

HDR 画像のビット深度スケーラブル符号化

木下 裕磨[†] 鈴木 亮[†] 土橋 俊之[†] 貴家 仁志[‡]

首都大学東京システムデザイン学部情報通信システムコース 〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6

E-mail: [†]{kinoshita-yuma, suzuki-ryo1, dobashi-toshiyuki}@ed.tmu.ac.jp, [‡]kiya@tmu.ac.jp

あらまし 本稿では、種々のビット深度のディスプレイの存在を想定して、HDR 画像の保存及びトーンマッピング処理を考察する。本稿では、HDR 画像からトーンマッピング処理によって、あるビット深度の LDR 画像を生成し、その LDR 画像を圧縮・保存する。次に使用されるディスプレイのビット深度に応じた深度に線形マッピングを復号画像に対して施す、ビット深度スケーラブル符号化を提案する。提案された符号化では、HDR 画像を保存する必要はなく、1 枚の LDR 画像のみを保存し、軽微な処理によって任意のビット深度を持つ LDR 画像へ変換が可能である。実験の結果、高ビット深度を持つ LDR 画像を符号化することにより、符号量を増加することなしに、ビット深度の変換後も高品質な LDR 画像を得られることが確認される。

キーワード HDR 画像, トーンマッピング, ビット深度スケーラブル符号化

Bit-Depth Scalable Coding for HDR Images

Yuma KINOSHITA[†] Ryo SUZUKI[†] Toshiyuki DOBASHI[†] and Hitoshi KIYA[‡]

Department of Information and Communication Systems, Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University

6-6 Asahigaoka, Hino-shi 191-0065, Tokyo, Japan

E-mail: [†]{kinoshita-yuma, suzuki-ryo1, dobashi-toshiyuki}@ed.tmu.ac.jp, [‡]kiya@tmu.ac.jp

Abstract In this article, tone mapping operations and image compression schemes are considered for HDR images, under the assumption that LDR displays with several bit-depths are used. In the proposed framework, a tone mapping operation is applied to a HDR image to generate a LDR image with a specified bit-depth, and the LDR image is then compressed. The decoded LDR image can be mapped to other LDR images with several arbitrary bit-depths appropriate for displays, by using a simple linear tone mapping operation. In the framework, the HDR image is not requested to be stored, and only the LDR image with a specified bit-depth is stored. Experiment results show that the compression of LDR images with higher bit-depth provide better quality images, without increasing any file size, than the use of lower ones.

Keyword HDR Image, Tone Mapping, Bit-Depth Scalable Coding

1. はじめに

HDR 画像 (High Dynamic Range Image, HDR-I) は、高いダイナミックレンジを記録できる画像として、その普及が期待されている。しかし、既存のディスプレイは HDR-I を直接表示することが困難であり、トーンマッピング処理を用いて HDR 画像を機器に適したビット深度を持つ LDR 画像 (Low Dynamic Range Image, LDR-I) に変換する必要がある。さらに HDR-I は、浮動小数点形式を持つなど、画像表現に要するデータ量が多く、そのデータ圧縮は、LDR-I に比べ多くの課題がある [1]-[4]。また、JPEG-XT として HDR 画像におけるデータ圧縮の標準化作業が進行中である [5]。

本稿では、種々のビット深度のディスプレイの存在を想定して、HDR-I 情報の保存及びトーンマッピング処理を考察する。ビット深度の異なるディスプレイに対して、その都度 HDR 画像に対してトーンマッピング処理を施すことは、メモリ及び処理負担の観点から

効率的でない。本稿では、あるビット深度の LDR-I にトーンマッピングされた画像をまず生成し、その画像を圧縮・保存する。次に使用されるディスプレイのビット深度に応じた深度に線形マッピングを施す、ビット深度スケーラブル符号化 (Bit-Depth Scalable Coding, BDSC) を提案する。BDSC では、HDR 画像を保存する必要はなく、1 枚の LDR 画像のみを保存し、軽微な処理によって任意のビット深度を持つ LDR 画像へ変換が可能である。

BDSC における符号化効率と出力画像の画質に関して実験を行い、その結果を考察する。実験の結果、高ビット深度を持つ LDR 画像を符号化することにより、符号量を増加することなしに、ビット深度の変換後も高品質な LDR 画像を得られることが示される。

2. 準備

本章では、準備として HDR 画像の概要と代表的フォーマットについて述べる。また、HDR 画像を LDR

画像に変換するトーンマッピング処理について簡単に説明する。

2.1. HDR 画像

HDR 画像は、1 画素あたりのビット深度 (bits per pixel, bpp) の拡張や、画素値を浮動小数点数で表現することで 200[dB]を越える高いダイナミックレンジを記録できる画像である。現実シーンのダイナミックレンジは約 200[dB]と言われ、人間はそのうちの約 120[dB]を知覚でき、従来画像で表現可能な範囲は約 80[dB]である。したがって、HDR 画像は人間の知覚範囲だけでなく、人間には知覚できないダイナミックレンジの表現が可能である[1]。

HDR 画像のフォーマットはいくつか提案されているが、ここでは、(1) RGBE, (2) Open EXR, (3) PFM という3つのフォーマットについて以下に述べる。

(1) RGBE

RGBE フォーマットは、画像における RGB の仮数部に加え、共通の指数部に対しそれぞれ 8bit を割り当てた計 32bpp のフォーマットである (図 1 (a))。圧縮にはランレングス符号化を用いており、約 25%の圧縮が可能である。符号ビットがなく、負の値を取り扱えないために RGB 空間では可視色域全体の表現ができない。

(2) Open EXR

Open EXR フォーマットは、RGB の各チャネルに対し 16bit を割り当てた計 48bpp のフォーマットである (図 1 (b))。浮動小数点数の表現には、単精度 IEEE 浮動小数点数のビット数を半分にした形式を採用している。ロスレスのデータ圧縮をサポートし、約 60%の圧縮が可能である[6]。

(3) PFM

PFM(Portable Float Map) フォーマットは、RGB の各チャネルに対し 32bit を割り当てた計 96bpp のフォーマットである (図 1 (c))。これは単精度 IEEE 浮動小数点数と同様の形式である。

2.2. トーンマッピング

HDR 画像の表示には、HDR 画像を LDR 画像に変換する必要がある。しかしながら、HDR 画像を線形にスケールすると細部のコントラストが大きく失われてしまうため、多くのトーンマッピングに関する研究が盛んに行われている (図 2) [1,3,7]。

トーンマッピングで用いる関数 (トーンマッピングオペレータ) は、グローバルオペレータとローカルオペレータの二つに分けられる[6,7]。ローカルオペレータは、画素近傍のコントラストによりかける関数に変化する。ローカルオペレータは計算量が大いだが、グローバルオペレータに比べ細部におけるコントラストの再現性が高い。

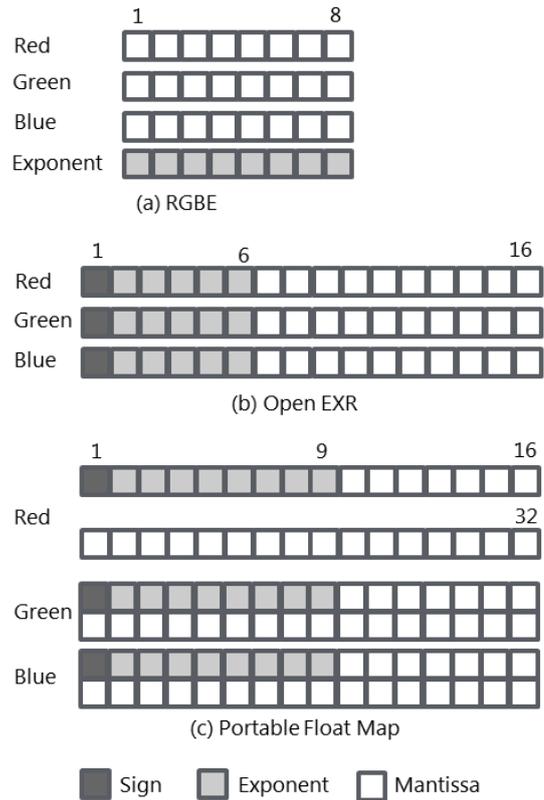
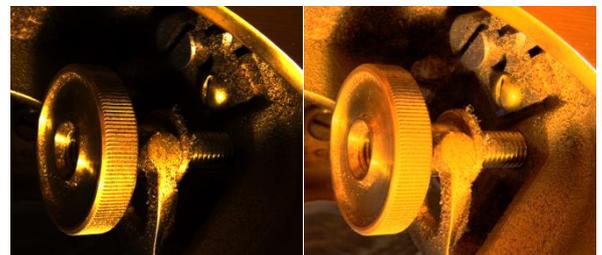


図 1 HDR 画像フォーマット



(a)線形スケール (b)トーンマッピング

図 2 LDR にマッピングされた HDR 画像

代表的なトーンマッピング処理として、Reinhard らの Photographic Tone Reproduction[7]が挙げられる (図 3)。

この手法では HDR 画像が持つ輝度のダイナミックレンジを式 (1) により圧縮することで、画素 p の値を $[0, 1]$ の値域を持つ信号 $C_f(p)$ に変換する。

$$C_f(p) = \frac{L_w(p)}{L_d(p)} C(p) \quad (1)$$

ここで、 $C(p)$ は HDR 画像における画素 p の値、 $L_w(p)$ は p の輝度、そして $L_d(p)$ はトーンマッピングオペレータの適用により得られるディスプレイ輝度である。

C_f から $k[\text{bit}]$ LDR 画像 LDR-I_k への変換は、線形スケールリングにより行われる (式 (2))。

$$\text{LDR-I}_k(p) = (2^k - 1) C_f(p) \quad (2)$$

式 (2) より、トーンマッピングされた LDR 画像を

異なるビット深度 l [bit] に線形スケールした画像は、元の HDR 画像から直接 l [bit] にトーンマッピングした画像と一致することがわかる。

3. ビット深度スケラブル符号化

機器に対応する画像のビット深度は様々であり、高品質な画像の表示には機器に適したビット深度を持つ LDR 画像への変換が望ましい。

本章では、トーンマッピングにより得られた LDR 画像のみを用いて、任意のビット深度を持つ LDR 画像を出力可能なビット深度スケラブル符号化 (Bit-Depth Scalable Coding, BDSC) を提案する (図 4)。

3.1. 目的

現在一般に用いられているディスプレイ機器は 8[bit] 画像にのみ対応している。しかし、今後は 10[bit] や 16[bit] など高いビット深度に対応した機器の普及が考えられる。それらの機器に適した HDR 画像の表示には、機器に出力できる最大のビット深度を持つ LDR 画像へのトーンマッピングが必要である。しかしながら、HDR 画像を表示する度にトーンマッピングを行うことは、メモリ・処理時間ともに効率的でない。二層符号化 [1,4,5] では、HDR 画像の符号量の削減が可能だが、任意のビット深度を持つ LDR 画像を得るためには、復号化ののちトーンマッピングを行う必要がある。

BDSC は、トーンマッピングされた LDR 画像を異なるビット深度 l [bit] に線形スケールした画像が、元の HDR 画像から直接 l [bit] にトーンマッピングした画像と一致する性質を利用し、1 枚の LDR 画像から任意のビット深度を持つ LDR 画像を効率的に生成できる。

3.2. 符号化の手順

BDSC を用いた HDR 画像から k [bit] の LDR 画像への変換処理を以下に示す。

- i. HDR-I をトーンマッピングし LDR- I_l を得る
- ii. LDR- I_l を任意の Image Encoder により符号化 (図 4 LDR- I_l')
- iii. LDR- I_l' を Image Decoder により復号化
- iv. 線形スケール (式 (3)) により LDR- I_k を得る

$$\text{LDR-}I_k(p) = \text{Int} \left(\frac{2^k - 1}{2^l - 1} \text{LDR-}I_l'(p) \right) \quad (3)$$

BDSC では、HDR 画像を利用せず、LDR- I_l' のみを用いて任意のビット深度を持つ LDR 画像へ変換が可能である。また、二層符号化で用いられている残差画像を利用しない。加えて、異なるビット深度への変換には簡単な線形スケールを用いる。したがって、トーンマッピングを用いた LDR 画像の生成と比較して、符号量の削減と高速な処理が可能となる。

4. 実験および考察

本章では、トーンマッピングにより得られた LDR 画像の符号化、および、LDR 画像の線形スケールが

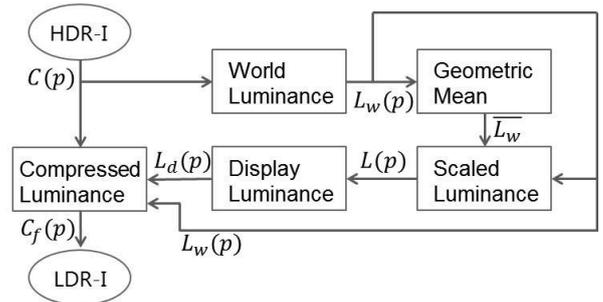


図 3 Photographic Tone Reproduction の処理

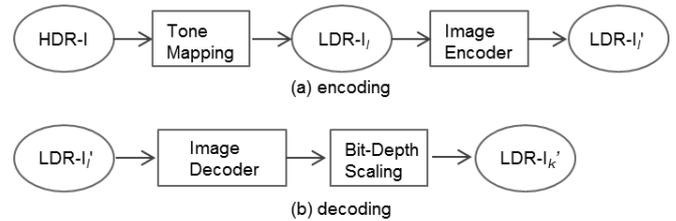


図 4 ビット深度スケラブル符号化

画質に与える影響について考察する。

4.1. 実験手順

- 実験は、BDSC が出力画像の画質に与える影響について、Image Encoder による圧縮の度合いとビット深度の変換による誤差の観点から評価する。図 5 に実験の概要を示す。また、実験の手順は以下の通りである。
- i. HDR-I をトーンマッピングし LDR- I_8 , LDR- I_{16} を生成
 - ii. i で得られた LDR-I をそれぞれの符号量が等しくなるよう Image Encoder により符号化
 - iii. ii で符号化した画像を復号化 (LDR- I_8' , LDR- I_{16}')
 - iv. LDR- I_8' , LDR- I_{16}' をそれぞれ k [bit] に線形スケールし、2 枚の LDR- I_k を得る (Target A, Target B)

実験には図 2 に示す HDR 画像を用いた。また、トーンマッピングには Photographic Tone Reproduction を利用し、トーンマッピングオペレータは Reinhard のグローバルオペレータ [7] を用いた。

4.2. 結果と考察

$k = 16$ とし、Target A と Target B をそれぞれ LDR- I_{16} と比較した際の PSNR を図 6 に示す。図 6 における横軸は手順 (ii) における画像の符号量である。ここで、Image Encoder には JPEG 2000 と JPEG XR [8] を用いた。JPEG 2000 により符号化された Target A と Target B を比較すると、符号量の増加に従い Target B の PSNR が高くなることが確認できる。JPEG XR により符号化した場合も同様の傾向にある。したがって、ビット深度を 16[bit] へ変換するには、低ビット深度の画像を低い圧縮率で符号化するより、高ビット深度の画像を高い圧縮率で符号化するほうが高品質な画像が得られるといえる。JPEG 2000 と JPEG XR の Target B をそれぞれ比較すると、JPEG 2000 で符号化を行った場合に、よ

り高品質な画像が得られている。

$k = 8$ とし、Target A と Target B をそれぞれLDR- I_{16} と比較した際の PSNR を図 7 に示す。ここで、Image Encoder には JPEG 2000 を用いた。bpp が 1 から 11 の範囲では、ビット深度の変換を行っているにも関わらず Target B が高い PSNR を示した。bpp = 12 の場合には Target A の PSNR が突出して高い。これは、Target A の圧縮率が 1/2 と小さい上に、ビット深度の変換を行っていないため、原画像との誤差が僅かであることに起因する。

$k = 12$ とした場合にも同様の実験を行い、Target B が高い PSNR を示す傾向を確認した。

以上の実験から、殆どの場合において Target A に比べ Target B の PSNR が高いという結果が得られた。したがって、BDSC では高いビット深度を持つ LDR 画像を保持しておくことで、線形スケールリングにより高品質にビット深度を変換できると考えられる。

5. おわりに

本稿では、HDR 画像のビット深度スケラブル符号化を提案し、符号化における符号化効率と出力画像の画質に関して実験を行った。実験の結果、高ビット深度を持つ LDR 画像を符号化することにより、符号量を増加することなしに、ビット深度の変換後も高品質な LDR 画像を得られることが示された。

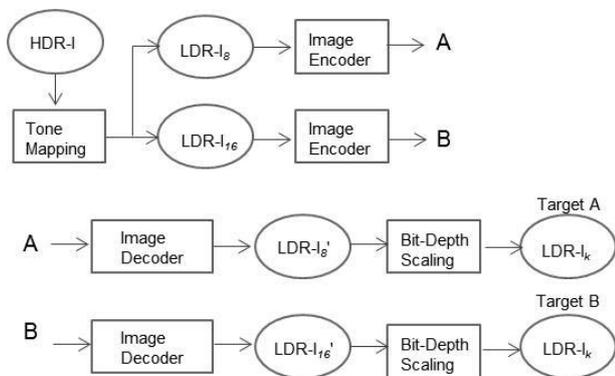


図 5 実験の手順

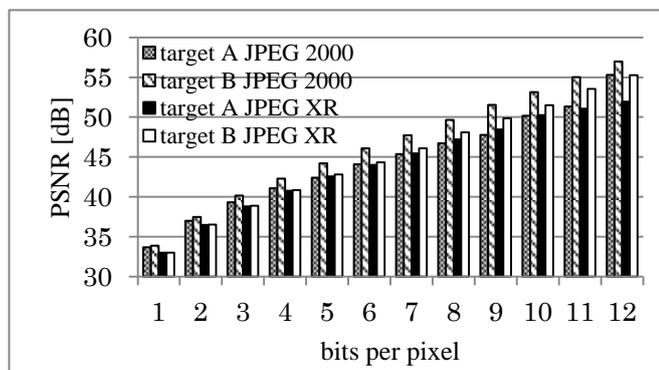


図 6 $k=16$ とした際の BDSC による画質変化

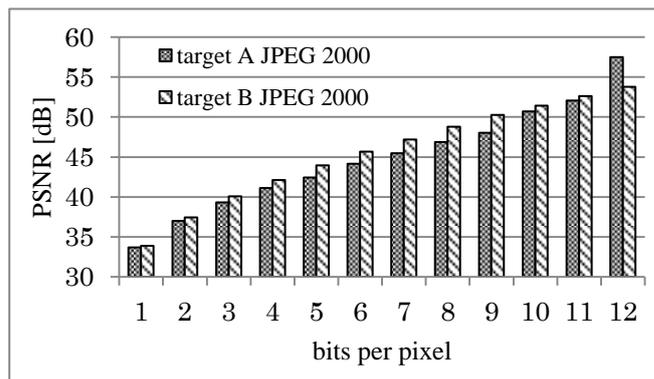


図 7 $k=8$ とした際の BDSC による画質変化

文 献

- 奥田正浩：“HDR 画像 ～色空間から符号化まで～”，映像情報メディア学会誌 Vol.64, No.3, pp.299-305(2010)
- 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)
- 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)
- M. Iwahashi and H. Kiya, “Two Layer Lossless Coding of HDR Images”, Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vancouver(May, 2013)
- ISO/IEC 18477-1, Information technology - Scalable compression and coding of continuous-tone still images
- E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik and P. Debevec : “High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)”, Morgan Kaufmann Publishers Inc., Massachusetts(2005)
- E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda : “Photographic Tone Reproduction for Digital Images”, ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, Vol.21, Issue 3, pp.267-276(July, 2002)
- ISO/IEC 29199-1, Information technology - JPEG XR image coding system : System architecture