

多重露出画像を用いた高品質画像生成法の性能評価

瀬尾 光希[†] 木下 裕磨[†] 貴家 仁志[†]

[†] 首都大学東京大学院システムデザイン研究科 〒191-0065 東京都日野市旭ヶ丘 6-6

E-mail: [†]{seo-kouki, kinoshita-yuma}@ed.tmu.ac.jp, ^{††}kiya@tmu.ac.jp

あらまし 一般に、多重露出画像を用いた高品質画像生成法として、2つのアプローチが知られている。一つは、多重露出画像から HDR 画像を生成した後トーンマッピングするアプローチであり、他の一つは、多重露出合成法により直接高品質な LDR 画像を生成するアプローチである。それらは、ほぼ同様の入力から高品質な画像を生成する手法であるが、これまで、それらの高画質画像生成手法の性能は、各アプローチごとに比較評価されることが一般的であり、両アプローチ間での比較評価は十分に行われていない。本稿では、性能評価実験によって、両アプローチの結果画像を画質、色、およびコントラストの逆転に関しての3つの評価尺度と計算コストの観点から比較し、それぞれのアプローチの利点と欠点を明らかにした。

キーワード HDR 画像, トーンマッピング, 多重露出画像合成

Performance evaluation of high-quality image generation methods using multi-exposure images

Kouki SEO[†], Yuma KINOSHITA[†], and Hitoshi KIYA[†]

[†] Department of Computer Science, Tokyo Metropolitan University 6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

E-mail: [†]{seo-kouki, kinoshita-yuma}@ed.tmu.ac.jp, ^{††}kiya@tmu.ac.jp

Abstract There are two approaches using multi-exposure images for producing well-exposed LDR images. One is to tone-map an HDR image generated from multi-exposure images. The other is to directly generate an LDR image from multi-exposure images by using a multi-exposure fusion method. These approaches are carried out with similar inputs, but the difference of their performances between the approaches has not been evaluated enough. In this paper, we aim to compare two approaches in terms of three criteria : TMQI, color distortion, contrast reversal.

Key words HDR imaging, Tone mapping, Multi-exposure fusion

1. はじめに

カメラによって得られる画像、すなわち、ローダイナミックレンジ (Low Dynamic Range, LDR) 画像の持つ輝度のダイナミックレンジは、現実のシーンが持つダイナミックレンジに比べ非常に狭い。そのため、カメラによって撮影された画像は、人間が知覚している輝度のダイナミックレンジを忠実に表現できていない。現実シーンの広い輝度のダイナミックレンジを記録した画像を獲得するため、これまでに数多くの輝度のダイナミックレンジに着目した高品質画像生成法が研究されている。

そのような高品質画像生成法は、同一シーンを異なる露出条件で撮影した複数枚の LDR 画像 (多重露出画像) を入力として用いることが一般的であり、大きく2つのアプローチに分けられる。第一のアプローチは、ハイダイナミックレンジ (High

Dynamic Range, HDR) 画像を生成した後に、その HDR 画像をトーンマッピングすることによって高品質な画像を生成するものである [1]~[6]。HDR 画像は、現実シーンの広いダイナミックレンジを記録した画像であり、多重露出画像から推定したカメラ応答関数 (Camera Response Function, CRF) に基づき、現実シーンの放射輝度を計算することで獲得される。しかし、現在一般に普及している LDR ディスプレイでは HDR 画像を直接表示できない。そのため、トーンマッピング (Tone Mapping, TM) と呼ばれる処理によって、HDR 画像の情報を高品質に記録した LDR 画像を HDR 画像から生成する必要がある。加えて、このアプローチには、CRF の推定のため、多重露出画像を撮影する際に用いた露光時間の情報が必要である。

第二のアプローチは、多重露出画像合成 (Multi-Exposure Fusion, MEF) を行い、高品質な LDR 画像を生成するもので

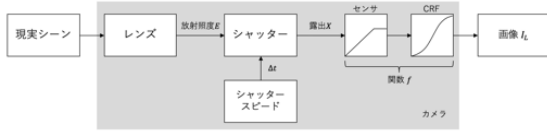


図 1 デジタルカメラによる画像撮影

ある [7]~[12]. 多重露出画像合成によるアプローチでは, HDR 画像を生成することなしに, 多重露出画像から高品質な LDR 画像を直接合成する. そのため, CRF を推定する必要がなく, 多重露出画像を撮影する際に用いた露光時間の情報も不要となる.

これらの 2 つのアプローチに基づき, 数多くの高品質画像生成手法がこれまでに提案されてきた. しかしながら, それら高画質画像生成手法の性能は各アプローチごとに比較されることが一般的であり, アプローチ間で各手法を比較することは, これまでにほとんど行われていない.

本稿では, 画質および処理時間の観点から 2 つのアプローチを実験的に比較する. 画質の評価実験では, 8 つの高品質画像生成手法により生成された画像を, TMQI [13], 色相差 ΔH [14], およびコントラストの逆転 [15] という 3 つの客観評価尺度を用いて比較する. 画質評価実験により, 多重露出画像合成によるアプローチは TMQI スコアに関して優れており, HDR 画像生成とトーンマッピングを用いるアプローチは色相差およびコントラストの逆転に関して優れていることが明らかとなる. 処理時間の評価実験により, 最も高い TMQI スコアを示した Nejati らの多重露出画像合成法 [8] が, 最も高速に高品質画像を生成できることが明らかとなる.

2. 準備

ここでは, 準備として, 同一シーンを異なる露光条件で撮影する多重露出画像について簡潔に説明する. また, それら複数の多重露出画像を用いた高品質画像生成法である HDR 画像生成とトーンマッピングに基づくアプローチ (アプローチ 1), および多重露出画像合成法の基づくアプローチ (アプローチ 2) の概要を述べる.

2.1 多重露出画像

高品質画像生成の際に, カメラセンサのダイナミックレンジの狭さを補うため複数枚を用いる多重露出画像は, 複数の露出条件で同一シーンを撮影することで取得できる. 図 1 に, デジタルカメラを用いた代表的な画像撮影の流れを示す. センサ照射される光は, シャッターが開いている時間 Δt の間累積される. この累積される光の, 単位面積あたりのエネルギーを露出 X とする. 静的なシーンであれば, 露出 X は, 放射照度 E とシャッター速度 Δt を用いて, 以下のように表される.

$$X(p) = E(p)\Delta t \quad (1)$$

ここで, $p = (x, y)$ は点 (x, y) における画素を表す. 撮影される画像 I_L の画素値 $I_L(p) \in [0, 1]$ は, 以下のように与えられる.

$$I_L(p) = f(X(p)) \quad (2)$$

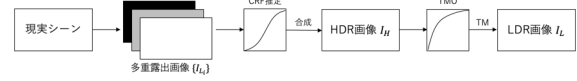


図 2 HDR 画像をトーンマッピングして高品質画像を生成するアプローチ

ここで, f はセンサの飽和を表す関数と CRF の合成関数である. CRF は, 個々のカメラが出力画像 $I_L(p)$ の品質を向上させるために行う補正処理を表す.

撮影された画像の明るさは, 露出の大きさによって決定される. 一般的に多重露出画像の撮影では, 様々なカメラパラメータのうちシャッター速度のみを変化させ露出を制御する. 本研究でも同様に, シャッター速度を除くカメラパラメータは固定であるとして取り扱う.

露出の大きさは, 露出値 (Exposure Value, EV) と呼ばれる数値を用いて表される. ここで, 個々のカメラにより決定されるシーンに対して適切な露出値を $0[\text{EV}]$ とし, その時のシャッター速度を Δt_{v_0} とする. このとき, 露出値 $v_i[\text{EV}]$ で画像を撮影する際のシャッター速度 Δt_{v_i} は,

$$\Delta t_{v_i} = 2^{v_i} \Delta t_{v_0} \quad (3)$$

として与えられる. 式 (1) から式 (3) を用いると, 露出値 $v_i[\text{EV}]$ で撮影される画像 I_{L_i} は以下のように表される.

$$I_{L_i}(p) = f(E(p)\Delta t_{v_i}) = f(2^{v_i} E(p)\Delta t_{v_0}) \quad (4)$$

2.2 HDR 画像生成とトーンマッピング

図 2 に, 多重露出画像を用いて HDR 画像を生成し, その後トーンマッピング処理を施すことで, 高品質な LDR 画像を生成するアプローチの概要を示す. 本稿では, このアプローチをアプローチ 1 とする. このアプローチ 1 は, 以下の手順によって行われる.

- (1) 複数枚の多重露出画像と画像撮影時のそれぞれのシャッター速度の情報から, センサの飽和を表す関数と CRF の合成関数 f を推定する.
- (2) 推定した関数 f を用いて, 多重露出画像の輝度値から放射照度をそれぞれ算出する.
- (3) 算出された放射照度の重み付き平均により HDR 画像を得る.
- (4) 生成された HDR 画像に対して, トーンマッピング処理を施し, 高品質な LDR 画像を生成する.

ここで, 関数 f の推定を行うために必要なシャッター速度の情報を近似する手法も存在する [2]. また, トーンマッピングは, HDR 画像のもつ多くの情報を保持したまま, 従来のディスプレイで表示可能な LDR 画像へ変換する処理である. アプローチ 1 によって生成された LDR 画像は, カメラを用いて直接得られた LDR 画像に比べ, 白とびや黒つぶれを抑制することができる.

2.3 多重露出画像合成

多重露出画像合成は, HDR 画像を介さず, 多重露出画像を直接合成することで, 高品質な画像を生成するアプローチで

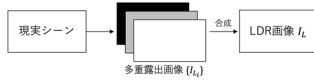


図3 多重露出画像合成によって高品質画像を生成するアプローチ

ある。本稿では、このアプローチをアプローチ2とする。図3に、このアプローチの概要を示す。代表的な多重露出画像合成法では、多重露出画像の重み付き平均により高品質画像を得る[7],[8]。アプローチ1と比較して、アプローチ2は、関数 f の推定やトーンマッピング処理が必要ない。そのため、シャッタースピードの情報を必要とせず、多重露出画像のみから少ない計算コストで高品質な画像を得られる。また、一方、より発展的な手法では、結果画像のさらなる高品質化のため、高い計算コストが必要なものもある[9]~[12],[16]。

2.4 問題設定

アプローチ1とアプローチ2は、これまで数多く研究されてきた。それらの高品質画像生成手法の性能は、各アプローチごとに比較評価されることが一般的であり、アプローチ間の比較はこれまでほとんど行われていない。そのため、各アプローチの利点と欠点が十分明らかにされていなかった。そこで、本研究では、2つのアプローチにより生成された画像を客観評価尺度を用いて比較することにより、それぞれアプローチの利点と欠点を画質、色、計算コストの観点から実験的に明らかにする。

3. 代表的な高品質画像生成法

ここでは、前節で述べた高品質画像生成法の2つのアプローチそれぞれについて、これまでに提案された代表的な手法を簡単に要約する。

3.1 HDR 画像生成

HDR 画像生成は、多重露出画像から関数 f を推定し、それに基づいてHDR 画像 $I_H \propto E$ を生成する。Debevecら[1]は、多重露出画像それぞれの正確なシャッタースピードを用いて関数 f の推定を行う手法を提案した。この手法では、関数 f が滑らかな単調増加関数であると仮定し、関数 f の逆関数を推定する。ただし、この手法はノイズに対する頑健性がないため、予測に用いる多重露出画像にノイズが含まれないことが必要である。Mitsunagaら[2]は、関数 f が単調増加な多項式関数であるとの仮定の下、関数 f を推定する手法を提案した。加えて、この手法では、関数 f の推定に必要な正確な露出値の比を、おおよそのシャッタースピードから計算することができる。

これらの手法のいずれかを用いて関数 f の推定を行った後、多重露出画像の画素値 $I_{L_i}(p)$ から放射照度 $E_i(p) = f^{-1}(I_{L_i}(p))/\Delta t_{v_i}$ を算出し、以下のようにそれらの重み付き平均を計算することで、最終的なHDR 画像 $I_H(p)$ を得る。

$$I_H(p) = \frac{\sum_{i=1}^N w(I_{L_i}(p))E_i(p)}{\sum_{i=1}^N w(I_{L_i}(p))} \quad (5)$$

ここで、 N は合成する画像の枚数であり、 $w(\cdot)$ は重みである。Debevecら[1]では、 $w(\cdot)$ をハット関数に基づき計算する。一方、Mitsunagaら[2]では、 $w(\cdot)$ を信号雑音比

(SNR)に基づき計算する。

3.2 トーンマッピング

トーンマッピング処理は、トーンマッピングオペレータ (Tone Mapping Operator, TMO) と呼ばれ、HDR 画像をLDR 画像に変換する。トーンマッピング手法は、グローバルトーンマッピングとローカルトーンマッピングの2種類に大別される。グローバルトーンマッピングは、すべての画素に対し、単一のトーンカーブを用いて輝度変換を行う。一方、ローカルトーンマッピングは、HDR 画像の局所的なコントラストをより保持するため、局所領域ごとに異なるトーンカーブを用いて輝度変換を行う。一般に、ローカルトーンマッピングは、グローバルトーンマッピングより複雑な処理を必要とするため、高い計算コストがかかる。

代表的なグローバルトーンマッピング法として、Reinhardらの手法[3]およびDragoらの手法[4]がある。Reinhardらは、ゾーンシステムの考え方に基づいて、「key value」と呼ばれるパラメータによって輝度の幾何平均を調整した上で、分数関数によってトーンマッピングを行う手法を提案した。この手法は、その処理の簡単さに対し高品質な結果を得られることから広く用いられている。Dragoらの手法では、画像の暗所および明所の輝度変換を、小さい底を持つ対数関数および大きい底を持つ対数関数によりそれぞれ行う。

一方、代表的なローカルトーンマッピング法には、Reinhardらの手法[3]、Fattalらの手法[5]、Guらの手法[6]がある。Reinhardらの手法は、彼らのグローバルトーンマッピング法の改良版であり、アナログ現象に用いられる「覆い焼き」と「焼き込み」を局所領域ごとに擬似的に行う。Fattalらの手法では、入力画像の輝度勾配の大きい部分をより強く圧縮するために、様々なスケールにおいてエッジ検出を行う。その後、ポアソン方程式に基づいて、トーンが圧縮されたLDR 画像の輝度値を算出する。Guらの手法では、入力画像をベースレイヤと複数のディティールレイヤに分解し、それぞれのトーンを圧縮した後に、それらを足し合わせることで結果画像を得る。

3.3 多重露出画像合成

多重露出画像合成は、HDR 画像を生成することなく、次式により、多重露出画像から高品質なLDR 画像を直接生成する。

$$I_L = F(I_{L_1}, I_{L_2}, \dots, I_{L_N}) \quad (6)$$

ここで、 F は多重露出画像合成の処理を表す関数である。このアプローチはHDR 画像の生成を行わないことから、その合成処理において多重露出画像撮影時のシャッタースピードを必要としない。

Mertensらの手法[7]では、多重露出画像をラプラシアンピラミッドに分解し、それらの重み付き平均によって結果画像を得る。合成時の重みは、コントラスト、彩度およびWell-exposednessの尺度を用いて計算する。Nejatiらの手法[8]では、エッジ保存平滑化フィルタを用いて、画像をベースレイヤとディティールレイヤに分解する。そして、Well-exposednessに基づく重みを用いてそれぞれのレイヤを重み付き平均によって合成する。その後、2つのレイヤの和を計算し結果画像を得る。Bruceら

表 1 実験に用いた手法

アプローチ 1		アプローチ 2
HDR 画像生成	TM	
Debevec [1]	Reinhard(Global) [3]	Mertens [7]
Mitsunaga [2]	Drago [4]	Nejati [8]
	Fattal [5]	Bruce [10]
	Gu [6]	Ma [9]

の手法 [10] では、多重露出画像の対数領域における局所エンタロピーに基づき各画像に対する重みを計算し、重み付き平均によって画像の合成を行う。Ma らの手法 [9] では、画像を信号強度、信号構造および平均強度という 3 つの独立な構成要素に分解し、重み付き平均を用いてそれぞれ合成する。そして、それぞれ合成された 3 つの構成要素から、画像を再構築することで結果画像を得る。

4. 実験

高品質画像を生成する 2 つのアプローチそれぞれの利点と欠点を明らかにするため、表 1 に示す高品質画像生成手法によって生成される画像の品質を、3 つの客観評価指標を用いて評価した。

本実験では、式 (4) に基づき、1 枚の HDR 画像 [17] から擬似的に 9 枚の多重露出画像 ($-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4$ [EV]) を次式のように生成し、入力として利用した。

$$I_{L_i}(p) = f\left(\frac{2^{v_i}}{G(I_H)}I_H(p)\right) = \left(\frac{2^{v_i}}{G(I_H)}I_H(p)\right)^{1/2.2} \quad (7)$$

ここで、 $G(I_H)$ は、HDR 画像 I_H の輝度の幾何平均を表し、関数 f には $\gamma = 2.2$ のガンマカーブを用いた。ここで、シャッター速度 Δt_{v_i} は、 $2^{v_i}/G(I_H)$ に相当する。図 5 に、本実験で用いた 9 枚の多重露出画像を示す。

4.1 評価基準

画質評価には、以下の評価尺度を用いた。

- TMQI [13]
- 色相差 ΔH [14]
- コントラストの逆転 [15]

TMQI [13] は、HDR 画像からトーンマッピングにより生成された LDR 画像の品質を、元の HDR 画像をリファレンスとして評価する客観評価尺度である。本実験では、入力多重露出画像を HDR 画像から生成しているため、多重露出画像合成法により合成された画像の品質評価にも TMQI を利用できる。TMQI のスコア Q は、構造的類似度を示すスコアである S 、および、画像における輝度分布の統計的な自然さを示すスコアである N を組み合わせて計算される。 Q 、 S 、 N はそれぞれ区間 $[0, 1]$ の値を取り、1 に近いほど生成された LDR 画像が元の HDR 画像を再現していることを示す。

色相差 ΔH は、CIEDE2000 [14] において定義される 2 色間の色相の差を示すスコアである。色相差 ΔH は、0 に近いほど、2 色間の色相に差がないことを示す。本実験では、元の HDR 画像をリファレンスとして用いることで、生成された LDR 画像の色の再現度に関する評価に使用した。

表 2 CRF 推定法の比較

CRF 推定法	TMQI(Q)	ΔH
Debevec	0.9177	0.7927
Mitsunaga	0.9190	0.7902

表 3 TMO の比較

TMO	TMQI(Q)	TMQI(S)	TMQI(N)	ΔH
Reinhard (Global)	0.9177	0.8671	0.6754	0.7927
Drago	0.9113	0.8587	0.6497	1.1021
Fattal	0.7855	0.8416	0.0544	0.7163
Gu	0.9494	0.8608	0.8960	0.7524

表 4 多重露出画像合成法に関する比較

MEF 手法	TMQI(Q)	TMQI(S)	TMQI(N)	ΔH
Mertens	0.9141	0.8501	0.6823	1.4015
Nejati	0.9616	0.8606	0.9815	1.2271
Bruce	0.9233	0.8473	0.7459	1.0547
Ma	0.9534	0.8517	0.9411	1.8827

コントラストの逆転は、Aydin らの手法 [15] において使用される尺度である。この尺度は、リファレンスである HDR 画像の画素値の大小関係と、生成された LDR 画像の画素値の大小関係を比較することで、生成された LDR 画像におけるコントラストの逆転を評価する。コントラストの逆転が少ないほど、生成された LDR 画像は、リファレンスである HDR 画像の画素値の大小関係を忠実に再現していることを示す。

4.2 予備実験

2 つの方式を公平に比較するために、まず各方式に対して予備実験を行った。

4.2.1 CRF 推定法の比較

アプローチ 1 において、CRF 推定の精度が結果画像の品質に与える影響を評価した。図 4 に、9 枚の多重露出画像を用いて、Debevec らおよび Mitsunaga らの手法により推定された関数 f^{-1} をそれぞれ示す。このとき、多重露出画像のシャッター速度の情報は、すべて正確なものを用いた。図 4 より、関数 f として $\gamma = 2.2$ のガンマカーブを用いた場合、Mitsunaga らの手法を用いた方が CRF 推定の精度が高いことがわかる。表 2 に、この 2 つの手法それぞれにより生成された HDR 画像から、Reinhard らの手法を用いてトーンマッピングした LDR 画像の品質を示す。表 2 より、CRF 推定の精度が高い場合、TMQI と ΔH の両方が改善していることがわかる。このことから、CRF 推定の精度向上は、トーンマッピングによって生成される LDR 画像の品質向上にも寄与するといえる。

4.2.2 TMO の比較

次に、アプローチ 1 において、TMO の性能が結果画像の品質に与える影響を評価した。本実験では、9 枚の多重露出画像から Debevec らの手法を用いて HDR 画像を生成し、表 1 に示す TMO によって高品質な LDR 画像を生成した。それら結果画像の TMQI および ΔH スコアを表 3 に示す。表 3 より、グローバル TMO(Reinhard, Drago) に対する TMQI の N のスコアは、0.6 から 0.7 の値をとっているのに対し、ローカル TMO(Fattal, Gu) は手法によってそのスコアに大きな差があることがわかる。これは、ローカルトーンマッピングに含まれる局所領域ごとの処理が、結果画像の輝度分布の自然さに大き



図4 実験に用いた多重露出画像

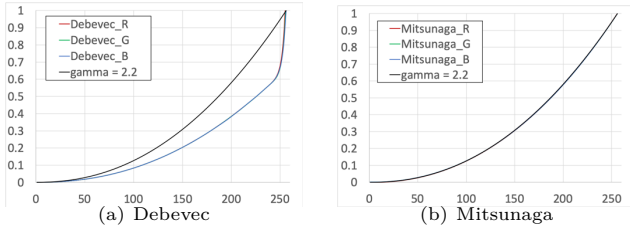


図5 関数 f^{-1} の推定結果

表5 2つのアプローチの性能比較 (-2, 0, 2[EV] の3枚での合成)

	TMQI(Q)	TMQI(S)	TMQI(N)	ΔH
アプローチ1 (Reinhard)	0.9140	0.8583	0.6669	1.1419
アプローチ1 (Fattal)	0.8443	0.8462	0.2908	1.1391
アプローチ2	0.9562	0.8568	0.9510	1.2468

表6 2つのアプローチの性能比較 (-4, 0, 4[EV] の3枚での合成)

	TMQI(Q)	TMQI(S)	TMQI(N)	ΔH
アプローチ1 (Reinhard)	0.9166	0.8645	0.6728	0.9306
アプローチ1 (Fattal)	0.7824	0.8389	0.0475	0.8519
アプローチ2	0.9593	0.8613	0.9641	1.1849

表7 2つのアプローチの性能比較 (-4, -2, 0, 2, 4[EV] の5枚での合成)

	TMQI(Q)	TMQI(S)	TMQI(N)	ΔH
アプローチ1 (Reinhard)	0.9178	0.8674	0.6758	0.8164
アプローチ1 (Fattal)	0.7845	0.8413	0.0519	0.7352
アプローチ2	0.9611	0.8573	0.9848	1.213

な影響を与えることを表す。また、ローカルトーンマッピングによって生成された画像は、グローバルトーンマッピングによるものに比べ、色相差 ΔH が小さい。

4.2.3 多重露出画像合成法の比較

9枚の多重露出画像から表1に示す多重露出画像合成法を用いてLDR画像を生成した場合のTMQIおよび色相差 ΔH スコアを表4に示す。表4より、以下のことが読み取れる。

- すべてのTMQIスコアにおいて、Nejatiらの手法が優れている。
- 特に、Nejatiらの手法により生成された画像は、他の手法より大幅に高いTMQI(N)スコアを示す。このことから、Nejatiらの手法は、輝度分布の自然な画像を生成できるといえる。
- 色相差 ΔH においては、Bruceらの手法が優れている。Bruceらの手法は、現実シーンの色相を高精度に再現した画像を生成可能であることがわかる。

4.3 2つのアプローチの比較

4.3.1 ΔH および TMQI の比較 (9枚)

表2から4を比較すると、アプローチ2は、アプローチ1と比べ、TMQIに関して優れた画像を生成できる傾向にあることがわかる。一方、色相差 ΔH を比較すると、アプローチ1が、アプローチ2より高いスコアを示した。これは、推定した関数 f^{-1} の適用が、CRFの非線形に起因する色相の歪みを補正するためだと考えられる[18]。

4.3.2 ΔH および TMQI の比較 (3枚と5枚)

条件の悪い多重露出画像が入力として与えられた際の性能を比較するため、3枚の多重露出画像 (-2, 0, 2[EV] および -4, 0, 4[EV])、および5枚の多重露出画像 (-4, -2, 0, 2, 4[EV]) をそれぞれ入力として性能評価を実施した。ここで、アプローチ1において、HDR画像生成にはDebevecらの手法を用い、トーンマッピングにはReinhardらの手法とFattalらの手法を用いた。また、多重露出画像合成法は、Nejatiらの手法を用いた。表5から7より、以下のことが確認できる。

- アプローチ1は、入力多重露出画像の条件によらず、アプローチ2より優れた色相差 ΔH スコアを持つ。
- アプローチ2では、どの入力多重露出画像が与えられた場合でも色相差 ΔH スコアにほとんど差が見られない。
- アプローチ1では、入力多重露出画像が広い輝度のレンジを記録している場合により良い ΔH スコアを示す。
- TMQIにおいては、入力多重露出画像の条件に関わらず、アプローチ2の結果画像が優れている傾向にある。

4.3.3 コントラスト逆転の有無

5枚の多重露出画像 (-4, -2, 0, 2, 4[EV]) から2つのアプローチで生成された画像を、コントラストの逆転の観点からそれぞれ評価した結果を図6に示す。ここで、図6(b), (d), (f)において赤く色のついている領域が、対応する画像のコントラストの逆転が起きている領域を表す。図6より、アプローチ2によって生成された画像は、アプローチ1によって生成されたものに比べ、多くの領域でコントラストの逆転が発生している。これは、アプローチ1では、シャッター速度 Δt_{v_i} を用いて入力多重露出画像の輝度を補正するのに対し、アプローチ2では、そのような補正を行わないまま合成することに起因すると考えられる。

4.3.4 計算コストの比較

2つのアプローチを計算コストの観点から比較するため、それぞれの手法にかかる処理時間を計測した。処理時間の計測は、表8に示す性能をもつコンピュータにより実施した。

表9に、比較手法それぞれによって高品質画像を生成する際の処理時間を示す。表9より、どの手法でも同様に、入力多



図 6 5 枚で合成した高品質画像のコントラストの逆転部分

表 8 実験に使用したコンピュータの性能

プロセッサ	Intel Core i5 1.6GHz
メモリ	8GB
OS	macOS Mojave 10.14.6

表 9 高品質画像生成にかかる処理時間 [s]

入力多重露出画像		3 枚 (-2,0,-2[EV])	5 枚 (-4,-2,0,2,4[EV])	9 枚 (-4~4[EV])
アプローチ 1	Reinhard (Global)	1.336	1.787	2.645
	Drago	1.434	1.888	2.745
	Fattal	3.951	4.383	5.413
	Gu	145.536	150.933	141.698
	アプローチ 2	Mertens	1.077	1.588
Nejati		0.534	0.774	1.107
Bruce		9.908	15.911	28.319
Ma		10.477	15.784	27.460

重露出画像が多くなるにつれ、処理時間が長くなるのがわかる。入力多重露出画像枚数が同じである条件の下で各手法を比較すると、最も高い TMQI スコアを示した Nejati らの多重露出画像合成法が、最も高速であるという結果が得られた。これは、アプローチ 2 において CRF の推定が必要ないことに加え、Nejati らの手法が高速ガイデットフィルタの使用を可能とするからである。

5. おわりに

本稿では、多重露出画像を用いて高品質画像を生成する 2 種類のアプローチを比較することで、各アプローチの利点と欠点を明らかにした。HDR 画像生成とトーンマッピングを用いるアプローチは色相差の観点から優れた傾向にあり、多重露出画像合成法によるアプローチは、TMQI の観点から優れた傾向にあることが示された。さらに、最も優れた TMQI スコアを示した Nejati らの多重露出画像合成法は、計算コストにおいても

最も優れている。加えて、HDR 画像生成とトーンマッピングによるアプローチは、コントラストの逆転の観点から、多重露出画像と用いるより高い性能を持つことが明らかとなった。

文 献

- [1] P.E. Debevec and J. Malik, "Recovering high dynamic range radiance maps from photographs," ACM SIGGRAPH 2008 Classes, pp.31:1–31:10, 2008.
- [2] T. Mitsunaga and S.K. Nayar, "Radiometric self calibration," Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149), vol.1, no.1, pp.374–380, June 1999.
- [3] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," ACM Trans. Graph. (TOG), vol.21, no.3, pp.267–276, 2002.
- [4] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba, "Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes," Computer Graphics Forum, vol.22, no.3, pp.419–426, 2003.
- [5] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman, "Gradient domain high dynamic range compression," ACM Trans. Graph., vol.21, no.3, pp.249–256, July 2002.
- [6] B. Gu, W. Li, M. Zhu, and M. Wang, "Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping," IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.1, pp.70–79, Jan. 2013.
- [7] T. Mertens, J. Kautz, and F. Van Reeth, "Exposure fusion," Pacific Graphics, pp.382–390, Oct. 2007.
- [8] M. Nejati, M. Karimi, S.M.Reza Soroushmehr, S. Samavi, N. Karimi, and K. Najarian, "Fast exposure fusion using exposedness function," IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.2234–2238, 09 2017.
- [9] K. Ma, H. Li, H. Yong, Z. Wang, D. Meng, and L. Zhang, "Robust multi-exposure image fusion: A structural patch decomposition approach," IEEE Transactions on Image Processing, vol.26, no.5, pp.2519–2532, May 2017.
- [10] N. Bruce, "Expoblend: Information preserving exposure blending based on normalized log-domain entropy," Computers & Graphics, vol.39, pp.12–23, 04 2014.
- [11] Y. Kinoshita, S. Shiota, and H. Kiya, "Automatic exposure compensation for multi-exposure image fusion," 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), pp.883–887, Oct. 2018.
- [12] Y. Kinoshita, T. Yoshida, S. Shiota, and H. Kiya, "Pseudo multi-exposure fusion using a single image," 2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp.263–269, Dec. 2017.
- [13] Y. Hojatollah and W. Zhou, "Objective quality assessment of tone-mapped images," IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.2, pp.657–667, Feb. 2013.
- [14] M.R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the cie 2000 colour-difference formula: Ciede2000," Color Research & Application, vol.26, no.5, pp.340–350, 2001.
- [15] T.O. Aydın, R. Mantiuk, K. Myszkowski, and H.-P. Seidel, "Dynamic range independent image quality assessment," 2008.
- [16] J. Shen, Y. Zhao, S. Yan, and X. Li, "Exposure fusion using boosting laplacian pyramid," IEEE Transactions on Cybernetics, vol.44, no.9, pp.1579–1590, Sep. 2014.
- [17] "High dynamic range image examples," <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>.
- [18] A. Visavakitcharoen, Y. Kinoshita, and H. Kiya, "A color compensation method using inverse camera response function for multi-exposure image fusion," IEEE Global Conference on Consumer Electronics, 2019.