

量子化誤差の影響を考慮した JPEG XT エンコーダー

鈴木 亮[†] 土橋 俊之^{††} 渡邊 修^{†††} 貴家 仁志^{††††}

[†] 首都大学東京 〒191-0065 東京都日野市旭ヶ丘 6-6

^{††††} 拓殖大学 〒193-0985 東京都八王子市館町 815-1

E-mail: [†]suzuki-ryo1@ed.tmu.ac.jp, ^{††}ocelobashi@gmail.com, ^{†††}owatanab@es.takushoku-u.ac.jp,
^{††††}kiya@sd.tmu.ac.jp

あらまし 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が、JPEG XT として国際標準化が進んでいる。本稿では、標準化委員会が提供するリファレンスソフトウェア（基準 JPEG XT）の問題点をまず指摘する。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、エンコーダーとデコーダー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 デコーダーをエンコーダー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ー構造を提案する。提案法は、JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダーとの互換性を完全に保持している。基準 JPEG XT に比べ、提案法は、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。

キーワード JPEG XT, 高ダイナミックレンジ, 符号化

A JPEG XT encoder considering effects of quantization error

Ryo SUZUKI[†], Toshiyuki. DOBASHI^{††}, Osamu WATANABE^{†††}, and Hitoshi. KIYA^{††††}

[†] Tokyo Metropolitan University Asahigaoka 6-6, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

^{††††} Takushoku University Tatemati 815-1, Hachioji-shi, Tokyo, 193-0985 Japan

E-mail: [†]suzuki-ryo1@ed.tmu.ac.jp, ^{††}ocelobashi@gmail.com, ^{†††}owatanab@es.takushoku-u.ac.jp,
^{††††}kiya@sd.tmu.ac.jp

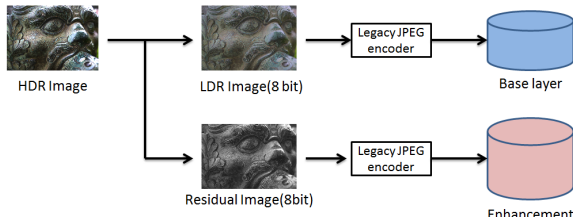
Abstract A new standard referred to as JPEG XT has been designing to provide coded data for HDR images. JPEG XT coded data contains two layers: the base-layer for tone-mapped LDR version of an HDR image and the enhancement layer. The legacy JPEG decoder can understand the base-layer of JPEG XT coded data because it has the same codestream syntax as the legacy JPEG. In this study, it is firstly pointed out that there is a mismatch on the handling of the quantization error between the normative encoder and the standard decoder. Next, to avoid the problem, a improved encoder structure with consideration of the mismatch is proposed. The experimental results demonstrate that the proposed structure can give better coding performances than those of the normative encoder, while keeping compatibility with the JPEG XT decoder.

Key words JPEG XT, high dynamic range, coding

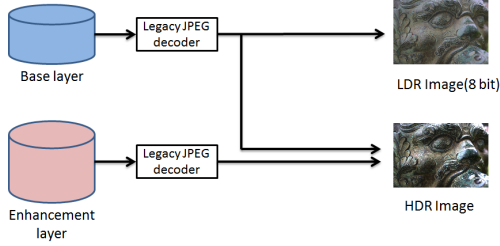
1. ま え が き

近年、高画質画像の需要が高まり、人間の視覚範囲を超えるダイナミックレンジの記録を可能とする HDR (High Dynamic Range Image) 画像 [1] が映像分野や医用分野等、応用され始めている。しかし、多くの 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、既存の表示機器環境に適する

ために、LDR 画像 (Low Dynamic Range Image) ヘレンジを圧縮するトーンマッピング技術や、ストレージや通信の効率化のために、データ圧縮技術に対する研究が行われている [2-7]。JPEG 方式 [8] は画像符号化の部門で最も広く扱われている形式である。しかし、JPEG 方式は 8 ビット深度の画像にしか対応されていないため HDR 画像を直接圧縮することができない。また、JPEG2000 [9] や JPEG XR [10] 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 方式との互換性を



(a) エンコーダー



(b) デコーダー

図1 JPEG XT の概要

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

持たない。

このような背景から、JPEG方式と互換性を有し、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。[11-14]。JPEG XTのフローを図1に示す。JPEG XTエンコーダーでは入力するHDR画像からトーンマッピングされたLDR画像と差分画像に分解し、各々JPEGエンコーダーで符号化を行う。この2枚の画像を各々基本階層及び拡張階層として二層符号化を実行する。JPEG XTデコーダーでは、コードストリームから基本階層と拡張階層を得る。基本階層から復号化されたLDR画像を生成し、基本階層と拡張階層の合成により、復号化されたHDR画像を生成する。このように、1つの符号化データからLDR画像とHDR画像の両方と提供できるビット深度スケーラビリティを有する。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。

本稿では標準化委員会が提供するリファレンスソフトウェアを基準JPEG XTとして議論を展開する。JPEG XTは異なる3つのprofile(A, B, C)があり、本稿ではprofile Aを例に準備を進める。JPEG XTによる画像の客観的及び主観的性能評価の結果を示す文献[15], [16]によると、profile A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こと

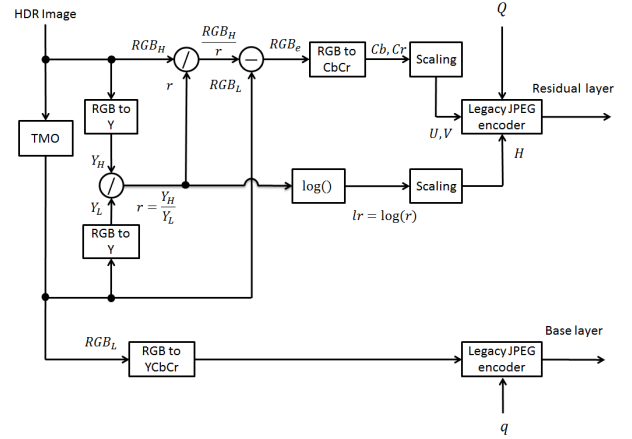


図2 基準 JPEG XT エンコーダー (Profile A)

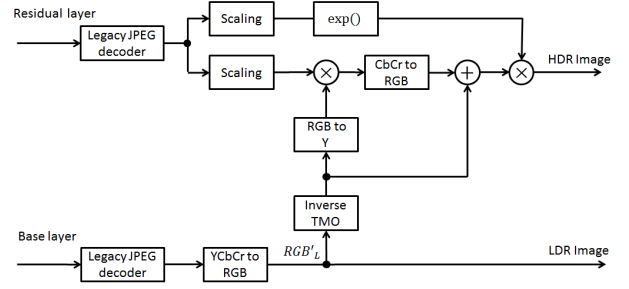


図3 基準 JPEG XT デコーダー (Profile A)

が報告されている。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。しかし、これらの文献では、各profileについての符号化性能を示しているが、この問題について解析されていない。

本稿では、基準JPEG XTの符号化性能上の問題を分析する。そこで、基準JPEG XTはエンコーダーとデコーダー間の量子化誤差の不一致により、画像符号量が復元されたHDR画像の画質向上に繋がらない問題があることを指摘する。次に、この問題を回避するために、JPEGデコーダーを追加した新たなエンコーダー構造を提案する。シミュレーション結果より、提案法は基準JPEG XTよりも高い符号化性能を持つだけでなく、ビットレートによるHDR画像の画質制御を可能とすることを示す。

2. JPEG XT

2.1 基準 JPEG XT エンコーダー

図2にprofile Aの基準JPEG XTエンコーダーの計算法を示す。始めに入力されたHDR画像 RGB_H に対してLDR画像 RGB_L へトーンマッピング処理を施す。このLDR画像は従来のJPEGエンコーダーで符号化され、基本階層となる。

次に拡張階層に保存する輝度成分 H を次式によって求める。まず、HDR画像の輝度 Y_H とLDR画像の輝度 Y_L の比 r を求

める。

$$r = \frac{Y_H}{Y_L} \quad (1)$$

輝度比 r を用いて、各画素について 8 ビット整数値 H

$$H = \frac{lr - lr_{min}}{lr_{max} - lr_{min}} \cdot 255 \quad (2)$$

ただし、

$$lr = \log(r) \quad (3)$$

と求める。ここで、 lr の最大値、最小値それぞれ lr_{max} 、および lr_{min} である。この lr_{max} 、および lr_{min} はヘッダに保存され、復号化時に使用される。

次に拡張階層に保存する色差成分 U, V を求める。まず、HDR 画像と LDR 画像の残差 RGB_e を次式によって求める。

$$RGB_e = \frac{RGB_H}{r} - RGB_L \quad (4)$$

次に RGB_e から色変換を施した色差 Cb, Cr を用いて 8 ビット整数値 U, V を次式によって求める。

$$U = \frac{Cb - Cb_{min}}{Cb_{max} - Cb_{min}} \cdot 255 \quad (5)$$

$$V = \frac{Cr - Cr_{min}}{Cr_{max} - Cr_{min}} \cdot 255 \quad (6)$$

Cb の最大値、最小値をそれぞれ Cb_{max} 、および Cb_{min} 、 Cr の最大値、最小値をそれぞれ Cr_{max} 、および Cr_{min} とする。この Cb_{max} 、 Cb_{min} 、 Cr_{max} 、および Cr_{min} はヘッダに保存され、復号化時に使用される。

拡張階層に保存された各 H, U, V 成分は YCbCr 形式として従来の JPEG エンコーダーで符号化される。拡張階層は、標準的な JPEG 形式に搭載されている APP11marker を用いて基本階層に多重化される。

LDR 画像と残差成分の量子化するために 2 つのパラメータ q, Q を設定する必要がある。LDR 画像に対するパラメータ q は、復号化された LDR 画像の品質を制御する。つまり、このパラメータ q は、従来の JPEG に用いられる品質係数と等しい。また、残差成分に対するパラメータ Q は、復号化された HDR 画像の品質を制御する。パラメータ q, Q は値が大きいほど復号された画像の品質が向上し、1~100 の範囲で制御することができる。

2.2 基準 JPEG XT のデコーダー

図 3 に profile A の JPEG XT デコーダーを示す。始めに JPEG XT の符号化コードストリームから基本階層と拡張階層を得る。基本階層には LDR 画像が保存されており、従来の JPEG デコーダによって復号化される。

また、HDR 画像を生成するためには、復号化された拡張階層の輝度成分と色差成分と逆トーンマッピングされた LDR 画像を用いて生成する。

3. 提案法

3.1 基準 JPEG XT の問題点

本稿では、図 2 に示した基準 JPEG XT の問題として、基

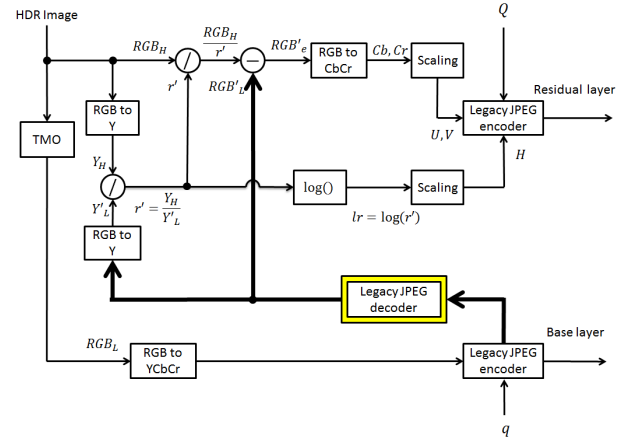


図 4 提案された JPEG XT エンコーダー

本階層と拡張階層とのミスマッチを指摘する。図 1 に示すように、基準 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、

$$RGB'_L = RGB_L + Err(q) \quad (7)$$

の関係がある。ここで、 $Err(q)$ は、パラメータ q を用いた量子化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 画像生成にも影響を及ぼす。しかし、図 2 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、エンコーダーとデコーダー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。このミスマッチの影響は、 q が大きいほど顕著になる。

3.2 提案する JPEG XT エンコーダー

本稿では、上記の問題を解決するために、新しいエンコーダーを提案する。これは、JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダーとの互換性を完全に保持している。

図 4 は、提案するエンコーダーの構成である。本提案法では JPEG デコーダーを新たに追加することで、量子化誤差の影響を考慮する。基本階層の生成では、HDR 画像 RGB_H からトーンマッピング処理により変換した LDR 画像 RGB_L を符号化し、保存する。すなわち、基本階層は図 2 と同様の処理を行っている。一方、拡張階層では、まず輝度比 r' が次式より計算される。

$$r' = \frac{Y_H}{Y'_L} \quad (8)$$

ここで、 Y'_L は、基本階層のデコードにより生成された画像より、計算された輝度値である。次に色差成分 U, V に変換される RGB'_e が、次式より計算される。

$$RGB'_e = \frac{RGB_H}{r'} - RGB'_L \quad (9)$$

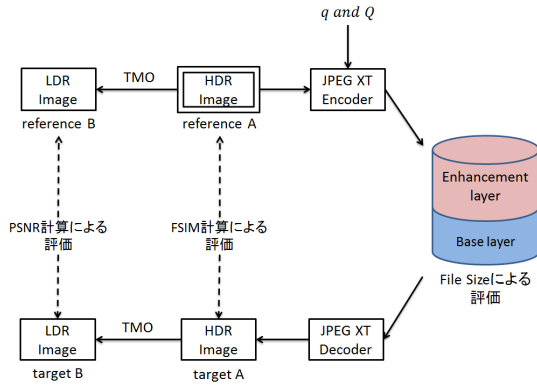


図5 シミュレーション概要

ここで、 RGB_L' は、JPEG デコーダーで復号化された基本階層の LDR 画像である。以上のように、提案法では、基本階層が発生した誤差を考慮した形式で、拡張階層を生成している。

3.3 期待される効果

本稿で提案する JPEG XT エンコーダーは以下の 3 つの効果を期待される。

(a) 復元された HDR 画像の画質向上

ある符号量の下で、より高品質な HDR 画像を表現できる。

(b) LDR 画像上での画質向上

復号された 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、基準 JPEG XT に比べ高品質な画像を生成できる。

(c) レート制御の改善

基準 JPEG XT はエンコーダーとデコーダー間の量子化誤差の不一致によってパラメータ q , Q で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。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

シミュレーションには OpenEXR フォーマット (48 ビットの浮動小数点値) の "Canon.exr" を入力画像の例にする。またトーンマッピング処理には Reinhard らによって提案されたグローバル関数 [17] を使用した。この基準 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 [18] を使用する。また提案するエンコーダーは基準 JPEG XT を改良されたものである。

4.2 HDR 画像に対する画質評価

入力する HDR 画像を基準として画質評価を行う。HDR 画像上での画質評価には Human visual system に基づいて、画像間の誤差を指標する FSIM (Feature Similarity) [19] 計算を用いる。

FSIM に基づく結果を図 6、および図 7 に示す。両図から、基準 JPEG XT は、多くの場合、提案法に比べ画質が低いことがわかる。特に q が小さい、すなわち基本階層を大きく量子化した場合には、そ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。

4.3 LDR 画像に対する画質評価

次に、基本階層と拡張階層から HDR 画像を復号した後、再度トーンマッピング処理によって生成された LDR 画像を、原 HDR 画像から直接生成した LDR 画像と比較した。画質評価は、PSNR (Peak Signal-to noise ratio) に基づき行った。PSNR は次式によって計算される。

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right) \quad (10)$$

MSE は平均二乗誤差を意味し、MAX は画像の最大輝度値 (255) である。

実験結果を図 8、および図 9 に示す。両図から提案法はパラメータ Q が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、基準 JPEG XT では Q を増加しても、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、ほとんどの値において、提案法は基準 JPEG XT よりも画質が良くなることを確認できる。

4.4 ファイルサイズに対する評価

図 10、および図 11 にエンコーダーによって生成されたファイルサイズの結果を示す。ここで、図に示すファイルサイズは基本階層と拡張階層との合計を表す。各パラメータ q , Q に関わらず、提案するエンコーダーは基準 JPEG XT エンコーダーよりも少ない符号量を持つことが確認できる。

5. まとめ

本稿では、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、エンコーダーとデコーダー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 デコーダーをエンコーダー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ー構造を提案した。提案法は、JPEG XT に準拠したものであり、JPEG XT デコーダー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、基準 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確認した。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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,

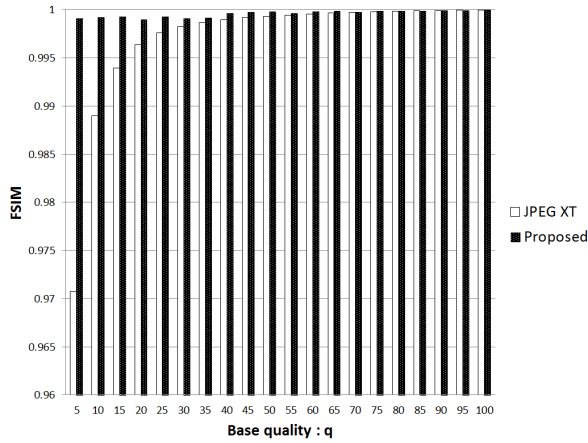


図 6 FSIM 結果 (Q=40)

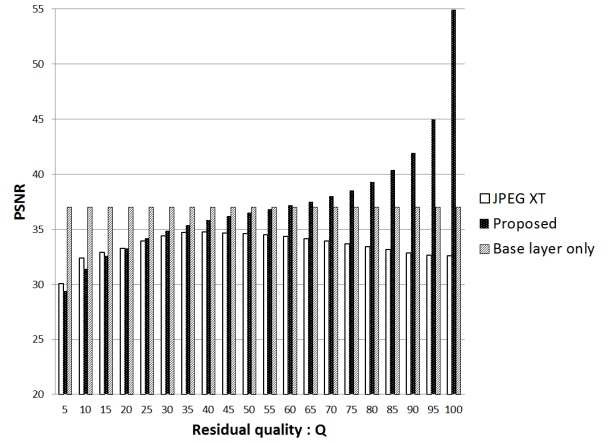


図 9 PSNR 結果 (q=80)

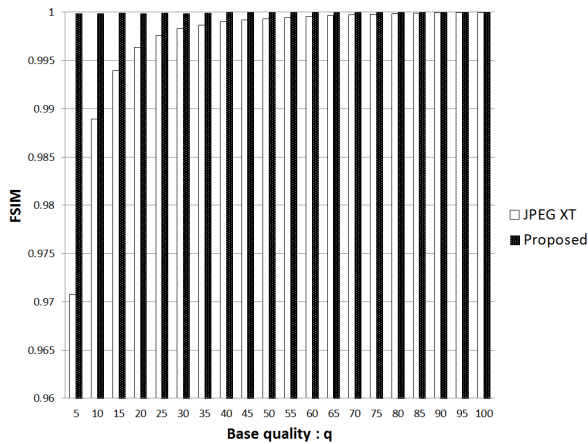


図 7 FSIM 結果 (Q=80)

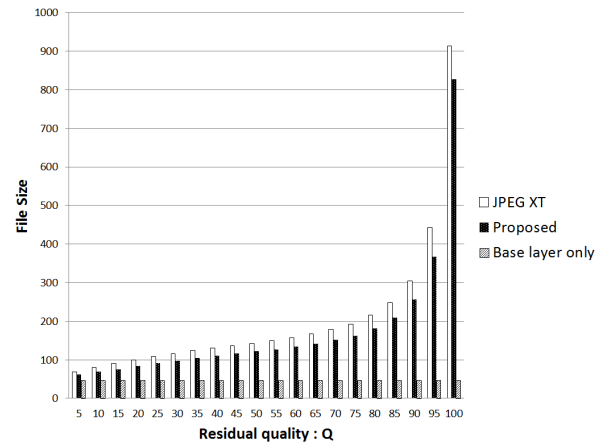


図 10 ファイルサイズ結果 (q=40)

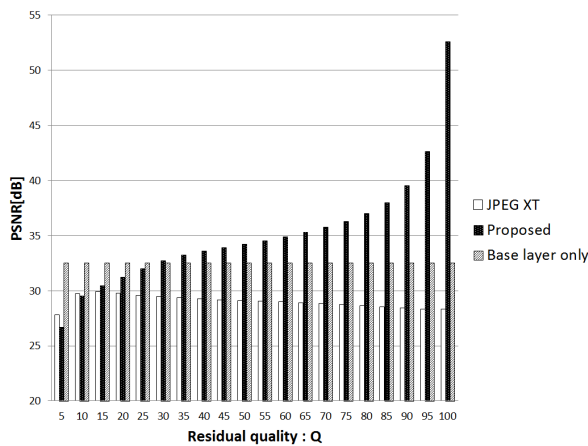


図 8 PSNR 結果 (q=40)

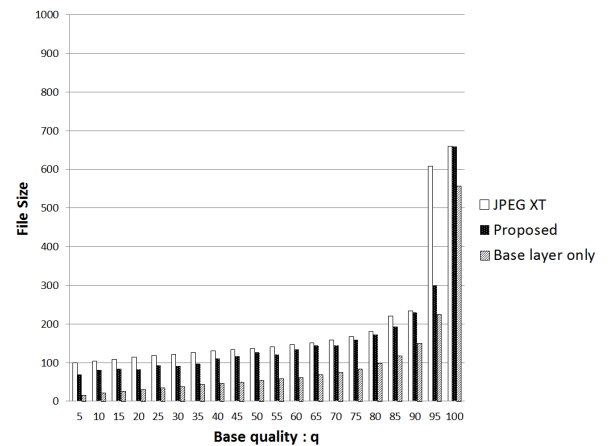


図 11 ファイルサイズ結果 (Q=40)

October 2014.

[5] 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.

[6] T. Odaka, W. SAE-TANG, M. Fujiyoshi, H. Kobayashi, M. Iwahashi, and H. Kiya, "An Efficient Lossless Compression Method Using Histogram Packing for HDR Images in OpenEXR Format," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E97-A, no.11, pp.2181-2183, November 2014.

[7] 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.

[8] Information technology - Digital compression and coding of continuous - tone still images: Requirements and guidelines," *International Standard ISO/IEC IS-10918-1*, Feb. 1994.

[9] Information technology - JPEG 2000 image coding system - Part 1:Core coding system," *International Standard*

- ISO/IEC IS-15444-1, Dec.2000.
- [10] Information technology - JPEG XR image coding system - Part 1: System architecture," ISO/IEC TR-29199-1, Jul. 2011.
 - [11] T. Richter, "On the standardization of the JPEG XT image compression," in Picture Coding Symposium (PCS), 2013, Dec 2013, pp. 37-40.
 - [12] "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.
 - [13] "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.
 - [14] "Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images - Part 7: HDR Floating Point Coding," ISO/IEC 18477-7, Jun. 2015.
 - [15] 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.
 - [16] 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.
 - [17] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," ACM Trans. Graph., vol. 21, no. 3, pp. 267-276, Jul. 2002.
 - [18] "Text of CD ISO/IEC 18477-5 (Reference Software)," ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 1 N69019, Jun. 2015.
 - [19] 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. 2378-86, Aug. 2011.