の品質は相反する。すなわち、画像の圧縮率を上げる(符号化された画像のデータ・サイズを小さくする)ほど画像の品質は低下する。逆に、画像の圧縮率を下げる(符号化された画像のデータ・サイズを大きくする)ほど画像の品質は向上する。つまり、画像の圧縮率を上げれば、通信コストや画像保存のためのディスク・スペースをさらに削減することが可能であるが、画像の品質は劣化する。そこで、画像の知覚的な劣化を伴うことなく、圧縮率を上げる JPEG 画像圧縮符号化形式のパラメータ(本研究においては JPEG 量子化テーブル)を求めること(最適化)が問題となる。

2. 本研究の位置付けと目的

環境適応通信研究所第二研究室では、(1)高次元通信制御設計技術の研究と(2)人間適合情報処理技術の研究をテーマにして、環境の変化に適応する情報通信システムの制御技術の研究を行っている。高次元通信制御設計技術の研究は、情報通信システムを複雑

系としてとらえ、環境に適応するモデル化に基づいて、その系のダイナミクスを解析し、環境適応可能な通信制御設計技術を確立することを目指している。一方、人間適合情報処理技術の研究は、人間の受容特性や心理特性に適合したマルチメディア情報通信のための高速処理技術の確立とマルチメディア通信に適した将来方式の提案を目指している。なお、高次元通信制御技術の研究成果として、汎用的な最適化手法である「高次元アルゴリズムによる最適化」が提案されている^[2]。

本研究は、これらのテーマに対応したもので、高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化を本研究のテーマとしている。本研究の第一の目的は、高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化が有用であるか否かを検証することである。これは、前述の第一のテーマに対応している。本研究の第二の目的は、JPEG 量子化テーブル最適化のための評価関数を構成するにあたり、視覚特性および JPEG 復号画像の劣化特性を考慮した画像品質評価基準をいかに構成するかについて検討することである。これは、前述の第二のテーマに対応している。

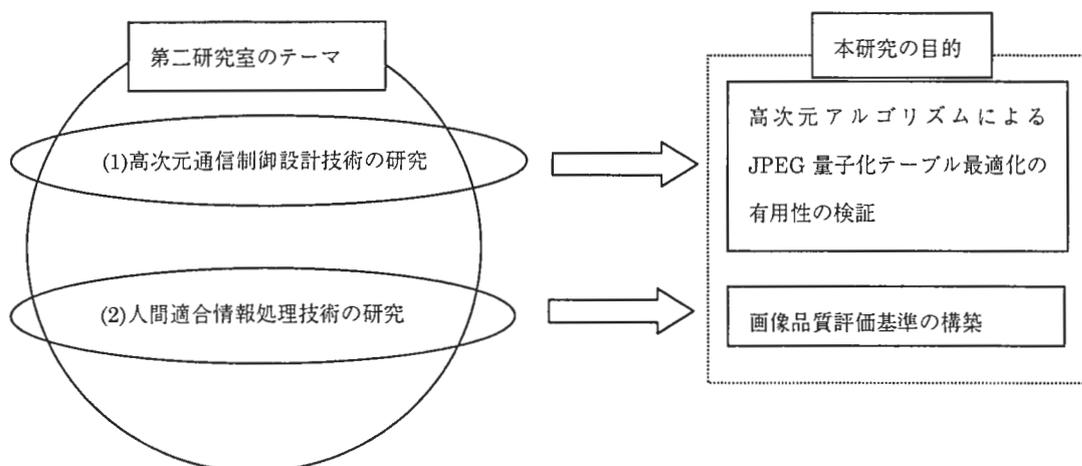


図 1 第二研究室のテーマと本研究の目的の関係

3. JPEG 量子化テーブルと高次元アルゴリズムの概説

ここでは、JPEG 画像圧縮方式および JPEG 量子化テーブル並びに高次元アルゴリズムについて概説する。

3.1. JPEG 画像圧縮方式と JPEG 量子化テーブル

JPEG 画像圧縮方式は、国際標準化団体の JPEG(Joint Photographic Coding Experts Group)が規定したカラー静止画像のための圧縮形式を示している。本来の JPEG の規

定では、もとの画像品質が保たれる可逆符号化方式ともとの画像品質が保たれない不可逆符号化方式とを含んでいるが、本報告では、不可逆符号化方式の必須機能であるベースライン・システムを対象とし、以下単に JPEG と略して記述する。つまり、本報告で取り扱う JPEG 画像圧縮方式は、本質的に画像の劣化を伴う方式であることに留意されたい。

図 2 は、JPEG 画像圧縮方式の符号器と復号器の構成を示す。図 2 の上段および下段は、それぞれ符号器および復号器の処理の流れを示す^{[9]~[11]}。符号器では、符号化される画像を入力し、色変換、画素の間引き、DCT(Discrete Cosine Transform:離散コサイン変換)、量子化およびハフマン符号化の過程を経て、JPEG データ・ストリームを生成する。一方、復号器では、JPEG データ・ストリームを入力し、ハフマン復号化、逆量子化、IDCT(Inverse DCT)、画素の補間および色変換の過程を経て、復号画像を生成する。前述したように、この復号画像は、原画像、すなわちもとの符号化される画像に対して劣化を伴っている。

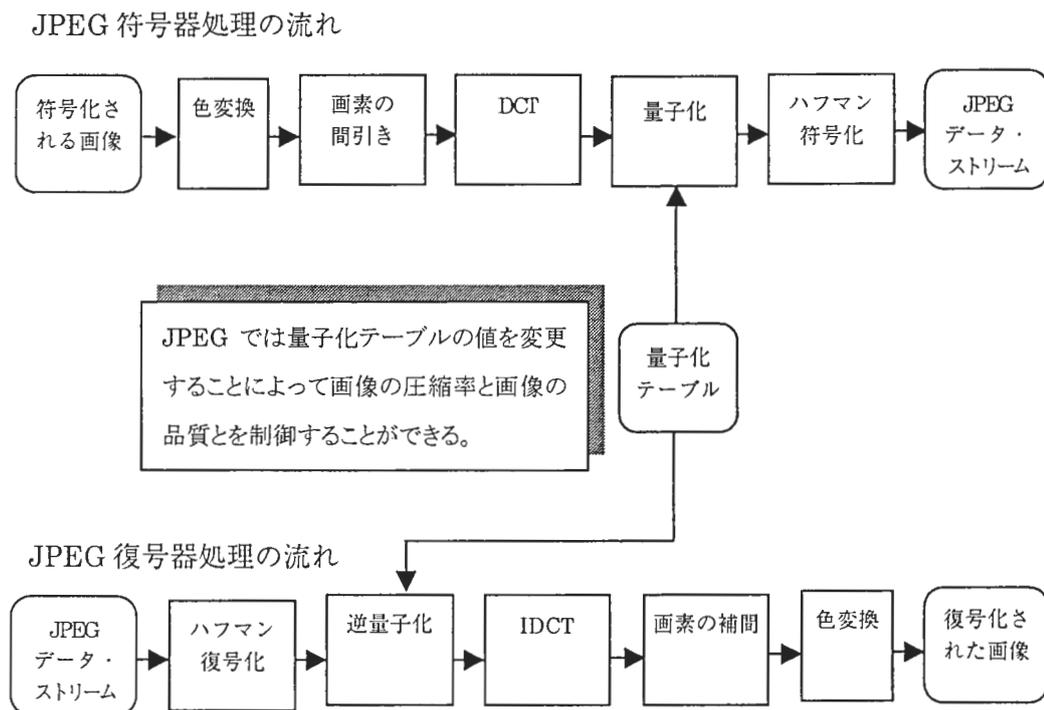


図 2 JPEG 符号器および復号器の処理の流れ

ここで、符号器の量子化および復号器の逆量子化の過程で JPEG 量子化テーブルと呼ばれる量子化ステップのパラメータの組が用いられる。JPEG 画像圧縮方式では、この量子化テーブルの値を変更することによって、画像(JPEG データ・ストリーム)の圧縮

率と(復号)画像の品質とを制御することができる。

本研究では、この量子化テーブルの最適化を対象にしている。量子化テーブルは、輝度用量子化テーブルとクロミナンス用量子化テーブルの二つに分けることができる。それぞれ輝度に対する64個のDCT係数および言わば色成分であるクロミナンスに対する64個のDCT係数をどのように量子化するか量子化ステップを保持している。

JPEGの規定においては、輝度用量子化テーブルとクロミナンス用量子化テーブルが例示されている(付録3-1の付表A3-1-3を参照されたい)。本研究では、それらのJPEG国際標準に例示した量子化テーブルを使用して、符号化復号化を行った場合の圧縮率および画像の品質を比較することによって、高次元アルゴリズムの有用性を検証する。

3.2. 高次元アルゴリズム

高次元アルゴリズムは、当研究所第二研究室の新上氏の提案による、多くのパラメータを有するシステムのパラメータの最適化手法である。高次元アルゴリズムは、パラメータの数が多ければ多いほど、最適解を見つけ出す可能性が高まるという特性があり、これまでにルーチングやコジェネレーション・システムのパラメータの最適化^{[12],[13]}に対する応用がなされている。

高次元アルゴリズムにおいては、最適化すべきパラメータの値を仮想的な粒子の位置に対応させ、さらにその仮想的な粒子の位置に対応する運動量を考える。その仮想的な粒子を、ポテンシャル関数に相当する所与の評価関数の下で運動させ、運動の軌跡を観測することによって最適解を見つけ出す。ここで、アルゴリズムの利用者は、仮想的な粒子の運動を規定するハミルトニアン関数を適正に構成することによって、仮想的な粒子に対応するパラメータを最適化することができる。ハミルトニアン関数は、ポテンシャル関数に対応する最適化のための評価関数を包含している。

JPEG量子化テーブルの最適化に高次元アルゴリズムを応用する場合において、最適化のための評価関数は、圧縮率の尺度と画像品質の尺度で構成することが考えられる。圧縮率の尺度には、原画像のデータ・サイズに対するJPEGデータ・スリムの比やレート^[14]と呼ばれる1画素当たりのビット数などが考えられる。一方、画像品質の尺度には、画像における信号対雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)や平均色差などが考えられる。

前述したようにJPEG量子化テーブルは、64個の要素を持つ輝度用量子化テーブルと同じく64個の要素を持つクロミナンス用量子化テーブルからなる。そこで、「輝度用」と「クロミナンス用」とを区別しないでJPEG量子化テーブルを取り扱っていると、典型的に式(1.1)で表現されるハミルトニアン関数の構成が考えられる。

式(1.1)において、 m は仮想的な粒子の質量を意味する定数、 γ_i は*i*番目の状態空間に対応する正の定数、 V_i は*i*番目の状態空間に対応するポテンシャル関数を示す。 M は、高次元アルゴリズムに特有な、ミキシングと呼ばれる仮想的な粒子間の相互作用を表現

するものである。

$$\begin{aligned}
H = & \frac{1}{2m} (p_{1,1}^2 + p_{1,2}^2 + \cdots + p_{1,128}^2)^{\gamma_1} \\
& + \frac{1}{2m} (p_{2,1}^2 + p_{2,2}^2 + \cdots + p_{2,128}^2)^{\gamma_2} \\
& + V_1(q_{1,1}, q_{1,2}, \cdots, q_{1,128}) \\
& + V_2(q_{2,1}, q_{2,2}, \cdots, q_{2,128}) \\
& + M(p_{1,1}, p_{2,1}, \cdots, p_{1,128}, p_{2,128}) \quad (1.1)
\end{aligned}$$

式(1.1)においては、 i 番目の状態空間の仮想的な粒子の位置および運動量の第 j 次元の要素は、それぞれ q_{ij} および p_{ij} で表現される。また、式(1.2)においては、仮想的な粒子の位置および運動量の第 j 次元の要素は、それぞれ q_j および p_j で表現される。以下の式でも同様の記述方法を用いる。

式(1.1)で表現されるハミルトニアン関数 H は、ポテンシャル関数を圧縮率の尺度を表現するポテンシャル関数 V_1 と画像の品質を表現するポテンシャル関数 V_2 の二つに分けて、それぞれのポテンシャル関数の下で 128 次元の空間を二つの仮想的な粒子が運動する場合に対応するものである。

次に、式(1.1)の特殊な場合として、式(1.2)で表現される第二のハミルトニアン関数 H を構成することができる。式(1.2)は、 γ を 1 とし、ミキシング M の項のない 128 次元の一つの状態空間において、一つの仮想的な粒子が圧縮率の尺度と画像品質の尺度の組み合わせで表現されるポテンシャル関数の下で、運動する場合に対応するものである。

$$\begin{aligned}
H = & \frac{1}{2m} (p_1^2 + p_2^2 + \cdots + p_{128}^2) \\
& + V_{(q_1, q_2, \cdots, q_{128})} \quad (1.2)
\end{aligned}$$

本研究においては、実装のしやすさから、まず、ミキシングの項のない第二のハミルトニアン関数を用いて JPEG 量子化テーブルの最適化を行った。その詳細は、第 2 章で述べられる。次に、第 3 章では、上記ポテンシャル関数をなす画像品質の尺度について論じる。続いて、第 4 章において、高次元アルゴリズムの一般型である第一のハミルトニアン関数を用いて JPEG 量子化テーブルを最適化した場合について述べる。第 5 章で本報告をまとめる。

第 2 章

高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への適用

第 1 章で述べたように、高次元アルゴリズムはルーチングやコジェネレーション・システムの最適化に既に応用され、それらの分野での有用性が示されている。本章では、高次元アルゴリズムを JPEG 量子化テーブルの最適化に応用した場合の有用性の検証方法とその結果について述べる。

1. 高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化

ここでは、高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブル最適化の方法論について述べる。まず、1.1 節において高次元アルゴリズムの設計方法について述べ、次に、1.2 節において高次元アルゴリズムを具体化した反復公式について述べ、続く 1.3 節において JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成について述べる。1.4 節において、その最適化システムの処理手順について述べる。実行モジュールの実装などの詳細については、付録 2-1 および付録 2-2 を参照されたい。

1.1. 高次元アルゴリズムの設計方法

JPEG 量子化テーブルの各要素、すなわち量子化ステップをそれぞれ仮想的な粒子を表現する一つの次元における位置とみなして、その仮想粒子の運動を追跡することによって、最適な量子化テーブルを得るように高次元アルゴリズムを実装した。具体的には、128 個の量子化テーブルの要素を 128 次元の状態空間で表現される一つの仮想粒子の位置に対応させる。高次元アルゴリズムのポテンシャル関数 V は、レートと SNR など構成する。そのポテンシャル関数の下で、運動をする一つの仮想粒子の 128 次元の運動量を考え、そこでの仮想粒子の運動の軌跡を追跡する。

高次元アルゴリズムを構成するハミルトニアン H は、式(2.1)で表現されるものを用いた。つまり、第 1 章で述べたミキシングの項はゼロとし、すなわち式(1.1)の $M=0$ 、 γ_i で表現されるシステム・パラメータを 1 として高次元アルゴリズムを実装した。

$$H = \frac{1}{2m} (p_1^2 + p_2^2 + \cdots + p_{128}^2) + V_{(q_1, q_2, \dots, q_{128})} \quad (2.1)$$

1.2. 反復公式

前述の各次元における仮想粒子の位置と運動量を計算する計算過程に対応する反復公式を導出する。

まず、式(2.1)のハミルトニアン H に基づく、以下の 128 個の連立偏微分方程式を考える。

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_1} \\ \frac{dq_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_1} \\ \frac{dp_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_2} \\ \frac{dq_2}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_2} \\ \vdots \\ \frac{dp_{128}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_{128}} \\ \frac{dq_{128}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_{128}} \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、一番目の次元に対応する連立偏微分方程式について考える。すなわち、式(2.3)および式(2.4)について考える。

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_1} & (2.3) \\ \frac{dq_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_1} & (2.4) \end{cases}$$

式(2.3)の右辺は、式(2.1)から式(2.5)のようになる。

$$-\frac{\partial H}{\partial q_1} = -\frac{\partial V_{(q_1, q_2, \dots, q_{128})}}{\partial q_1} \quad (2.5)$$

一方、式(2.4)の右辺は、式(2.1)から式(2.6)のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial p_1} = \frac{p_1}{m} \quad (2.6)$$

式(2.3)および式(2.4)の左辺を式(2.7)および式(2.8)で定義されるものとする。

$$\frac{dp_1}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{1(t+\Delta t)} - P_{1(t)}}{\Delta t} \quad (2.7)$$

$$\frac{dq_1}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q_{1(t+\Delta t)} - q_{1(t)}}{\Delta t} \quad (2.8)$$

式(2.7)および式(2.8)の Δt を小さな値の定数とすることによって、式(2.9)および式(2.10)で表現される反復公式を得る。

$$\begin{cases} P_{1(t+\Delta t)} = P_{1(t)} - \frac{\partial V(q_1, q_2, \dots, q_{128})}{\partial q_1} \Delta t & (2.9) \\ q_{1(t+\Delta t)} = q_{1(t)} + \frac{1}{m} P_{1(t)} \Delta t & (2.10) \end{cases}$$

この連立した反復公式は、他の次元に対しても同様に成立する。JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成とこれらの反復公式を実行する手順は、続く節で述べられる。

1.3. JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成

図 2.1 は、JPEG 量子化テーブル最適化システムのシステム構成図を示す^[15]。同一の輝度用およびクロミナンス用量子化テーブルが JPEG 符号器および復号器に参照される。JPEG 符号器は、試験画像を入力し、JPEG データ・ストリームを出力する。JPEG 復号器は、JPEG データ・ストリームを入力し、復号化画像を出力する。JPEG データ・ストリームを用いて圧縮率(レート)を算出する。また、試験画像および復号化画像を用いて画像品質を算出する。算出された圧縮率および画像品質は高次元アルゴリズムの評価関数の値を算出するために用いられる。図 2.1 の高次元アルゴリズム部分は、評価関数の値を算出し、その値によって量子化テーブルの値を変更する。その変更された量子化テーブルを用いて符号化および復号化が行われる。このように処理が繰り返される。

今回の実装においては、反復ごとの JPEG 量子化テーブルの値はすべてファイルとして記録し、既定の反復回数終了後に、適切な JPEG 量子化テーブルの値を検索することによって、最適化された JPEG 量子化テーブルを得るようにした。

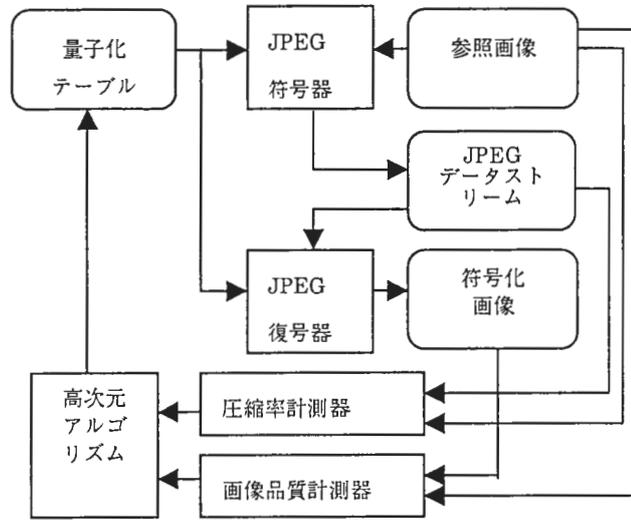


図 2.1. システム構成

1.4. 処理手順

ここでは、前節の反復公式を実現する JPEG 量子化テーブルの実装における処理手順を示す。まず、処理手順説明を簡便にするために、反復公式を書き換える。すなわち、 $q_{current}$ は粒子の反復処理前の位置、 q_{new} は反復処理後の粒子の位置、 $v_{current}$ は反復処理前の粒子の速度、 v_{new} は反復処理後の粒子の速度を表すものとし、式(2.11)の關係を用いて運動量 p を速度 v に書き直すと、式(2.12)および式(2.13)を得る(付録 2.1 参照)。

$$p = mv \quad (2.11)$$

$$v_{new} = \frac{f}{m} \Delta t + v_{current} \quad (2.12)$$

$$q_{new} = \frac{f}{2m} \Delta t^2 + v_{current} \Delta t + q_{current} \quad (2.13)$$

ここで、 Δt は 1 回の反復に相当する時間を表す定数である。1 回の反復ごとに、 $q_{current}$ の値は q_{new} の値で置きかえられ、同時に $v_{current}$ の値は v_{new} の値で置きかえられる。粒子の小さな変位を表す定数 δq を用いて、変数 q_{tmp} を式(2.14)で定義し、粒子に係る力 f を、式(2.15)にて定義する。

$$q_{tmp} = q_{current} + \delta q \quad (2.14)$$

$$f = -\left(\frac{V(q_{tmp}) - V(q_{current})}{\delta q}\right) \quad (2.15)$$

図 2.2 と以下のリストに高次元アルゴリズムの処理手順(S1~S8)を示す。手続き S4 から S8 には並列性があり、PVM(Parallel Virtual Machines)などを使って、 f などを並列に計算することにより、効果的に最適化することができる。

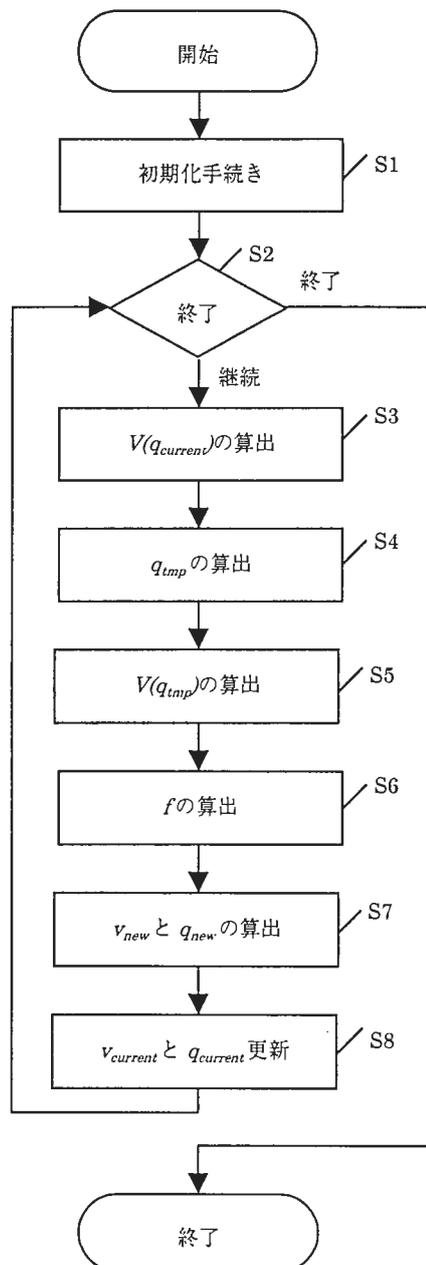


図 2.2. 処理手順

- S1. 初期化手続き
 $q_{current}$ および $v_{current}$ に対して初期値を与え、また m や Δt の値を設定する。
- S2. 終了判定
 所望の反復回数に達していた場合、終了する。そうでなければ、S3 から S8 の処理を継続する。
- S3. $V(q_{current})$ の算出
 現在の $q_{current}$ における評価関数の値を算出する。
- S4. q_{tmp} の算出
 $q_{current}$ から q_{tmp} を算出する(式(2.14)参照)。
- S5. $V(q_{tmp})$ の算出
 q_{tmp} における評価関数の値を算出する。
- S6. f の算出
 $V(q_{tmp})$ 、 $V(q_{current})$ および δq から f を算出する(式(2.15)参照)。
- S7. v_{new} と q_{new} の算出
 反復公式(2.12)および(2.13)から v_{new} と q_{new} を算出する。
- S8. $q_{current}$ と $v_{current}$ の更新
 v_{new} によって $v_{current}$ を更新し、 q_{new} によって $q_{current}$ を更新する。

なお、ステップ S3 および S5 のポテンシャル V の算出においては、他の次元についての位置 q の値も用いてポテンシャル V を計算していることに注意すること。

2. 検証実験

2.1. 検証方法

高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化の有用性検証実験は、高次元アルゴリズムをソフトウェアで実装し、JPEG 量子化テーブルの最適化を行い、従来技術とレートすなわち圧縮率と画像品質について比較することによって有用性を検証する。ここで、JPEG 国際標準に例示されている量子化テーブルを用いて符号化復号化した場合を比較対象の従来技術として参照する。

レートの比較を 1 画素あたりのビット数で表現したレート計量結果の客観的数値のみで行う。一方、画像品質の比較を SNR など客観的な各画像品質評価基準と目視による観察の主観的な評価によって行う。主観評価においては、従来技術に対して、著しい視覚的な劣化を生じているか否かに注目して各復号化画像を観察する。

2.2. 参照画像

参照画像(検証実験において参照する原画像)として(a)デジタル標準画像、(b)スキャナで入力された画像および(c)医療用超音波画像が用いられた。ここで、参照画像は、第 1 章の図 6 における「符号化される画像」に対応する。

(a) デジタル標準画像

自然画像の代表として、映像メディア学会(旧テレビジョン学会)が編成したデジタル標準画像5種を用いた^{[15],[16]}。それぞれ、肌色チャート、ヘアバンドの女性、天気予報、スイスの山村およびチューリップとして参照する。本報告では、これらの画像をいわゆる自然画像を代表していると考ええる。

(b) スキャナで入力された画像

電子文書のコンテンツとしてスキャナによって入力された印刷物などの画像は多用されると考えられる。そこで、スキャナで入力された画像(以下、スキャン入力画像と称する。)に対する本手法の有効性を検証するために、「建物」と「文字」からなる印刷物のスキャン入力画像および「地図」のスキャン入力画像を参照画像とした。

これらのスキャン入力画像は、デジタル標準画像とは異なり、スキャン入力の原稿が印刷物であり、すなわち原画がいわゆる網点画像で構成され、スキャン入力過程でレンズなどのボケなどの劣化を生じている点で、一般のデジタル画像とは画像の特性が異なると考えられる。

このスキャン入力画像を参照画像とした検証実験は、この網点画像とボケなどの劣化に対する本手法の有効性を確認するために行った。

(c) 医療用超音波画像

JPEG 画像の応用のひとつに医療用超音波画像に対する応用がある。本手法の医療用超音波画像に対する有効性を検証するために、胸部医療用超音波画像などを参照画像として検証実験を行った。

検証実験に用いた医療用超音波画像は、次の点で(a)デジタル標準画像や(b)スキャン入力画像と異なる。部分的に色づけされている点で通常のモノクローム画像あるいはカラー画像とも画像の特性が異なると考えられる。

- 画像データは超音波エコーの過程を経て電子化されている。
- 画像内容の多くの領域(周辺領域)はモノクロームであるが、特定領域は多色に色づけされている。

2.3. 検証実験の態様

ポテンシャル関数(評価関数)の構成と参照画像の組み合わせによって、表 2.1 のように複数の検証実験のパターンがある。ポテンシャル関数の構成は、画像品質の尺度によって、各 RGB 色成分の SNR を用いる場合、CIEL*a*b*色空間で定義される色差に基づく平均色差を用いる場合あるいは視覚特性と画像の劣化特性を考慮した画像品質

評価尺度を用いる場合の三つに分けられる(第3章参照)。また、参照画像は上述の三種に分けられる。それぞれ次の各節において対応する実験結果を示す。表 2.1 中「未実施」の項は、該当する検証実験を行っていないことを意味する。

表 2.1. 検証実験のパターン

		参照画像		
		デジタル標準画像	スキャン入力画像	医療用超音波画像
画像品質の尺度	SNR	第 3.1 節	第 3.2 節	第 3.3 節
	平均色差	第 3.4 節	未実施	第 3.3 節
	視覚特性と画像の劣化特性を考慮した画像品質尺度	第 3.5 節	未実施	未実施

ポテンシャル関数の構成要素と参照画像のほかに、検証実験のパターンを多様化させる要素には以下のものがある。

- k_1 や k_2 などのポテンシャル関数のパラメータ(第3章参照)
- 仮想粒子の質量など各種定数値
- 仮想粒子の位置の初期値
- 仮想粒子の運動量の初期値

3. 結果

本節では、表 2.1 の検証実験パターンに対応する結果を示す。hamiltonC5, hamiltonC8 あるいは hamiltonC9 など JPEG 量子化テーブル最適化モジュールの出力結果からのデータ抽出方法については、付録 2-3 を参照されたい。また、検証実験結果の生データの保管ディレクトリとそれらをまとめた Excel ファイル名については、付録 2-4 を参照されたい。各節に対応する得られた量子化テーブルは、付録 2-5 から付録 2-9 を参照されたい。同じく、3.1 節に対応する検証実験で用いられた参照画像および復号画像をサイズ縮小して印刷したものを付録 2-10 から付録 2-14 に示す。他の節の対する復号画像は割愛する。

3.1. SNR でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合

ここでは、ポテンシャル関数をレートと各 RGB 色成分に対する SNR で構成し、デジタル標準画像を参照画像とした場合の結果について述べる^{[17]~[19]}。

表 2.2 は、ポテンシャル関数のパラメータを変えた場合のレート改善率が最も良い

ときの各参照画像に対するレートと各 RGB 色成分に対する SNR を示す。レートの値が小さければ小さいほど、圧縮率は高くなる。一方、SNR の値が大きければ大きいほど、一般的に画像の品質が良い。改善率は Microsoft Excel による 15 桁の浮動小数点で計算し、表中は四捨五入表示していることに注意(以下の他の結果も同じ)。各画像に対して、SNR の改善率は、0.0002%~0.42%と低いものの、画像品質を維持しつつ、レートについては、2.27%~6.52%の改善がみられる。ここで、ポテンシャル関数のパラメータとは、ポテンシャル関数の構成要素の寄与率を示す変数 k_1 , k_2 , k_3 および k_4 のことである。表 2.2 に対応する(ベスト・ケース)の各パラメータを表 2.3 に示す。

表 2.2. レートと SNR

参照画像	国際標準例示		本方式			改善率(%)			
	レート	SNR	レート	SNR	レート	SNR			
肌色チャート	0.435	R	32.1	0.425	R	32.1	2.34	R	0.03
		G	37.5		G	37.5		G	0.04
		B	31.9		B	32.0		B	0.32
ヘアバンドの女性	0.603	R	30.3	0.590	R	30.3	2.27	R	0.13
		G	34.6		G	34.6		G	0.04
		B	29.3		B	29.3		B	0.03
天気予報	0.650	R	29.1	0.634	R	29.2	2.39	R	0.42
		G	34.2		G	34.3		G	0.06
		B	26.9		B	27.0		B	0.41
スイスの山村	1.497	R	24.3	1.399	R	24.4	6.52	R	0.14
		G	27.4		G	27.5		G	0.28
		B	21.5		B	21.5		B	0.01
チューリップ	1.526	R	24.7	1.454	R	24.8	4.76	R	0.09
		G	28.0		G	28.1		G	0.36
		B	22.4		B	22.4		B	0.002

最適化によって得られた量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、いずれの画像についても国際標準例示の場合に比べて、顕著なブロック歪やモスキート・ノイズは見られなかった。

表 2.3. ベスト・ケースのポテンシャル関数のパラメータ

参照画像	パラメータ			
	k_1	k_2	k_3	k_4
肌色チャート	10.0	1.0	1.0	1.0
ヘアバンドの女性	5.0	1.0	1.0	1.0
天気予報	12.0	1.0	1.5	1.0
スイスの山村	2.0	1.0	1.0	1.0
チューリップ	2.5	1.0	1.1	1.0

3.2. SNR でポテンシャル関数を構成し、スキャン入力画像を参照画像とする場合

ここでは、ポテンシャル関数をレートと各 RGB 色成分に対する SNR で構成し、スキャン入力画像を参照画像とした場合の結果について述べる^[18]。

表 2.4 は、ポテンシャル関数のパラメータを、 $k_r=6.0$, $k_g=1.0$, $k_b=1.0$ および $k_f=1.0$ に固定した場合のレート改善率が最も良いときの各参照画像に対するレートと各 RGB 色成分に対する SNR を示す。「建物と文字」の場合、SNR については 0.01～0.19%の改善に対して、レートは 10%を超える改善となっている。同様に、「地図」の場合、SNR については 0.09%～0.71%と改善率が低いものの、レートについては、約 7%の改善となっている。

最適化によって得られた量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、いずれの画像についても国際標準例示の場合に比べて、顕著なブロック歪やモスキート・ノイズは見られなかった。

表 2.4. レートと SNR

参照画像	国際標準例示		本方式			改善率(%)			
	レート	SNR	レート	SNR	レート	SNR			
建物と文字	1.089	R	29.0	0.969	R	29.0	10.95	R	0.19
		G	29.2		G	29.2		G	0.01
		B	27.4		B	27.4		B	0.11
地図	0.867	R	30.9	0.807	R	31.1	6.91	R	0.71
		G	30.6		G	30.6		G	0.09
		B	28.6		B	28.8		B	0.63

3.3. SNR または平均色差でポテンシャル関数を構成し、医療用超音波画像を参照画像とする場合

ここでは、ポテンシャル関数をレートと各 RGB 色成分に対する SNR または CIE $L^*a^*b^*$ 色空間における平均色差で構成し、医療用超音波画像を参照画像とした場合の結果について述べる。これに関連する検証実験は、東海大学濱本研究室に委託して行われた。

濱本らの報告^{[20],[21]}では、高次元アルゴリズムは、医療用超音波画像に対しても有用であることが示されている。具体的には、従来方法と比較して、同程度の画像品質で、10%以上の圧縮率改善を図ることが例証されている。詳細は、文献[20]および[21]を参照されたい。

3.4. 平均色差でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合

ここでは、ポテンシャル関数をレートと CIE L*a*b*色空間における平均色差で構成し、デジタル標準画像を参照画像とした場合の結果について述べる。

表 2.5 は、ポテンシャル関数のパラメータを $k_1=1.0$ および $k_2=1.0$ に固定した場合のレート改善率が最も良いときの各参照画像に対するレートと平均色差を示す。平均色差の値が小さければ、小さいほど画像の品質は良い。

平均色差を 0.5%~3.4%とわずかに改善しつつ、レートについては、約 12%~34%の高いレートの改善が見られた。しかし、最適化によって得られた量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、いずれの画像についても国際標準例示の場合に比べて、顕著なブロック歪が観察された。

表 2.5. レートと平均色差

参照画像	国際標準例示		本方式		改善率(%)	
	レート	平均色差	レート	平均色差	レート	平均色差
肌色チャート	0.435	5.18	0.289	5.15	33.6	0.53
ヘアバンドの女性	0.603	6.56	0.418	6.45	30.7	1.78
天気予報	0.650	7.04	0.491	6.80	24.4	3.43
スイスの山村	1.497	14.38	1.119	14.12	25.3	1.78
チューリップ	1.526	16.59	1.342	16.07	12.1	3.15

次に、圧縮率が最良ではないが、5%を超える圧縮率改善に初めて達したときの結果を表 2.6 に示す。これらの結果に対応する量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、いずれの画像についても国際標準例示の場合に比べて、顕著なブロック歪やモスキート・ノイズは見られなかった。

表 2.6. レートと平均色差

参照画像	国際標準例示		本方式		改善率(%)	
	レート	平均色差	レート	平均色差	レート	平均色差
肌色チャート	0.435	5.18	0.409	5.13	5.96	0.95
ヘアバンドの女性	0.603	6.56	0.568	6.55	5.93	0.23
天気予報	0.650	7.04	0.612	6.60	5.91	6.26
スイスの山村	1.497	14.38	1.408	14.31	5.96	0.49
チューリップ	1.526	16.59	1.447	16.47	5.21	0.74

3.5. 視覚特性と画像の劣化特性を考慮した画像品質尺度でポテンシャル関数を構成し、デジタル標準画像を参照画像とする場合

ここでは、ポテンシャル関数をレートと視覚特性と画像の劣化特性を考慮した画像品質尺度(画像品質予測式)で構成し、デジタル標準画像を参照画像とした場合の結果について述べる^{[22]~[24]}。

表 2.7 は、ポテンシャル関数のパラメータを $k_f=8.0$ および $k_g=1.0$ に固定した場合のレート改善率が最も良いときの各参照画像に対するレートと画像品質予測式の値を示す。予測値の値は大きければ、大きいほど一般的に画像の品質は良い。

最適化によって得られた量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、いずれの画像についても国際標準例示の場合に比べて、顕著なブロック歪やモスキート・ノイズは見られなかった。

表 2.7. レートと画像品質の予測値

参照画像	国際標準例示		本方式		改善率(%)	
	レート	予測値	レート	予測値	レート	予測値
肌色チャート	0.435	4.069	0.432	4.158	0.69	2.19
ヘアバンドの女性	0.603	3.334	0.557	3.423	7.63	2.67
天気予報	0.650	3.024	0.592	3.098	8.92	2.45
スイスの山村	1.497	3.632	1.355	3.708	9.49	2.09
チューリップ	1.526	4.212	1.258	4.425	17.56	5.06

4. 考察

4.1. 得られた量子化テーブルの値の傾向

ここでは、3.1 節の実験結果を例にして、最適化された JPEG 量子化テーブルが国際標準例示のものとのように異なるかについて述べる。

図 2.3 および図 2.4 は、肌色チャートおよびスイスの山村の輝度用量子化テーブルについて、国際標準例示のものとの差分を示す。正の値は、量子化ステップの増加を示し、負の値は、量子化ステップの減少を示す。なお、他の場合に対応する図については、付録 2-15 を参照されたい。

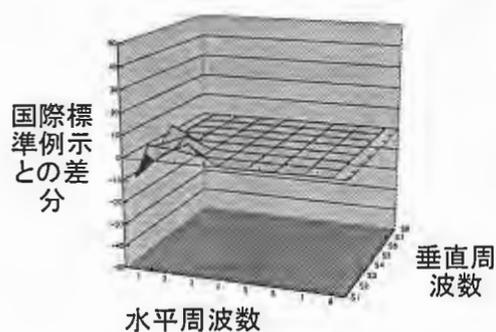


図 2.3. 輝度用量子化テーブルの変化
(肌色チャート)

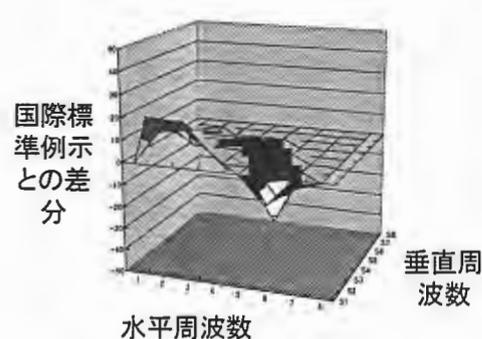


図 2.4. 輝度用量子化テーブルの変化
(スイスの山村)

これらの図から JPEG 量子化テーブルの DC 成分および AC 成分について、次のことがわかる。

- DC 成分に対する量子化ステップ
量子化ステップが減少している場合がある。
- AC 成分に対する量子化ステップ
 - 低周波域の量子化ステップは増加するが多い。
 - 中周波域の量子化ステップは減少するが多い。
 - 高周波域の量子化ステップは変化しないが多い。

量子化ステップ、すなわち量子化テーブルの値は大きいほど粗く量子化され、逆に、量子化ステップの値が小さいほど精細に量子化される。一般に粗く量子化された場合には、レートは削減されるが、画像の品質は悪くなる。一方、詳細に量子化された場合には、レートは増加するけれども、画像の品質は良くなる。

DC成分の量子化ステップおよびAC成分中周波数域の量子化ステップの減少により、詳細な量子化となり画像品質を向上させる。一方、AC成分の低周波域の量子化ステップの増加により、粗い量子化となりレートを削減する。これらの相補的な効果によって、画像品質を維持したまま、レートを削減できたと考えられる。

4.2. 最適化可能な画像

3.1 節においては、異なる内容のデジタル画像に対して SNR を維持したまま、レートを削減する量子化テーブルが得られたことを示した。

3.2 節においては、スキャン入力画像に対して、SNR を維持したまま、レートを削減する量子化テーブルが得られたことを示した。スキャン入力画像は、建物と文字を内容とする画像とコンピュータ・グラフィックスで表現された地図を内容とする画像であることから、次の画像に対して有用であると考えられる。

- 印刷物など網点画像
- いわゆる文字画像(文字の形状(グリフ)を内容とする画像)
- ビジネス・グラフィックスなどベクター・グラフィックス
- ボケなどの劣化過程を経た画像
- スキャナによって入力された画像

3.3 節においては、医療用超音波画像に対して本手法が有用である、とした報告があることことを述べた。

以上の帰結をまとめると、本手法は、画像の種類ないし内容を問わず、一般的な画像に対して、JPEG 量子化テーブルの最適化が可能であると考えられる。

4.3. ポテンシャル関数の構成

検証実験においては、レートと画像品質の尺度でポテンシャル関数を構成した。3.1 節においては、各 RGB 色成分の SNR を画像品質の尺度とし、画像品質を維持したまま、レートを削減する JPEG 量子化テーブルが得られたことを示した。

CIEL*a*b*色空間で定義される色差に基づく平均色差は、均等色空間で画像の劣化程度を評価している点で視覚特性を考慮していると言え、各 RGB 色成分の SNR による評価よりも、画像の劣化程度をより適正に表現していると考えられた。そこで、その平均色差とレートをポテンシャル関数として実験を行い、その結果を 3.4 節に示した。3.4 節では、レートが最も良くなる場合の JPEG 量子化テーブルでは、見た目の画像品質を悪くするけれども、レートが 10%ほど改善される場合の JPEG 量子化テーブルでは、視覚的な画像品質の劣化を伴うことがないことを示した。

このように平均色差のみを画像品質の尺度とした場合には、見た目との不一致がみられたため、この点を改善すべく、視覚特性および画像品質劣化特性を考慮した画像品質評価尺度を高次元アルゴリズムに導入して、JPEG 量子化テーブルの最適化を図り、その結果を 3.5 節に示した。具体的には、3.5 節では、レートと視覚特性および画像品質劣化特性を考慮した画像品質評価尺度をポテンシャル関数とした場合、視覚的な劣化を伴うことなく、レートを改善する JPEG 量子化テーブルが得られたことを示した。

これらのことから、圧縮率に対する尺度(レート)と適切な画像品質評価尺度でポテンシャル関数を構成することによって、本手法により、視覚的な劣化を伴うことなく、レートを改善する JPEG 量子化テーブルを獲得できると考えられる。

4.4. ミキシングなしとシステム・パラメータ γ

前述のように、この有用性検証実験では、ミキシングの項はゼロとし、 γ で表現されるシステム・パラメータは、 $\gamma=1$ として高次元アルゴリズムを実装した。この場合は、高次元アルゴリズムは、計算機化学におけるいわゆる分子動力学法^[25]と同一の効果をもたらす。

4.5. ポテンシャル関数のパラメータと初期値

ポテンシャル関数のパラメータ値の大小によって、レートあるいは画像品質評価尺度の値が同じ場合であっても、それらの影響する度合いが異なり、計算される量子化ステップの値は異なる。3.1 節では、パラメータの値を変化させて、最もレートが削減される場合の結果を示した。3.2 節ほか他の節では、パラメータを固定した場合の結果を示した。ポテンシャル関数のパラメータ値をどのような値とすべきかは検討課題となっている。

式(2.9)および式(2.10)の反復公式から分かるように、代表的なとして、各状態空間における仮想粒子の運動量と位置が初期値として与えられる必要がある。どのような値を与えるべきかについても検討課題となっている。各検証実験における仮想粒子の運動量と位置が初期値については、付録 2-16 を参照されたい。

5. 結論

以上の実験結果および考察から高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブルへの応用に対する有用性が示された。本章では、主に以下の点について述べた。

- デジタル画像、スキャン入力画像(印刷物を原稿とする画像)、いわばアナログ画像ないし劣化を受けた中間調画像(網点画像)、並びに医療用超音波画像に対する有用性を示した。そこで、本手法は、画像の種類を問わず有用と考えられる。
- 検証実験において、SNR、平均色差、視覚特性と画像品質劣化特性を考慮した画像品質評価尺度のそれぞれでポテンシャル関数を構成し、JPEG 量子化テーブルを最適化できることを示した。そこで、本手法は、レートと画像品質の尺度で構成される任意のポテンシャル関数に対応して最適化可能と考えられる。

第3章

画像品質評価基準

ここでは、JPEG 量子化テーブルを最適化する場合に用いられる画像品質評価基準について述べる。高次元アルゴリズムなどを用いて JPEG 量子化テーブルを最適化する場合、圧縮率の基準と共に画像品質評価基準が必要となる。JPEG ベース・ライン・システムにおいては、原画像を符号化し、復号化した場合、結果の復号化画像は原画像に対して劣化している。以下、原画像を参照画像と、復号化画像を試験画像と呼ぶことがある。

1. 従来の画像品質評価尺度

従来画像品質評価は、主に次の三つに分類される尺度を用いてきた。

- (a) 画像における信号対雑音比
- (b) 平均色差
- (c) 画像の劣化特性を考慮した尺度

画像における信号対雑音比(Signal to Noise Ratio: SNR)(以下、単に SNR と称する。)(a)は、画像の品質を評価する合に典型的に用いられる尺度であり、式(3.1)によって表現される。この派生版として視覚の周波数特性を考慮したものも多用される。式(3.1)において各色成分を8ビットで構成することを仮定している。また、式(3.2)の $R(x,y)$ および $T(x,y)$ は、それぞれ参照画像および試験画像の座標 (x,y) におけるある色成分の値を示す。また、 W および H は参照画像および試験画像の幅および高さを示す。例えば、参照画像および試験画像の各画素の色成分を RGB の三色で構成した場合、R 成分に対する SNR、G 成分に対する SNR および B 成分に対する SNR のように、三つの SNR を求める。

$$SNR(dB) = 20 \log \frac{255}{\sqrt{MSE}} \quad (3.1)$$

$$MSE = \frac{1}{WH} \sum_{y=1}^H \sum_{x=1}^W (R_{(x,y)} - T_{(x,y)})^2 \quad (3.2)$$

これは、典型的には、図 3.1 のように、通常の SNR を計算する前の過程で、FFT(高速フーリエ変換)および IFFT(逆高速フーリエ変換)を介して、視覚の周波数特性特性を考慮したフィルタリング(HVS(Human Visual System)フィルタリング)を行うものである。

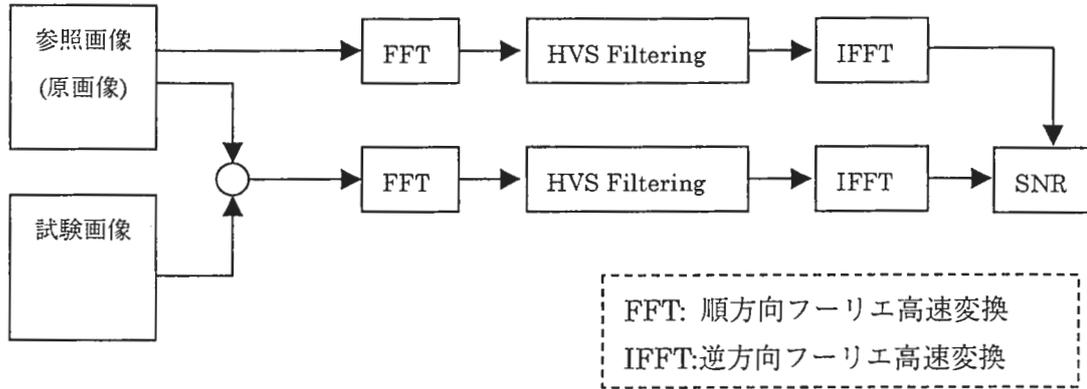


図 3.1. 視覚特性を考慮した SNR

次に、画像品質尺度として平均色差(b)もよく用いる。色差^[26]を CIE $L^*a^*b^*$ 色空間に基づいて計算することが多い。画像の多くは、RGB 色空間を用いて表現されているので平均色差の計算の前には、色空間の変換すなわち RGB 色空間から CIE $L^*a^*b^*$ 色空間への変換が必要となる。参照画像と試験画像の各画素に対する色差を計算し、画像の全画素についての平均したものを平均色差と呼ぶことにする。参照画像のある画素に対応する CIE $L^*a^*b^*$ 空間での座標(L_1^*, a_1^*, b_1^*)と試験画像のある画素に対応する CIE $L^*a^*b^*$ 空間での座標(L_2^*, a_2^*, b_2^*)との色差は、式(3.3)により計算する。ここで、 L^* 成分および a^* 成分および b^* 成分は式(3.4)から求められる。RGB 色空間から XYZ 色空間への変換についての説明は割愛する。関連する実験では、式(3.4)の三刺激値(X_0, Y_0, Z_0)は D65 光源を仮定して計算した。SNR の場合と同じく、視覚の周波数特性を考慮する場合もある。

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a^* = 500 \left(\left(\frac{X}{X_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \\ b^* = 200 \left(\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \right) \end{cases} \quad (3.4)$$

画像の劣化特性を考慮した尺度(c)には、画像処理のアルゴリズムに対応していくつかの尺度が考えられる。JPEG ベース・ライン・システムに対応したものとして、小谷らの画像品質尺度が提案されている。

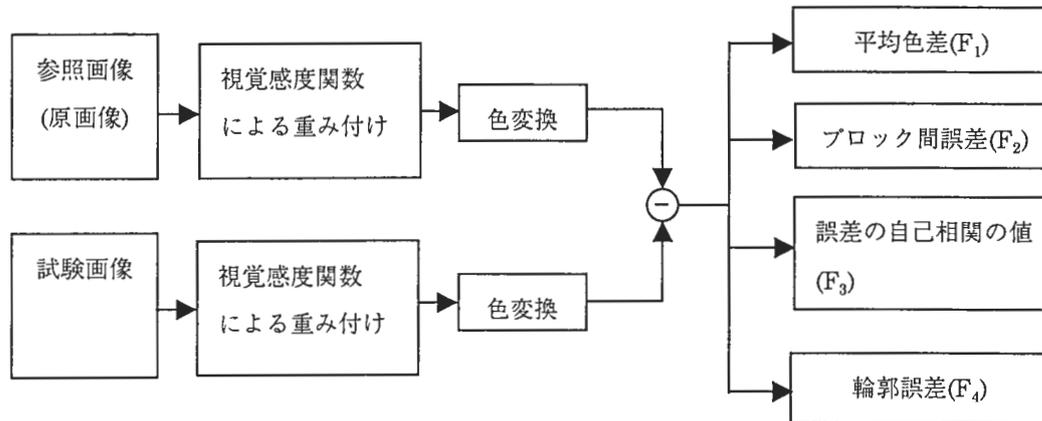


図 3.2. 画像の劣化特性を考慮した尺度

図 3.2 は、小谷らの画像劣化特性を考慮した尺度の画像劣化特性を求める部分のブロック・ダイアグラムである。参照画像と試験画像は、それぞれ視覚感度関数による重み付けが行われ、さらに RGB 色空間から CIE $L^*a^*b^*$ 色空間への変換が行われ、CIE $L^*a^*b^*$ 色空間内での L^*, a^*, b^* の各色成分ごとの色差が算出される。それらの色差から画像の劣化特性を示す 4 つの特徴量として、平均色差(F_1)、ブロック間誤差(F_2)、誤差の自己相関の値(F_3)および輪郭誤差(F_4)を算出する。

ここで、視覚感度関数による重み付けは、前述の HVS フィルタリングと同様の効果を持つ。また、平均色差(F_1)は、CIE $L^*a^*b^*$ の色空間で定義される色差の平均値を意味する。つまり、通常の意味での平均色差である。ブロック間誤差(F_2)は、サブブロック間の隣接画素の色成分から計算される平均誤差である。誤差の相互相関の値(F_3)は、誤差(ここでは、色差)がテクスチャ(模様)となっている様子を計量する値である。輪郭誤差(F_4)は、画像の内容の輪郭周辺に生じる誤差を、視覚特性を考慮して計量した値である。

小谷らの画像品質評価尺度は、それらの特徴量($F_1 \sim F_4$)の主成分分析に基づいた値から構成される。図 3.3 は、その主成分分析の計算過程を示す図である。まず、特徴量($F_1 \sim F_4$)から相関行列が計算され、その相関行列についての固有ベクトル I_1, I_2, I_3 および I_4 を計算する。それらの固有ベクトルを列ベクトルとする行列 $[I_1, I_2, I_3, I_4]$ を構成し、その行列によって、もとの特徴量(F_1, F_2, F_3, F_4)を変換し、主成分(z_1, z_2, z_3, z_4)を得る。それらの中から寄与率の大きい z_1, z_2 および z_3 を使って、画像品質の予測式を構成する。

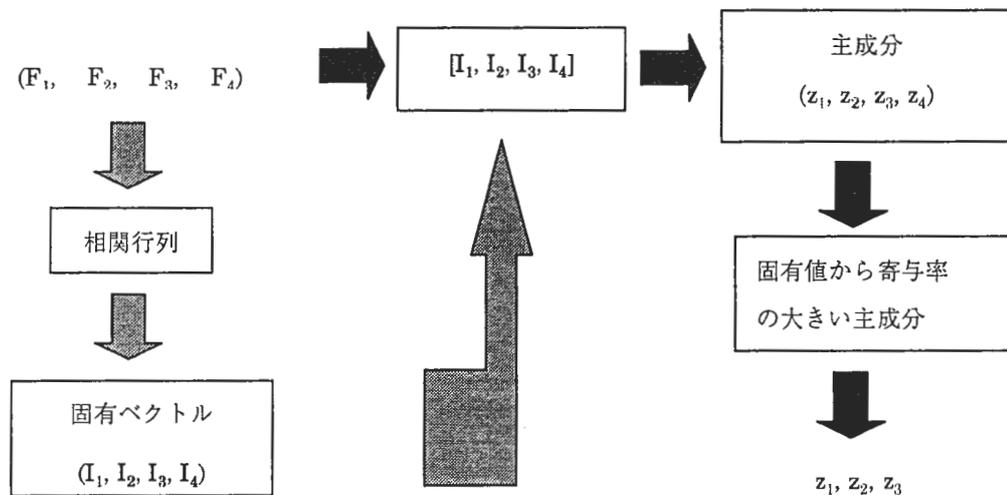


図 3.3. 画像品質劣化特徴量の主成分分析

小谷らの提案する画像品質評価尺度は、画像品質の予測値が、主観評価実験における平均主観評点(Mean Opinion Score: MOS)の値とよく一致するように、前記の主成分 z_1 , z_2 および z_3 を線形結合して予測式を構成する。そこで、その画像品質評価尺度は、画像品質の劣化特徴量 $F_1 \sim F_4$ から MOS を予測することができる。このように、本報告でも画像品質の評価尺度を画像品質の予測式と表現することがある。

2. JPEG 量子化テーブル最適化のための画像品質評価尺度

高次元アルゴリズムの評価尺度の一要素として前述の SNR および平均色差の画像評価尺度を用いてきた。しかし、視覚特性を考慮していないことおよび画像の劣化特性を考慮していないことから、それらを考慮した前述の小谷らの画像品質評価尺度を JPEG 量子化テーブル最適化に導入することを検討した。しかし、以下の二点を考慮する必要があった。

- 視覚の周波数特性(視覚の感度関数)が明確でない。
- 計算時間が長いことが予想される。

視覚の感度関数については、よく参照される式(3.5)のものを用いた^[27]。ここで、 f は空間周波数(cycle/deg)である。また、小谷らの方法では、L*成分、a*成分、b*成分を独立に捉えて、画像品質の予測式を構成しており、計算時間が長くかかることが予想されたので、通常平均色差に基づいて劣化要因に対する特徴量を計算することとした。さらに、図 3.2 の構成での視覚感度関数による重み付けでは、計算時間が長くかかるので、

構成を図 3.4 のように構成し、DCT 係数でのフィルタリングを行うようにした。

$$H(f) = 2.46(0.1 + 0.25f) \exp(-0.25f) \quad (3.5)$$

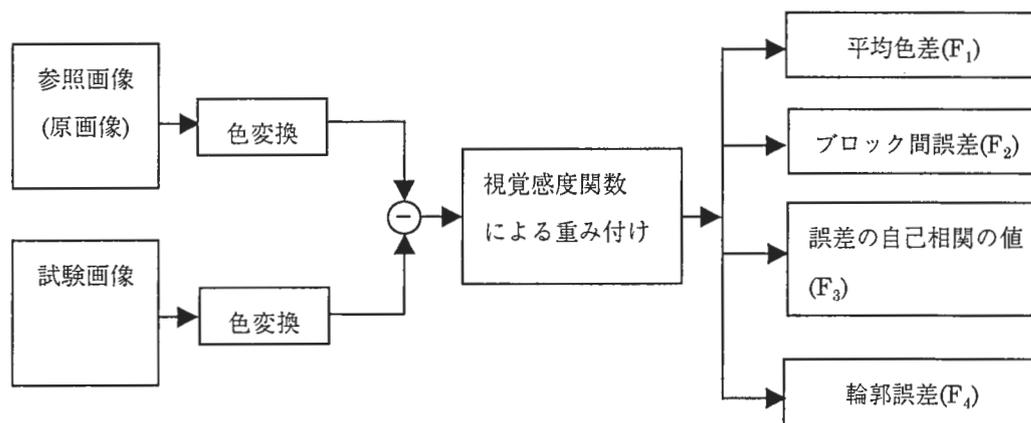


図 3.4. 本方式の画像劣化特性計量

3. 主観評価実験と画像品質評価尺度の正当性の検証

前節で説明した画像品質評価尺度を高次元アルゴリズムに導入する前に、その正当性を検証する必要がある。つまり、構成した画像品質評価尺度が正しく画像の品質を評価(予測)するかどうかを検証する必要がある。そこで、劣化させた画像(試験画像)の主観評価実験を行い、その平均主観評点と画像品質尺度の予測値が一致するかを重相関の値を調査することによって調べた。ここでは、3.1 節で主観評価実験^{[28]~[31]}について述べ、3.2 節で画像品質評価尺度の正当性の検証について述べる。続く 3.3 節で正当性検証結果について議論する。

3.1. 主観評価実験

主観評価実験は、参照画像と JPEG 復号画像と違い、すなわち劣化の程度を主観的な評点として明確にするために行われた。具体的には、ある参照画像に対して、8 種類の JPEG 量子化テーブルを用いて符号化復号化し、それらの結果を試験画像とした。つまり、8 段階の劣化程度を持つ試験画像を用意した(付録 3-1 参照)。参照画像は、表 3.1 のように合計 11 種類を用意した。そこで、試験画像は、合計 88 枚となる。これ

らの参照画像および試験画像を勧告^[28]に準じて、ディスプレイに提示し、それを評価者に観察してもらい(主観評価実験条件は表 3.2 を参照されたい)、各試験画像ごとに 5 段階の評点を記録した。評点の平均評点 MOS を各試験画像ごとに求めた。主観評価実験の詳細については、付録 3-2 を参照されたい。また、各試験画像ごとの MOS の具体的な値は付録 3-3 を参照されたい。

表 3.1. 参照画像

内容	個数
ITE デジタル標準画像	5
ビジネス・グラフィックス	4
テキスト画像	2

表 3.2. 主観評価実験条件

項目	主観評価実験条件
視距離	4H (ここで H は画面の高さ)
室内照明	弱照明
ディスプレイ	ナナオ社製 21 インチ・ディスプレイ FlexScanE76D, 画面ピーク輝度:92.502(cd/m ²)
提示方法	二重刺激妨害尺度法
評価尺度	5 段階劣化尺度
評定者数	21 名

3.2. 画像品質評価尺度の正当性の検証

3.1 節で述べた画像品質評価尺度による予測値と 3.2 節で述べた試験画像の MOS がどれくらい一致しているのかを確認するためにオープン・データに対して検証を行った(付録 3-4 参照)。ここでは、予測値と MOS の一致の度合いを重相関係数の値で表現する。表 3.3 は、各画像の種類ごとの重相関係数の値を示す。また、図 3.5a~図 3.5d は、各画像の種類ごとの画像品質の予測値と MOS との関係を示すプロット図である。

表 3.3. 予測値と MOS の一致の度合い

画像の種類	重相関係数
種類を問わない場合	0.58
ITE デジタル標準画像	0.77
ビジネス・グラフィックス	0.74
テキスト画像	1.03

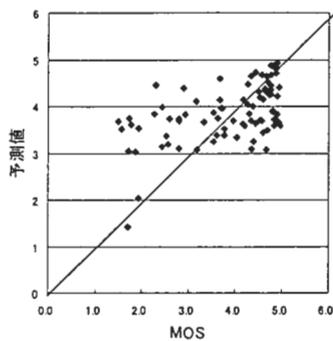


図 3.5a. MOS と予測値との関係
(画像の種類を問わない場合)

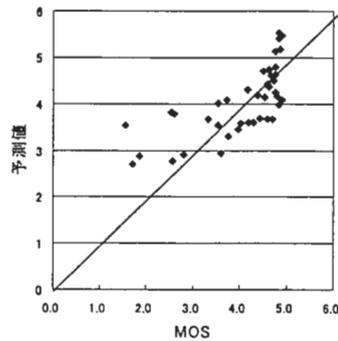


図 3.5b. MOS と予測値との関係
(ITE デジタル標準画像)

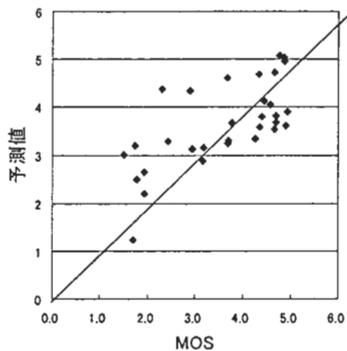


図 3.5c. 予測値と MOS との関係
(ビジネス・グラフィックス)

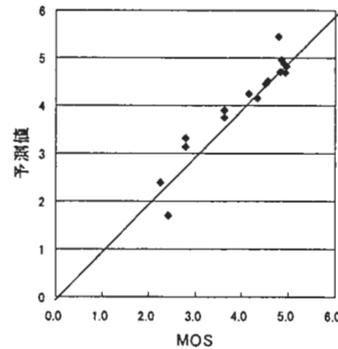


図 3.5d. 予測値と MOS との関係
(文字画像)

図 3.5a～図 3.5d および表 3.3 を見てわかるように、ITE デジタル標準画像、ビジネス・グラフィックスおよび文字画像の各画像の種類ごとに予測式を構成した場合の重相関係数(それぞれ 0.77、0.74 および 1.03)は、画像の種類を問わず、全試験画像のデータを使って予測式を構成した場合の重相関係数(0.58)に比べて大きい。このことは、全試験画像のデータを使って構成した汎用的な予測式に対して、各画像の種類ごとのデータを使って、画像の種類に応じて予測式を構成すべきことを示していると考えられる。

画像の種類を問わない予測式 p_{all} と各画像の種類に応じて構成した予測式を式(3.6)～式(3.9)に示す。ここで、 p_{ITE} 、 $p_{graphics}$ および p_{text} は、それぞれ自然画像、ビジネス・グラフィックスおよびテキスト画像に対する予測式を示している。なお、ITE デジ

タル標準画像はいわゆる自然画像のデータを代表すると考えられることから、予測式(3.7)は ITE デジタル標準画像のデータから構成されたものであるが、一般的な自然画像に対する予測式となっていると考えられる。特徴量($F_1 \sim F_4$)から主成分($z_1 \sim z_3$)の具体的な変換については付録 3-5 および付録 3-6 を参照されたい。

$$p_{all} = -0.17135z_1 - 0.15446z_2 - 0.60128z_3 + 3.883289 \quad (3.6)$$

$$p_{ITE} = -0.14641z_1 - 0.46831z_2 - 0.63768z_3 + 4.032086 \quad (3.7)$$

$$p_{graphics} = -0.43709z_1 - 0.53566z_2 - 0.1377z_3 + 3.623953 \quad (3.8)$$

$$p_{text} = -0.53533z_1 - 0.1542z_2 + 0.420345z_3 + 4.029968 \quad (3.9)$$

3.3. 考察

小谷らの画像品質評価の予測式は、画像の種類を問わない汎用的な予測式として報告されているが、我々の構成した予測式では、前述のように各画像の種類を考慮して予測式を構成した方が良い結果となった。その原因を調査するために、画像品質劣化の特徴量($F_1 \sim F_4$)の分布を画像の種類ごとに調べた。図 3.6a～図 3.6d は、画像品質劣化の特徴量の分布を示す。

図 3.6a～図 3.6d を見ると、画像品質劣化の特徴量($F_1 \sim F_4$)は、それぞれ画像の種類によって異なる分布となっていることが分かる。これは、画像の種類ごとにそれらの特徴量を分類できる可能性を示唆している。この画像の種類による特徴量の分布の違いは、各画像の種類に応じて異なる予測式を構成すべきことを示唆していると考えられる。なお、各画像の種類ごとの固有ベクトルの違いについては、付録 3-6 を参照されたい。

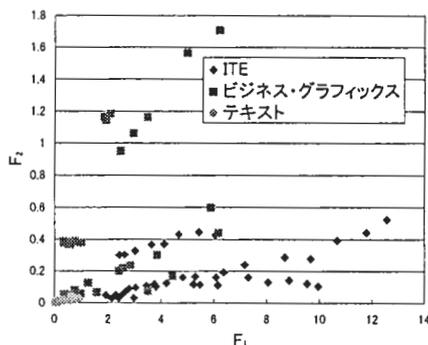


図 3.6a. 画像品質劣化特徴量の分布
($F_1 F_2$)

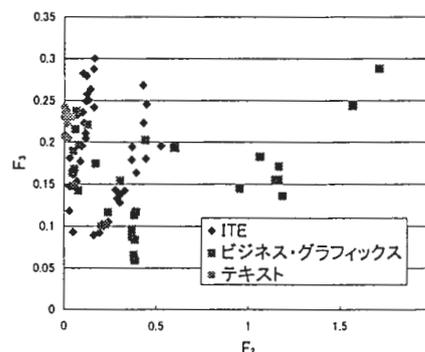


図 3.6b. 画像品質劣化特徴量の分布
($F_2 F_3$)

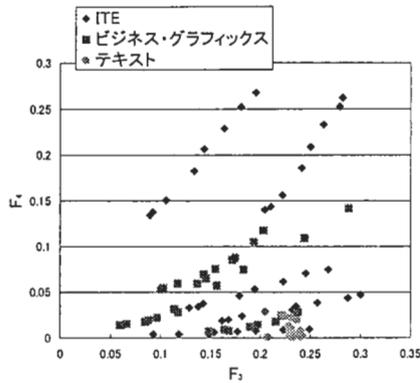


図 3.6c. 画像品質劣化特徴量の分布
(F_3F_4)

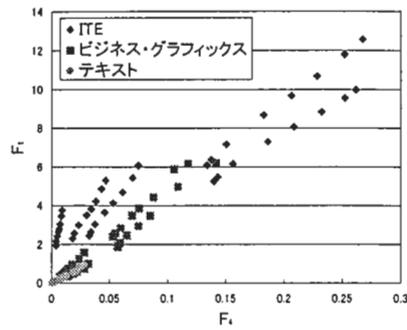


図 3.6d. 画像品質劣化特徴量の分布
(F_4F_1)

4. まとめと課題

本章では、JPEG 量子化テーブル最適化のための画像品質評価尺度について述べた。提案した視覚特性と画像劣化特性を考慮した画像品質評価尺度(予測式)は、各画像の種類に応じて構成したものを用いるべきことが示された。

提案した画像品質評価尺度の予測式の精度に改善の余地があると思われ、課題となっている。以下のようにして予測式を改善することが可能と思われる。

- モスキート・ノイズの計量化
- 輝度コントラストの閾値の考慮

まず、JPEG 画像圧縮符号化において特有なモスキート・ノイズを計量し、それを画像劣化の特徴量として予測式を再構成することが考えられる。現在のバージョンの予測式では、モスキート・ノイズは平均色差(F_1)や誤差の自己相関の値(F_3)に包含されて計算されていると考えられる。個別に画像劣化の特徴量としてとらえることにより予測式の精度が上がると考えられる。

次に、輝度コントラストの閾値を考慮して、予測式を再構成することが考えられる。現在のバージョンの予測式では、視覚の周波数特性(視覚の感度関数)を考慮しているものの輝度コントラストなどで閾値処理を行っていない。輝度コントラストによる閾値処理により、いわば信号対雑音比が相対的に向上して、予測式の精度が改善されるものと考えられる。

第 4 章

高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への適用 2

第 2 章では、分子動力学法の拡張応用と考えられる単純化した高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブル最適化について述べた。それに対して、本章では、高次元アルゴリズムの本質であるミキシングやシステム・パラメータ γ を考慮した高次元アルゴリズムを JPEG 量子化テーブルの最適化に応用した場合の有用性の検証方法とその結果について述べる。

1. 高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化

ここでは、高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブル最適化の方法論について述べる。まず、1.1 節において高次元アルゴリズムの設計方法について述べ、次に、1.2 節において高次元アルゴリズムを具体化した反復公式について述べる。JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成や処理手順については第二章 1.3 節および 1.4 節を参照されたい。また、実行モジュールの実装などの詳細については、付録 4-1 を参照されたい。

1.1. 高次元アルゴリズムの設計方法

JPEG 量子化テーブルの各要素、すなわち量子化ステップを仮想的な粒子の各次元における位置とみなして、その仮想粒子の運動を追跡することによって、最適な量子化テーブルを得るように高次元アルゴリズムを実装した。具体的には、128 個の量子化テーブルの要素を仮想粒子の 128 次元の位置に対応させる。高次元アルゴリズムのポテンシャル関数 V は、レートと SNR で構成し、各ポテンシャル関数における二つの仮想粒子の運動を追跡する。つまり、それらのポテンシャル関数の下で、128 次元運動をする 2 個の仮想粒子に対応するそれぞれ 128 次元の運動量を考える。すなわち、2 個の状態空間を考え、そこでの仮想粒子の運動の軌跡を追跡する。

高次元アルゴリズムを構成するハミルトニアン H は、式(4.1)で表現されるものを用いた。ここで、第 1 章で述べたミキシング M の項を式(4.2)で定義する。 γ_1 および γ_2 で表現されるシステム・パラメータは、共に 0.5 として高次元アルゴリズムを実装した。

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2m} (p_{1,1}^2 + p_{1,2}^2 + \cdots + p_{1,128}^2)^{\gamma_1} \\ & + \frac{1}{2m} (p_{2,1}^2 + p_{2,2}^2 + \cdots + p_{2,128}^2)^{\gamma_2} \\ & + V_1(q_{1,1}, q_{1,2}, \cdots, q_{1,128}) \\ & + V_2(q_{2,1}, q_{2,2}, \cdots, q_{2,128}) \\ & + M(p_{1,1}, p_{2,1}, \cdots, p_{1,128}, p_{2,128}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

式(4.1)において、ポテンシャル関数 V_1 は圧縮率(レート)の尺度に対応する。一方、ポテンシャル関数 V_2 は画像品質の尺度(SNR)に対応する。

$$\begin{aligned}
 M_{(p_{1,1}, p_{2,1}, \dots, p_{1,128}, p_{2,128})} &= \sum_{j=1}^{128} p_{1,j} p_{2,j} \\
 &= p_{1,1} p_{2,1} + p_{1,2} p_{2,2} + \dots + p_{1,128} p_{2,128} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

式(4.2)において j は次元の番号を示す。以下の式でも同様の記号を用いる。概念的には、式(4.2)のミキシング M を通して、二つの状態空間の仮想的な粒子は、相互にエネルギーを交換し、各粒子の運動に影響を与えられ考えられる。

1.2. 反復公式

前述の各状態空間における仮想粒子の位置と運動量を計算する計算過程に対応する反復公式を導出する。

まず、式(4.1)のハミルトニアン H に基づく、式(4.3)の二つの連立偏微分方程式で表現される 128 次元の 2 個の状態空間を考える。

$$\begin{cases}
 \frac{dp_{1,j}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_{1,j}} \\
 \frac{dq_{1,j}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_{1,j}} \\
 \frac{dp_{2,j}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_{2,j}} \\
 \frac{dq_{2,j}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_{2,j}}
 \end{cases} \quad (4.3)$$

ここで、一番目の仮想粒子に対応する状態空間について考える。すなわち、式(4.4)および式(4.5)について考える。

$$\frac{dp_{1,j}}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_{1,j}} \quad (4.4)$$

$$\frac{dq_{1,j}}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_{1,j}} \quad (4.5)$$

式(4.4)の右辺は、式(4.1)および式(4.2)から式(4.6)のようになる。

$$-\frac{\partial H}{\partial q_1} = -\frac{\partial V_1(q_{1,1}, q_{1,2}, \dots, q_{1,128})}{\partial q_1} \quad (4.6)$$

一方、式(4.5)の右辺は、式(4.1)および式(4.2)から式(4.7)のようになる。ここに、ミキシングの項は、単に M と略記する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial p_{1,j}} &= \frac{\gamma_1 p_{1,j}}{m} (p_{1,1}^2 + p_{1,2}^2 + \dots + p_{1,128}^2)^{\gamma_1 - 1} + \frac{\partial M}{\partial p_{1,j}} \\ &= \frac{\gamma_1 p_{1,j}}{m} (p_{1,1}^2 + p_{1,2}^2 + \dots + p_{1,128}^2)^{\gamma_1 - 1} + p_{2,j} \quad (4.7) \end{aligned}$$

式(4.4)および式(4.5)の左辺を式(4.8)および式(4.9)で定義されるものとする。

$$\frac{dp_{1,j}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{1,j(t+\Delta t)} - p_{1,j(t)}}{\Delta t} \quad (4.8)$$

$$\frac{dq_{1,j}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{q_{1,j(t+\Delta t)} - q_{1,j(t)}}{\Delta t} \quad (4.9)$$

式(4.8)および式(4.9)の Δt を小さな値の定数とすることによって、式(4.10)および式(4.11)で表現される反復公式を得る。

$$\left\{ \begin{aligned} p_{1,j(t+\Delta t)} &= p_{1,j(t)} - \frac{\partial V_1(q_{1,1}, q_{1,2}, \dots, q_{1,128})}{\partial q_{1,j}} \Delta t & (4.10) \\ q_{1,j(t+\Delta t)} &= q_{1,j(t)} + \frac{\gamma_1 p_{1,j}}{m} (p_{1,1}^2 + p_{1,2}^2 + \dots + p_{1,128}^2)^{\gamma_1 - 1} \Delta t & (4.11) \\ &+ p_{2,j} \Delta t \end{aligned} \right.$$

これらの連立した反復公式は、第二状態空間に対しても同様に成立する。

JPEG 量子化テーブル最適化システムの構成は第二章のものと同様であり、説明を割愛

する。JPEG 量子化テーブル最適化システムの反復公式を実行する手順は、第二章 1.4 節の処理手順 S1～S8 において、速度 v を運動量 p で読み替えた場合に等しく、説明を割愛する(図 2.2 においても同様に読み替えて参照)。すなわち、 $q_{current}$ は粒子の反復処理前の位置、 q_{new} は反復処理後の粒子の位置、 $p_{current}$ は反復処理前の粒子の運動量、 p_{new} は反復処理後の粒子の運動量を表すものとして読み替える。

2. 検証実験

ミキシング M とシステム・パラメータ γ を考慮した高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化の有用性検証実験は、高次元アルゴリズムをソフトウェアで実装し(実装モジュール名は hamiltonC10 である)、JPEG 量子化テーブルの最適化を行い、従来技術とレートすなわち圧縮率と画像品質について比較することによって有用性を検証する。ここで、JPEG 国際標準に例示されている量子化テーブルを用いて符号化復号化した場合を比較対象の従来技術として参照する。

レートの比較については、1 画素あたりのビット数で表現したレート計量結果の客観的数値のみで行った。一方、画像品質の比較については、SNR で表現される客観的な各画像品質評価基準と目視による観察の主観的な評価によって行った。主観評価においては、従来技術に対して、著しい視覚的な劣化を生じているか否かに注目して各復号化画像を観察した。

SNR で表現されるポテンシャル関数 V_2 は、各 RGB 成分の SNR(SNR_r , SNR_g および SNR_b) の平均値とした(式(4.12)参照)。第 2 章や第 3 章で述べたポテンシャル関数のパラメータ k_1 および k_2 は hamiltonC10 では使用しない。

$$V_2 = -\frac{SNR_r + SNR_g + SNR_b}{3} \quad (4.12)$$

また、仮想粒子の質量など各種定数値あるいは仮想粒子の位置および運動量の初期値について付録 4-2 を参照されたい。

参照画像(検証実験において参照する原画像)として第二章において説明した(a)デジタル標準画像を用いた。

3. 結果

本節では、検証実験の結果を示す。JPEG 量子化テーブル最適化モジュール hamiltonC10 の出力結果からのデータ抽出方法については、付録 4-3 を参照されたい。検証実験結果の生データの保管ディレクトリとそれらをまとめた Excel ファイル名につ

いては、付録 4-4 を参照されたい。得られた量子化テーブルは、付録 4-5 および付録 4-6 を参照されたい。検証実験で用いられた参照画像および復号画像をサイズ縮小して印刷したものを付録 4-7 から付録 4-9 に示す。

表 4.1 は、ポテンシャル関数のパラメータを変えた場合のレート改善率が最も良いときの各参照画像に対するレートと各 RGB 色成分に対する SNR を示す。レートの値が小さければ小さいほど、圧縮率は高くなる。一方、SNR の値が大きければ大きいほど、一般的に画像の品質が良い。改善率は 64 ビット倍精度浮動小数点で計算し、表中は四捨五入表示していることに注意すること。各画像に対して、SNR の改善率は、0.07%~3.38%と低いものの、レートについては、8.55%~12.01%の改善がみられる(ただし、肌色チャートを除く。肌色チャートのレート改善率は 1.29%と他の場合に比べて低い)。

表 4.1. レートと SNR

参照画像	国際標準例示		本方式		改善率(%)				
	レート	SNR	レート	SNR	レート	SNR			
肌色チャート	0.435	R	32.1	0.429	R	32.2	1.29	R	0.47
		G	37.5		G	37.5		G	0.21
		B	31.9		B	32.1		B	0.71
ヘアバンドの女性	0.603	R	30.3	0.548	R	30.5	9.12	R	0.79
		G	34.6		G	34.6		G	0.07
		B	29.3		B	29.5		B	0.80
天気予報	0.650	R	29.1	0.597	R	29.5	8.11	R	1.39
		G	34.2		G	34.3		G	0.21
		B	26.9		B	27.8		B	3.38
スイスの山村	1.497	R	24.3	1.317	R	24.3	12.01	R	0.12
		G	27.4		G	27.4		G	0.07
		B	21.5		B	21.7		B	0.96
チューリップ	1.526	R	24.7	1.396	R	25.0	8.55	R	1.00
		G	28.0		G	28.2		G	0.39
		B	22.4		B	22.6		B	1.11
建物と文字	1.089	R	29.0	0.988	R	29.2	9.20	R	0.80
		G	29.2		G	29.6		G	1.19
		B	27.4		B	27.5		B	0.20
地図	0.867	R	30.9	0.767	R	31.5	11.60	R	1.93
		G	30.6		G	31.1		G	1.69
		B	28.6		B	28.7		B	0.19

最適化によって得られた量子化テーブルを用いて復号化した画像をフルカラー・ディスプレイに表示して観察した場合、ヘアバンドの女性、天気予報およびスイスの山村の各復

号画像については、国際標準例示の復号画像に比べて、モスキート・ノイズの増加による若干の画質劣化が観察された。一方、肌色チャート、チューリップ、建物と文字および地図の復号画像については、国際標準例示の復号画像に比べて、顕著なブロック歪やモスキート・ノイズは見られなかった。

4. 考察

4.1. 得られた量子化テーブルの値の傾向

ここでは、3 節の実験結果における最適化された JPEG 量子化テーブルが国際標準例示のものとのどのように異なるかについて述べる。

付録 4-10 の各図は、輝度用およびクロミナンス用 JPEG 量子化テーブルについて、国際標準例示のものとの差分を示す。正の値は、量子化ステップの増加を示し、負の値は、量子化ステップの減少を示す。

これらの図から JPEG 量子化テーブルの DC 成分および AC 成分について、次のことがわかる。

- DC 成分に対する量子化ステップ
量子化ステップが減少している場合がある。

- AC 成分に対する量子化ステップ
 - 低周波域の量子化ステップは増加する場合が多い。
 - 中周波域の量子化ステップは減少する場合が多い。
 - 高周波域の量子化ステップは変化しない場合が多い。

これらの結果は、ミキシング M をゼロとし、システム・パラメータ γ を 1 とした場合における JPEG 量子化テーブル最適化システムの結果の傾向と変わらない(第二章 4 節参照)。また、少なくとも付録 4-10 の図からは、国際標準例示の場合に比べて良い結果となった量子化テーブルの傾向と悪い結果となった量子化テーブルの傾向に特に違いがあるようには見えない。

良い結果となった場合(参照画像が、チューリップ、建物と文字および地図の場合)については、DC 成分の量子化ステップおよび AC 成分中周波数域の量子化ステップの減少により、詳細な量子化となり画像品質を向上させ、一方、AC 成分の低周波域の量子化ステップの増加により、粗い量子化となりレートを削減することによる相補的な効果によって、画像品質を維持したまま、レートを削減したと考えられる。

4.2. ポテンシャル関数の構成

検証実験においては、レートと画像品質の尺度で各状態空間におけるポテンシャル関数を構成した。3節の結果は、ある参照画像に対して、各 RGB 色成分の SNR を画像品質の尺度とし、画像品質を維持したまま、レートを削減する JPEG 量子化テーブルが得られる場合があることを示している。

レートの尺度でポテンシャル関数を構成した状態空間の第一の仮想粒子は、レートすなわち圧縮率を改善するように、第一の仮想粒子の位置を変化させると考えられる。一方、画像品質の尺度でポテンシャル関数を構成した状態空間の第二の仮想粒子は、画像の品質を改善するように、第二の仮想粒子の位置を変化させると考えられる。

4.3. ミキシングとシステム・パラメータ γ

前述のように、この有用性検証実験では、ミキシング M の項は非ゼロとし、 γ で表現されるシステム・パラメータは、 $\gamma=0.5$ として高次元アルゴリズムを実装した。この場合は、高次元アルゴリズムは、計算機化学におけるいわゆる分子動力学法^[14]とは異なる効果をもたらすと考えられる。

つまり、ミキシング M によって、解空間をくまなく探索できることが期待できる。また、システム・パラメータ γ を 1 より小さく設定することによって、最適解の近傍を探索する可能性を高めることができると期待できる。

また、今回の検証実験に関連して異なる形式でミキシング M の項を構成した場合の実験を行った。しかし、それらの場合は国際標準例示の JPEG 量子化テーブルに対して、良い結果を得ることができなかった。この失敗事例については、付録 4-11 を参照されたい。

5. 結論

以上の実験結果および考察から、一部の参照画像に対して、ミキシング M とシステム・パラメータ γ を考慮した高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブルへの応用に対する有用性が示された。具体的には、以下の条件の場合について述べた。

- ミキシング M を各状態空間の各次元における運動量の積の総和として定義した。
- 各状態空間のそれぞれのシステム・パラメータ γ の値を 0.5 とした。
- レートと SNR でポテンシャル関数を構成し、それぞれに対応する状態空間における仮想粒子の運動を追跡した。

今回の実験結果では、一部の画像に対してのみ有用な結果が得られた。有用でない結果

の原因は、SNR によるポテンシャル関数の構成に一因があると考えられる。つまり、SNR では主観評価との不一致が場合によって生じることが有用でない結果をもたらしたと考えられる。これに対する補償は、主観評価に一致する客観的な画像品質評価尺度のポテンシャル関数への導入である。すなわち、第三章で述べたような視覚特性と画像劣化特性を考慮した画像品質尺度を用いることで、有用でない結果の不具合は解消されることが考えられる。この尺度による検証実験は課題のひとつである。

また、ミキシング M の項やシステム・パラメータをいかに設定するかは残された課題のひとつである。現在有効なミキシングとそうでないミキシングの違いは良く分かっていない。

第 5 章 まとめ

本報告では、環境適応通信研究所が提案している高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への応用について述べた。

まず、第 1 章においては、本研究の背景、位置付けおよび目的についての説明し、JPEG 量子化テーブルと高次元アルゴリズムについて概説した。

次に、第 2 章においては、高次元アルゴリズムが JPEG 量子化テーブルの最適化手法として有用であるか否かを検証した。具体的には、最適化手法の方法論と検証実験について述べた。ここでは、ミキシング M やシステム・パラメータ γ を考慮せずに高次元アルゴリズムを単純化して構成した場合であっても、自然画像やスキャン入力された画像に対して応用可能であることを示した。さらに、医療用超音波画像に対しても本手法は有用であることを示した。

第 3 章では、最適化のための評価関数を構成する画像品質評価基準をいかに構成すべきかについて論じた。一般的に用いられている SNR などの画像品質評価基準やより洗練された視覚特性と画像劣化特性を考慮した画像品質評価基準について述べた。

続く第 4 章においては、高次元アルゴリズムの一般的な場合として、ミキシング M とシステム・パラメータ γ を考慮した場合の高次元アルゴリズムが JPEG 量子化テーブルの最適化手法として有用であることを示した。

付録 2-1. 反復公式についての補足

ここでは、反復公式について補足する。式(2.12)および式(2.13)は、状態空間の各次元に依存しないように、反復公式の式(2.9)および式(2.10)を抽象化したものである。また、これらの式は JPEG 量子化テーブル最適化システムの実行モジュール `hamiltonC8` や `hamiltonC9` などのソース・コードに対応したものである。同様な記述方法を用いて素直に、反復公式を書き直すと、式(A2.1)および式(A2.2)のようになる。

$$v_{new} = v_{current} + \frac{1}{m} f \Delta t \quad (A2.1)$$

$$q_{new} = q_{current} + v_{current} \Delta t \quad (A2.2)$$

式(2.13)は、1反復分前の速度 v_{old} を使って、 q_{new} を求める反復公式である。つまり、式(A2.1)に対応する式(A2.3)を式(A2.2)に代入し、式(A2.4)を得る。

$$v_{current} = v_{old} + \frac{1}{m} f \Delta t \quad (A2.3)$$

$$q_{new} = \frac{f}{m} \Delta t^2 + v_{old} \Delta t + q_{current} \quad (A2.4)$$

式(A2.4)において、改めて v_{old} を $v_{current}$ と書き直し、第一項を 0.5 倍することによって、式(2.13)が得られる。「第一項の 0.5 倍」は調整用システム・パラメータとみなすことにする。また、付録 2-2 実装における量子化テーブルの更新の補足事項も参照されたい。

実行モジュール `hamiltonC8` や `hamiltonC9` は実際には、式(A2.3)および式(A2.4)に基づいて実装されている。これは、式(A2.1)の右辺を二重に計算している点で冗長であり、`hamiltonC9` 以前のバージョンの実行モジュールの改良すべき点である。この点は、`hamiltonC10` 実行モジュールでは改善されている。

付録 2-2. 高次元アルゴリズムの実装についての補足

ここでは、高次元アルゴリズムを実現化した JPEG 量子化テーブル最適化システムについて補足説明する。まず、A2-2.1 節において、実装モジュールのバージョンについて説明する。次に、A2-2.2 節において、量子化テーブルの更新方法について述べる。

A2-2.1. 実行モジュールのバージョン

ポテンシャル関数の構成により、実行モジュールのバージョンが異なる。付表 A2-1 に実際に検証実験で用いた実行モジュール名とポテンシャル関数の構成要素を示す。実行モジュール名中の hamiltonC?の?部分がバージョンを示す。?の値が大きいほど最近のバージョンとなっている。

付表 A2-1. 検証実験と実行モジュール名

検証実験	実行モジュール名
3.1 節	hamiltonC8
3.2 節	hamiltonC8
3.3 節	hamiltonC8
3.4 節	hamiltonC5
3.5 節	hamiltonC9

A2-2.2. 量子化テーブルの更新方法

高次元アルゴリズムをソフトウェアあるいはハードウェアで実装する場合には、すべての変数を浮動小数点で計算し、JPEG 符号化あるいは復号化時に量子化テーブルの値を整数化する、あるいは、符号器および復号器を改良し、浮動小数点の量子化テーブルの値に対応するように構成することもできる。しかし、今回計算を高速にするために、更新後の座標 q_{new} は、式(A2.5)のように、式(2.13)右辺第 1 項および第 2 項の和の値を定数 Mag 倍して、整数化し、更新前の座標 $q_{current}$ に加えることによって、量子化テーブルの値を更新するようにした。

$$q_{new} = \left[Mag \left(\frac{f}{2m} \Delta t^2 + v_{current} \Delta t \right) + 0.5 \right] + q_{current} \quad (A2.5)$$

このように、量子化テーブルの値を浮動小数点に拡張することなく整数のまま計算し、通常の JPEG 符号器および復号器を利用できるようにした。

付録 2-3. 符号化および復号化画像と JPEG 量子化テーブルの取得方法

ここでは、hamiltonC8 実行モジュールまたは hamiltonC9 実行モジュール<あるいは hamiltonC5 実行モジュール>による JPEG 量子化テーブルの出力結果 iq1st.dat および iq2nd.dat から、次の手続きによって、符号化および復号化画像と JPEG 量子化テーブルを取得することができる。

STEP1

対象となるデータのあるディレクトリに移動する(付録 2-4 の検証実験結果のデータ参照)。

```
%cd ~/experi/experi12/hamiltonC8/BS10to111
```

STEP2

参照画像のファイル名を parameters.dat ファイルにより確かめる。

```
%cat parameters.dat
```

例えば、参照画像が chart1cro.bmp とする。

STEP3

参照画像をセットアップする。

```
%setupExpo.sh chart1cro
```

STEP4

e12-???.xls の良値を検索し、その行番号を確認する。

(注)

elist.xls のシートの「備考」欄に記載の行数(回目と表現さる行数)は、2 を減じた値となっている。

STEP5

行番号が 29 の場合、行番号-2=29-2<行番号-1=29-1>を jpeg13.csh の引数とする。

```
%jpeg13.csh chart1cro 27
```

出力ファイル

以下のようなファイルが得られる。ここで、ファイル名中の27は先の jpeg13.csh の引数の値に対応している。

- chart1cro27-d.bmp //復号化画像
- chart1cro27.jpg //符号化画像
- qt1st27.dat //輝度用量子化テーブル
- qt2nd27.dat //クロミナンス用量子化テーブル

付録 2-4. 検証実験結果のデータ

ここでは、本報告において示された検証実験結果の生データの保管ディレクトリとそれらをまとめた Excel ファイル名について述べる。

付表 A-2a. 表 2.2 のデータ

参照画像	Excel ファイル名	生データ保管ディレクトリ
肌色チャート	e12-038.xls	experi12/hamiltonC8/BS10to111
ヘアバンドの女性	e13-034.xls	experi13/hamiltonC8/BS5to111
天気予報	e14-012.xls	experi14/hamiltonC8/BS12to11P51
スイスの山村	e15-012.xls	experi15/hamiltonC8/BS2to111
チューリップ	e16-021.xls	experi16/hamiltonC8/BS2P5to11P11

付表 A-2b. 表 2.4 のデータ

参照画像	Excel ファイル名	生データ保管ディレクトリ
建物と文字	e10-007.xls	experi10/hamiltonC8/BS6to111
地図	e11-009.xls	experi11/hamiltonC8/BS6to111

付表 A-2c. 表 2.5 および表 2.6 のデータ

参照画像	Excel ファイル名	生データ保管ディレクトリ
肌色チャート	e12-011.xls	experi12/hamiltonC5/BC1to1
ヘアバンドの女性	e13-003.xls	experi13/hamiltonC5/BC1to1
天気予報	e14-007.xls	experi14/hamiltonC5/BC1to1
スイスの山村	e15-003.xls	experi15/hamiltonC5/BC1to1
チューリップ	e16-004.xls	experi16/hamiltonC5/BC1to1

付表 A-2d. 表 2.7 のデータ

参照画像	Excel ファイル名	生データ保管ディレクトリ
肌色チャート	e12-043.xls	experi12/hamiltonC9/BP8to1
ヘアバンドの女性	e13-044.xls	experi13/hamiltonC9/BP8to1
天気予報	e14-035.xls	experi14/hamiltonC9/BP8to1
スイスの山村	e15-023.xls	experi15/hamiltonC9/BP8to1
チューリップ	e16-023.xls	experi16/hamiltonC9/BP8to1

*実行モジュール hamiltonC9 の出力結果からユーティリティ・スクリプト reload.sh 等を使って符号化画像および復号化画像などを生成できる。bp-all.dat の「best.dat の第 1 行目に 1 を加えた値」の行が、表 2.7 で採用したデータとなっている。tbl2-7.xls 参照。

付録 2-5. 表 2.2 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 2.2 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

肌色チャート(輝度用)

8	14	19	16	24	40	51	61
15	14	14	19	26	58	60	55
14	18	16	24	40	57	69	56
20	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

肌色チャート(クロミナンス用)

10	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

ヘアバンドの女性(輝度用)

11	15	19	16	24	40	51	61
17	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

ヘアバンドの女性(クロミナンス用)

11	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

天気予報(輝度用)

21	28	34	16	24	14	51	61
21	29	14	27	15	58	60	55
14	29	16	21	17	57	69	56
33	17	14	29	28	87	80	62
18	22	12	32	68	109	103	77
27	30	55	64	81	104	113	92
19	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

天気予報(クロミナンス用)

16	18	31	20	99	74	99	99
14	22	17	66	77	99	99	99
11	21	54	99	99	99	99	99
45	66	99	99	99	99	99	99
78	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
56	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

スイスの山村(輝度用)

16	26	27	24	24	28	47	61
30	29	24	19	26	35	60	55
27	27	18	24	35	37	69	56
22	17	22	29	36	87	80	62
18	22	23	42	63	109	103	77
24	32	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

スイスの山村(クロミナンス用)

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

チューリップ(輝度用)

16	24	27	16	24	19	51	61
27	25	23	19	26	41	60	55
24	23	16	23	26	57	69	56
22	17	22	29	38	87	80	62
18	22	22	43	68	109	103	77
24	26	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

チューリップ(クロミナンス用)

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

付録 2-6. 表 2.4 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 2.4 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

建物と文字(輝度用)

17	17	46	34	36	29	40	28
36	35	32	36	26	18	31	55
33	26	29	34	32	26	69	56
32	31	43	46	25	87	80	62
26	22	24	28	42	109	103	77
24	29	39	35	81	104	113	92
21	56	73	87	103	121	120	101
70	92	95	98	112	100	103	99

建物と文字(クロミナンス用)

15	10	21	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
8	21	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

地図(輝度用)

18	22	36	25	38	24	32	61
35	25	27	19	26	46	50	55
28	27	16	20	39	32	69	56
31	17	22	28	51	87	80	62
20	26	31	36	59	109	103	77
24	35	55	54	81	104	113	92
18	58	78	87	103	121	120	101
64	92	95	98	112	100	103	99

地図(クロミナンス用)

20	18	6	13	99	99	99	99
21	21	26	66	99	99	99	99
5	21	56	72	99	99	99	99
28	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

付録 2-7. 表 2.5 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 2.5 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

肌色チャート(輝度用)

15	40	61	51	161	165	150	190
25	41	99	160	167	151	147	136
45	154	157	165	181	120	152	121
63	158	163	166	190	152	145	127
45	161	156	181	199	116	100	118
35	160	190	191	128	121	78	101
50	151	161	142	100	82	63	82
211	123	100	99	83	91	80	90

肌色チャート(クロミナンス用)

8	5	19	52	180	174	170	54
7	20	117	203	34	62	122	32
13	117	197	162	136	130	174	70
8	59	142	144	118	118	112	80
46	174	54	70	60	120	110	142
52	50	60	66	88	58	100	88
52	62	94	66	74	66	52	68
124	64	52	92	76	72	88	126

ヘアバンドの女性(輝度用)

10	67	60	26	184	186	207	239
90	32	136	117	196	246	244	187
46	81	62	202	206	203	199	178
54	87	210	211	235	255	184	176
84	204	177	206	202	165	147	165
80	191	191	204	205	174	125	148
41	200	180	221	193	139	106	123
214	190	157	156	182	148	131	137

ヘアバンドの女性(クロミナンス用)

11	10	8	9	19	89	41	91
6	5	8	30	249	91	93	193
14	32	134	251	93	33	95	39
11	124	91	91	253	97	173	109
51	41	219	91	57	93	155	177
91	91	93	79	33	93	177	149
91	169	37	75	93	99	95	113
45	51	91	171	117	135	119	133

天気予報(輝度用)

16	71	100	178	26	126	75	249
56	86	166	153	150	144	210	173
108	125	122	66	146	75	255	192
40	73	88	137	199	91	254	180
72	108	165	120	188	251	181	153
136	193	245	104	253	160	165	138
61	146	182	227	243	143	126	135
160	122	195	124	152	196	129	145

天気予報(クロミナンス用)

11	8	4	5	31	103	77	55
14	57	10	62	61	47	85	91
16	6	56	25	249	221	57	233
13	88	55	33	65	97	245	229
11	27	225	35	47	99	93	47
41	231	27	225	229	85	211	117
11	17	103	85	211	225	109	177
101	27	211	77	203	187	193	179

スイスの山村(輝度用)

22	49	48	52	40	46	77	53
50	50	52	57	44	50	62	77
52	51	54	40	54	71	63	88
52	55	60	67	67	107	78	74
54	60	61	64	96	137	133	39
58	63	77	96	95	142	85	54
39	76	70	125	119	117	82	63
90	82	99	122	108	92	65	61

スイスの山村(クロミナンス用)

3	16	16	9	61	61	69	63
14	17	12	30	61	91	61	61
16	14	18	61	61	61	83	67
9	28	103	137	61	61	123	61
61	61	61	111	61	93	87	61
79	61	91	61	61	65	103	61
65	107	61	61	61	101	61	61
65	61	101	69	83	61	95	107

チューリップ(輝度用)

16	33	22	42	48	38	87	71
34	48	14	35	40	38	92	31
34	37	44	48	36	53	81	62
40	51	56	51	57	123	66	54
54	58	19	92	104	81	79	41
50	27	31	100	73	138	77	56
19	84	82	85	67	85	84	65
44	82	73	64	76	66	67	63

チューリップ(クロミナンス用)

9	14	8	11	63	121	101	79
18	13	12	30	81	133	99	79
6	6	32	63	63	69	115	63
11	30	67	75	87	63	121	91
63	63	63	89	63	63	63	63
63	63	63	91	63	67	63	63
67	63	99	63	63	63	63	63
65	65	63	81	63	63	63	63

付録 2-8. 表 2.6 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 2.6 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

肌色チャート(輝度用)

15	14	13	19	25	37	48	58
15	15	17	22	29	55	57	52
17	16	19	27	43	58	66	53
17	20	25	28	52	84	77	59
21	23	34	53	65	106	100	74
27	32	52	61	78	101	110	89
46	61	75	84	100	118	117	98
73	89	92	95	109	97	100	96

肌色チャート(クロミナンス用)

14	15	21	48	96	96	96	96
15	18	23	65	96	96	96	96
21	23	59	96	96	96	96	96
44	65	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96

ヘアバンドの女性(輝度用)

19	14	13	19	27	39	48	58
15	15	17	22	25	61	59	52
17	16	19	27	39	54	66	53
17	20	25	26	50	84	77	59
21	19	34	55	67	106	100	74
27	32	52	61	78	101	110	89
46	61	75	84	100	118	117	98
69	89	92	95	109	97	100	96

ヘアバンドの女性(クロミナンス用)

20	15	21	44	96	96	96	96
15	18	23	63	96	96	96	96
21	23	53	96	96	96	96	96
44	63	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96
96	96	96	96	96	96	96	96

天気予報(輝度用)

22	11	56	114	96	46	29	169
70	6	86	73	70	64	130	93
80	103	120	100	66	67	175	112
84	43	134	81	119	45	176	100
30	64	85	80	108	171	101	73
56	113	165	48	173	80	85	58
81	66	102	147	163	63	46	55
80	42	115	44	72	116	49	65

天気予報(クロミナンス用)

9	26	8	11	51	23	25	21
14	11	52	20	21	35	5	11
18	6	48	17	169	141	29	197
15	52	21	15	19	17	165	149
91	55	145	39	21	19	13	41
41	199	23	145	149	23	131	37
91	35	23	13	131	145	29	97
21	27	131	13	123	107	113	99

スイスの山村(輝度用)

20	15	14	20	28	36	55	57
16	16	18	23	30	54	64	51
18	17	20	26	44	53	73	54
18	21	26	33	55	89	76	58
22	26	37	60	64	105	99	73
28	33	53	62	85	108	109	88
53	66	74	91	99	117	116	97
70	88	91	94	108	96	99	95

スイスの山村(クロミナンス用)

13	20	20	43	95	95	103	97
16	17	22	64	95	103	95	95
20	22	52	95	95	95	99	101
43	62	103	103	95	95	95	95
95	95	95	95	95	95	103	95
103	95	95	95	95	95	99	95
99	103	95	95	95	95	95	95
99	95	103	103	101	95	95	103

チューリップ(輝度用)

18	17	16	22	28	40	57	55
18	18	10	25	32	52	62	49
20	7	20	26	42	61	71	50
20	21	26	35	51	93	86	56
24	28	31	62	74	103	97	71
30	39	57	70	83	108	107	86
43	68	76	89	97	115	114	95
66	86	89	92	106	94	97	93

チューリップ(クロミナンス用)

15	12	22	41	93	93	99	105
14	17	20	60	93	103	93	99
18	26	62	93	93	93	93	93
41	60	97	93	93	93	93	93
93	93	93	95	93	93	93	93
93	93	93	93	93	93	93	93
97	93	95	93	93	93	93	93
95	93	93	93	93	93	93	93

付録 2-9. 表 2.7 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 2.7 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

肌色チャート(輝度用)

17	11	10	16	24	40	51	61
13	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

肌色チャート(クロミナンス用)

17	19	24	47	99	99	99	99
18	22	26	66	99	99	99	99
25	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

ヘアバンドの女性(輝度用)

22	11	19	16	24	40	51	61
12	21	22	23	26	58	60	55
18	22	19	24	40	57	69	56
20	23	22	29	51	87	80	62
18	28	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

ヘアバンドの女性(クロミナンス用)

8	18	24	47	99	99	99	99
18	21	20	66	99	99	99	99
23	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

天気予報(輝度用)

24	21	20	18	25	40	51	61
22	22	21	21	26	59	60	55
23	20	23	24	40	57	69	56
14	17	22	30	51	87	80	62
19	22	37	56	68	109	103	77
26	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

天気予報(クロミナンス用)

17	12	24	49	99	99	99	99
22	21	22	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
52	66	99	99	99	99	99	99
99	100	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

スイスの山村(輝度用)

21	19	18	21	29	40	51	61
20	18	20	23	26	58	60	55
20	19	22	24	43	57	69	56
20	23	25	32	51	87	80	62
20	23	37	56	68	109	103	77
28	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

スイスの山村(クロミナンス用)

18	25	31	49	99	99	99	99
18	21	33	66	99	99	99	99
31	32	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

チューリップ(輝度用)

20	15	14	20	24	40	51	61
16	16	18	22	26	58	60	55
14	15	16	24	40	59	69	56
18	17	22	29	51	87	80	62
18	23	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

チューリップ(クロミナンス用)

21	19	24	47	99	99	99	99
22	21	30	66	99	99	99	99
23	27	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

付録 2-10. 参照画像と復号化画像

付図 A2-1a に参照画像を、付図 A2-1b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A2-1c に本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、肌色チャートである。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A2-1a. 参照画像



付図 A2-1b. 国際標準例示の場合



付図 A2-1c. 本手法の場合

付録 2-11. 参照画像と復号化画像

付図 A2-2a に参照画像を、付図 A2-2b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A2-2c に本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、ヘアバンドの女性である。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A2-2a. 参照画像



付図 A2-2b. 国際標準例示の場合



付図 A2-2c. 本手法の場合

付録 2-12. 参照画像と復号化画像

付図 A2-3a に参照画像を、付図 A2-3b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A2-3c に本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、天気予報である。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A2-3a. 参照画像



付図 A2-3b. 国際標準例示の場合



付図 A2-3c. 本手法の場合

付録 2-13. 参照画像と復号化画像

付図 A2-4a に参照画像を、付図 A2-4b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A2-4c に本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、スイスの山村である。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A2-4a. 参照画像



付図 A2-4b. 国際標準例示の場合



付図 A2-4c. 本手法の場合

付録 2-14. 参照画像と復号化画像

付図 A2-5a に参照画像を、付図 A2-5b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A2-5c に本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、チューリップである。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A2-5a. 参照画像



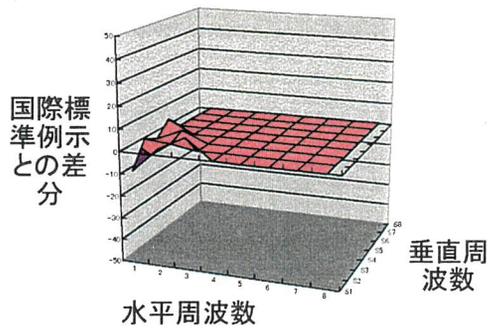
付図 A2-5b. 国際標準例示の場合



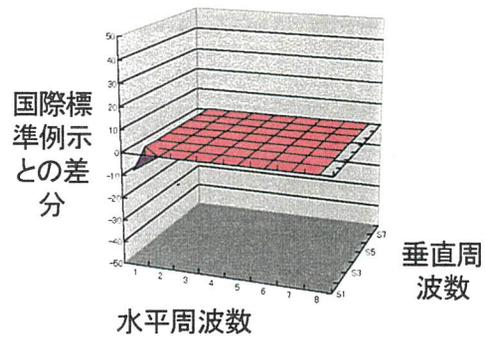
付図 A2-5c. 本手法の場合

付録 2-15. 国際標準例示と最適化された JPEG 量子化テーブルの違い

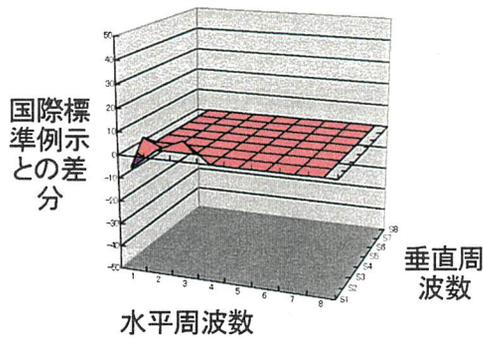
ここでは、国際標準例示の JPEG 量子化テーブルの値と高次元アルゴリズムによって、最適化された JPEG 量子化テーブルの値との差のグラフを示す。



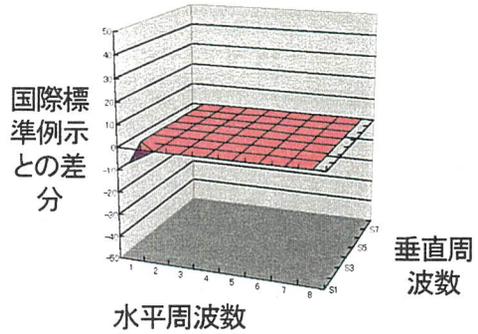
肌色チャート(輝度)



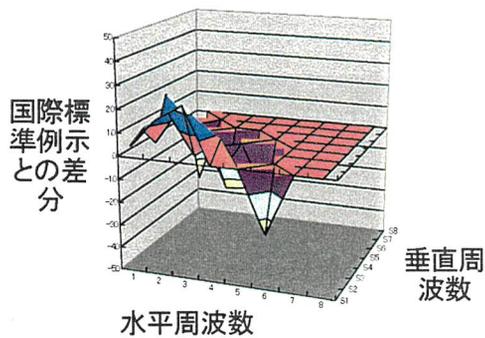
肌色チャート(クロミナンス用)



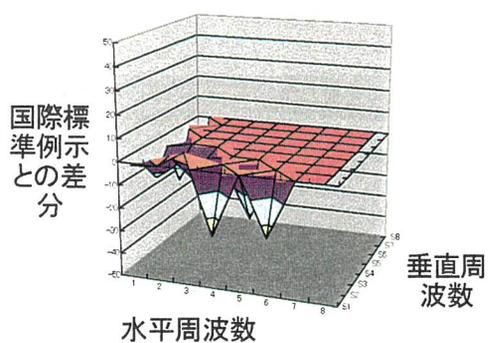
ヘアバンドの女性(輝度用)



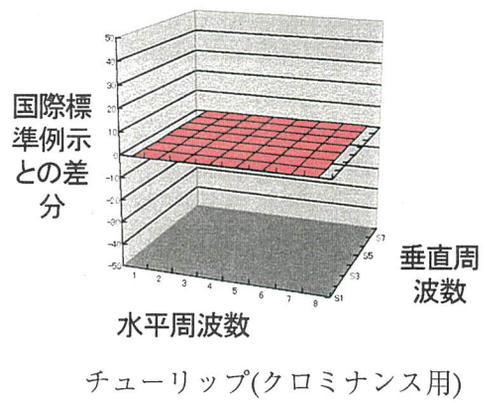
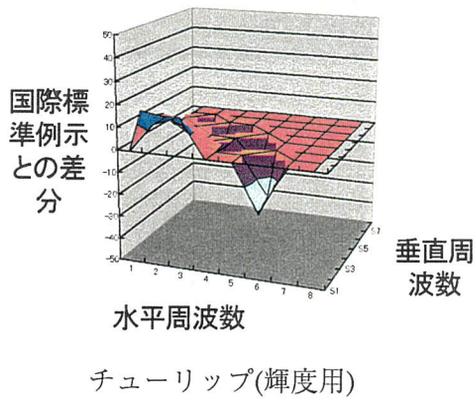
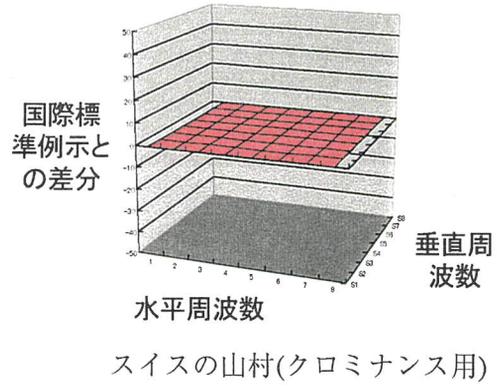
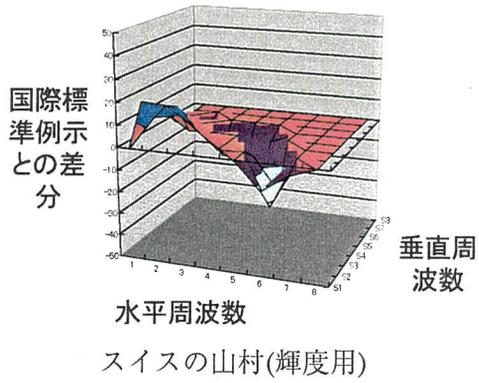
ヘアバンドの女性(クロミナンス用)



天気予報(輝度用)



天気予報(クロミナンス用)



付録 2-16. 仮想粒子の運動量と位置の初期値

ここでは、仮想粒子の運動量と位置の初期値について補足する。検証実験においては仮想粒子の位置に対する初期値として国際標準例示(文献[1]の Annex K 参照)の JPEG 量子化テーブルの値が用いられた。また、仮想粒子の運動量(実装においては速度)に対する初期値として、すべて 0 の値が用いられた。その他の変数の設定値については、対応する Microsoft Excel ファイルを参照されたい(付録 2-4 参照)。

最適化すべき参照画像の統計的性質が既に分かっている場合などは、仮想粒子の位置に対する初期値を適切に設定することによって、効率良く最適化することが可能と思われる。医療用超音波画像を対象にした濱本らの報告^[10]では、参照画像の統計データに基づいて構成した量子化テーブルを、仮想粒子の位置に対する初期値とする実験結果が報告されている。

また、文献[6]においては、仮想粒子の位置に対する初期値として、国際標準例示の JPEG 量子化テーブルの値の約 4 分の 1 の値を用いた場合の実験結果が報告されている。これは、ポテンシャル関数のレートに対するパラメータの値を、画像品質の尺度(SNR)に対するパラメータの値よりも大きく構成し、画像品質に対する補償を事前に行い、レートに対する最適化を効率良く行うことを狙ったものである。つまり、初期化時に小さな値の JPEG 量子化テーブルを粒子の位置とすることにより、まず、画像品質を補償する。ポテンシャル関数のパラメータについて、レートに対するパラメータを画像品質に対するパラメータより大きくすることによって、量子化テーブル変更時のレートの値よるフィードバックないし寄与を大きくする。文献[6]は、このような効果を狙って、初期値およびポテンシャル関数のパラメータを設定した場合について報告したものである。

付録 3-1. 符号化のための量子化テーブル

付表 A3-1-1～A3-1-8 は、第 3 章の主観評価実験に用いた JPEG 圧縮符号化のための 8 組(グレード 1～8)の輝度用およびクロミナンス用量子化テーブルについて記載である。

付表 A3-1-1. グレード 1 の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

48	33	30	48	72	120	153	183
36	36	42	57	78	174	180	165
42	39	48	72	120	171	207	168
42	51	66	87	153	255	240	186
54	66	111	168	204	255	255	231
72	105	165	192	243	255	255	255
147	192	234	255	255	255	255	255
216	255	255	255	255	255	255	255

51	54	72	141	255	255	255	255
54	63	78	198	255	255	255	255
72	78	168	255	255	255	255	255
141	198	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255
255	255	255	255	255	255	255	255

付表 A3-1-2. グレード 2 の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

32	22	20	32	48	80	102	122
24	24	28	38	52	116	120	110
28	26	32	48	80	114	138	112
28	34	44	58	102	174	160	124
36	44	74	112	136	218	206	154
48	70	110	128	162	208	226	184
98	128	156	174	206	242	240	202
144	184	190	196	224	200	206	198

34	36	48	94	198	198	198	198
36	42	52	132	198	198	198	198
48	52	112	198	198	198	198	198
94	132	198	198	198	198	198	198
198	198	198	198	198	198	198	198
198	198	198	198	198	198	198	198
198	198	198	198	198	198	198	198
198	198	198	198	198	198	198	198

付表 A3-1-3. グレード 3 の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

付表 A3-1-4. グレード4の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

9	6	6	9	14	24	30	36
7	7	8	11	15	34	36	33
8	7	9	14	24	34	41	33
8	10	13	17	30	52	48	37
10	13	22	33	40	65	61	46
14	21	33	38	48	62	67	55
29	38	46	52	61	72	72	60
43	55	57	58	67	60	61	59

10	10	14	28	59	59	59	59
10	12	15	39	59	59	59	59
14	15	33	59	59	59	59	59
28	39	59	59	59	59	59	59
59	59	59	59	59	59	59	59
59	59	59	59	59	59	59	59
59	59	59	59	59	59	59	59
59	59	59	59	59	59	59	59

付表 A3-1-5. グレード5の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

6	4	4	6	9	16	20	24
4	4	5	7	10	23	24	22
5	5	6	9	16	22	27	22
5	6	8	11	20	34	32	24
7	8	14	22	27	43	41	30
9	14	22	25	32	41	45	36
19	25	31	34	41	48	48	40
28	36	38	39	44	40	41	39

6	7	9	18	39	39	39	39
7	8	10	26	39	39	39	39
9	10	22	39	39	39	39	39
18	26	39	39	39	39	39	39
39	39	39	39	39	39	39	39
39	39	39	39	39	39	39	39
39	39	39	39	39	39	39	39
39	39	39	39	39	39	39	39

付表 A3-1-6. グレード6の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

3	2	2	3	4	8	10	12
2	2	2	3	5	11	12	11
2	2	3	4	8	11	13	11
2	3	4	5	10	17	16	12
3	4	7	11	13	21	20	15
4	7	11	12	16	20	22	18
9	12	15	17	20	24	24	20
14	18	19	19	22	20	20	19

3	3	4	9	19	19	19	19
3	4	5	13	19	19	19	19
4	5	11	19	19	19	19	19
9	13	19	19	19	19	19	19
19	19	19	19	19	19	19	19
19	19	19	19	19	19	19	19
19	19	19	19	19	19	19	19
19	19	19	19	19	19	19	19

付表 A3-1-7. グレード7の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

1	1	1	1	2	4	5	6
1	1	1	1	2	5	6	5
1	1	1	2	4	5	6	5
1	1	2	2	5	8	8	6
1	2	3	5	6	10	10	7
2	3	5	6	8	10	11	9
4	6	7	8	10	12	12	10
7	9	9	9	11	10	10	9

1	1	2	4	9	9	9	9
1	2	2	6	9	9	9	9
2	2	5	9	9	9	9	9
4	6	9	9	9	9	9	9
9	9	9	9	9	9	9	9
9	9	9	9	9	9	9	9
9	9	9	9	9	9	9	9
9	9	9	9	9	9	9	9

付表 A3-1-8. グレード8の輝度用量子化テーブル(左)とクロミナンス用量子化テーブル(右)

1	1	1	1	1	2	2	3
1	1	1	1	1	2	3	2
1	1	1	1	2	2	3	2
1	1	1	1	2	4	4	3
1	1	1	2	3	5	5	3
1	1	2	3	4	5	5	4
2	3	3	4	5	6	6	5
3	4	4	4	5	5	5	4

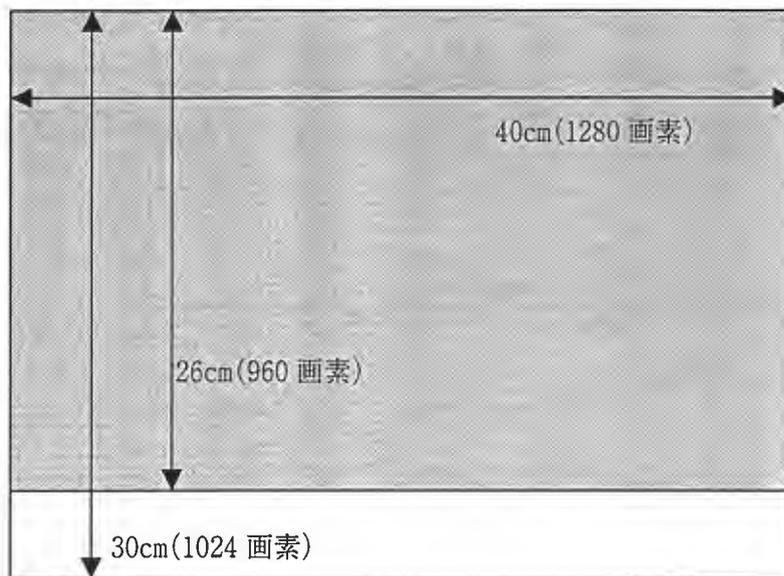
1	1	1	2	4	4	4	4
1	1	1	3	4	4	4	4
1	1	2	4	4	4	4	4
2	3	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4
4	4	4	4	4	4	4	4

なお、付表 A3-1-3 のグレード3の輝度用およびクロミナンス用量子化テーブルは、国際標準例示の各量子化テーブルと同じである。

付録 3-2. 主観評価実験の詳細

ここでは、主観評価実験について詳述する。まず、画像の提示方法について述べる。参照画像と試験画像は、オリジナルのサイズが幅画素高さ画素であり、そのままディスプレイに表示した場合、複数の観察者で評価することは困難である。そこで、画素を縦横に 1 画素分複写することによって、面積的に 4 倍に拡大した参照画像および試験画像を提示した。ディスプレイに提示したときのサイズは、付図 A3-2-1 のようになる(ハッチ部分が画像内容である)。ここで、拡大した参照画像または試験画像の高さは約 26(cm)となることから、視距離は、その 4 倍の 104(cm)とした。

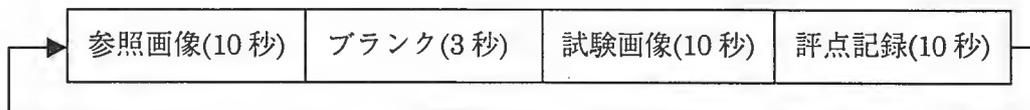
付図 A3-2-1. 画像の提示サイズ



視距離104cm(オリジナル画像サイズ:640×480画素)

また、画像の提示間隔(画像提示シーケンス)は、付図 A3-2-2 のようにした。画像提示シーケンスは、最初の 10 秒で参照画像を提示し、次の 3 秒をブランク(灰色画面)を提示し、続く 10 秒に試験画像を提示し、最後の 10 秒で評価者による評点の記録を行う構成とした。この画像提示シーケンスを繰り返した。1セッションは、参照画像と試験画像の各組の順番がランダムに 2 回提示するように構成された。

付図 A3-2-2. 画像提示シーケンス



付録 3-3. 平均主観評点(MOS)

ここでは、平均主観評点(MOS)の詳細について述べる。まず、主観評価実験で得られた生データから MOS を求める方法について述べる。MOS は、各観察者ごとの第 1 回目の提示と第 2 回目の提示に対する主観評点の差が-2 以下または+2 以上の両主観評点を含めずに、主観評点の平均値を求めることによって求められた。なお、試験画像提示の都合上、4 回提示した場合のデータは、後半 2 回のデータを用いた。また、オリジナルのデータは、mos.xls ファイルとして保存している。

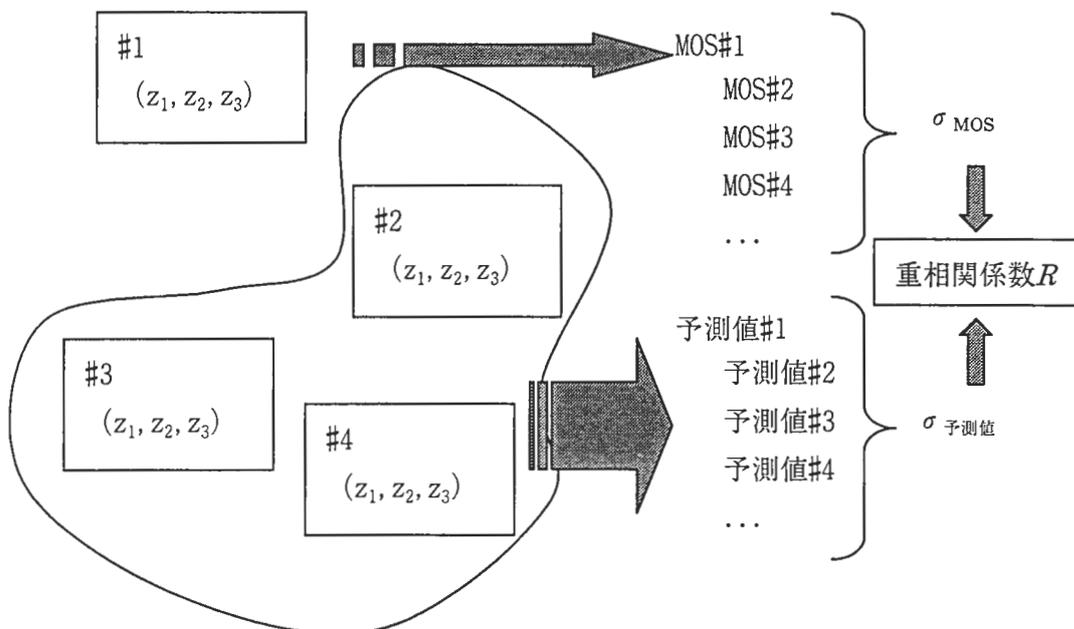
付表 A3-3-1 は、各試験画像に対する MOS の具体的な値を示す。ここで、グレードは劣化程度を示す。数値は MOS である。

付表 A3-3-1. 平均主観評点

グレード	対応する参照画像のファイル名										
	test01	test02	test03	test04	test05	test10	test11	test12	test13	test14	test15
g1	1.6	1.9	1.7	2.5	3.3	2.3	1.5	1.7	1.8	2.4	2.3
g2	2.6	2.8	2.6	3.5	3.5	2.9	1.7	1.9	1.9	2.8	2.8
g3	3.7	3.8	3.6	4.0	4.4	3.7	2.9	2.4	3.2	3.6	3.6
g4	4.2	4.2	4.0	4.6	4.5	4.3	3.7	3.2	3.7	4.3	4.2
g5	4.8	4.4	4.3	4.7	4.6	4.7	4.3	3.8	4.3	4.5	4.6
g6	4.8	4.6	4.5	4.8	4.8	4.9	4.7	4.4	4.7	4.9	4.8
g7	4.9	4.7	4.8	4.9	4.8	4.9	4.9	4.7	4.6	4.9	5.0
g8	4.9	4.7	4.6	4.8	4.8	4.8	4.9	4.4	4.4	4.8	4.9

付録 3-4. オープン・データに対する検証

画像品質の予測式の性能を検査するため、オープン・データに対する重相関係数を付図 A3-4-1 のように求めた。例えば、試験画像#2 から試験画像#88 までに対応する主成分 z_1, z_2 および z_3 から予測式の係数を決定し、その係数を使った予測式で、試験画像#1 に対応する MOS を予測する。ここで、各試験画像の番号を#1 や#2 などのように表す。同様に、試験画像#L に対応する MOS を予測する場合には、その試験画像#L を除いた試験画像を使って予測式の係数を求め、その係数を用いて予測式を構成し、MOS を予測する。それらの予測値と MOS との違いを付式(A3.1)の重相関係数 R で表現する。ここで、 σ_{MOS} および $\sigma_{\text{予測値}}$ は、それぞれ MOS と予測値の標準偏差を意味する。



付図 A3-4-1. オープン・データに対する検証

$$R = \frac{\delta_{\text{予測値}}}{\sigma_{\text{MOS}}} \quad (\text{A3.1})$$

付録 3-5. 画像品質劣化特徴量抽出モジュール

ここでは、画像品質劣化特徴量抽出モジュールについて説明する。まず、A3-5-1 節において、全体の構成を説明する。つづく A3-5-2 節で画像品質劣化特徴量抽出モジュールを構成する主要な関数について概説する。A3-5-3 節に各モジュールのソース・コードの保管ディレクトリを示す。

A3-5-1. 全体の構成

ここでは、画像品質劣化特徴量抽出モジュールの全体構成について述べる。以下は、画像品質劣化特徴量の計量に関連するプログラム・ソース・コードのファイル名である。アプリケーション(bmpPQS または jfifPQS)は、ライブラリ libPQS.a を呼び出して利用する。また、ライブラリ libPQS.a は、JPEG 量子化テーブル最適化システムの実行モジュール hamiltonC9 内で呼び出され、利用される。

- ライブラリ
 jfifPQSStandardPackage.c
- アプリケーション
 bmpPQS.c BMP 形式のファイル用
 jfifPQS.c Sun Raster 形式のファイル用

続いて、ライブラリ(jfifStandardPackage.c)を構成する関数について概説する。jfifPQS 関数または bmpPQS 関数は、画像劣化特徴量を計量する下位関数を呼び出すインターフェースである。それぞれ Sun Raster 形式用または BMP 形式用の画像ファイルを取り扱い、内部画像形式 JFIF_Dxyz_t のポインタ型にデータを変換する。

画像劣化特徴量を計量する下位関数には、jfifMeanOfColorDifference 関数、jfifMeanOfBlockNoise 関数、jfifMeanOfAutoCorrelation 関数および jfifMaskedEdgeError 関数がある。jfifMeanOfColorDifference 関数は、平均色差(F_1)を計量する。jfifMeanOfBlockNoise 関数は、ブロック間誤差(F_2)を計量する。jfifMeanOfAutoCorrelation 関数は、誤差の自己相関の値(F_3)を計量する。また、jfifMaskedEdgeError 関数は、輪郭誤差(F_4)を計量する。

A3-5-2. 画像劣化特徴量を計量する関数

A3-5-2.1. jfifMeanOfColorDifference 関数

jfifMeanOfColorDifference 関数は、一画素当たりの CIEL*a*b*平均色差を求め
る関数である。jfifHvsFiltering 関数により、参照画像および試験画像を視覚感度
関数でフィルタリングする。そのフィルタリング結果に対して平均色差 F_1 を求め
る。各画素ごとの色差は、jfifColorRGB2XYZ 関数、jfifColorXYZ2BAL 関数、
jfifColorDiff 関数の各下位関数を使って求められ、参照画像ないし試験画像の幅お
よび高さの値で平均化される。

A3-5-2.2. jfifMeanOfBlockNoise 関数

jfifMeanOfBlockNoise 関数は、参照画像と試験画像の差に対して、水平および
垂直方向におけるブロック境界の差の平均値を計算し、その水平方向の平均値と
垂直方向の平均値の幾何平均をブロック間誤差 F_2 として計算する。ブロックは、
幅高さともに 8 画素の正方形領域である。隣接画素が未定義となる画像の端につ
いては計量されない。

A3-5-2.3. jfifMeanOfAutoCorrelation 関数

jfifMeanOfAutoCorrelation 関数は、参照画像と試験画像の差に対して、ブロッ
クごとに水平および垂直方向の自己相関の値を計算し、それらの幾何平均を「誤
差の自己相関の値 F_3 」として計算する。ここで、自己相関の値は、文献[22]にお
いて定義される式に基づいて計算される。

A3-5-2.4. jfifMaskedEdgeError 関数

jfifMaskedEdgeError 関数は、画像内容のエッジ周辺のノイズ成分を輪郭誤差
 F_4 として計量する。エッジ(輪郭)は、いわゆる Kirsch フィルタを用いて検知され
る。この輪郭誤差については、ブロックごとには計算しない。輪郭誤差は、文献[22]
において定義される式に基づいて計算される。

A3-5-3. ソース・コードの保管ディレクトリ

ライブラリおよびアプリケーションのソース・コードは、付表 A3-5 に示すディ
レクトリに保管されている。

付表 A3-5. ライブラリおよびアプリケーションの保管ディレクトリ

	ソース・ファイル名	保管ディレクトリ
ライブラリ	jfifPQSStandardPackage.c	src/libPQS
アプリケーション	bmpPQS.c	src/jpeg/util
	jfifPQS.c	src/jpeg/util

付録 3.6 各画像の種類における固有ベクトル

ここでは、各画像の種類における画像品質劣化特徴量($F_1 \sim F_4$)から導出された固有ベクトルについて述べる。第 3 章第 1 節従来の画像品質評価尺度において述べたように、まず主観評価実験で用いた各試験画像に対する劣化特徴量を求め、それらに対応する相関行列から固有ベクトルが計算される。各試験画像に対する劣化特徴量は、実行モジュール(jffPQS)によって求められた。劣化特徴量から固有ベクトルは、Microsoft Excel を用いて求められた。付表 A3-6a から付表 A3-6d は、各画像の種類ごとの固有ベクトルの要素の値を示す。

付表 A3-6a. 画像の種類を問わない場合の固有ベクトル

	第一要素	第二要素	第三要素	第四要素
第一固有ベクトル	0.67	0.26	0.18	0.67
第二固有ベクトル	0.06	-0.66	0.75	-0.01
第三固有ベクトル	-0.23	0.71	0.63	-0.22
第四固有ベクトル	-0.71	-0.03	0.03	0.71

付表 A3-6b. ITE デジタル標準画像の場合の固有ベクトル

	第一要素	第二要素	第三要素	第四要素
第一固有ベクトル	0.65	0.40	0.18	0.62
第二固有ベクトル	0.01	-0.45	0.89	0.01
第三固有ベクトル	-0.22	0.79	0.41	-0.41
第四固有ベクトル	0.73	-0.12	-0.06	-0.67

付表 A3-6c. ビジネス・グラフィックスの場合の固有ベクトル

	第一要素	第二要素	第三要素	第四要素
第一固有ベクトル	0.56	0.43	0.40	0.58
第二固有ベクトル	0.06	-0.63	0.77	-0.13
第三固有ベクトル	-0.50	0.62	0.50	-0.33
第四固有ベクトル	0.66	0.17	-0.04	-0.73

付表 A3-6d. テキスト画像の場合の固有ベクトル

	第一要素	第二要素	第三要素	第四要素
第一固有ベクトル	0.56	0.51	-0.31	0.57
第二固有ベクトル	0.09	0.31	0.94	0.15
第三固有ベクトル	-0.46	0.80	-0.16	-0.35
第四固有ベクトル	0.68	0.08	0.02	-0.73

付録 4-1. ミキシングとシステム・パラメータを考慮した高次元アルゴリズムの実装

ここでは、ミキシングの項 M とシステム・パラメータ γ を考慮した高次元アルゴリズムの実装 hamiltonC10 について説明する。他の古いバージョンの実装(hamiltonC8 や hamiltonC9 など)もほぼ同様に行われている(付録 2-2 参照)。

A4-1-1. 機能と入出力ファイル

実行モジュール hamiltonC10 は、反復公式(4.10)および(4.11)に基づいて、最適な JPEG 量子化テーブルを探索する。付表 4.1-1 の各ファイルを入力し、定数および変数の初期設定を行う。検証実験において実際に入力された値については、付録 4-2 を参照されたい。

付表 4.1-1. 入力ファイル

ファイル名	内容
parameters.dat	最大試行回数などの各種パラメータ
q11st.ini	第一の状態空間に対する仮想粒子の初期位置(輝度用量子化テーブルに対応)
q12nd.ini	第一の状態空間に対する仮想粒子の初期位置(クロミナンス用量子化テーブルに対応)
q21st.ini	第二の状態空間に対する仮想粒子の初期位置(輝度用量子化テーブルに対応)
q22nd.ini	第二の状態空間に対する仮想粒子の初期位置(クロミナンス用量子化テーブルに対応)
p11st.ini	第一の状態空間に対する仮想粒子の初期運動量(輝度用量子化テーブルに対応)
p12nd.ini	第一の状態空間に対する仮想粒子の初期運動量(クロミナンス用量子化テーブルに対応)
p21st.ini	第二の状態空間に対する仮想粒子の初期運動量(輝度用量子化テーブルに対応)
p22nd.ini	第二の状態空間に対する仮想粒子の初期位置(クロミナンス用量子化テーブルに対応)

また、hamiltonC10 は付表 4.1-2 の各ファイルを出力する。これらの出力された結果ファイルを元に、付録 4-3 記載の手続きに従ってデータを抽出したものを第 4 章 3 節の結果とした。なお、hamiltonC10 では運動量についての情報を出力しない。

付表 4.1-2. 出力ファイル

ファイル名	内容
q11st.dat	反復ごとの第一の状態空間に対する仮想粒子の位置 (輝度用量子化テーブルに対応)
q12nd.dat	反復ごとの第一の状態空間に対する仮想粒子の位置 (クロミナンス用量子化テーブルに対応)
q21st.dat	反復ごとの第二の状態空間に対する仮想粒子の位置 (輝度用量子化テーブルに対応)
q22nd.dat	反復ごとの第二の状態空間に対する仮想粒子の位置 (クロミナンス用量子化テーブルに対応)

A4-1-2. 構成

hamiltonC10 は、付表 4.1-3 に示す関数によって構成されている。対応するソース・コードは、ディレクトリ~/src/hamiltonC10 に hamiltonC10.c として保管されている。JPEG 符号器および復号器に相当する部分は、Thomas G. Lane のライブラリ”The Independent JPEG Group’s JPEG software, release 6a”(7-Feb-96)の呼び出しにより実現し、JPEG 符号化復号化を行う。そのライブラリは、ディレクトリ~/jpeg6a に保管されている。

付表 4.1-3. 関数

関数名	機能
calcRate	画像情報 bmiHeader に基づき、レートを計算し、戻り値として計算結果を返す。
encoder	image_buffer に格納された幅 image_width 高さ image_height の画像データを輝度用量子化テーブル table0 およびクロミナンス用量子化テーブル table1 に基づいて JPEG 符号化する。
decoder	JPEG 復号化したデータを body1 に格納する。また、フォーマット情報 bmiHeader に格納する。
mapFromQminTo1	浮動小数点型の値 s を QMIN から 1.0 の範囲に写像する。
mapFromQMINToQMAX	符号なし整数型の値 s を QMIN から QMAX の範囲に写像する。
mapFrom1To255Double	浮動小数点型の値 s を 1.0 から 255.0 の範囲に写像する。
readParameters	filename で指定される入力パラメータ・ファイルから各パラメータを読み込み、反復回数 t_max、微小時間定数(Δt)dt、反射係数(吸収係数) reflection を返す。
writeDoubleMatrix2D	二次元形式で浮動小数点型配列 s の値をディスプレイに表示する。
writeUnsignedIntMatri	二次元形式で符号なし整数型配列 s の値をディ

x2D	スプレイに表示する。
readDoubleMatrix2DfromFile	filename1 および filename2 で指定されるファイルから二次元形式で浮動小数点数型の値を配列 d に読み込む。
readUnsignedIntMatrix2DfromFile	filename1 および filename2 で指定されるファイルから二次元形式で符号なし整数型の値を配列 d に読み込む。
writeDoubleMatrix2DtoFile	filename1 および filename2 で指定されるファイルに、モード mode に従って、二次元形式で浮動小数点数型の配列 s の値を書き込む。
writeUnsignedIntMatrix2DtoFile	fp1 および fp2 で指定されるファイルに、二次元形式で符号なし整数型の配列 s の値を書き込む。
normalize	浮動小数点数型の配列 s の値を 255.0 で割ることによって正規化する。
scaleByDouble	浮動小数点数型の配列 s の値を 255.0 倍して、浮動小数点数型の配列 d に格納する。
checkValues	浮動小数点数型の値 s を特定の値に収める。
writeResults	結果を出力ファイルに記録する。
closeAndFree	出力ファイルを閉じ、作業用メモリを開放する。
signal_handler	シグナル・ハンドラ
main	高次元アルゴリズムの本体

A4-1-3. ポテンシャル関数

ポテンシャル関数には、以下のレートに関するポテンシャル関数 V_1 と画像品質に関するポテンシャル関数 V_2 の二つがある。

- ポテンシャル関数 V_1
calcRate 関数によりレートが算出され、その結果をポテンシャル関数 V_1 の値とする。
- ポテンシャル関数 V_2
bmpRGBSNR 関数により各 RGB 成分の SNR (SNR_r , SNR_g および SNR_b) が計算され、式(4.12)に基づいてポテンシャル関数の値を計算する。

A4-1-4. 入出力ファイルのフォーマット

ここでは、各入出力ファイルのフォーマットについて説明する。

- parameters.dat
 - 1 行目: ダミー(浮動小数点数)
 - 2 行目: ダミー(浮動小数点数)
 - 3 行目: 第一の状態空間に対するシステム・パラメータ γ_1 (1 より小さな浮動小数点数)
 - 4 行目: 第二の状態空間に対するシステム・パラメータ γ_2 (1 より小さな浮動小数点数)
 - 5 行目: 最大試行回数(整数)
 - 6 行目: 微小時間定数 Δt (浮動小数点数)、反復公式(4.10)および(4.11)参照。
 - 7 行目: 反射係数(浮動小数点数)
 - 8 行目: BMP 形式の参照画像

- q11st.ini, q12nd.ini, q21st.ini および q22nd.ini
8 行 8 列の整数

- p11st.ini, p12nd.ini, p21st.ini および p22nd.ini
8 行 8 列の浮動小数点数。なお、値として整数を記録しても動作に支障はないことに注意。

- q11st.dat, q12nd.dat, q21st.dat および q22nd.dat
反復処理ごとの 8 行 8 列の整数が反復回数(試行回数)だけ連続して並ぶ。

A4-1-5. 実行前に準備すべきファイル

実行モジュール hamiltonC10 が配置される作業ディレクトリには、hamiltonC10 の実行に先だって以下のファイルが準備されなければならない。

- parameters.dat
- q11st.ini, q12nd.ini, q21st.ini および q22nd.ini
- p11st.ini, p12nd.ini, p21st.ini および p22nd.ini
- parameters.dat の 8 行目に指定する BMP 形式の参照画像

A4-1-6. 実行方法

起動用スクリプトファイル `testC.sh` により、`hamiltonC10` 実行モジュールを実行することを推奨する。`testC.sh` は、古いデータ・ファイルの削除などを行う。

A4-1-7. メイン関数の構成

メイン関数 `main` は、初期化部分と反復処理部分に分かれ、以下の処理を行う。初期化部分は、第二章図 2.2 のステップ S1 に対応する。一方、反復処理部分は、同じく第二章図 2.2 のステップ S2～S8 に対応する。

- 初期化部分

初期化部分は以下の機能を負う。

- 変数の宣言および初期設定
- シグナル・ハンドラ `signal_handler` の設定
- `q11st.ini` など初期化ファイルの読み込み
- パラメータ・ファイル `parameters.dat` の読み込み
- 参照画像の読み込み

- 反復処理部分

反復処理部分は、`parameters.dat` ファイルで指定される最大試行回数まで反復処理を行う。反復中にユーザにより停止が命令された場合または最大試行回数まで反復処理を行った場合には、第一および第二の状態空間における仮想粒子の軌跡、すなわち JPEG 量子化テーブルの値をファイルとして出力する。反復中のユーザによる停止命令は、シグナル・ハンドラ `signal_handler` によって行う。

反復処理部分は、次の 5 つの部分からなる。

- 第一の状態空間における仮想粒子の現在の運動量を計算する部分
- 第二の状態空間における仮想粒子の現在の運動量を計算する部分
- 第一の状態空間における仮想粒子の現在の位置を計算する部分
- 第二の状態空間における仮想粒子の現在の位置を計算する部分
- 第一および第二の状態空間における運動量と位置の更新処理

付録 4-2. 仮想粒子の位置と運動量に対する初期値

付表 4-2a および付表 4-2b は、それぞれ第一の状態空間および第二の状態空間における仮想粒子の位置に対する初期値をそれぞれ示す(第 4 章 2 節参照)。左の表が輝度用 JPEG 量子化テーブルに対応する。また、右の表がクロミナンス用 JPEG 量子化テーブルに対応する。第一の状態空間における仮想粒子の位置の初期値は、国際標準例示の JPEG 量子化テーブルの各量子化ステップの約 4 分の 1 の値としたものである。一方、第二の状態空間における仮想粒子の位置の初期値は、国際標準例示の JPEG 量子化テーブルと同じ値である。

第一の状態空間および第二の状態空間における仮想粒子の運動量に対する初期値は、すべて 1 として設定した。

付表 4-2a. 第一の状態空間における仮想粒子の位置

4	2	2	4	6	10	12	15
3	3	3	4	6	14	15	13
3	3	4	6	10	14	17	14
3	4	5	7	12	21	20	15
4	5	9	14	17	27	25	19
6	8	13	16	20	26	28	23
12	16	19	21	25	30	30	25
18	23	23	24	28	25	25	24

4	4	6	11	24	24	24	24
4	5	6	16	24	24	24	24
6	6	14	24	24	24	24	24
11	16	24	24	24	24	24	24
24	24	24	24	24	24	24	24
24	24	24	24	24	24	24	24
24	24	24	24	24	24	24	24
24	24	24	24	24	24	24	24

付表 4-2b. 第二の状態空間における仮想粒子の位置

16	11	10	16	24	40	51	61
12	12	14	19	26	58	60	55
14	13	16	24	40	57	69	56
14	17	22	29	51	87	80	62
18	22	37	56	68	109	103	77
24	35	55	64	81	104	113	92
49	64	78	87	103	121	120	101
72	92	95	98	112	100	103	99

17	18	24	47	99	99	99	99
18	21	26	66	99	99	99	99
24	26	56	99	99	99	99	99
47	66	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99
99	99	99	99	99	99	99	99

付録 4-3. hamiltonC10 関連のデータ処理

ここでは、hamiltonC10 に関連するデータ処理の手順について説明する。

STEP1. 準備

以下のファイルを作業用ディレクトリに用意する(付録 4-1 参照)。ほかに、parameters.dat で指定する参照画像も用意する。

- parameters.dat
- q11st.ini
- q12nd.ini
- q21st.ini
- q22nd.ini
- p11st.ini
- p12nd.ini
- p21st.ini
- p22nd.ini

STEP2. 最適化システムの実行

実行用スクリプト testC.sh を作業用ディレクトリで起動することによって、実行モジュール hamiltonC10 を動作させる。

```
%testC.sh
```

以下の結果ファイルが出力される。

- q11st.dat
- q12nd.dat
- q21st.dat
- q22nd.dat

STEP3. 出力結果ファイルの保管

例えば、データ保管用のディレクトリを~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1 とする。データ保管用のディレクトリは、parameters.dat の内容を確認して生成する。

```
%cat parameters.dat
%mkdir ~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1
```

STEP4. 保管ディレクトリへの移動

初期化ファイルや結果ファイルを保管ディレクトリに保管する。

```
%cd ~/src/hamiltonC10
%mv *.dat ~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1
%cp *.ini ~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1
%mv *.time ~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1
%cd ~/experi/experi12/hamiltonC10/BS1to1
%chmod -w *
```

STEP5. 改善データの判定

```
%cat parameters.dat
%setupExpo.sh chart?.cro
%support.sh
%chmod -w result.dat
```

STEP6. PC での準備

まず、PC 上の作業ディレクトリに以下のファイルを用意する。ワークステーションから PC への“result.dat”のコピーは ftp などにより行う。

- result.dat
- experi3.xls

STEP7. Excel ファイルへの変換

PC 側で以下の手続きによって、result.dat を Excel ファイルに変換する。

experi3.xls を起動する。

このとき [Microsoft Excel] ダイアログでは、[マクロを有効にする(E)]を選択する。

[ファイル(F)][開く(O)...]を選択する。

[ファイルを開く]ダイアログの[ファイル名(N):]で、“result.dat”を選択し、ダブルクリックする。

続く[テキスト ファイル ウィザード 1/3]では、[元のデータの形式]として、[カンマやタブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータ(D)]を選択し、[次へ>]ボタンをクリックする。

続く[テキスト ファイル ウィザード 2/3]では、[区切り文字]に[カンマ(C)]を選択し、[完了(F)]ボタンをクリックする。

ファイル名を e??-???として保存する。

つまり、ファイル(F)[名前を付けて保存(A)...]を選択し、[ファイル名を付けて保存]ダイアログで[ファイル名(N):]で”e??-???”と入力する。

続く[ファイルの種類(T):]で”Microsoft Excel 97 および 5.0/95 ブック(*.xls)”を選択し、[保存(S)]ボタンをクリックする。

シート名が”result”であることを確認する。

STEP8. 良い結果の検索

PC 側で以下の手続きによって、良い結果を検索する。

[ツール(T)][マクロ(M)][マクロ(M)...]を選択する。

[マクロ]ダイアログの[マクロ名(M):]に”experi3.xls!search”マクロを選択し、[実行(R)]ボタンをクリックする。

[ファイル(F)][上書き保存(S)]を選択する。

この時点で、赤く表現された行があれば、その行は国際標準例示の場合よりレートおよび SNR が改善されている結果であることを示す。

このエクセルの行数を N、例えば 17 とする。

STEP9. 改善率の算出

サポート・スクリプト support2.sh により改善率を算出する。サポート・スクリプト support2.sh の引数には前述の行数(ここでは、17)を用いる。

```
%support2.sh 17
```

以下のファイルが生成される。

- result2.dat //改善率などのデータ・ファイル
- qt1st-best.dat //引数に対応した輝度用量子化テーブル
- qt2nd-best.dat //引数に対応したクロミナンス用量子化テー

ブル

ここで、result2.dat は、付表 4-3 のようなフォーマットになっている。

付表 4-3. result2.dat のフォーマット

行	内容
1	国際標準例示のレート、 SNR_r 、 SNR_g および SNR_b
2	エクセルの行数-1 の値、第一の状態空間におけるレート、 SNR_r 、 SNR_g および SNR_b 並びに第二の状態空間におけるレート、 SNR_r 、 SNR_g および SNR_b 、各状態空間のレートと SNR_r 、 SNR_g および SNR_b が国際標準例示の場合よりも良くなっているかの判断結果(○は改善、×は悪化)、第一または第二の状態空間において国際標準例示の場合に比べて良くなっているか否かの判断(○は改善、×は悪化)
3	レート、 SNR_r 、 SNR_g および SNR_b についてのパーセント改善率

レートの単位は(bits/sample)である。 SNR_r は R 成分についての SNR、 SNR_g は G 成分についての SNR、 SNR_b は B 成分についての SNR である。SNR の単位は(dB)である。

安全のため、データ・ファイルの属性変更する。

```
%chmod -w *.dat
```

STEP10. 復号化画像の生成

ユーティリティ jencoder および jdecoder により符号化画像および復号化画像を生成する。ユーティリティ jencoder は BMP 形式の画像データを JPEG ストリームに変換する。jencoder は引数として、JPEG 量子化テーブルを採ることができ。ユーティリティ jdecoder は、JPEG データ・ストリームを BMP 形式に変換する。

```
%jencoder chart1cro.bmp proposal.jpg qt1st-best.dat qt2nd-best.dat  
%jdecoder proposal.jpg chart1cro17-d.bmp
```

STEP11. 後処理

以下による不要なリンクを削除する。

```
%cleanExpo.sh
```

付録 4-4. データの保管ディレクトリと発見回数

付表 A4-4a は、本報告において示された検証実験結果の生データの保管ディレクトリとそれらをまとめた Excel ファイル名を示す。

付表 A4-4a. 表 2.2 のデータ

参照画像	Excel ファイル名	生データ保管ディレクトリ
肌色チャート	e12-044.xls	experi12/hamiltonC10/BS1to1
ヘアバンドの女性	e13-045.xls	experi13/hamiltonC10/BS1to1
天気予報	e14-036.xls	experi14/hamiltonC10/BS1to1
スイスの山村	e15-024.xls	experi15/hamiltonC10/BS1to1
チューリップ	e16-024.xls	experi16/hamiltonC10/BS1to1
建物と文字	e10-010.xls	experi10/hamiltonC10/BS1to1
地図	e11-011.xls	experi11/hamiltonC10/BS1to1

次に、結果として採用した JPEG 量子化テーブルの得られた試行回数を付表 A4-4b に示す。採用回数は、Excel の行数に同じであり、support2.sh の引数となる値で、レートが最小となる場合を選択した。

付表 A4-4b. 表 2.2 のデータ

参照画像	試行回数(回)	採用回数(回)
肌色チャート	6170	17
ヘアバンドの女性	10000	21
天気予報	10000	25
スイスの山村	10000	31
チューリップ	10000	27
建物と文字	10000	27
地図	10000	26

付録 4-5. 表 4.1 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 4.1 に対応する最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

肌色チャート(輝度用)

9	16	18	20	22	26	28	31
16	19	19	20	22	30	31	29
19	19	20	22	26	30	33	30
19	20	21	23	28	37	36	31
20	21	25	30	33	43	41	35
22	24	29	32	36	42	44	39
28	32	35	37	41	46	46	41
34	39	39	40	44	41	41	40

肌色チャート(クロミナンス用)

9	18	22	27	40	40	40	40
19	21	22	32	40	40	40	40
22	22	30	40	40	40	40	40
27	32	40	40	40	40	40	40
40	40	40	40	40	40	40	40
40	40	40	40	40	40	40	40
40	40	40	40	40	40	40	40
40	40	40	40	40	40	40	40

ヘアバンドの女性(輝度用)

13	22	22	24	26	30	32	35
21	23	23	24	26	34	35	33
23	23	24	26	30	34	37	34
23	24	25	27	32	41	40	35
24	25	29	34	37	47	45	39
26	28	33	36	40	46	48	43
32	36	39	41	45	50	50	45
38	43	43	44	48	45	45	44

ヘアバンドの女性(クロミナンス用)

11	18	26	31	44	44	44	44
19	23	26	36	44	44	44	44
26	26	34	44	44	44	44	44
31	36	44	44	44	44	44	44
44	44	44	44	44	44	44	44
44	44	44	44	44	44	44	44
44	44	44	44	44	44	44	44
44	44	44	44	44	44	44	44

天気予報(輝度用)

13	26	26	28	30	34	36	39
27	27	27	28	30	38	39	37
27	27	28	30	34	38	41	38
27	28	29	31	36	45	44	39
28	29	33	38	41	51	49	43
30	32	37	40	44	50	52	47
36	40	43	45	49	54	54	49
42	47	47	48	52	49	49	48

天気予報(クロミナンス用)

13	27	30	35	48	48	48	48
27	29	30	40	48	48	48	48
30	30	38	48	48	48	48	48
35	40	48	48	48	48	48	48
48	48	48	48	48	48	48	48
48	48	48	48	48	48	48	48
48	48	48	48	48	48	48	48
48	48	48	48	48	48	48	48

スイスの山村(輝度用)

34	32	32	34	36	40	42	45
33	33	33	34	36	44	45	43
33	33	34	36	40	44	47	44
33	34	35	37	42	51	50	45
34	35	39	44	47	57	55	49
36	38	43	46	50	56	58	53
42	46	49	51	55	60	60	55
48	53	53	54	58	55	55	54

スイスの山村(クロミナンス用)

30	34	36	41	54	54	54	54
34	35	36	46	54	54	54	54
36	36	44	54	54	54	54	54
41	46	54	54	54	54	54	54
54	54	54	54	54	54	54	54
54	54	54	54	54	54	54	54
54	54	54	54	54	54	54	54
54	54	54	54	54	54	54	54

チューリップ(輝度用)

30	28	28	30	32	36	38	41
29	29	29	30	32	40	41	39
29	29	30	32	36	40	43	40
29	30	31	33	38	47	46	41
30	31	35	40	43	53	51	45
32	34	39	42	46	52	54	49
38	42	45	47	51	56	56	51
44	49	49	50	54	51	51	50

チューリップ(クロミナンス用)

25	30	32	37	50	50	50	50
30	31	32	42	50	50	50	50
32	32	40	50	50	50	50	50
37	42	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50

付録 4-6. 表 4.1 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブル

ここでは、表 4.1 に対応した最適化された JPEG 量子化テーブルを示す。

建物と文字(輝度用)

23	28	28	30	32	36	38	41
29	29	29	30	32	40	41	39
29	29	30	32	36	40	43	40
29	30	31	33	38	47	46	41
30	31	35	40	43	53	51	45
32	34	39	42	46	52	54	49
38	42	45	47	51	56	56	51
44	49	49	50	54	51	51	50

建物と文字(クロミナンス用)

16	30	32	37	50	50	50	50
30	31	32	42	50	50	50	50
32	32	40	50	50	50	50	50
37	42	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50

地図(輝度用)

19	27	27	29	31	33	37	40
28	28	28	29	31	39	40	38
28	28	29	31	35	39	42	39
28	29	30	32	37	46	45	40
29	30	34	39	42	52	50	44
31	33	38	41	45	51	53	48
37	41	44	46	50	55	55	50
43	48	48	49	53	50	50	49

地図(クロミナンス用)

18	24	31	36	49	49	49	49
26	30	31	41	49	49	49	49
26	31	39	49	49	49	49	49
36	41	49	49	49	49	49	49
49	49	49	49	49	49	49	49
49	49	49	49	49	49	49	49
49	49	49	49	49	49	49	49
49	49	49	49	49	49	49	49

付録 4-7. 復号化画像

付図 A4-1-1 から付図 A4-1-5 に実行モジュール hamiltonC10 によって得た JPEG 量子化テーブル(付録 4-5 参照)を用いた場合の復号画像を示す。参照画像や国際標準例示の場合については、付録 2-10 から付録 2-14 を参照されたい。なお、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A4-1-1. 肌色チャート



付図 A4-1-2. ヘアバンドの女性



付図 A4-1-3. 天気予報



付図 A4-1-4. スイスの山村



付図 A4-1-5. チューリップ

付録 4-8. 参照画像と復号化画像

付図 A4-2a に参照画像を、付図 A4-2b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A4-2c に実行モジュール hamiltonC10 による本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、建物と文字である。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



In the information society of the 21st century, great volumes of diverse information will be disseminated through various means. This vast, varied information exchange will require advanced systems for accurate and efficient processing of information.

付図 A4-2a. 参照画像



In the information society of the 21st century, great volumes of diverse information will be disseminated through various means. This vast, varied information exchange will require advanced systems for accurate and efficient processing of information.

付図 A4-2b. 国際標準例示の場合



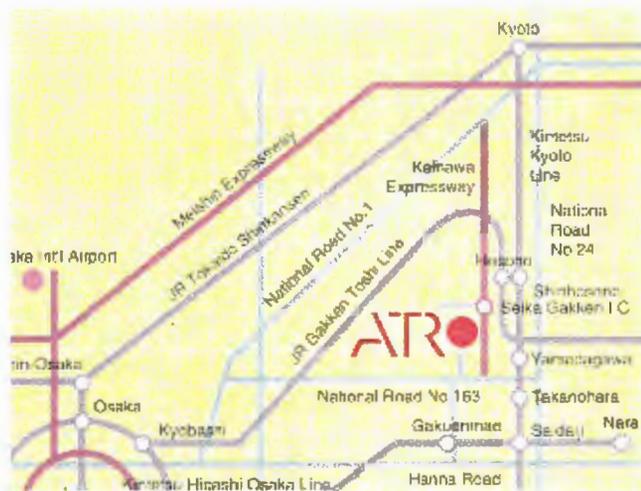
In the information society of the 21st century, great volumes of diverse information will be disseminated through various means. This vast, varied information exchange will require advanced systems for accurate and efficient processing of information.

付図 A4-2c. 本手法の場合

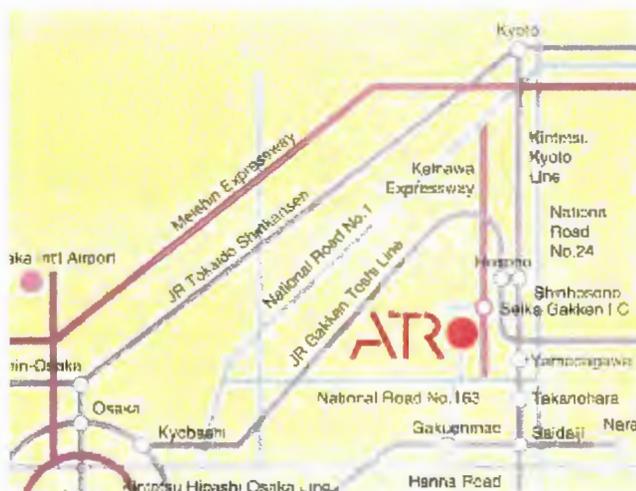
上記の付図 A4-2a～付図 A4-2c においては、原稿が印刷物であり、サイズを縦横半分にし、さらに印刷出力しているため、モアレと呼ばれる劣化が目立つ。ディスプレイ表示の結果と比較されたい。

付録 4-9. 参照画像と復号化画像

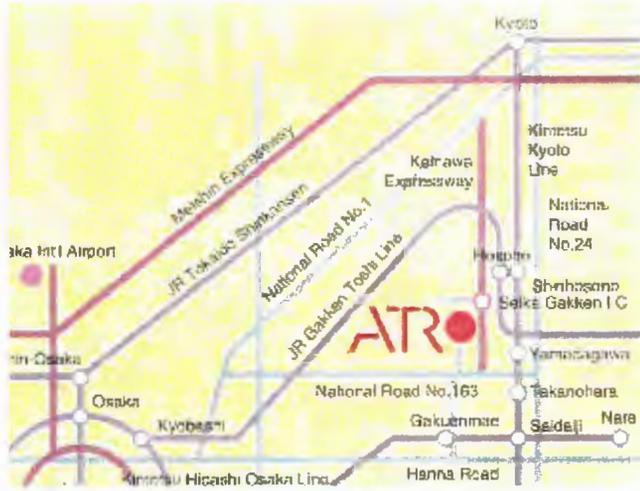
付図 A4-3a に参照画像を、付図 A4-3b に国際標準例示の場合の復号化画像を、付図 A4-3c に実行モジュール hamiltonC10 による本手法の場合の復号化画像をそれぞれ示す。参照画像は、地図である。また、サイズは検証実験で用いた画像の縦横半分になっている。



付図 A4-3a. 参照画像



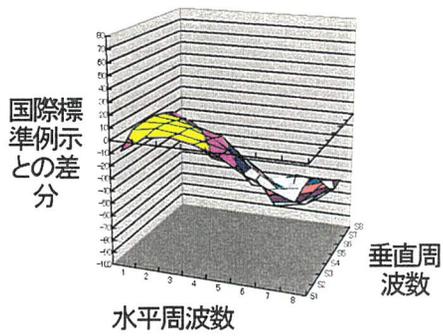
付図 A4-3b. 国際標準例示の場合



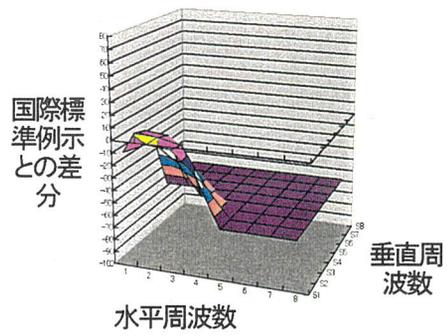
付図 A4-3c. 本手法の場合

付録 4-10. 国際標準例示と最適化された JPEG 量子化テーブルの違い

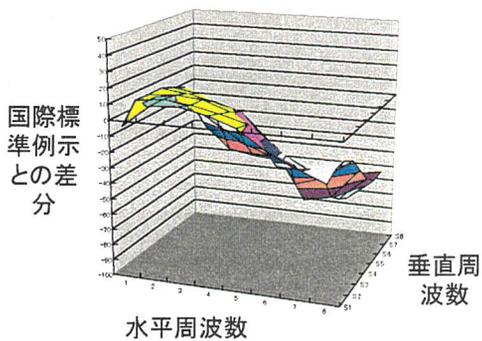
ここでは、国際標準例示の JPEG 量子化テーブルの値と高次元アルゴリズムによって最適化された JPEG 量子化テーブルの値との差のグラフを示す。



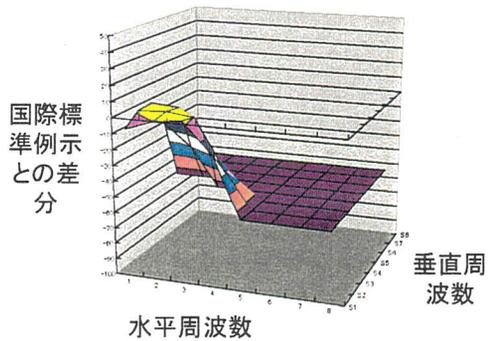
肌色チャート(輝度)



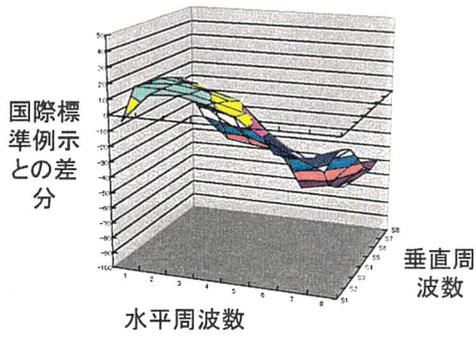
肌色チャート(クロミナンス)



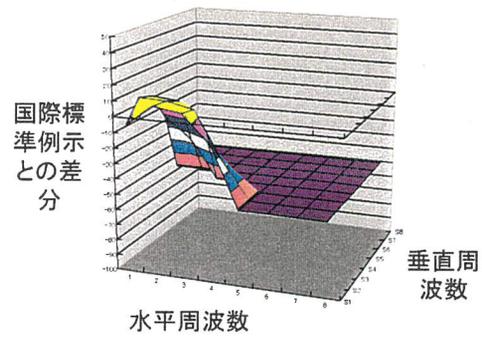
ヘアバンドの女性(輝度用)



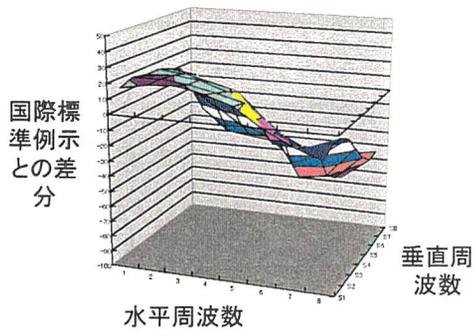
ヘアバンドの女性(クロミナンス用)



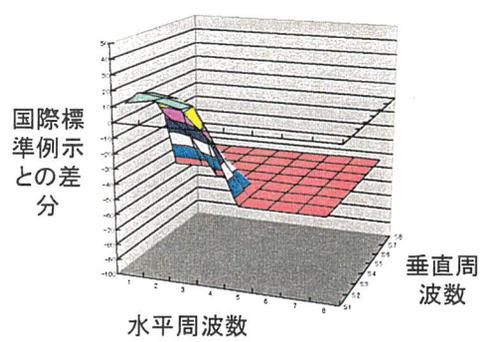
天気予報(輝度用)



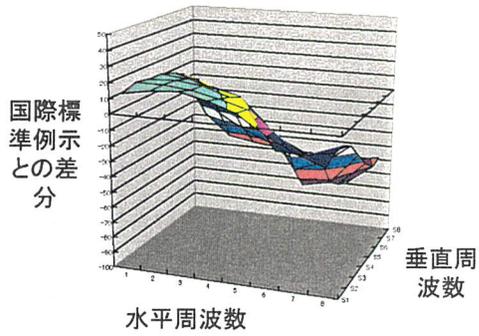
天気予報(クロミナンス用)



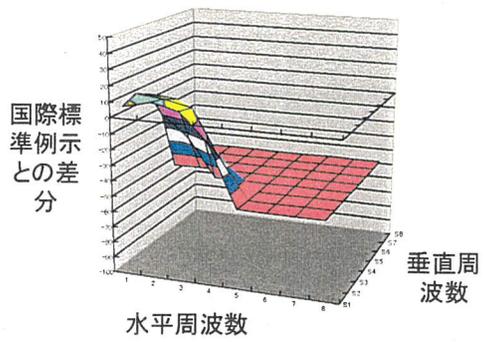
スイスの山村(輝度用)



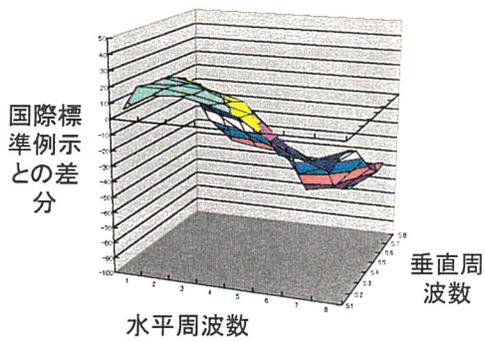
スイスの山村(クロミナンス用)



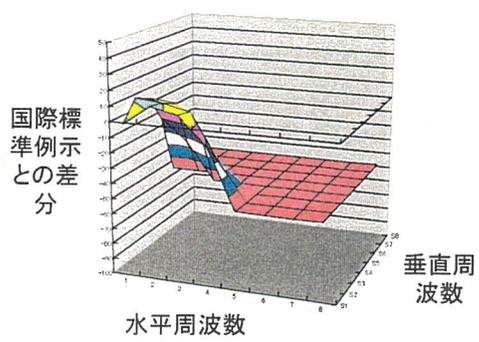
チューリップ(輝度用)



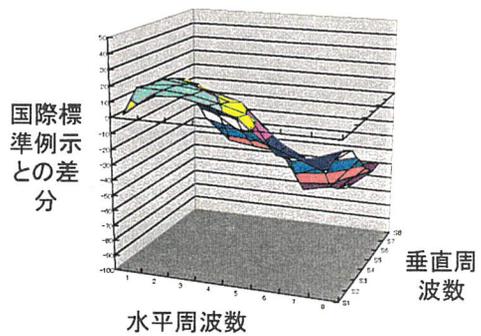
チューリップ(クロミナンス用)



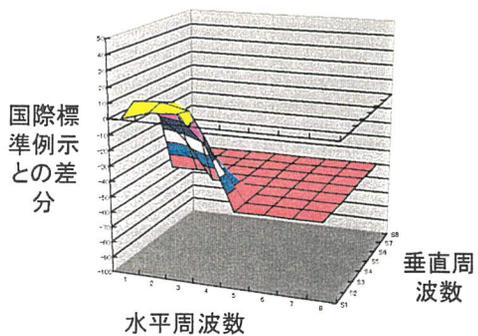
建物と文字(輝度用)



建物と文字(クロミナンス用)



地図(輝度用)



地図(クロミナンス用)

付録 4-11. ミキシングの失敗事例

ここでは、良い結果が得られなかった場合の式(4.1)におけるミキシング M の構成方法について述べる。以下に述べる付式(A4.1)から付式(A4.3)のミキシングの構成では良い結果が得られなかった。現在なぜ良い結果が得られなかったのかについては原因がわかっていない。

A4-10-1. 失敗事例 1

$$M = \sum_{j=1}^{128} \alpha_j p_{1,j}^{3(\gamma_1-1)} p_{2,j}^{3(\gamma_2-1)} \quad (A4.1)$$

ここに、 α_j は定数であり、予備検証実験では、すべて 1.0 に設定した。また、システム・パラメータ γ_1 および γ_2 は共に 0.5 に設定した。詳細については、ソース・コード hamiltonC10.c.ver1.3 を参照されたい。

A4-10-2. 失敗事例 2

$$M = \sum_{j=1}^{128} \alpha_j (p_{1,j}^2 + a_1)^{\gamma_1-1} (p_{2,j}^2 + a_2)^{\gamma_2-1} \quad (A4.2)$$

ここに、 α_j は定数であり、予備検証実験では、すべて 1.0 に設定した。システム・パラメータ γ_1 および γ_2 は共に 0.5 に設定した。また、 a_1 および a_2 は、共に 0 より大きな定数であり、予備実験では、共に 1.0 に設定した。詳細については、ソース・コード hamiltonC10.c.ver1.4 を参照されたい。

A4-10-3. 失敗事例 3

$$M = \sum_{j=1}^{128} \alpha_j (\sin p_{1,j} + a_1)^{\gamma_1-1} (\sin p_{2,j} + a_2)^{\gamma_2-1} \quad (A4.3)$$

ここに、 α_j は定数であり、予備検証実験では、すべて 1.0 に設定した。システム・パラメータ γ_1 および γ_2 は共に 0.5 に設定した。また、 a_1 および a_2 は、共に 1 より大きな定数であり、予備実験では、共に 2.0 に設定した。詳細については、ソース・コード hamiltonC10.c.ver1.5 を参照されたい。

参考文献

- [1] "Information technology-Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines", ISO/IEC10918-1(1994)
- [2] 新上和正、山田順一、下川信祐:"高次元化によるシステムの制御方法",1997 年電子情報通信学会総合大会, A-1-14, p.14
- [3] ケイワーク:"JPEG-概念から C++による実装まで",ソフトバンク(1998),p.7-45,ISBN4-7973-0632-7
- [4] 八木伸行、井上誠喜、林正樹ほか:"C 言語で学ぶ実践デジタル映像処理",オーム社(平成 7 年),p.239-257
- [5] 荻原剛志、山口英(訳):"データ圧縮ハンドブック改訂第 2 版",トッパン(1996),p.280-326,ISBN4-8101-8605-9
- [6] 新上和正、山田順一、下川信祐ほか:"高次元アルゴリズムによるルーチング性能評価",1998 年電子情報通信学会総合大会 B-7-104
- [7] 稲村浩:"C で実現する JPEG 準拠画像データ圧縮/伸張システム",インターフェース(Dec. 1991), p.183-203
- [8] 藤原洋:"最新 MPEG 教科書",アスキー出版局(1994),p.53-57,ISBN4-7561-0247-6
- [9] 安田浩、藤原洋(監訳):"デジタル放送・インターネットのための情報圧縮技術",共立出版(1998),p.90-119
- [10] 原島博:"画像情報圧縮",オーム社(1991),p.95-108,ISBN4-274-07675-X
- [11] Eric Hamilton:"JPEG File Interchange Format Version 1.02", (Sep. 1992)
- [12] 種田和正、新上和正:"ルーチングアルゴリズムの性能限界について",1998 年電子情報通信学会総合大会 B-7-103,p.224
- [13] 山田順一、新上和正、北川美宏ほか:"ハミルトニアンアルゴリズムによるコーデジェネレーションシステムの最適化",電子情報通信学会技術研究報告 EE98-35(1998-09),p.33-40
- [14] 谷萩隆嗣:"音声と画像のデジタル信号処理",コロナ社(1996),p.175
- [15] テレビジョン学会:"テレビジョン・システム評価用デジタル標準画像解説書", (昭和 60 年)
- [16] テレビジョン学会:"デジタル標準画像(フロッピーディスク版)解説書", (平成 2 年)
- [17] 平田和貴、山田順一、新上和正:"高次元アルゴリズムによる JPEG 量子化テーブルの最適化", 電子情報通信学会技術研究報告 IE98-87(1998-11),p.31-38
- [18] 平田和貴、山田順一、新上和正:"高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への応用",1998 年電子情報通信学会総合大会 D-11-70
- [19] HIRATA Kazutaka, YAMADA Jun-ichi, SHINJO Kazumasa:"Applying the Hamiltonian algorithm to optimize JPEG quantization tables", SPIE Vol. 3648 (Jan. 1999), pp.344-351
- [20] 濱本和彦、梅村英昭、平田和貴、山田順一、新上和正:"医療用超音波画像のための JPEG 量子化テーブルの最適化に対する高次元アルゴリズムの応用",第 19 回超音波エレクトロニクス基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, OH1, (1998 年 11 月), p263
- [21] 濱本和彦:"医療用超音波画像に対する JPEG 量子化テーブルの最適化",1998 年度委託研究最終報告書
- [22] 小谷一孔、古性淑子、堀田裕弘、宮原誠:"色差の空間的つながりを考慮したカラー符号化画像の画質評価モデル",電子情報通信学会技術研究報告 CS97-131~144[通信方式],p.49-53, 1997 年 12 月 12 日
- [23] 平田和貴、山田順一:"JPEG 量子化テーブル最適化のための客観的画質評価法の検討",電子情報通信学会 1998 年情報・システムソサイエティ大会 D-11-11
- [24] 平田和貴、山田順一:"高次元アルゴリズムの JPEG 量子化テーブル最適化への応用",1999 年電子情報通信学会総合大会 D-11-25
- [25] 片岡洋右:"分子軌道法とモンテカルロ法",講談社(1994),p.18-40,ISBN4-06-154701-1
- [26] 日本規格協会編集:"JIS Z8730(色差表示方法)",JIS ハンドブック 33 色彩-96,日本規格協会(1996)
- [27] 谷萩隆嗣:"音声と画像のデジタル信号処理",コロナ社(1996),p.193-195
- [28] "METHODOLOGY FOR THE SUBJECTIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF TELEVISION PICTURES", DRAFT REVISION OF RECOMMENDATION ITU-R BT.500-7
- [29] 日高恒義:"デジタル圧縮画像の評価法",Interface(Sep. 1996),p.132-142
- [30] 宮川洋:"テレビジョン画像の評価技術",コロナ社(1986),p.66-101,ISBN4-339-00527-4
- [31] 大串健吾、中山剛、福田忠彦:"画質と音質の評価技術",昭晃堂(1991),p88-97,ISBN-7856-9039-9