

首都大学東京大学院博士前期課程
システムデザイン研究科修士論文

トーンマッピング処理に基づく
HDR 画像の圧縮に関する研究
Study on image compression based on
tone-mapped high dynamic range images

首都大学東京大学院 システムデザイン研究科
システムデザイン専攻 情報通信システム学域
14890518 鈴木 亮

指導教員 貴家 仁志 教授

目次

1	はじめに	1
2	準備	4
2.1	HDR 画像	4
2.2	HDR 画像フォーマット	6
2.3	トーンマッピング	8
2.4	JPEG XT	10
2.5	画像評価指標	12
2.5.1	LDR 画像評価指標	12
2.5.2	HDR 画像評価指標	14
3	量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダ	16
3.1	背景	16
3.2	準備	18
3.2.1	Profile A	18
3.2.2	Profile B	20
3.2.3	Profile C	22
3.3	提案法	24
3.3.1	JPEG XT の問題点	24
3.3.2	提案する JPEG XT エンコーダ	25
3.3.3	期待される効果	26
3.4	シミュレーション	27
3.4.1	HDR 画像に対する画質評価	27
3.4.2	LDR 画像に対する画質評価	27
3.5	まとめ	31
4	ビット深度スケーラビリティ符号化	32
4.1	背景	32
4.2	準備	33

4.2.1	異なるビット深度画像の要求モデル	33
4.2.2	ビット深度スケーラビリティ	34
4.2.3	JPEG2000	34
4.3	提案法	36
4.3.1	エンコード処理	36
4.3.2	デコード処理	36
4.3.3	JPEG XT との違い	37
4.4	シミュレーション	39
4.5	まとめ	42
5	おわりに	43
6	謝辞	44

あらまし

本論文では、第一に量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダ構成を提案する。JPEG XT とは High Dynamic Range(HDR) 画像から基本階層と拡張階層を生成し、それぞれを JPEG 方式で圧縮する符号化方式である。しかし、エンコーダとデコーダ間の量子化誤差の不一致が起こり、復号化された HDR 画像の画質を制御できない。提案するエンコーダ構成は量子化誤差の不一致による問題点を解決することができる。

第二にビット深度スケーラビリティを有する符号化を提案する。ビット深度スケーラビリティとは、一つの圧縮データから任意のビット深度を持つ画像を復号できることを意味する。現在は 8 ビット整数深度で表現される画像が広く普及しているが、今後はより高ビット深度を持つ画像が普及され、様々なビット深度の画像が要求されることが考えられる。提案する符号化により、任意のビット深度を持つ画像を効率的に得ることができる。

Summary

First, this study proposes a JPEG XT encoder considering effects of quantization error. JPEG XT coded data contains two layers: the base-layer for tone-mapped high dynamic range (HDR) image and the enhancement layer. The legacy JPEG decoder can understand the base-layer of JPEG XT coded data because it has the same codestream syntax as the legacy JPEG. Because there is a mismatch on the handling of the quantization error between the normative encoder and the standard decoder, the quality of the reconstructed HDR will can not be controllable. The proposed structure can settle a problem by quantized error.

Second, this study proposes a bit depth scalable coding for tone-mapped HDR images. The bit depth scalability can serve multiple images with

various desired bit depths from only one compressed data file. Although 8-bit images are widely used at present, the wider spread of images with higher bit depths is demanded and the coexistence of images with various bit depths is also predicted in the near future. The proposed bit depth scalable coding efficiently serves images with an arbitrary bit depth.

1 はじめに

近年, High Dynamic Range Image(HDR) 画像は写真やコンピュータグラフィックスの分野を始め, 車載カメラや医用画像等にも利用されるようになってきた [1]- [2]. HDR 画像とは, 従来の 8 ビット整数値で表現される Low Dynamic Range(LDR) 画像よりも広範囲の輝度, 色域を保存できる画像である. この広範囲の情報を保存するため, HDR 画像は一般に高ビット深度の浮動小数点値で表現される. HDR 画像は LDR 画像より高精度である一方, 従来の映像機器へ直接表示することができず, また一画像当たりのデータ量が非常に大きくなるという問題が生じる. そこで, HDR 画像を既存の表示機器環境でも表示可能とするためのトーンマッピング処理 [6]- [8] や, 効率的な圧縮技術 [9]- [17] が重要となる. 本論文では, HDR 画像の圧縮規格である JPEG XT の問題点を分析し, その問題を避けた新たなエンコーダ構成を提案し, 更に, HDR 画像を様々なビット深度に合わせて圧縮可能にするビット深度スケーラビリティを有する HDR 画像符号化を提案する.

始めに, JPEG XT を用いた HDR 画像の圧縮について説明する. 国際画像圧縮規格であり, 広く用いられている JPEG [28] には高ビット深度の浮動小数点で表現される HDR 画像には直接適用できないという問題がある. この背景から, JPEG XT という JPEG との下位互換性を有する HDR 画像の符号化技術が注目を集めており, 標準化が進んでいる [9]- [12]. JPEG XT では, HDR 画像をトーンマッピング処理することによって変換される 8 ビット整数値表現の LDR 画像を基本階層とし, HDR 画像と LDR 画像との残差データを拡張階層として各層に対して JPEG 圧縮を行う. 下位互換性とは, 圧縮されたデータの基本階層のみを復号することで LDR 画像を得ることができることを意味する. JPEG XT では, 圧縮の工程を二層構造にすることで, 従来の表示環境では基本階層の LDR 画像だけで復号し, HDR 画像として扱う場合には拡張階層と合わせて復号するという下位互換性を

保持することが可能となる．しかし，HDR 画像と LDR 画像の残差を保持する拡張階層については，圧縮の手順や圧縮の精度などに問題が残っている [18]- [20]．

そこで，本稿では始めに，標準化委員会が提供するリファレンスソフトウェアを用いた比較実験を行い，基本階層と拡張階層の特徴について分析を行った．JPEG XT の計算手順では，基本階層の JPEG 圧縮によって発生する量子化誤差の影響が拡張階層の処理に考慮されていないため，エンコーダとデコーダ間において量子化誤差の不一致が発生することが分かった．この問題点を回避するためにエンコーダ内に JPEG デコーダを追加することで，量子化誤差の影響を考慮した新たなエンコーダ構造を提案する [21]．JPEG XT では，HDR 画像からトーンマッピング処理された LDR 画像を拡張階層の算出に用いるが，提案するエンコーダでは JPEG デコーダで復号化された基本階層の LDR 画像を拡張階層での差分算出に用いる．すなわち，提案法ではデコーダで用いる LDR 画像とエンコーダで用いる LDR 画像を同じにすることで量子化誤差の不一致を回避することが可能となる．また提案法は，JPEG XT に準拠したものであり，JPEG XT デコーダとの互換性を完全に保持している．実験において，提案法は従来の JPEG XT と比較して，復号化された画像の画質を向上すると同時に，符号量の増加が画質向上に繋がらない問題，すなわちレート制御の問題を解決することができることを示す．

次に，HDR 画像の普及に伴い，より高ビット深度の整数値で表現される画像が普及することが考えられる．その際に，各々の環境に応じた異なるビット深度を持つ画像への要求といった新しい問題も生じてくる．そこで，本稿では JPEG 2000 を用いたビット深度スケーラビリティを有する圧縮を提案する [23]．ビット深度スケーラビリティとは，一つの圧縮データから任意のビット深度を持つ画像を生成できることを意味する．JPEG2000 は JPEG と比べて，今後普及が予想される高ビット画像に対して効果的な圧縮を可能とする．また，提案法は高ビット深度の画像に対し適用可能である点と一つの圧縮

データから任意の画質を持つ画像の生成を可能とする Signal-to-Noise Ratio(SNR) スケーラビリティを有する点の2つの特徴に着目する. 提案法では, あらかじめ HDR 画像からトーンマッピング処理により 16 ビット深度整数で表現される画像を生成し, この画像を中間画像として扱う. 中間画像を JPEG2000 でコーデックした後, 任意のビット深度へとスケーリングすることでビット深度スケーラビリティが実現される. また, JPEG2000 の持つ SNR スケーラビリティを併用することで, より効率的な圧縮や画質管理が可能となる. 実験では, 提案法が圧縮前にあらかじめ任意のビット深度を持つ画像を生成した場合とほぼ同等の圧縮効率を持つことを示す.

2 準備

2.1 HDR 画像

高ダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) 画像とは、人間が知覚しうる輝度範囲と色域全体を表現可能な画像である。ここでダイナミックレンジの定義は一般的に、以下の式のように表現可能な最低輝度値 I_{min} と最大輝度値 I_{max} の比で表す。

$$DynamicRange[dB] = 10 \log_{10} \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (1)$$

HDR 画像を考案した背景として、撮影機器や表示機器と現実シーンのダイナミックレンジの違いがある。図 1 に現実シーンの輝度とダイナミックレンジを示す。

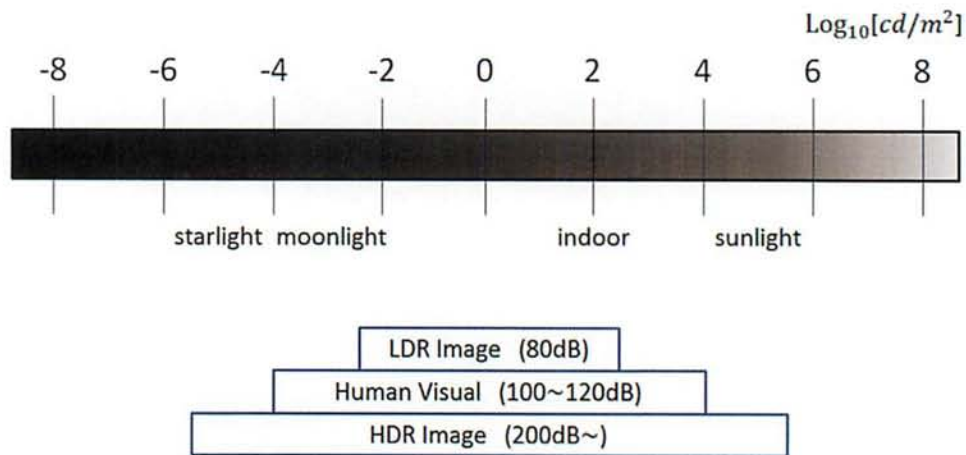


図 1: 現実シーンの輝度とダイナミックレンジ

撮影機器や表示機器のダイナミックレンジは 80dB から 120dB 程度であるのに対し、現実シーンのダイナミックレンジは 200dB を超える。この現実シーンの高いダイナミックレンジを記憶するには現行する画像フォーマットの 1 チャンネル 8 ビットの階調数では不十分である。この問題を解決するために、画像のビット深度を増やし、人間の

知覚しうるダイナミックレンジと色域全体を表現できるように考案されたのがHDR画像である。HDR画像はその高いダイナミックレンジから一般に浮動小数点で表現される。HDR画像は現在、デジタル車載カメラや医用画像等の分野でさらなる応用が期待されている。また、HDR画像は現行する表示機器での表示ができないため、視覚特性を考慮しながら表示機器での表示を可能とする画像（LDR:Low Dynamic Range）に変換するトーンマッピング処理をする必要がある。図2にHDR画像からトーンマッピングされた画像例を示す。

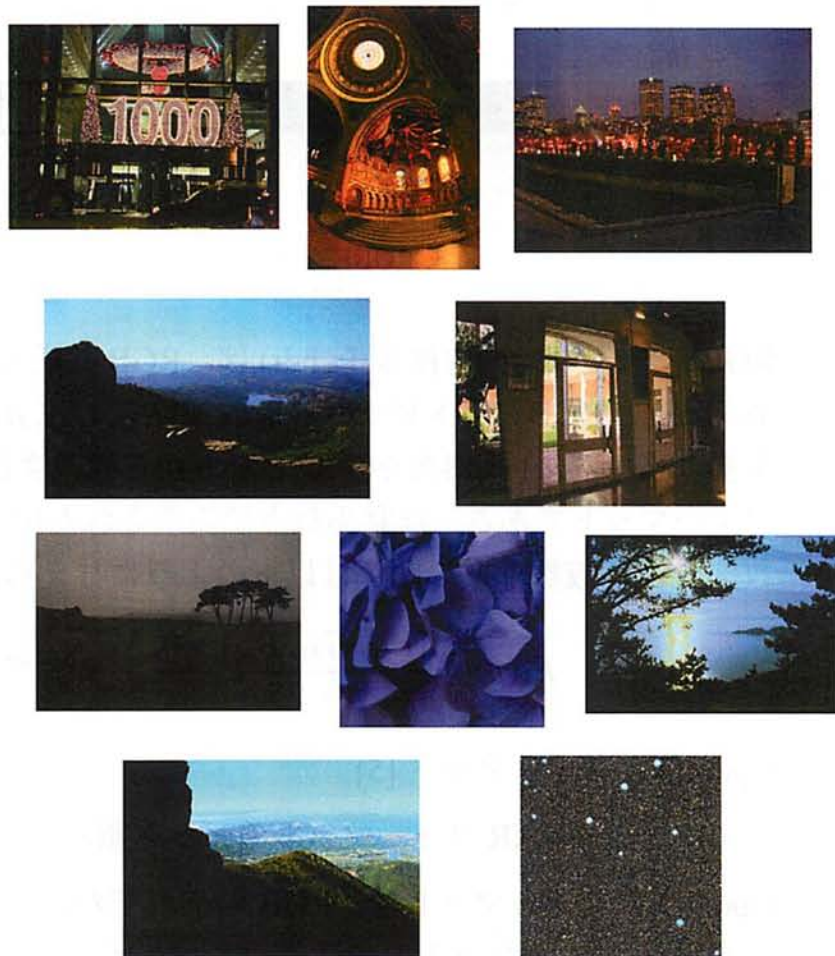


図 2: トーンマッピングされた HDR 画像

2.2 HDR 画像フォーマット

HDR 画像の広いダイナミックレンジを記録するために, HDR 画像のための画像フォーマットがいくつか提案されてきた. ここでは代表的な HDR 画像フォーマットの構成を紹介する.

A. RGBE フォーマット [4]

HDR 画像の代表的なフォーマットの一つに G.Ward らが提案した RGBE フォーマットがある. 図 3 に, RGBE フォーマットのビット割り当てを示す.

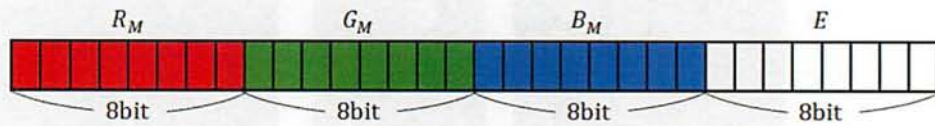


図 3: RGBE フォーマット

RGBE フォーマット (拡張子 .hdr) は, RGB 共通の 8 ビットの指数部 (E) と RGB に各 8 ビットの仮数部 (R_M, G_M, B_M) にそれぞれを割り当てた, 1 画素あたり 32 ビットから構成される HDR 画像フォーマットである. 浮動小数点値表現された値 F_1 と, その指数部および仮数部との関係は以下のように与えられる.

$$F_1(p) = \frac{[R_M, G_M, B_M] + 0.5}{256} \cdot 2^{E-128} \quad (2)$$

B. OpenEXR フォーマット [5]

図 4 に, OpenEXR フォーマットのビット割り当てを示す.

OpenEXR フォーマットは, RGB のそれぞれに対して 1 ビットの符号部 (S), 5 ビットの指数部 (E), 10 ビットの仮数部 (M) を割り当てた, 1 画素あたり 48 ビットから構成される HDR 画像フォーマットである.

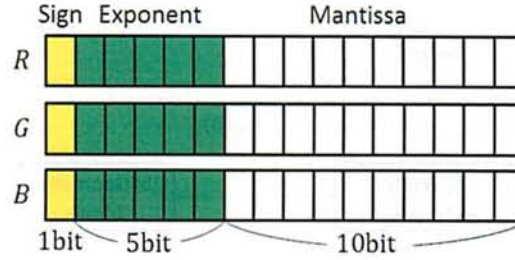


図 4: OpenEXR フォーマット

浮動小数点値表現された値 F_2 と、その符号部、指数部および仮数部との関係は以下のように与えられる.

$$F_2 = \begin{cases} (-1)^S M \cdot 2^{-24} & , E = 0 \\ (-1)^S (1 + M \cdot 2^{-10}) \cdot 2^{E-15} & , 1 \leq E \leq 31 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 トーンマッピング

HDR 画像は従来の表示機器で完全に表示することができない. そのため HDR 画像を表示可能な整数画像 (LDR 画像) へと変換するトーンマッピング処理が重要であり, 様々な手法が提案されている. ここで図 5 に, 代表的なトーンマッピング処理の一つである "Photographic Tone Reproduction" [6] を示す.

図 5 における各処理の詳細は以下の通りである.

(a). HDR 画像の輝度計算 (World Luminance)

トーンマッピング処理に対する入力は, 浮動小数点数で表現された HDR 画像の RGB 値 $C(p) \in \{R(p), G(p), B(p)\}$ で構成されている. ここで p は各画素を表す. 各画素 p の HDR 画像の輝度 $L_w(p)$ は, 次のように計算される.

$$L_w(p) = 0.27R(p) + 0.67G(p) + 0.06B(p) \quad (4)$$

(b). 輝度の幾何平均 (Geometric Mean)

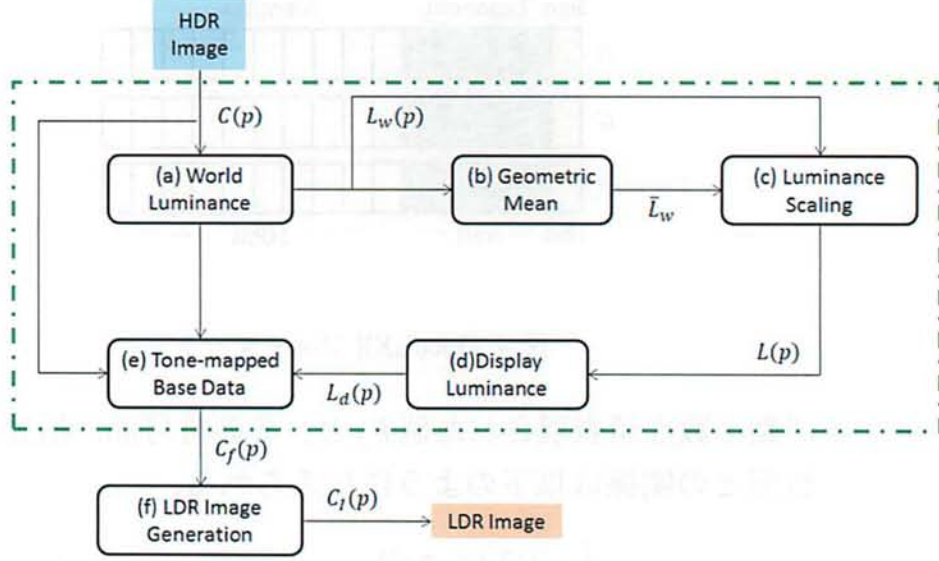


図 5: Photographic Tone Reproduction

HDR 画像の輝度の幾何平均 \bar{L}_w は、以下のように定義される。

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_p (\log(L_w(p)))\right) \quad (5)$$

ここで、 N は HDR 画像の総画素数である。式 (3) の計算において、微小値を用いてゼロピクセルに起因する特異性を避けている。本稿では、微小値を使用せずに $L_w(p) \neq 0$ のピクセルのみで処理を行うこととする。

(c). スケーリング輝度 (Scaled Luminance)

スケーリングされた輝度 $L(p)$ を以下により計算する。

$$L(p) = k \cdot \frac{L_w(p)}{\bar{L}_w} \quad (6)$$

この時、 $k \in [0, 1]$ は "key value" と呼ばれるパラメータである。 k の値が大きければ生成される LDR 画像の明度が大きくなる。

(d). ディスプレイ輝度 (Display Luminance)

ディスプレイ輝度 $L_d(p)$ は, トーンマッピング関数 $y(\cdot)$ を用いて以下のように計算される.

$$L_d(p) = y(L(p)) \quad (7)$$

結果的に得られる LDR 画像は, トーンマッピング関数 $y(\cdot)$ の選択に依存する. 本論文で用いるトーンマッピング関数は, Reinhard のグローバル関数 [6] を用いる. Reinhard のグローバル関数は以下の式で与えられる.

$$y(L(p)) = \frac{L(p)}{1 + L(p)} \quad (8)$$

(e). 実数値表現された RGB 値 (Tone-Mapped Base Data)

実数値表現された RGB 値 $C_f(p) \in \{R_f(p), G_f(p), B_f(p)\}$ を次式により計算する.

$$C_f(p) = L_d(p) \cdot \frac{C(p)}{L_w(p)} \quad (9)$$

(f). LDR 画像の生成 (LDR Image Generation)

最後にビット深度 X を持つ整数画像 $C_I(p)$ を $C_f(p)$ を用いて計算される.

$$C_I(p) = \text{Round}(C_f(p) \cdot (2^X - 1)) \quad (10)$$

ここで, $\text{Round}(x)$ は x を最も値の近い整数値へ丸め込むことを意味する.

2.4 JPEG XT

JPEG XT とは, JPEG と下位互換性を有し, かつ HDR 画像の符号化を可能とする JPEG の拡張形式である. また現在, 標準化が進められている [9]-[12].

また, JPEG XT は, 現在, 9つの構成から成り立っている. 各構成を表 1 に示す.

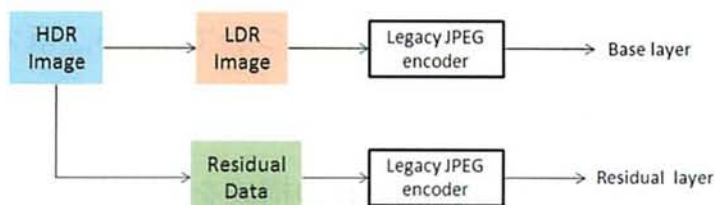
表 1: JPEG XT の構成表

part.1	Core coding system
part.2	Coding of high dynamic range images
part.3	Box file format
part.4	Conformance testing
part.5	Reference software
part.6	IDR Integer coding
part.7	HDR floating-point coding
part.8	Lossless and near-lossless coding
part.9	Alpha channel coding

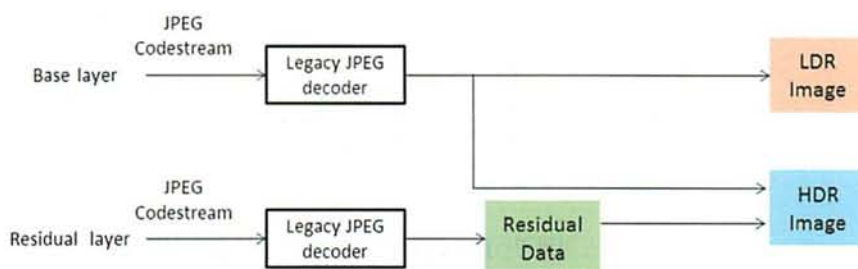
第1部は、基本技術である JPEG について定義され、第2部では、JPEG 互換の HDR 画像の符号化方式に対する JPEG の拡張を定義される。第3部では、すべての基準 JPEG と今後拡張される JPEG についての拡張ボックススペースのファイル形式の拡張が定義されている。このボックススペースのファイル形式は JFIF との互換性があり、既に実装されているすべての JFIF で読み取ることが可能である。第4部は、適合性試験を定義し、第5部は、JPEG XT のリファレンス・ソフトウェアを定義される。第6部では、各色、9 から 16 ビットの整数値で保存されたカラー画像への符号化に対する JPEG の拡張を定義されている。第7部では、浮動小数点数値で保存された HDR 画像の符号化を規格する。これは、第2部と第3部の上位セットであり、低複雑性および/またはハードウェア実装のニーズに対応する追加の符号化ツールを提供する。第8部は、整数値と浮動小数点数値画像に対する非可逆符号化構造を定義する。これは、第6部と第7部の拡張を示す。第9部では、アルファチャネルに対する可逆/非可逆符号化を可能とすること示す。アルファチャネルとは画像の透明度を示す付加情報である。

JPEG XT のエンコーダ及びデコーダの概要を図6に示す。

JPEG XT エンコーダでは入力する HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像と、HDR 画像と LDR 画像との残差画像に分解し、



(a) JPEG XT エンコーダ



(b) JPEG XT デコーダ

図 6: JPEG XT の概要

各々JPEGエンコーダで符号化を行う。この2つの符号化データを各々基本階層及び拡張階層として二層構造に保存される。JPEG XT デコーダでは、基本階層のみを復号化することでLDR画像を生成することができる。また、基本階層と拡張階層を復号化し、この2枚の画像データを合成することでHDR画像を生成することがする。JPEG XTでは、圧縮の工程を二層構造にすることで、従来の表示環境では基本階層のLDR画像だけで復号し、HDR画像として扱う場合には拡張階層と合わせて復号するという下位互換性を保持することが可能となる。しかし、HDR画像とLDR画像の残差に相当する第二層をどのように圧縮するのかという問題や、圧縮効率が従来の符号化に劣るといった問題が残されている。

JPEG XTのリファレンスソフトには、3つの構成が実装されている(Profile A, B, C) [9]。本稿で提案するJPEG XT エンコーダ構成は、

Profile A を基に構成されている．ここでは，Profile A 以外の構成について説明する．また Profile A については，3.2 章で詳しく説明する．

(1). Profile B

図 7 及び図 8 に Profile B の構成を示す．

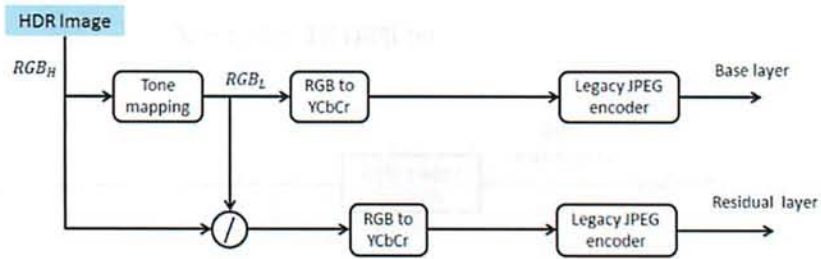


図 7: JPEGXT エンコーダ (Profile B)

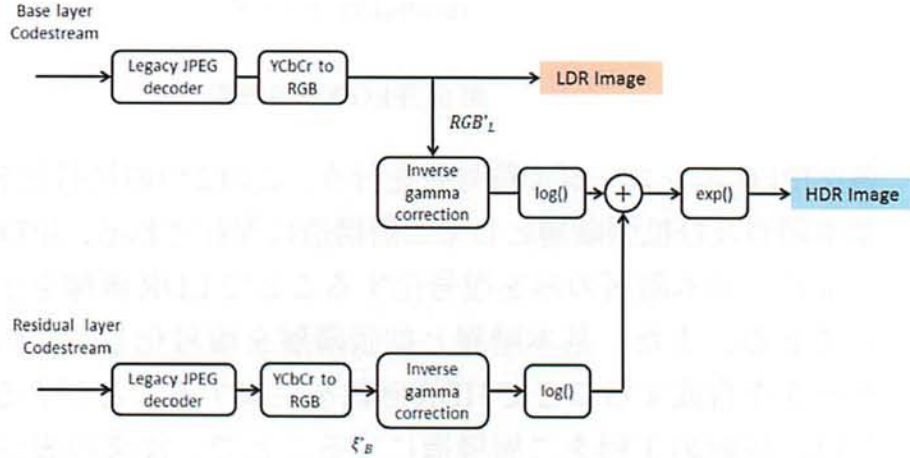


図 8: JPEGXT デコーダ (Profile B)

エンコーダでは，HDR 画像 RGB_H と HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像 RGB_L の比 ξ_B と，露光量 E が拡張階層に保存される． ξ_B は以下の式で求められる．

$$\xi_B = \frac{1}{E} \cdot \frac{RGB_L}{RGB_H} \quad (11)$$

また、露出光 E は以下の式で求められる。

$$E = \frac{frac}{av} \quad (12)$$

$$frac = \log \frac{I_{max}}{I_{min} + 10^{-6}} \quad (13)$$

ここで、 av は画像の平均値を示し、 I_{max} 及び I_{min} は HDR 画像の最大値、最小値を示す。

デコーダでは、基本階層に保存された画像 RGB'_L と拡張階層に保存された画像 ξ'_B と露出量を用いることで、HDR 画像 RGB'_H を生成することができる。HDR 画像は以下の式で求められる。

$$RGB'_H = E \exp [\log (RGB'_L) - \log \xi'_B] \quad (14)$$

しかし、Profile B は 3 章で説明する Profile A での問題と同様の理由で符号量の増加が画質向上に繋がらない問題を持つ。

(2). Profile C

図 9 及び図 10 に Profile C の構成を示す。

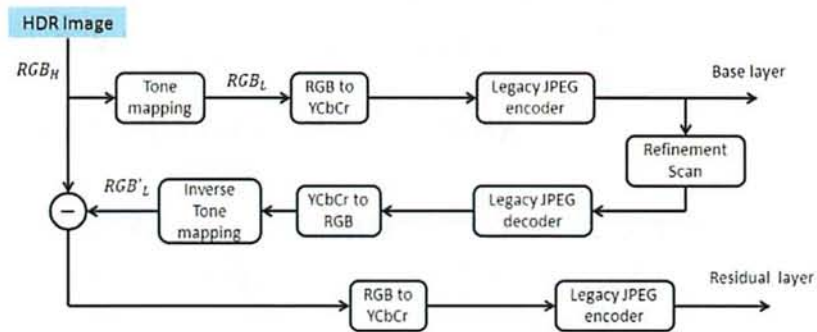


図 9: JPEGXT エンコーダ (Profile C)

ここで、”refinement scan”では、DCT 空間の符号化データのビット精度を最高 12 ビットまで増大させることを意味する。

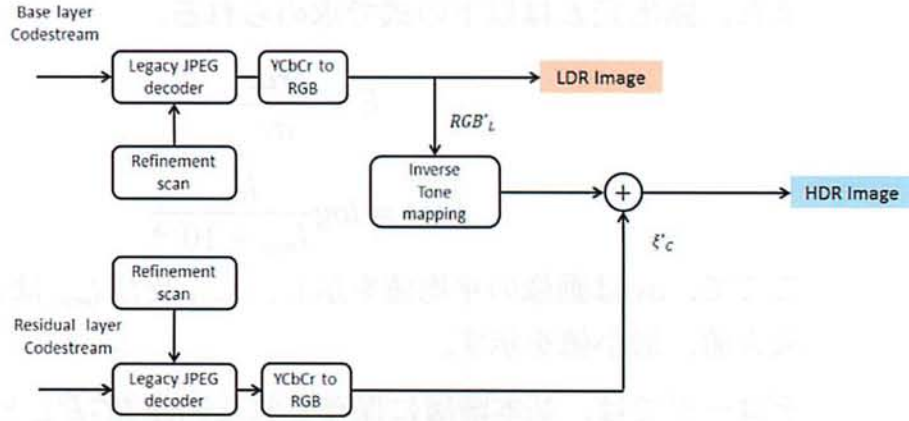


図 10: JPEGXT デコーダ (Profile C)

エンコーダでは，HDR 画像 RGB_H と，基本階層に保存された画像 RGB'_L に逆トーンマッピング処理された画像 $\Phi(RGB'_L)$ との差 ξ_C が拡張階層に保存される． ξ_C は以下の式で求められる．

$$\xi_C = \Phi(RGB'_L) - RGB_H \quad (15)$$

デコーダでは，基本階層に保存された画像 RGB'_L と拡張階層に保存された画像 ξ_C を用いることで，HDR 画像 RGB'_H を生成することができる．HDR 画像は以下の式で求められる．

$$RGB'_H = \exp[\log(\Phi(RGB'_L))] + \xi_C \quad (16)$$

この構成で生成された HDR 画像は拡張階層の符号量が少ないほど，画質が低下する．つまり，HDR 画像の画質は拡張階層の符号量に依存される．

2.5 画像評価指標

ここでは，いくつかの客観的な画質評価法について説明する．

2.5.1 LDR 画像評価指標

A'. Peak Signal-to-Ratio (PSNR)

PSNR は、画像の信号と誤差の比率をもとにした画質評価指標である。PSNR は次のように定義される。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L}{MSE} \quad (17)$$

ここで、 L は対象画像の最大画素値を示す。X ビット整数値画像の場合 $L = 2^X - 1$ となる。また、総画素数が $M \times N$ ピクセルのグレースケール画像に対する Mean square Error(MSE) は次の式で定義される。

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} R(i, j) - T(i, j)^2 \quad (18)$$

ここで、 $R(i, j)$ は評価基準となる参照画像の位置 (i, j) における画素値を表し、 $T(i, j)$ は評価対象となる対象画像の位置 (i, j) における画素値を表す。

また、カラー画像に対するは次のように計算される。

$$MSE = \frac{1}{3MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\Delta r^2 + \Delta g^2 + \Delta b^2) \quad (19)$$

$$\Delta r^2 = R_r(i, j) - T_r(i, j)^2 \quad (20)$$

$$\Delta g^2 = R_g(i, j) - T_g(i, j)^2 \quad (21)$$

$$\Delta b^2 = R_b(i, j) - T_b(i, j)^2 \quad (22)$$

B'. Structural Similarity (SSIM)

SSIM は、輝度とコントラスト、画像の構造という三つの観点から画質を評価する手法である。SSIM は以下の式で計算される。

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (23)$$

$$C_1 = (K_1 L)^2 \quad (24)$$

$$C_2 = (K_2 L)^2 \quad (25)$$

ここで、 $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ 及び σ_{xy} は画像 x, y の局所的な平均、標準偏差、相互共分散である。また、 L は対象画像の最大値であり、 K_1 及び K_2 はそれぞれ小さな定数であり、 $K_1 = 0.01$ 及び $K_2 = 0.03$ と定義される。

C'. CIE76

CIE76 は、 $L^* a^* b^*$ 空間から画像間の色差を評価する手法である。CIE76 による色差値は以下の式で計算される。

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2} \quad (26)$$

ここで L^* は明度を表し、 a^*, b^* は色度を表す。

2.5.2 HDR 画像評価指標

HDR 画像は基本的に現実シーンと比例した画素値が保存されているため、LDR 画像の画質評価方法と異なる手法が必要である。ここで、いくつかの代表的な評価手法について説明する。

A''. Feature Similality (FSIM) [26]

FSIM は、人間の視覚特性を考慮しつつ、輝度とコントラスト、画像の構造という三つの観点から画質を評価する手法である。FSIM は以下の式で計算される。

$$FSIM(x, y) = \frac{\sum_{x=M-N} S_L(x) \cdot PC_m(x)}{\sum_{x=0} PC_m(x)} \quad (27)$$

$$PC_m(x) = \max(PC_1(x), PC_2(x)) \quad (28)$$

$$S_L(x) = \frac{(2PC_1PC_2 + T_1)}{(PC_1^2 + PC_2^2 + T_1)} \cdot \frac{(2G_1G_2 + T_2)}{(G_1^2 + G_2^2 + T_2)} \quad (29)$$

ここで, PC は画像の位相であり, G は画像の勾配を示す. また, $M \cdot N$ は総画素数を示す.

B". HDR visual defference range (HDR-VDP) [27]

HDR-VDP は, 参照画像と対象画像との視認性 P_{map} と画質 Q_{MOS} (Mean-Opinion-Score(MOS)) の両方を予測できる手法である. 図 11 に HDR-VDP の処理手順を示す.

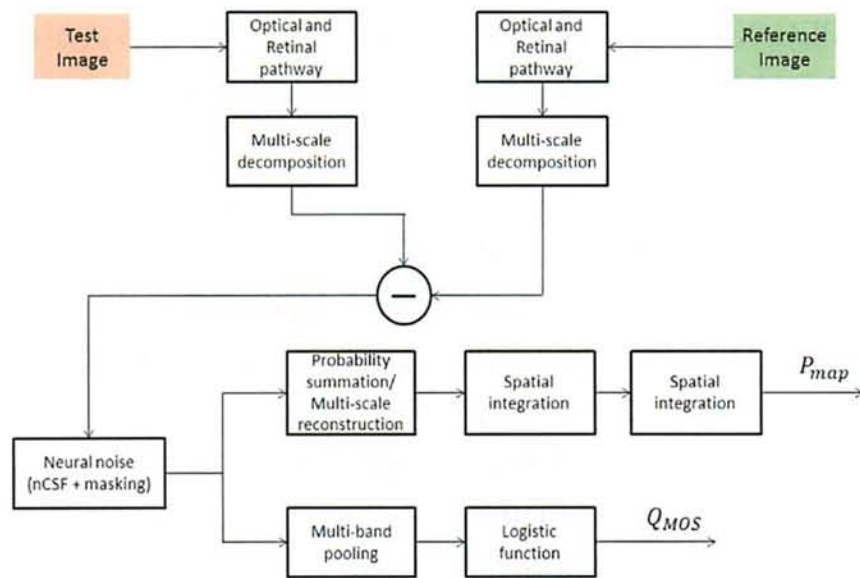


図 11: HDR-VDP

3 量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダ

3.1 背景

HDR 画像は LDR 画像よりも広範囲の情報を保存しなければならないため、一画像あたりに要するデータ量が大きく、非常に高いコストを要する。そのためにストレージや通信の効率化のためのデータ符号化技術が重要となる [9]- [17]。しかし、HDR 画像は高ビット深度の浮動小数点値で表現されるため、画像符号化の部門で最も広く扱われている形式である JPEG [28] を含む従来の画像符号化技術では HDR 画像を直接符号化することができない。また、JPEG2000 [29] や JPEG XR [30] の HDR 画像に対応した符号化形式が存在するが、それらは JPEG との互換性を持たないため、使用できる環境が限られてしまう。

このような背景から、JPEG と下位互換性を有し、かつ HDR 画像の符号化を可能とする JPEG XT の標準化が進められている [9]- [12]。JPEG XT エンコーダでは入力する HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像と残差画像に分解し、各々 JPEG エンコーダで符号化を行う。この 2 つの符号化データを各々基本階層及び拡張階層として二層構造に保存される。JPEG XT デコーダでは、基本階層のみを復号化することで LDR 画像を生成することができる。また、基本階層と拡張階層を復号化し、この 2 枚の画像データを合成することで HDR 画像を生成することができる。JPEG XT では、圧縮の工程を二層構造にすることで、従来の表示環境では基本階層の LDR 画像だけで復号し、HDR 画像として扱う場合には拡張階層と合わせて復号するという下位互換性を保持することが可能となる。

しかし、HDR 画像と LDR 画像の残差データを保持する拡張階層については、圧縮の手順や圧縮の精度などに問題が残っている。現在、標準化委員会が提供するリファレンスソフトウェアには異なる 3 つの圧縮手順 (Profile A, B, C) が実装されている。しかし、Profile A と B の圧縮手順では符号量の増加が、復元された HDR 画像の画質向上

に繋がらない問題が生じる。これは、特定の符号化条件では正常に動作しないことを意味する [18]- [20].

ここでは、始めに、標準化委員会が提供するリファレンスソフトウェアを用いた比較実験を行い、基本階層と拡張階層の特徴について分析を行った。JPEG XT の計算手順では、基本階層の JPEG 圧縮によって発生する量子化誤差の影響が拡張階層の処理に考慮されていないため、エンコーダとデコーダ間において量子化誤差の不一致が発生することが分かった。この問題点を回避するためにエンコーダ内に JPEG デコーダを追加することで、量子化誤差の影響を考慮した新たなエンコーダ構造を提案する [21]. JPEG XT では、HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像を拡張階層の算出に用いるが、提案するエンコーダでは JPEG デコーダで復号化された基本階層の LDR 画像を拡張階層での差分算出に用いる。すなわち、提案法ではデコーダで用いる LDR 画像とエンコーダで用いる LDR 画像を同じにすることで量子化誤差の不一致を回避することが可能となる。また提案法は、JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダとの互換性を完全に保持している。実験において、提案法は従来の JPEG XT と比較して、復号化された画像の画質を向上すると同時に、符号量の増加が画質向上に繋がらない問題、すなわちレート制御の問題を解決することができることを示す。

3.2 準備

JPEG XT のリファレンスソフトには、3つの構成が実装されている (Profile A, B, C) [9]. ここでは、各 Profile の構成についてそれぞれ説明する.

3.2.1 JPEG XT エンコーダ (Profile A)

図 12 に ProfileA のエンコーダ構成を示す.

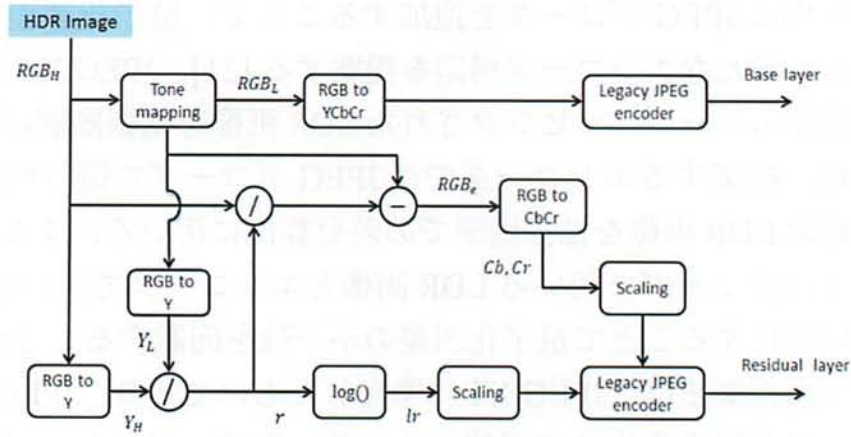


図 12: JPEGXT エンコーダ (Profile A)

エンコーダでは、HDR 画像と HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像の比と差分を輝度成分 Y 及び色差成分 Cb, Cr として拡張階層に保存される.

拡張階層にて保存される輝度成分 Y は以下の式により計算される.

$$r = \frac{Y_H}{Y_L} \quad (30)$$

$$Y = \log r \quad (31)$$

ここで、 Y_H は、HDR 画像の輝度を示し、 Y_L は、HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像の輝度を示す.

また，拡張階層に保存される色差成分 Cb, Cr は以下の式により計算される．

$$RGB_e = \frac{RGB_H}{r} - RGB_L \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1688 & -0.3313 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_e \\ G_e \\ B_e \end{bmatrix} \quad (33)$$

ここで， RGB_H は，HDR 画像の RGB 値を示し， RGB_L は，HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像の RGB 値を示す．

3.2.2 JPEG XT デコーダ (Profile A)

図 13 に ProfileA のデコーダ構成を示す．

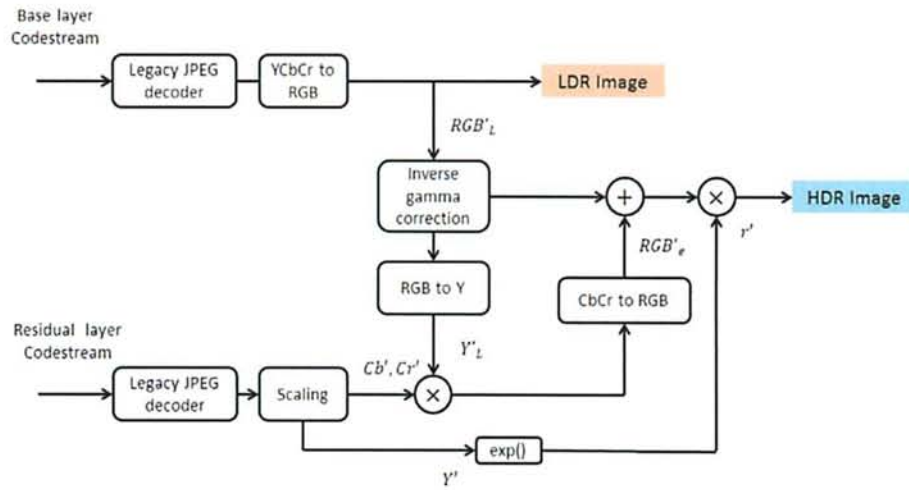


図 13: JPEGXT デコーダ (Profile A)

デコーダでは，基本階層に保存された画像 RGB'_L と拡張階層に保存された画像 Y', Cb', Cr' を用いることで，HDR 画像 RGB'_H を生成することができる．HDR 画像は以下の式で求められる．

$$RGB'_H = \exp(Y') \cdot (RGB'_L + Y'_L \cdot RGB'_e) \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} R'_e \\ G'_e \\ B'_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 & 1.402 \\ -0.344 & -0.714 \\ 1.772 & 0.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Cb' \\ Cr' \end{bmatrix} \quad (35)$$

ここで, Y'_L は, 基本階層に保存された画像の輝度を示す.

Profile A の構成で生成された HDR 画像の画質は, 符号量の増加が画質向上に繋がらない問題が生じる. 提案するエンコーダでは, このエンコーダ構成に JPEG デコーダを追加することで, 問題を解決している.



3.3 提案法

3.3.1 JPEG XT の問題点

図 14 に Profile A 及び Profile B の構成をした JPEG XT のデータの流れを示す。

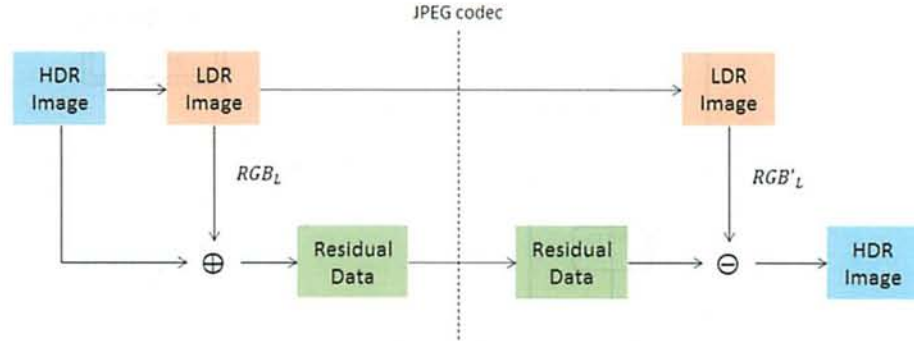


図 14: JPEGXT のデータの流れ (Profile A,B)

本論文では、JPEG XT の問題点として基本階層と拡張階層とのミスマッチを指摘する。JPEG XT の計算手順では、JPEG 圧縮で発生する基本階層の量子化誤差の影響が拡張階層の処理に考慮されていない。すなわち、圧縮後の基本階層画像 RGB'_L は、圧縮前の画像 RGB_L との間に、

$$RGB'_L = RGB_L + Err(q) \quad (36)$$

の関係がある。ここで、 $Err(q)$ は、基本階層の JPEG 圧縮によって発生した量子化誤差である。

量子化誤差 $Err(q)$ は LDR 画像の画質に影響するだけでなく HDR 画像の生成にも影響を及ぼす。しかし、図 14 では、拡張階層に保存される輝度 H 及び、色差成分 U, V にはこの量子化誤差が含まれていない。そのため、エンコーダとデコーダ間の量子化誤差の不一致が発生し、拡張階層の符号量を増加しても、HDR 画像の画質向上に繋がらないことが予想される。

3.3.2 提案する JPEG XT エンコーダ

図 15 に提案するエンコーダ構成を示す.

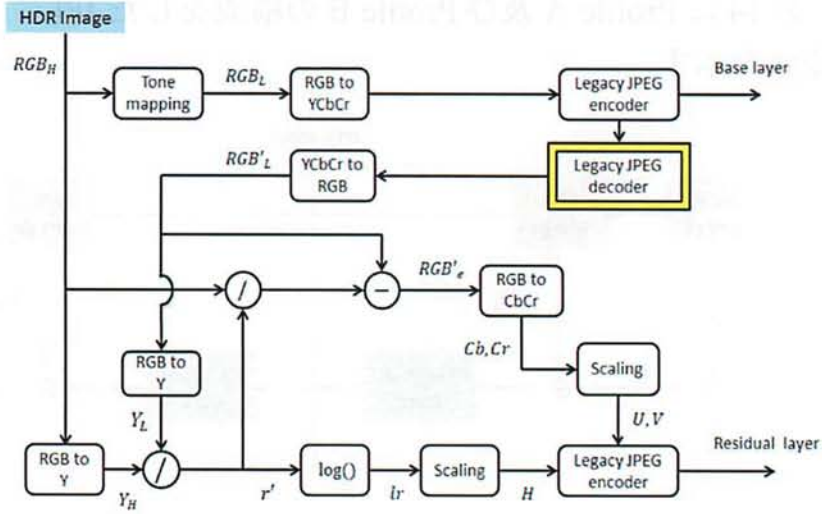


図 15: 提案する JPEG XT エンコーダ

提案するエンコーダは Profile A の構成に JPEG デコーダを新たに追加することで、量子化誤差の影響を考慮する。また、これは JPEG XT に準拠した構成であり、JPEG XT デコーダとの互換性を完全に保持されている。拡張階層には、HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像の代わりに JPEG デコーダで復号化された基本階層の LDR 画像を拡張階層での算出に用いる。すなわち、提案法ではデコーダで用いる LDR 画像とエンコーダで用いる LDR 画像を同じにすることで量子化誤差の不一致を回避することが可能となる。

拡張階層にて保存される輝度成分 Y は以下の式により計算される。

$$r = \frac{Y_H}{Y'_L} \quad (37)$$

$$Y = \log r \quad (38)$$

ここで、 Y_H は、HDR 画像の輝度を示し、 Y'_L は、基本階層に保存された画像の輝度を示す。

また，拡張階層に保存される色差成分 Cb, Cr は以下の式により計算される．

$$RGB_e = \frac{RGB_H}{r} - RGB'_L \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1688 & -0.3313 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4187 & -0.081 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_e \\ G_e \\ B_e \end{bmatrix} \quad (40)$$

ここで， RGB_H は，HDR 画像の RGB 値を示し， RGB'_L は，基本階層に保存された画像の RGB 値を示す．

3.3.3 期待される効果

提案する JPEG XT エンコーダは以下の 3 つの効果が期待される．

A. 生成された HDR 画像の画質向上

ある符号量の下で，より高画質な HDR 画像を表現できる．

B. LDR 画像上での画質向上

復号化された HDR 画像から再度トーンマッピング処理によって LDR 画像を生成した場合，JPEG XT に比べ高画質な画像を生成できる．

C. レート制御の改善

JPEG XT はエンコーダとデコーダ間の量子化誤差の不一致によってレート制御できない場合が生じる．それに対して，提案法はその問題を改善できる．

3.4 シミュレーション

ここでは、提案するエンコーダ構成が量子化誤差の影響を回避された構成であることを示す。シミュレーションには、文献 [31] で用いられた "danibelgium.hdr" を入力画像として行う。JPEG XT は標準化委員会から入手可能なリファレンスソフトウェア [32] を使用する。また、提案するエンコーダはこのソフトウェアを改良されたものである。

3.4.1 HDR 画像に対する画質評価

各エンコーダ構成の JPEG XT により生成された HDR 画像と提案法により生成された HDR 画像に対する圧縮効率を比較する。図 16 における "Reference.1" と "Target.A" との FSIM および "Reference.1" と "Target.B" との FSIM をそれぞれ測定した。図 17 に、それぞれの圧縮効率を bits per pixel (bpp) と FSIM の観点から評価した結果を示す。図 17 で表される bpp は基本階層の符号量を固定させたまま、拡張階層の符号量を変化させており、bpp は基本階層と拡張階層との合計を示す。

両図から、提案法は多くの場合、JPEG XT に比べ画質が低いことがわかる。また、基本階層を大きく量子化した場合 (図 15(a)) には、Profile A、及び Profile B の構成の JPEG XT で生成した HDR 画像の画質低下が大きい。これは、量子化誤差 $Err(q)$ の影響を考慮せずに拡張階層を生成するためである。

3.4.2 LDR 画像に対する画質評価

各エンコーダ構成の JPEG XT により生成された HDR 画像を再度トーンマッピング処理によって生成された LDR 画像と提案法により生成された HDR 画像を再度トーンマッピング処理によって生成された LDR 画像に対する圧縮効率を比較する。図 18 における "Reference.2" と "Target.C" との PSNR および "Reference.2" と "Target.D" との

PSNR をそれぞれ測定した。図 19 に、それぞれの圧縮効率を bpp と PSNR の観点から評価した結果を示す。図 19 で表される bpp は基本階層と拡張階層との合計を示す。

図 19 から提案法は拡張階層の符号量を増加するほど画質が向上していることが確認できる。一方、Profile A、及び Profile B の構成の JPEG XT では拡張階層の符号量が増加しても、画質向上が確認できない。すなわち、レート制御によって、画質の制御が困難な場合があることがわかる。また、ほとんどの bpp において、提案法は JPEG XT よりも画質が良くなることが確認できる。

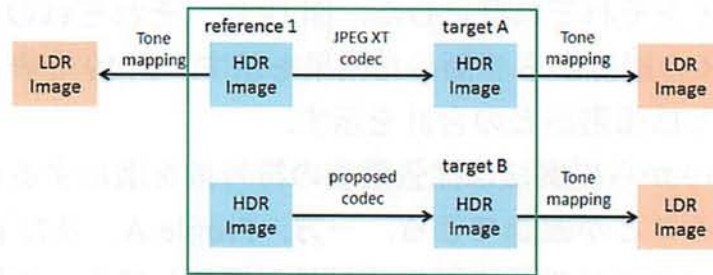
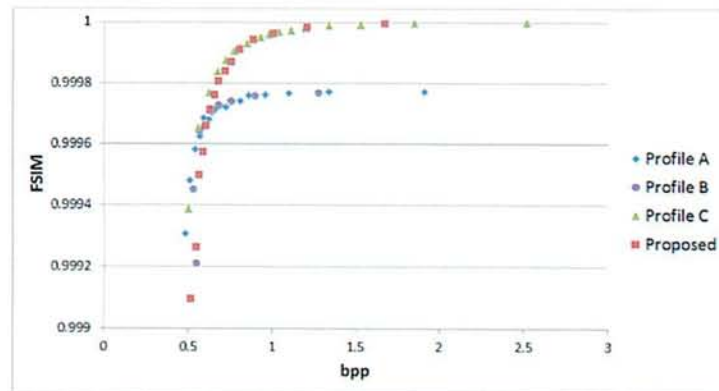
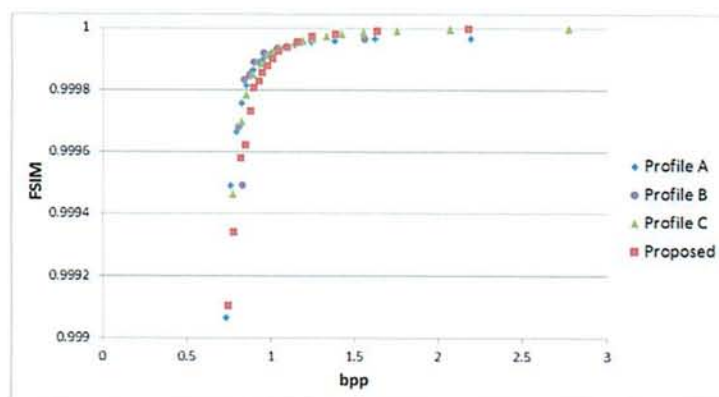


図 16: 比較対象その 1



(a) Base Layer = 0.29



(b) Base Layer = 0.57

図 17: HDR 画像上での PSNR 結果

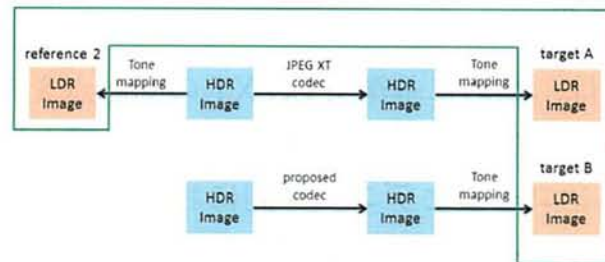
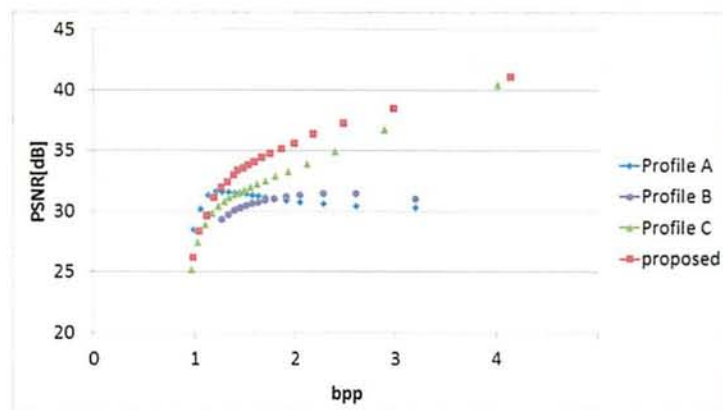
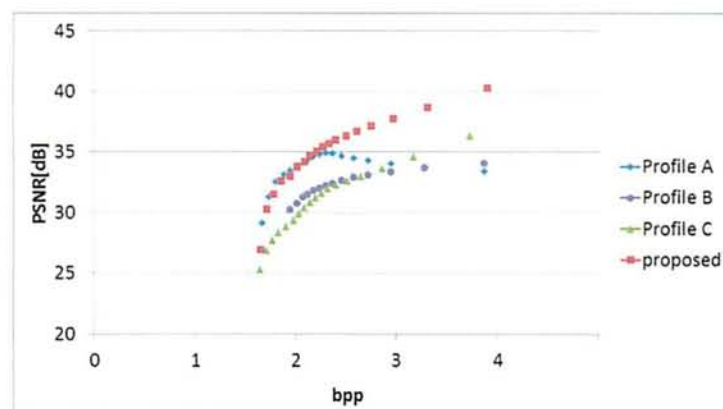


図 18: 比較対象その 2



(a) Base Layer = 0.29



(b) Base Layer = 0.57

図 19: LDR 画像上での PSNR 結果

3.5 まとめ

ここでは、始めに基準 JPEG XT の問題点を指摘した。その問題点は、基本階層で発生する量子化誤差の影響を拡張階層が考慮しておらず、エンコーダとデコーダ間において量子化誤差の不一致が発生することである。次に、この問題を回避するために、JPEG デコーダをエンコーダ内に追加することで、量子化誤差の影響を考慮した新たなエンコーダ構造を提案した。提案法は、JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダとの互換性を完全に保持している。シミュレーション結果より提案法は、JPEG XT に比べ、符号化画像の品質を向上すると同時に、符号量の増加が画質向上に繋がらない問題、すなわちレート制御の問題を解決することができることを示した。

4 ビット深度スケーラビリティ符号化

4.1 背景

HDR 画像の普及に伴い、より高ビット深度を持つ整数値で表現される画像が普及することが考えられる。その際に、各々の環境に応じた異なるビット深度を持つ画像への要求といった新しい問題も生じてくる。しかし、JPEG XT では、8 ビット整数画像と HDR 画像との残差データの二つを符号化する必要がある。また、8 ビットを超えるビット深度整数値画像を得るためには復号化された HDR 画像から再度トーンマッピング処理をする必要がある。

ここでは、JPEG2000 を用いたビット深度スケーラビリティを有する符号化を提案する [23]。ビット深度スケーラビリティとは、一つの圧縮データから任意のビット深度を持つ画像を生成できることを意味する。JPEG2000 は JPEG と比べて、今後普及が予想される高ビット画像に対して効果的な圧縮を可能とする。また、提案法は高ビット深度の画像に対し適用可能である点と一つの圧縮データから任意の画質を持つ画像の生成を可能とする Signal-to-Noise Ratio(SNR) スケーラビリティを有する点の2つの特徴に着目する。提案法では、あらかじめ HDR 画像からトーンマッピング処理により 16 ビット深度整数で表現される画像を生成し、この画像を中間画像として扱う。中間画像を JPEG2000 でコーデックした後、任意のビット深度へとスケールリングすることでビット深度スケーラビリティが実現される。また、JPEG2000 の持つ SNR スケーラビリティを併用することで、より効率的な圧縮や画質管理が可能となる。このため、提案法は JPEG XT において圧縮効率を低下させている原因である 8 ビット整数画像と HDR 画像との残差データの符号化を考える必要がなく、高い圧縮効率を実現できる。実験では、提案法が圧縮前にあらかじめ任意のビット深度を持つ画像を生成した場合とほぼ同等の圧縮効率を持つことを示す。

4.2 準備

ここでは、環境に応じた異なるビット深度画像の要求モデルとビット深度スケーラビリティ及び JPEG2000 についてそれぞれ説明する。提案法は、ビット深度スケーラビリティにより環境に応じた異なるビット深度画像の要求という問題を解決している。

4.2.1 異なるビット深度画像の要求モデル

本論文では、図 20 に示すような各々の環境に応じた異なるビット深度を持つ画像の要求について議論する。

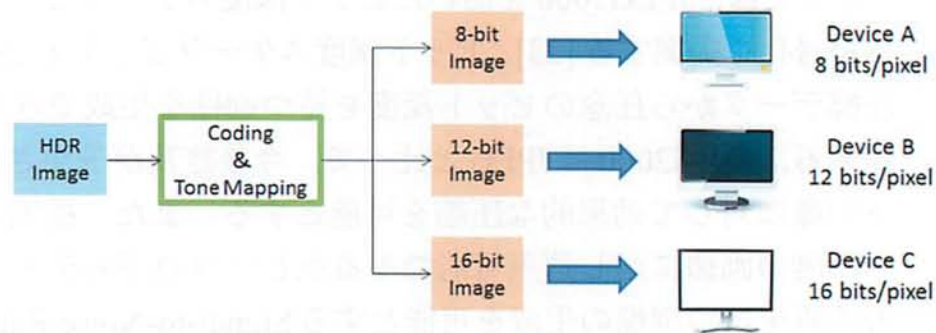


図 20: 異なるビット深度画像の要求モデル

現行する表示機器の多くは8ビットの整数深度を基準としている。しかし、HDR 画像の持つ広いダイナミックレンジを表示するためには、8ビットの整数深度では不十分である。このためHDR 画像の普及に伴い、12ビットや16ビット等のより高ビット整数深度の画像や表示機器の普及が予想され、その普及の過程では様々な環境の映像機器が混在すると考えられる。そのため、各々の環境に応じた異なるビット深度の画像の生成を可能とする画像符号化の必要性が生じる。

4.2.2 ビット深度スケーラビリティ

図 21 には、ビット深度スケーラビリティの概要を示す。

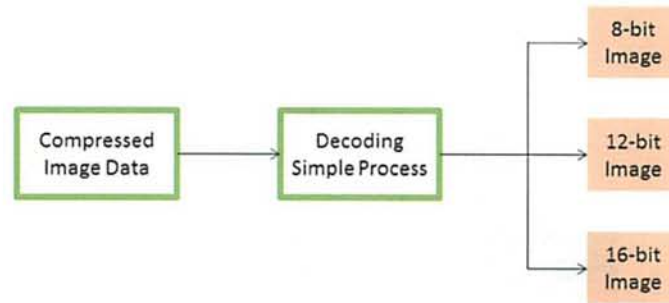


図 21: ビット深度スケーラビリティ

ビット深度スケーラビリティとは、一つの圧縮データから任意のビット深度を持つ画像を生成できることを意味する。提案法は、トーンマッピング処理によって生成された画像を中間画像とし、その画像が符号化される。その一枚の符号化された中間画像から、ビット深度スケーラビリティにより異なるビット深度を持つ画像を生成することができる。

4.2.3 JPEG2000

JPEG2000 [29] は現在一般に普及している JPEG と比べて、今後普及が予想される高ビット画像に対して効果的な符号化を可能とする。提案法は JPEG2000 の持つ 2 つの特徴に着目した。

A. 高ビット深度整数画像への符号化

JPEG では 8 ビット整数画像を基準に符号化を行うが、JPEG2000 では 8 ビットを超える高ビット深度の整数画像に対し符号化を可能としている。提案法は、高ビット深度を持つ画像を中間画像として、符号化することでビット深度スケーラビリティを実現することができる。

B. SNR スケーラビリティ

図 22 に、SNR スケーラビリティの概要を示す。

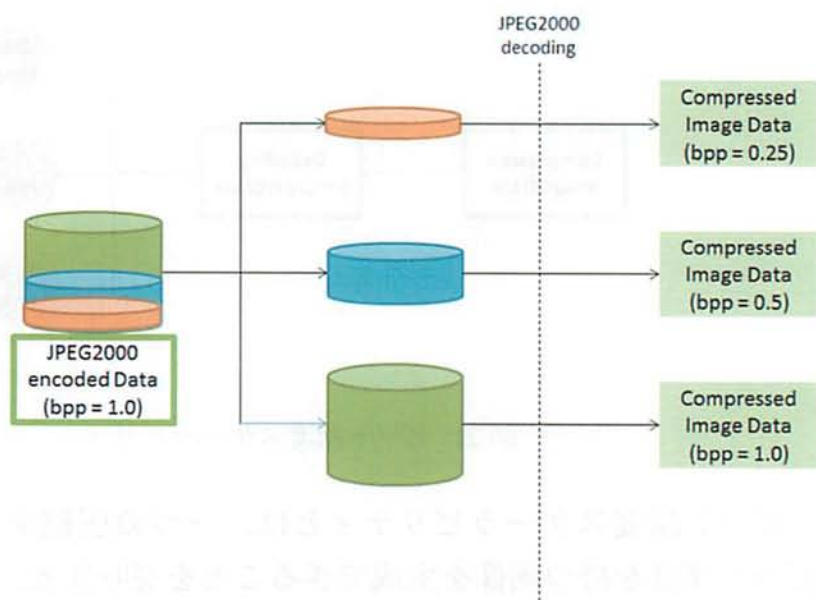


図 22: SNR スケーラビリティ

SNR スケーラビリティとは、一つの符号化データから任意の画質を持つ画像を生成できることを意味する。提案法は、SNR スケーラビリティを併用することによって、ビット深度による画質劣化を軽減することが出来る。

4.3 提案法

ここでは、提案するビット深度スケーラビリティを有する HDR 画像符号化のエンコード処理とデコード処理および二層符号化との違いについて説明する。

4.3.1 エンコード処理

図 23 に提案するエンコード処理の手順を示す。

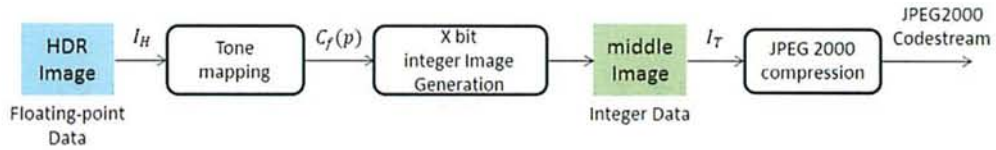


図 23: 提案法におけるエンコード処理

エンコード処理では、HDR 画像から図 5 における破線内の処理 (式 (4) ~ (9)) によって実数値で表現された RGB 値 $C_f(p)$ を生成する。次に、式 (10) において、 X ビット深度を持つ整数画像 I_X を生成する。この画像を中間画像 I_T とし、JPEG2000 によって符号化する。ここで、中間画像のビット深度 X は想定する映像機器の最大ビット深度を考慮して $X = 16$ ビットと定義する。すなわち、 $I_T = I_{X=16}$ とする。

4.3.2 デコード処理

次に、図 24 に提案するデコード処理の手順を示す。

デコード処理では、JPEG2000 の復号化によって X ビットの整数画像が得られる。ビット深度スケーラビリティは、この復号された X ビットの整数画像に所望するビット深度 $Y (\leq X)$ に対応するスケールファクター s を乗算することで実現される。スケールファクター s と所望のビット深度 Y との関係は、次のように与えられる。

$$s = \frac{2^Y - 1}{2^X - 1} \quad (41)$$

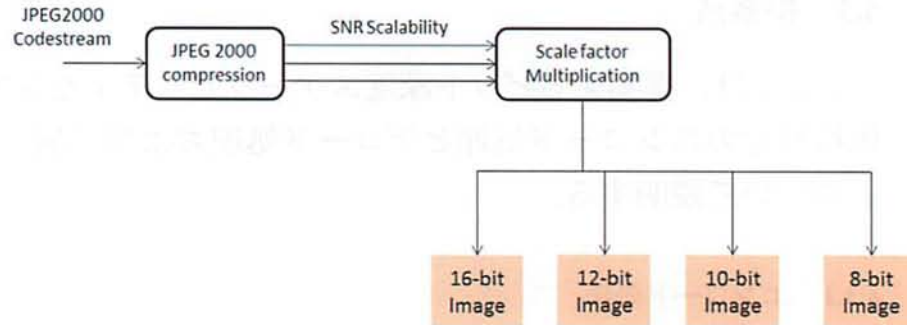


図 24: 提案法におけるデコード処理

最終的な所望するビット深度を持つ画像 I_Y は、以下によって得られる。

$$I_Y = \text{Round}(I_T \cdot s) \quad (42)$$

ここで、 I_T は復号された中間画像である。

4.3.3 JPEG XT との違い

図 25 及び図 26 に、JPEG XT と提案法におけるデコード側のデータの流れを示す。

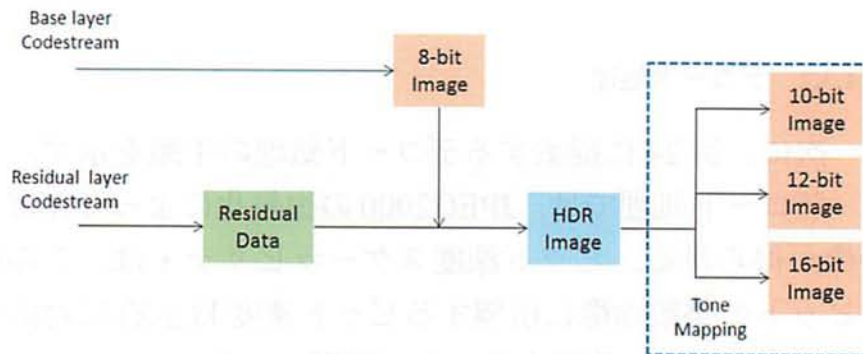


図 25: JPEG XT におけるデコード側のデータの流れ

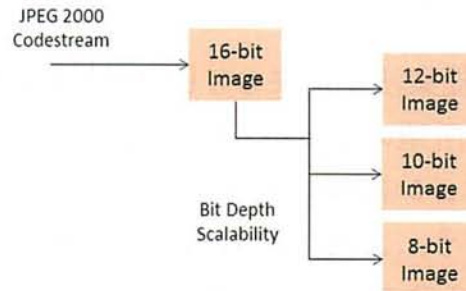


図 26: 提案法におけるデコード側のデータの流れ

提案法と JPEG XT による符号化では、符号化するデータが異なる。提案法は 16 ビット整数画像のみを符号化するが、JPEG XT では 8 ビット整数画像および 8 ビット整数画像と HDR 画像との残差データの二つを符号化する。提案法では、ビット深度スケーラビリティにより、一枚の符号化された 16 ビット整数画像から異なるビット深度を持つ画像を生成することができる。このため、提案法では、JPEG XT において圧縮効率を低下させている原因である 8 ビット整数画像と HDR 画像との残差データの符号化を考える必要がなく、高い圧縮効率を実現できる。

4.4 シミュレーション

ここでは、提案法が従来の8ビット整数画像の符号化と同等の高い圧縮効率で、所望のビット深度を持つ画像を生成できることを示す。シミュレーションには、図2に示す10枚の異なるHDR画像を入力画像として行う。また、出力結果は画像全体の平均結果である。また、JPEG2000のエンコード処理およびデコード処理には、Kakadu software [33]を用いた。

始めに、HDR画像からトーンマッピング処理により生成した8ビット整数値画像と提案法のビット深度スケーラビリティにより生成した8ビット整数値画像に対するJPEG2000の圧縮効率を比較する。図27における"Reference.1"と"Target.A"とのPSNRおよび"Reference.1"と"Target.B"とのPSNRをそれぞれ測定した。図28に、それぞれの圧縮効率をbppとPSNRの観点から評価した結果を示す。図28から、提案法では16ビット整数画像を符号化しているのにもかかわらず、従来の8ビット整数画像の符号化と同等の高い圧縮効率を実現していることがわかる。

次に、HDR画像からトーンマッピング処理により生成した8ビット整数画像から8ビットシフトをした画像と提案法により生成した16ビット整数画像に対するJPEG2000の圧縮効率を比較する。図29における"Reference.2"と"Target.C"とのPSNRおよび"Reference.2"と"Target.D"とのPSNRをそれぞれ測定した。図30に、それぞれの圧縮効率をbppとPSNRの観点から評価した結果を示す。図30から、提案法では16ビットの整数画像に対する符号化の圧縮効率も、従来の8ビット整数画像の符号化と同等の高い圧縮効率を実現していることがわかる。

これらの結果から、提案法では従来の8ビット整数画像の符号化と同等の高い圧縮効率を維持したまま、異なるビット深度を持つ画像を生成できることがわかる。

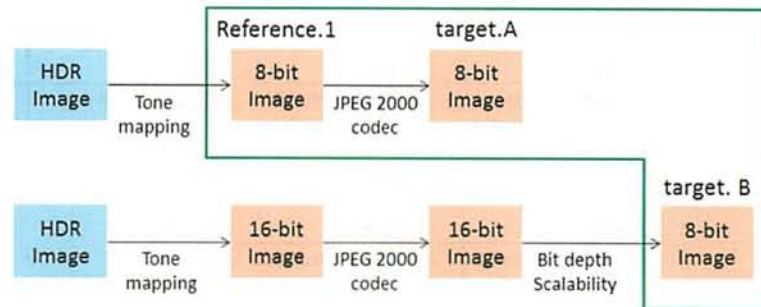


図 27: 比較対象その 1

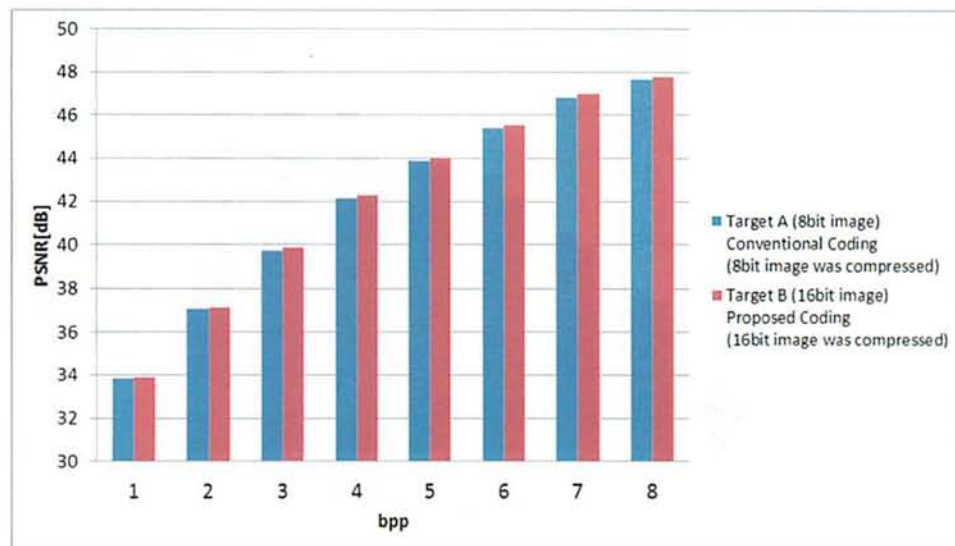


図 28: 提案法による 8 ビット整数画像の圧縮効率の比較結果

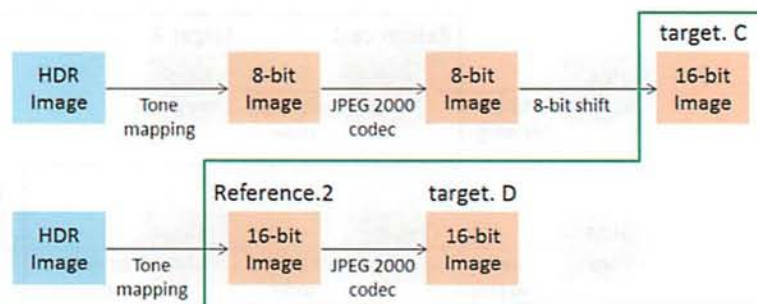


図 29: 比較対象その 2

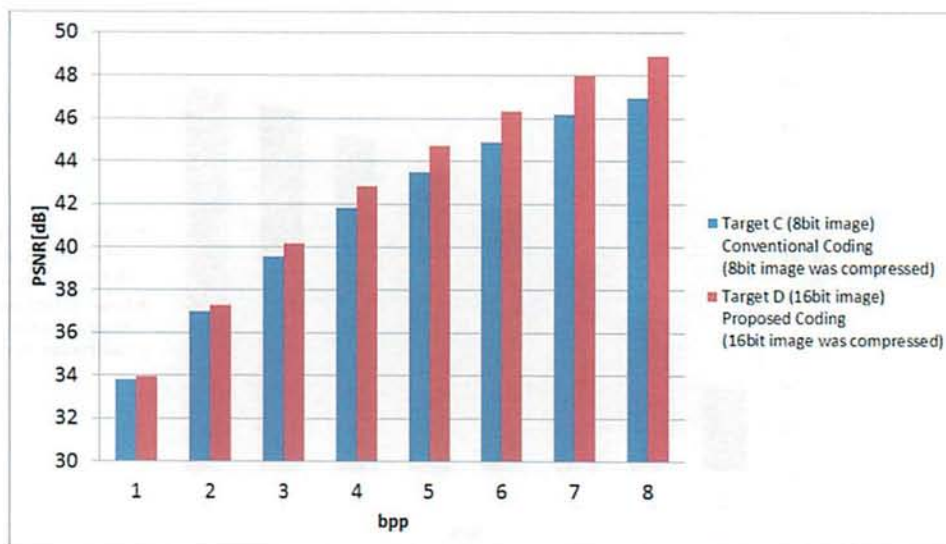


図 30: 提案法による 16 ビット整数画像の圧縮効率の比較結果

4.5 まとめ

ここでは、環境に応じた異なるビット深度画像の要求という問題に対し、JPEG2000を用いたビット深度スケーラビリティを有するHDR画像符号化を提案した。提案法ではビット深度スケーラビリティにより一枚の中間画像から要求に応じたビット深度画像を生成することができる。また、提案法ではJPEG XTのような二つのデータを符号化する必要がないため、高い圧縮効率を実現出来る。シミュレーションでは、提案法が従来の8ビット整数画像の符号化と同等の圧縮効率を維持したまま、異なるビット深度を持つ画像を生成することができることを示した。

5 おわりに

本論文では、量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダ構成及び JPEG2000 を用いたビット深度スケーラビリティを有する HDR 画像符号化を提案した。

量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダ構成では、JPEG デコーダをエンコーダ内に追加し、HDR 画像からトーンマッピングされた LDR 画像の代わりに JPEG デコーダで復号化された基本階層の LDR 画像を拡張階層での差分算出に用いる。すなわち、JPEG XT デコーダで用いる LDR 画像とエンコーダで用いる LDR 画像を同じにすることで JPEG XT のエンコーダとデコーダ間に発生していた量子化誤差の不一致を回避することができる。また、この提案するエンコーダ構成は JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダとの互換性を完全に保持している。シミュレーション結果より提案法は、JPEG XT に比べ、符号化画像の品質を向上すると同時に、符号量の増加が画質向上に繋がらない問題、すなわちレート制御の問題を解決することができることを示した。

JPEG2000 を用いたビット深度スケーラビリティを有する HDR 画像符号化では、あらかじめ HDR 画像からトーンマッピングされた一枚の高ビット深度整数画像を符号化することで、その一枚の画像から任意のビット深度画像を生成することができる。提案した符号化は JPEG XT のような二つのデータを符号化する必要がないため、高い圧縮効率を実現出来る。また、環境に応じた異なるビット深度画像の要求問題を効率的に解決した。シミュレーションでは、提案法が従来の 8 ビット整数画像の符号化と同等の圧縮効率を維持したまま、異なるビット深度を持つ画像を生成することができることを示した。

6 謝辞

本研究は、著者が首都大学東京大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻情報通信システム学域において、多くの方々の御指導、御協力の元に進めたものであります。

はじめに、指導教員である貴家仁志教授には、本研究の全般にわたり、進行、執筆、発表に関する熱心な御指導、御助言を賜りました。ここに心より厚く御礼申し上げます。また、田川憲男教授、西川清史准教授には、本論文の審査を通して貴重な御助言と御指導を賜り、深く感謝の意を表します。塩田さやか助教には、本研究のみならず、各種機器の使用法、会議の手続きなどをはじめとする各方面において大変貴重な御助言、御指導を頂きました。ここに深く感謝致します。著者が在学中にお世話になった先輩、公私にわたり良き相談相手となってくれた同輩、後輩に感謝致します。

最後に、これまでの学生生活を理解し、暖かい御支援を頂いた家族に心から感謝致します。

参考文献

- [1] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, W. Heidrich, K. Myszkowski, "High Dynamic Range Imaging - Acquisition, Display and Image based Lighting," Morgan Kaufmann, 2010.
 - [2] Seetzen, Helge, W. Heidrich, W. Stuezelinger, G. Ward, L. Whitehead, M. Trentacoste, A. Ghosh, A. Vorozcovs: "High Dynamic Range Display Systems", ACM Trans. Graph. (special issue SIGGRAPH 2004) (Aug. 2004)
 - [3] 奥田正浩, 高ダイナミックレンジ画像処理技術と MATLAB シミュレーション High Dynamic Range Image Processing, TRI-CEPS,EX41, 2010
 - [4] G. Ward, "Real Pixels", Graphics Gems II, Ed. by J. Arvo, Academic Press, 1992
 - [5] R. Bogart, F. Kainz, D. Hess, "Openexr image file format" ACM SIGGRAPH 2003, Sketches Applications, 2003
 - [6] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic Tone Reproduction for Digital Images" ACM Tran. Graphics, Vol. 21, No. 3, p. 267-276, July. 2002.
 - [7] T. Dobashi, A. Tashiro, M. Iwahashi, and H. Kiya, "A fixed-point implementation of tone mapping operation for HDR images expressed in floating-point format," APSIPA Trans. Signal and Information Processing, vol.3, no.e11, pp.1-11, October 2014.
 - [8] T. Dobashi, T. Murofushi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "A Fixed-Point Global Tone Mapping Operation for HDR Images in the RGBE Format," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E97-A, no.11, pp.2147-2153, November 2014.
-

-
- [9] T. Richter, "On the standardization of the JPEG XT image compression," in Picture Coding Symposium (PCS), 2013, Dec 2013, pp. 37-40.
- [10] "Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images - Part 1: Scalable compression and coding of continuous-tone still images," ISO/IEC 18477-1, Jun. 2015.
- [11] "Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images - Part 2 : Extensions for High Dynamic Range Images," ISO/IEC 18477-2, Oct. 2014.
- [12] "Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images - Part 7: HDR Floating Point Coding," ISO/IEC 18477-7, Jun. 2015.
- [13] G. Ward, and M. Simmons, "JPEG-HDR: A Backwards Compatible, High Dynamic Range Extension to JPEG," Thirteenth Color Imaging Conference, Nov. 2005
- [14] C. Mantel, S. Ferchiu, and S. Forchhammer, "Comparing subjective and objective quality assessment of HDR images compressed with JPEG-XT," in Multimedia Signal Processing (MMSP), 2014 IEEE 16th International Workshop on, Sept 2014, pp. 1-6.
- [15] M. Iwahashi, T. Yoshida, N. B. Mokhtar, and H. Kiya, "Bit-Depth Scalable Lossless Coding for High Dynamic Range Images," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, no.2015:22, March 2015.
- [16] M. Iwahashi and H. Kiya, "Two layer lossless coding of hdr images," in Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on, May 2013, pp. 1340-1344.
-

- [17] M. Iwahashi, T. Yoshida, N. Mokhtar, and H. Kiya, “ Bit-depth scalable lossless coding for high dynamic range images,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol.2015, no.1, pp.1-15, 2015.
 - [18] A. Pinheiro, K. Fliegel, P. Korshunov, L. Krasula, M. Bernardo, M. Pereira, and T. Ebrahimi, “ Performance evaluation of the emerging jpeg xt image compression standard, ” in *Multimedia Signal Processing (MMSP)*, 2014 IEEE 16th International Workshop on, Sept 2014, pp. 1-6.
 - [19] Seungcheol Choi, Oh-Jin Kwon, Dukhyun Jang, and Seokrim Choi, “ Performance Evaluation of JPEG XT Standard for High Dynamic Range Image Coding, ” *Proceedings of the World Congress on Engineering 2015 Vol I, WCE 2015*, July 1 - 3, 2015, London, U.K.
 - [20] . Artusi, R. Mantiuk, T. Richter, P. Hanhart and P. Korshunov et al. Overview and Evaluation of the JPEG XT HDR Image Compression Standard, accepted in *Journal of Real-Time Image Processing*, 2015
 - [21] 鈴木 亮, 土橋 俊之, 渡邊 修, 貴家 仁志, “ 量子化誤差を考慮した JPEG XT エンコーダー, ” *電子情報通信学会 スマートインフォメディアシステム研究会*, vol.115, no.348, (no.SIS2015-34), pp.2934, 2015 年 12 月 3 日.
 - [22] Osamu WATANABE, Ryo SUZUKI, and Hitoshi KIYA, “ A Structure of JPEG XT Encoder considering Effect of Quantization Error ” , *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Montreal, Canada, 22nd May, 2016.
 - [23] 鈴木 亮, 室伏 辰耶, 貴家 仁志, “ JPEG2000 のスケーラビリティを用いた HDR 画像の効果的符号化, ” *電子情報通信学会 スマートイ*
-

- ンフォメディアシステム研究会, vol.114, no.370, (no.SIS2014-67), pp.16, 2014 年 12 月 18 日.
- [24] Tatsuya MUROFUSHI, Ryo SUZUKI, and Hitoshi KIYA, "Bit Depth Scalable Coding of HDR Images Using SNR Scalability in JPEG 2000," Proc. International Workshop on Advanced Image Technology, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan, 13th January, 2015.
- [25] Philippe Hanhart, Marco V. Bernardo, Manuela Pereira, Antnio M. G. Pinheiro and Touradj Ebrahimi, "Benchmarking of objective quality metrics for HDR image quality assessment", EURASIP Journal on Image and Video Processing 2015, 2015:39
- [26] L. Zhang, L. Zhang, X. Mou, and D. Zhang, "FSIM: a feature similarity index for image quality assessment." IEEE Trans. Image Process., vol. 20, no. 8, pp. 237886, Aug. 2011.
- [27] RafaÅ Mantiuk, Kil Joong Kim, Allan G. Rempel and Wolfgang Heidrich. "HDR-VDP-2: A calibrated visual metric for visibility and quality predictions in all luminance conditions", ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH'11), 30(4), article no. 40, 2011
- [28] Information technology - Digital compression and coding of continuous - tone still images: Requirements and guidelines, " International Standard ISO/IEC IS-10918-1, Feb. 1994.
- [29] " Information technology - JPEG 2000 image coding system - Part 1:Core coding system," International Standard ISO/IEC IS-15444-1, Dec.2000.
- [30] " Information technology - JPEG XR image coding system - Part 1:System architecture," ISO/IEC TR-29199-1, Jul. 2011.
-

- [31] Greg Ward, Anywhere Software. "High Dynamic Range Image Encodings"
 - [32] "Text of CD ISO/IEC 18477-5 (Reference Software)," ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N69019, Jun. 2015.
 - [33] Kakadu software, <http://www.kakadusoftware.com>
-

著者紹介

鈴木 亮

平 3 (1991) 年 6 月 宮城県生まれ.

平 19 (2007) 年 3 月 仙台市立高森中学校 卒業.

平 22 (2010) 年 3 月 宮城県立宮城野高等学校普通科 卒業.

平 26 (2014) 年 3 月 首都大学東京 システムデザイン学部
システムデザイン学科 卒業.

平 28 (2016) 年 3 月 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科
博士前期課程 卒業見込み.