

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18104

研究課題名（和文）HDR画像のヒストグラム疎性を考慮した2階層HDR画像符号化

研究課題名（英文）Two-Layer Coding for High Dynamic Range Images Based on Histogram Sparsity

研究代表者

吉田 太一（Yoshida, Taichi）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：60737914

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高ダイナミックレンジ（HDR）画像の二階層符号化において圧縮率向上に寄与する要素技術を提案している。二階層符号化は、HDR画像符号化の国際標準規格JPEG XTに採用されている構造である。本研究成果は、その構造を考慮した要素技術を複数提案しており、それらは二階層構造を大きく損なうことなく導入でき、次世代規格に対して有益な知見を提供している。実験において、提案技術は多い場合では約15%、少ない場合でも数%の圧縮率向上を達成している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、HDR画像の二階層符号化において圧縮率向上に寄与する複数の知見を提供しておりその点で意義がある。本研究では、圧縮率向上に寄与するHDR画像の特性や二階層符号化の特徴などを発見するとともに、二階層符号化でそれらを用いるアルゴリズムを提案した。近年の符号化では、他要素技術を害さない圧縮率向上に寄与する要素技術を複数組み合わせる高圧縮を達成するのが主流である。本研究の知見は、その要素技術に成り得るものであり、二階層符号化の発展に貢献している。

研究成果の概要（英文）：In this research, techniques are proposed for two-layer coding of high dynamic range (HDR) images. The two-layer coding is applied by JPEG XT that is a recent global standard of HDR image coding. The proposed techniques improve compression rates for the two-layer coding as fundamentals and are selectively used without interfering other fundamental ones. They are realized based on the particular property of HDR images and their two-layer coding that is introduced in this research. Therefore, this research contributes the next global standard for HDR image coding. In simulation, they show the improvement of compression rates, which reaches up to 15%, compared with methods without themselves.

研究分野：信号処理、画像処理

キーワード：HDR画像符号化 二階層符号化 ロスレス符号化 トーンマッピング 画像デノイズ

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高ダイナミックレンジ (HDR) 画像は、次世代の画像規格として普及が期待されているが、そのデータ容量の大きさが課題となっている。HDR 画像は、従来の画像 (LDR 画像) よりも取得された輝度の幅が広く、人間の視覚特性とほぼ同等のダイナミックレンジを有する新たな画像規格として提案されている。そのため HDR 画像は、LDR 画像よりも高い表現力を有し、その優位性から今後の普及が期待されている。HDR 画像の撮像デバイスにおいてセンサーが取得した輝度値の幅は、従来デバイスの幅よりも非常に広いので、離散データとして保存するために HDR 画像にむけた OpenEXR などの新たな符号化形式が提案されている。LDR 画像では画素値は一般的に整数 8bit で符号化されているが、HDR 画像では一般的に浮動小数点数 16bit で符号化されており、HDR 画像はより高い階調数を実現している一方で非常に大きな保存データ容量が課題となっている。

そのため、HDR 画像の高圧縮な符号化技術が求められており盛んに研究されている。RGBE や LogLuv, OpenEXR などの符号化形式は、視覚的劣化を出来る限り抑えながら実数値を離散データにし保存することを目的としており圧縮率は高くない。そのため、それらで保存された画像を圧縮する符号化の研究が盛んになされている。また、圧縮率の比較的高い符号化形式の確立を目指して、それらの成果を基に HDR 画像符号化の国際標準規格 JPEG XT の策定が進んでいる。JPEG XT では、これまでの標準化における反省を基に、LDR 画像との互換性を考慮して二階層符号化という方法が採用される予定である。ただし、JPEG XT で HDR 画像の符号化規格は十分ではなく、近年では大量の画像が日々伝送されており、そのため符号化技術は常により高い圧縮率が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、二階層符号化を基にして、HDR 画像に対する高圧縮な符号化技術の実現を目的としている。

二階層符号化は、HDR 画像においてこれからも高い需要が見込まれる。二階層符号化は、圧縮後の保存データから HDR 画像とその LDR 版の画像が選択的に復号できる特性を有している。従来表示デバイスは HDR 画像を表示できないので、それしかない場合は一般的に LDR 画像に変換する技術 (トーンマッピング: TMO) を用いる。HDR 画像表示デバイスは未だ一般的に普及しているとは言い難く、LDR 画像のみを求める一般ユーザに考慮して JPEG XT では上記特性を有する二階層符号化が採用されている。HDR 画像を考慮した撮像と表示のデバイスは未だ普及しておらず、今後数年は過渡期として両画像規格が混在すると予想され、HDR 画像の二階層符号化は今後も求められると考えられる。

本研究目的は、学術的にも社会的にも高い意義が見込まれるものである。背景で示したとおり、HDR 画像は膨大なデータ容量が未だ必要なため、高圧縮なその符号化技術は急務となっている。また上記のとおり、JPEG XT への採用を考慮すると、二階層符号化は当分野において今後も一定の需要が考えられる。本研究の成果は、需要が高いその課題に対して効果的な解決の知見を与え、今後の当分野における学術的發展に寄与するものである。またそれは、圧縮率向上に寄与する要素技術として、次世代標準規格への採用をとおして社会に貢献でき得るものと考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、HDR 画像および二階層符号化の特性を用いて、差分画像のエントロピーを低減することで圧縮率向上を達成している。

差分画像のエントロピー低減は二階層符号化の圧縮率向上に大きく寄与することが知られている。図 1 に HDR 画像の二階層符号化の構造を示す。ここで、逆 TMO とは TMO の逆処理を表し、原 HDR 画像と逆 TMO 後画像との各画素値差分の結果をここでは差分画像と呼ぶ。二階層符号化では、付加データと LDR データを合わせて格納したものが保存データとなる。ここで、LDR データは一般的な LDR 画像を圧縮した後の bit 列なので容量は小さく、データ容量は付加データの bit 列が大半を占める。そのため圧縮率向上には、付加データ容量を低減させることが重要であり、その符号化前信号である差分画像のエントロピー低減はそれに大きく寄与することが構造からもわかる。

本研究では、差分画像のエントロピー低減を目指して、入力 HDR 画像から差分計算までと復号 A から差分計算までの間に導入する技術を提案している。なぜなら、符号化 B を除く他ブロックは、以下に示すとおり制約があるため、新しい技術の導入は難しいからである。TMO では、復号される LDR 画像の画質に影響を大きく及ぼすため、圧縮率向上よりも LDR 画質が優先される。符号化 A では、LDR 画像の従来符号化との互換性を考慮して一般的にそれらが採用されており、JPEG XT でも JPEG ベースの手法が実際に採用されている。そして、復号 A はその逆処理なので選択の余地はない。また符号化 B は、原理的には任意の符号化手法が適用できるが、JPEG XT では汎用性を考慮して JPEG の符号化方法が推奨されている。

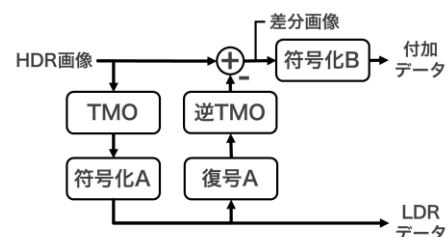


図 1 二階層符号化の構造

4. 研究成果

本報告では、差分画像のエントロピー低減に寄与する提案技術をいくつか紹介しその有効性を比較実験の数値結果を用いて簡単に示す。

まず、ヒストグラム疎性を用いた HDR 画像のビット深度圧縮とそれを二階層符号化に適用するための適応的逆 TMO について説明する。HDR 画像は、背景で示したとおり高い階調数を有しているが、全画素数は有限でありまた光量が近い領域内では近い画素値を有していると考えられる。そのため、一枚の画像において画素値のヒストグラムを算出した場合、ヒストグラムがゼロのビンつまり画素値として用いられていない候補数値が多く、非ゼロの値が飛び飛びに存在しているヒストグラムが疎であることを発見した。そこで、ゼロである候補数値を削減することで、画像に必要なビット深度を低減する手法を提案した。本手法は、可逆であり、二階層符号化において原 HDR 画像に適用することで、差分画像のエントロピーを低減でき HDR 画像の可逆圧縮に寄与するものである。具体的には、画素値の最小値を基準として、そこから順々にゼロビンが発生しないよう最も近いビンからゼロビンに遷移させる変換を画像全体に適用するアルゴリズムを提案している。また、その処理を可逆にするために、それらの遷移幅をサイド情報として保存する必要がある。その最小値はそのままヘッダーに遷移幅はエントロピー符号化を適用して保存している。次に、上記ビット深度圧縮によって HDR 画像が変換されるので、二階層符号化に適用するために適応的逆 TMO を提案している。本手法は、本質的には逆 TMO ではなく画像を別の画像に近似するための適応的関数処理であるが、図 1 の逆 TMO ブロックを置換するのでここではそのように示す。具体的には、前処理によって変換された HDR 画像と復号された LDR 画像の画素値を軸にした空間において、全画素に対して区分された領域内で平均二乗誤差的に最適な線形関数によって近似するアルゴリズムを提案している。ただし、こちらも再現性を担保するために、原点をとおり各区分関数は接続するという制約を課している。各傾きをサイド情報として保存している。表 1 と 2 に、上記二手法を二階層符号化に適用した提案法の可逆符号化における比較実験結果を示す。これらの値は、サイド情報を含めた最終的なデータ容量を一画素当たりのビット数 (bpp) で示したものであり、低いほど容量が小さくなっていることを表している。また、「基準」とは図 1 に示した構造の手法であり、「Opt.」とは下記参考文献[A]の手法、「平均値」は 30 枚の画像の平均値を表している。表からわかるとおり、提案法は両符号化形式において圧縮率向上を実現しており、特に OpenEXR 形式では約 15%の向上を達成している。以上のとおり、HDR 画像の二階層符号化において HDR 画像のヒストグラム疎性という特性を基にした圧縮技術を提案し、圧縮率向上に寄与する知見を示した。

表 1 OpenEXR 画像の圧縮後容量[bpp]

	基準	Opt.	提案法
平均値	26.19	26.14	19.52

表 2 RGBE 画像の圧縮後容量[bpp]

	基準	Opt.	提案法
平均値	15.52	19.60	14.29

次に、周辺画素値からの逆 TMO 後画像の補正について説明する。逆 TMO 後画像は、図 1 で表されているとおり、原 HDR 画像を逆 TMO 関数から算出される代表値に量子化した画像に近似できる。そのため、ある代表値を有する画素の原 HDR 画像における画素値はそのビン内のいずれかの値であり、それを推定し逆 TMO 後画像を補正することで差分画像のエントロピーが低減する。本手法では、そのビン内の分布を仮定し、周辺画素値から算出した予測値を基にその大小関係からビン内の数値を該当画素に割り振るアルゴリズムを提案している。以下に具体的な説明を示す。まず分布に関しては、局所的な画素値集合であり一般的な確率分布に近似しづらいため、一様分布を仮定し余った場合は代表値に振り分けている。次に、予測値は該当画素を中心としたエッジ保持型平滑化を適用して算出しており、それにより該当画素と異なる領域に属している画素の影響を低減している。最後に、各予測値において代表値より大きいものは大きい順に数値を割り振っていき、小さいものも小さい順に同様にしている。これは、周辺画素が代表値よりも大きい場合は、該当画素も本来は代表値より大きい画素値であったものが代表値に丸め込まれたと予想できるからである。本手法は、用いる TMO 関数が規定されていれば逆 TMO 後画像のみから再現可能でありサイド情報の保存は必要ない。表 3 に、本手法を二階層符号化に適用した提案法の可逆符号化における比較実験結果を示す。ここで数値は、bpp で表されており、本手法を導入していない場合とした場合の差分値である。また、「平均値」は各符号化形式の画像 30 枚の平均を示している。結果の数値がマイナスになっているので、本手法を導入することで最終的なデータ容量が低減されており、本手法が圧縮率向上に寄与していることがわかる。以上のとおり、HDR 画像の二階層符号化における劣化画像が生成されるまでの過程を基にした原 HDR 画像推定技術を提案し、圧縮率向上に寄与する知見を示した。

表 3 手法 2 導入による変化量[bpp]

	OpenEXR	RGBE
平均値	-0.28	-0.14

最後に、逆 TMO による誤差の拡大を低減するバイアス成分補正について説明する。本手法では、TMO は一般的に用いられている global TMO に閉じている。雑音を含んだある画像に対して TMO を適用した場合、雑音の分布が非線形処理である TMO によって歪み、その期待値が TMO 前後によって異なることを発見した。本手法では、そのずれをバイアス成分と呼び、それらを推定し補正するアルゴリズムを提案している。本現象は、HDR 画像の二階層符号化においても発生しており、LDR 画像の符号化復号によって必然的に符号化誤差が発生し、その後の逆 TMO によってバイアス成分による誤差拡大が起こる。それにより、逆 TMO 後画像の各代表値を有する画素集合がバイアス成分の幅だけ原 HDR 画像とそれぞれずれるため、差分画像のエントロピーを増加させ圧縮率を低下させる。そこで、用いられている TMO 関数と誤差の確率分布を基にベイズ推定を用いてバイアス成分を推定し補正する手法を提案した。具体的には、ベイズ推定を用いた理論展開の結果、逆 TMO 後画像において同じ画素値を有する画素の集合を設定し、その画素集合における誤差のバイアス成分は誤差の確率分布に TMO 関数の当該局所領域を適用したものの期待値として導出できることを示している。ここで、誤差の確率分布は、誤差が符号化復号による量子化誤差であることから、画像全体としてガウス分布に従うと考えられる。そのため、画像全体で平均ゼロのガウス分布であると仮定し、その分散値を実際の誤差の値を基に最小二乗法により近似して算出、その値をサイド情報として保存している。また、画素集合の要素数が少ないなどの原因で、実際の確率分布が設定したガウス分布と大きく異なる場合は、その画素集合に対する本補正は悪影響をおよぼすことが確認された。そこで、ある画素集合のみに本補正を適用した場合としない場合を比較し、効果が確認される場合にのみ適用する適応的アルゴリズムを導入している。ここで、適用したかどうかの各 1bit のラベルはサイド情報として符号化し保存する。表 4 に、本手法を二階層符号化に適用した提案法の非可逆符号化における比較実験結果を示す。ここで、PSNR は復号画像の画質評価指標の数値を dB で表しており高い方が高画質であり、rate は最終的なデータ容量を bpp で表して、それぞれ本手法を導入していない場合とした場合の差分値である。また、「低圧縮」と「高圧縮」はそれぞれ異なる圧縮率で符号化した画像 10 枚の平均を示している。非可逆圧縮なので、画質比較を公平におこなうため、それぞれの手法において出来る限り最終的なデータ容量が等価となるように圧縮率の調整を行った。まず低圧縮から、rate において提案法の方は圧縮率が高くなっており、その上で PSNR において優っていることから、本手法導入による画質向上が確認できる。また高圧縮では、比率から低圧縮時ほどの効果は見込めないものの rate の差に対して一定の画質向上が確認できる。表より、同圧縮率における画質向上の結果をおおして、本手法が圧縮率向上に寄与していることがわかる。以上のとおり、HDR 画像の二階層符号化における逆 TMO による誤差拡大を補正する手法を提案し、圧縮率向上に寄与する知見を示した。

表 4 手法 3 導入による変化量

	PSNR [dB]	rate [bpp]
低圧縮	3.04	-0.019
高圧縮	5.10	0.098

参考文献

- [A] A. Koz and F. Dufaux, "Methods for improving the tone mapping for backward compatible high dynamic range image and video coding," *Signal Process.-Image Commun.*, vol. 29, no. 2, pp. 274-292, 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yo Umeki, Taichi Yoshida, and Masahiro Iwahashi	4. 巻 E101-D
2. 論文標題 Co-propagation with distributed seeds for salient object detection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Inf. & Syst.	6. 最初と最後の頁 1640-1647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2017EDP7413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sayaka Minewaki, Taichi Yoshida, Yoshinori Takei, Masahiro Iwahashi, and Hitoshi Kiya	4. 巻 8
2. 論文標題 Noise bias compensation for tone mapped noisy image using prior knowledge	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APSIPA Trans. Signal Inf. Process.	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/ATSIP.2018.29	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sayaka Minewaki, Masahiro Iwahashi, Hiroyuki Kobayashi, Taichi Yoshida, Hitoshi Kiya	4. 巻 2017
2. 論文標題 Near lossless coding of sparse histogram images based on zero-skip quantization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Multimed. Tools Appl.	6. 最初と最後の頁 1~19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11042-017-5082-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fairoza Amira Binti Hamzah, Taichi Yoshida, Masahiro Iwahashi	4. 巻 58
2. 論文標題 Non-separable four-dimensional integer wavelet transform with reduced rounding noise	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Signal Process. Image Commun.	6. 最初と最後の頁 123 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.image.2017.07.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taizo Suzuki, Taichi Yoshida	4. 巻 27
2. 論文標題 Lower Complexity Lifting Structures for Hierarchical Lapped Transforms Highly Compatible With JPEG XR Standard	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.	6. 最初と最後の頁 2652 ~ 2660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSVT.2016.2595326	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Yoshida, Masahiro Iwahashi, Hitoshi Kiya	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 Two-Layer Lossless Coding for High Dynamic Range Images Based on Range Compression and Adaptive Inverse Tone-Mapping	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Trans. Fundamentals.	6. 最初と最後の頁 259 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Isana Funahashi, Yo Umeki, Taichi Yoshida, and Masahiro Iwahashi
2. 発表標題 Safety-level estimation of aerial images based on convolutional neural network for emergency landing of unmanned aerial vehicle
3. 学会等名 APSIPA Annual Summit Conf. 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fairoza Amira Binti Hamzah, Taichi Yoshida, Masahiro Iwahashi
2. 発表標題 Non-separable quadruple lifting structure for four-dimensional integer wavelet transform with reduced rounding noise
3. 学会等名 IEEE Int. Conf. Acoustics Speech Signal Process. (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Fairoza Amira Binti Hamzah, Taichi Yoshida, Masahiro Iwahashi
2 . 発表標題 Four-dimensional image compression with region of interest based on non-separable double lifting integer wavelet transform
3 . 学会等名 Asia-Pacific Signal Inf. Process. Association Annual Summit Conf. (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 You Umeki, Taichi Yoshida, and Masahiro Iwahashi
2 . 発表標題 Estimation method of initial labels for propagation-based saliency detection
3 . 学会等名 Asia-Pacific Signal Inf. Process. Association Annual Summit Conf. 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Daiki Kimura, Akira Kondo, Taichi Yoshida, and Masahiro Iwahashi
2 . 発表標題 High dynamic range imaging based on camera response estimation and multi-gradients fusion
3 . 学会等名 Asia-Pacific Signal Inf. Process. Association Annual Summit Conf. 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Masahiro Iwahashi, Tin Moe Aye, Taichi Yoshida, and Hitoshi Kiya
2 . 発表標題 Subset noise bias compensation for tone-mapping and up-scaling of JPEG images
3 . 学会等名 IEEE Int. Symp. Circuits Syst. 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 坂井孝生, 井川大輔, 吉田太一, 岩橋政宏
2. 発表標題 Multi-exposure image fusion for noise free image based on pre-learned dictionary and sparse representation
3. 学会等名 IEICE 第31回信号処理シンポジウム
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----