

HDR 画像のトーンマッピング処理におけるコントラスト強調の効果

佐田 歩美[†] 木下 裕磨[†] 塩田さやか[†] 貴家 仁志[†]

[†] 首都大学東京システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭ヶ丘 6-6

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

あらまし 本研究では、輝度の偏りを考慮した HDR 画像のトーンマッピング処理について考察する。従来のトーンマッピング処理では、HDR 画像の輝度の分布に偏りがある場合、生成される LDR 画像も輝度の分布に偏りを持ってしまう。そこで、提案法では、既存のトーンマッピング処理にコントラスト強調を組み合わせることで、HDR 画像が持つ輝度の分布にかかわらず、高品質な LDR 画像を生成可能であることを示す。HDR 画像に基づく画質評価基準の一つである TMQI を用いた画質評価実験を、代表的なトーンマッピング処理とコントラスト強調法のもとで行う。提案法が従来のトーンマッピング法と比較して高品質な LDR 画像を生成できることが確認される。

キーワード HDR, コントラスト強調, トーンマッピング

Effect of Contrast Enhancement in Tone Mapping Operation for HDR images

Ayumi SADA[†], Yuma KINOSHITA[†], Sayaka SHIOTA[†], and Hitoshi KIYA[†]

[†] Faculty of System Design, Tokyo Metropolitan University 6-6, Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065
Japan

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

Abstract This paper proposes a new tone mapping operation for HDR images with biased intensity distribution. In conventional tone mapping operations, when an HDR image has a bias of intensity distribution, an LDR one mapped from the HDR one has also the bias. To overcome this problem, a conventional contrast enhancement method is combined with a tone mapping operation for the tone mapping in the proposed method. The proposed method enables us to generate high quality LDR images, even when HDR images have some biased intensity distribution. We perform a number of experiments under typical tone mapping operations and contrast enhancement methods. The effectiveness of proposed method is evaluated, based on TMQI, which is one of quality assessments, represented by the objective relationship between HDR and LDR images.

Key words HDR, Contrast Enhancement, Tone Mapping

1. ま え が き

ハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range, HDR) 画像は、一般に用いられるローダイナミックレンジ (Low Dynamic Range, LDR) 画像と比較して、高いダイナミックレンジの記録が可能であり、写真撮影、コンピュータグラフィックス、車載カメラ、医用画像などの多くの分野で用いられている。

しかしながら、HDR 画像は一般に、そのハイダイナミックレンジを表現するために、画素値が浮動小数点で表現されているため、いくつかの問題点が指摘されている。特に大きな問題とされているのは、既存のディスプレイで直接 HDR 画像を表示できないことである。そのため、既存のディスプレイで HDR 画像を表示するために多くの場合、HDR 画像を一度 LDR 画像にトーンマッピング処理を施す必要がある。

このような背景から、HDR 画像から高品質な LDR 画像を生成するために、トーンマッピングオペレータ (Tone Mapping Operator, TMO) に関する研究が盛んに行われている [1-3]。

しかし、従来のトーンマッピング法では、HDR 画像のもつ輝度の分布の偏りについて考慮されてこなかった。また、HDR 画像に対し直接適応することのできる偏りの改善法 (HDR 画像に対するコントラスト強調) についての、人間の視覚特性の考慮の複雑さから十分な研究がなされていない。従って、元の HDR 画像の輝度の分布に偏りがある場合、従来のトーンマッピング法によって生成された LDR 画像は、その偏りの影響を受けたものになってしまう。

一方、LDR 画像に対するコントラスト強調法は、様々な手法が存在する [4-6]。ヒストグラムイコライゼーション (HE) は、その中で最も代表的な手法であり、画像の輝度の分布を一様分布

に近づけることでコントラスト強調を実現する [4]．それ以外にも、多重露出画像を合成に基づく方法 [5] や AGCWD (Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution) 法 [6] など、多くのコントラスト強調法が、ノイズに強く、自然な画像を生成するために提案されている．

そこで、本研究では、既存のトーンマッピング処理に対し、LDR 画像のためのコントラスト強調を組み合わせた、HDR 画像のための新しいトーンマッピング法を提案する．提案法では、トーンマッピング処理にコントラスト強調を組み合わせることで、HDR 画像の持つ輝度の分布に関わらず、高品質な LDR 画像を生成することを目指す．HDR 画像に基づく画質評価基準の一つである TMQI [7] を用いた画質評価実験を実施し、提案法が従来のトーンマッピング法と比較して、より高品質な LDR 画像を生成できることが確認される．

2. 準備

ここでは、本稿で用いる TMO と、HDR 画像を基準とした LDR 画像の代表的な画質評価法である TMQI について述べる．

2.1 Photographic Tone Reproduction

ここでは代表的なトーンマッピング法である "Photographic Tone Reproduction" [8] について簡単に要約する．

この手法は 6 つのステップからなる．

- (a) HDR 画像 I_H の RGB 値から world luminance $L_w(p)$ を計算する．

$$L_w(p) = 0.27R(p) + 0.67G(p) + 0.06B(p) \quad (1)$$

ここで $R(p)$, $G(p)$ および $B(p)$ は、HDR 画像の画素 p における RGB 値である．

- (b) world luminance $L_w(p)$ の幾何平均 \bar{L}_w を計算する．幾何平均 \bar{L}_w は次式により与えられる．

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \log L_w(p)\right) \quad (2)$$

ここで、 N は入力画像 I_H の画素の総数を表す．式 (2) は、 $L_w(p) = 0$ において特異点を持つ．したがって、入力画像 I_H が $L_w(p) = 0$ となる画素 p を持つ場合には、特異点を回避するため、 $L_w(p) = 0$ を微小な値 ϵ で置き換え以下のように計算する．

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \left(\sum_{p \notin B} \log L_w(p) + \sum_{p \in B} \log \epsilon\right)\right) \quad (3)$$

ここで、 B は $L_w(p) = 0$ となる画素 p の集合を表す．

- (c) scaled luminance $L(p)$ を、次式のように計算する．

$$L(p) = \frac{\alpha}{\bar{L}_w} L_w(p) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha \in [0, 1]$ は "key value" と呼ばれるパラメータであり、この操作は輝度の幾何平均を α に正規化する．

- (d) display luminance $L_d(p)$ を、トーンマッピングオペレータ $y(\cdot)$ を用いて求める．

$$L_d(p) = y(L(p)) \quad (5)$$

Reinhard のグローバルオペレータ [8] は次式で与えられる．

$$L_d(p) = \frac{L(p)}{1 + L(p)} \quad (6)$$

- (e) 浮動小数点表現された画素値 $C_f(p)$ が次式で与えられる．

$$C_f(p) = \frac{L_d(p)}{L_w(p)} C(p) \quad (7)$$

ここで、 $C(p) \in \{R(p), G(p), B(p)\}$ は入力画像 I_H における浮動小数点の RGB 値であり、また、 $C_f(p) \in \{R_f(p), G_f(p), B_f(p)\}$ である．

- (f) 24-bit の LDR 画像 I_{Lg} における RGB 値 $C_i(p)$ を次式によって求める．

$$C_i(p) = \text{round}(C_f(p) \cdot 255) \quad (8)$$

ここで $\text{round}(x)$ は x をもっとも近い整数値に丸める操作である．また、 $C_i(p) \in \{R_i(p), G_i(p), B_i(p)\}$ である．さらに、必要に応じて $C_f(p)$ に対しガンマ補正を行う．

2.2 TMQI

ここでは LDR 画像の評価基準の一つである TMQI について要約する [7]．TMQI とは、トーンマッピングによって生成された LDR 画像を元の HDR 画像をリファレンスとして評価する評価尺度である．TMQI は以下の式によって計算され、 Q はスコアを示す．

$$Q = aS^\alpha + (1 - a)N^\beta \quad (9)$$

ここで、 a , α 及び β は S と N の重要度を定めるパラメータで、[7] と同様に $a = 0.8012$, $\alpha = 0.3046$, $\beta = 0.7088$ とする． S は "Structural Fidelity" で、以下の式で与えられる．

$$S = \prod_{l=0}^L \left(\frac{1}{N_l} \sum_{i=0}^{N_l} S_{local}(x_i, y_i) \right)^{\beta_l} \quad (10)$$

ただし、 S_{local} は以下の式で与えられる．

$$S_{local}(x, y) = \frac{2\sigma'_x\sigma'_y + C_1}{\sigma_x'^2 + \sigma_y'^2 + C_1} \cdot \frac{\sigma_{xy} + C_2}{\sigma_x\sigma_y + C_2} \quad (11)$$

ここで σ_x , σ_y は、それぞれ HDR 画像と LDR 画像の局所標準偏差を示し、 σ_{xy} は HDR 画像と LDR 画像の一致するパッチの相互相関を表す．また、[7] と同様に C_1, C_2 はパラメータで、 $C_1 = 0.01, C_2 = 10$ とする．

また、 N は "Statistical Naturalness" で、以下の式で与えられる．

$$N = \frac{1}{K} P_m P_d \quad (12)$$

である．ここで P_m は事前に用意された標準分布に対する画像の輝度の平均値の確率を、 P_d は事前に用意された β 分布に対する画像の輝度の分散値の確率を、 K は $K = \max(P_m, P_d)$ によって与えられる正規化ファクターを示す．

TMQI 値は 0 ~ 1 の範囲をとり、1 に近い程、生成された LDR 画像は元の HDR 画像をより再現しているとされる．

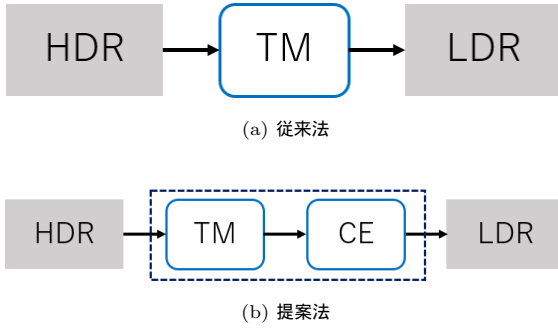


図 1 提案するトーンマッピング法

3. トーンマッピング処理におけるコントラスト強調の有用性

ここでは、既存のトーンマッピング処理に加えコントラスト強調を追加した、HDR 画像に対するトーンマッピング法を提案する。HDR 画像のトーンマッピング処理におけるコントラスト強調の有効性を TMQI に基づき考察する。

3.1 提案法の概要

従来のトーンマッピング処理では、HDR 画像における輝度の分布の偏りについて考慮されてこなかった。また、HDR 画像に対して直接適用可能な偏りの改善法 (HDR 画像のためのコントラスト強調法) についても研究されていない。そのため、輝度の分布に偏りのある HDR 画像に対してトーンマッピング処理を実施した場合、その HDR 画像から生成される LDR 画像も輝度の分布に偏りを持ってしまう。そこで、本稿では、HDR 画像に代表的ないくつかのトーンマッピング処理をして生成される LDR 画像に対し、コントラスト強調を施す。さらにその効果を TMQI に基づき評価する。

提案するトーンマッピング法は図 1 に示すように、トーンマッピング処理によって生成された LDR 画像に対して、コントラスト強調法を適用することで実行される。

3.2 画像の偏りを考慮した TMO

本研究では、図 1(b) の方法の有効性を確認するため、以下に示す代表的な TMO 及びコントラスト強調法を用いて実験を実施する。

(A) TMO

TMO として以下の関数を用いる。各 TMO の特徴は文献 [9] において比較されている。

A1. Reinhard

Reinhard の TMO には、2.1 節で述べたグローバルオペレータの他に、ローカルオペレータがある。今回は、その両方を用いて、それぞれ実験を行う。

Reinhard のローカルオペレータは、式 (6) における $L_d(p)$ を次式に置き換えることによって与えられる [8]。

$$L_d(p) = \frac{L(p)}{1 + V(p, S_m(p))} \quad (13)$$

ここで、 $V(p, S_m(p))$ は画素 p を中心とした半径 S_m の円形領域における輝度の平均を表す。また、 $s_m(p)$ は画素 p の周りで大きなコントラスト変化がない最大の範囲である。

A2. Tumblin

Tumblin の TMO は、以下の式によって与えられる [10]。

$$L_d(p) = \frac{L_{da} \cdot m \cdot \left(\frac{L_w(p)}{L_w}\right)^k}{L_{dmax}} \quad (14)$$

$$k = \frac{\gamma(\bar{L}_w)}{\gamma(L_{da})} \quad (15)$$

ここでの L_{dmax} はディスプレイの最大輝度を示し、今回は $L_{dmax} = 100$ とした。また、 $L_{da} = 20$ とし、 $\gamma(x)$ は以下の式となる。

$$\gamma(x) = \begin{cases} 1.855 + 0.4 \log_{10}(x + 2.3 \cdot 10^{-5}) & (for\ x \leq 100) \\ 2.655 & (otherwise) \end{cases} \quad (16)$$

また、 m は以下の式によって与えられる。

$$m = 100^{\frac{\omega_{wd}-1}{2}} \quad (17)$$

ただし ω_{wd} は、

$$\omega_{wd} = \frac{\gamma(\bar{L}_w)}{1.855 + 0.4 \cdot \log(L_{da})} \quad (18)$$

である。

A3. Ward

Ward の TMO は、グローバルとアダプティブの二種があるが、今回は以下の式によって与えられるグローバルを用いる [11]。

$$L_d(p) = sf \cdot L_w(p) \quad (19)$$

このときの sf については以下の式によって求められる。

$$sf = \frac{1}{L_{dmax}} \left(\frac{1.219 + (L_{dmax}/2)^{0.4}}{1.1219 + \bar{L}_w^{0.4}} \right)^{2.5} \quad (20)$$

(B) コントラスト強調

本稿で用いたコントラスト強調法を以下に示す。

B1. ヒストグラムイコライゼーション

ヒストグラムイコライゼーション (HE) は、画像の輝度の分布を一様分布に近づけることでコントラスト強調を行う。画素数 N の 8bit グレイスケール画像の場合 HE を用いた輝度値の変換は以下の式で与えられる。

$$c_q = T(I_q) = \frac{255}{N} \sum_{j=0}^q n_j \quad q = 0, 1, 2, \dots, 255 \quad (21)$$

ただし、 c_q および I_q は出力画像および入力画像における q 番目の輝度の強度レベルを表す。また、 n_q は輝度値が I_q に等しい画素の数を表す。すなわち、ヒストグラムイコライゼーションは、輝度値が I_q である各画素の値を c_q に変換する処理である。MATLAB では、ヒストグラムイコライゼーション実行時、デフォルトで 6bit に量子化された (ピン数を $2^6 = 64$ とした画像) のヒストグラムを用いて処理を実行するが、本研究では 6bit の他に 10bit に量子化した場合の実験も行った。また、本研究では文献 [4] に従い、HSI 空間を用いて実験を行った。RGB 色

空間の画像から，HSI 色空間の輝度 I を以下の式によって求める．

$$I(p) = \frac{R(p) + G(p) + B(p)}{3} \quad (22)$$

次に， $I(p)$ に量子化およびヒストグラムイコライゼーションを施し，算出された $I(p)$ と $T(I(p))$ を用いて，画素毎の $\delta = T(I(p))/I(p)$ を求める．そして，出力画像の R, G, B 値 R', G', B' を， $R' = \delta R, G' = \delta G, B' = \delta B$ として強調し， R, G, B 画像を求めている．

B2. 擬似的多重露出画像合成法

単一画像から擬似的に生成された多重露出画像を合成することで，コントラスト強調を行っている [5]．動的なシーンなど位置ずれのない多重露出画像の撮影が困難であるときに用いることができる．まず，以下の式を用いて，単一の画像から露出の違う画像を複数枚擬似的に作ることで原画像から計算される輝度 L に対して，局所コントラスト強調，擬似的な露出の変更，トーンマッピングを行うことで多重露出画像を生成する．

$$L_i(p) = 2^{R_i} L_0(p) \quad (23)$$

この時の $L_0(p)$ は，入力画像から推定された基準となる露出値 $0[\text{EV}]$ を持つ画像の輝度で， R_i は生成される画像の持つ露出値である．その後従来の多重露出画像合成法を適用し，画像を合成することで一枚の LDR 画像を生成する．

B3. AGCWD

ヒストグラムイコライゼーションでは，強調の効果が強すぎたり弱すぎたりすることで，不自然な出力になってしまう場合がある．それを解決するために，AGC 法と WD 法を組み合わせたコントラスト強調法である AGCWD (Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution) が提案されている [6]．AGC 法は，以下の式によって行われる．

$$T(I_q) = I_{qmax}(I_q/I_{qmax})^\mu \quad (24)$$

このときの I_{qmax} は画像が表現可能な輝度の最大値を示す．また， μ は WD 法を用いて以下の式によって求められる．

$$\mu = 1 - cdf_\omega(I_q) \quad (25)$$

となり，このときの $cdf_\omega(I_q)$ は重み付けられた累積確率密度関数であり，確率密度関数 $pdf(I_q) = (n_q/N)$ を用いて以下の式によって求める．

$$cdf_\omega(I_q) = \frac{\sum_{I_q=0}^{I_{qmax}} pdf(I_q)}{\sum_{i=0}^{I_{qmax}} pdf_\omega(i)} \quad (26)$$

また，このときの $pdf_\omega(I_q)$ は，

$$pdf_\omega(I_q) = pdf_{max} \cdot \left(\frac{pdf(I_q) - pdf_{min}}{pdf_{max} - pdf_{min}} \right)^\eta \quad (27)$$

このときの pdf_{max} ， pdf_{min} は pdf の最大値，最小値をそれぞれ示す．文献 [6] に従い，パラメータ $\eta = 0.8$ と設定した．

4. 実験

提案手法が生成する LDR 画像の品質を従来のトーンマッピ

表 1 提案法における TM と CE の組み合わせ

提案法 1	TM + HE(ピン数=64)
提案法 2	TM + HE(ピン数=1024)
提案法 3	TM + 擬似的多重露出合成法
提案法 4	TM + AGCWD

ング処理と比較するため，いくつかの HDR 画像を用いて実験を行った．

4.1 実験条件

HDR 画像データベース [12,13] から選択した 3 枚の HDR 画像 2 を実験に使用した．提案手法の有効性の評価は以下の手順に従って比較した．

- (1) HDR 画像に対して，3.2 で示した TMO を用いてトーンマッピング処理を施す．
- (2) トーンマッピングされた画像に，3.2 で示したコントラスト強調 (CE) を施す．
- (3) 評価尺度 TMQI を用いて，生成された LDR 画像のスコアの品質を評価する．リファレンスには元の HDR 画像を用いる．

4.2 実験結果

図 3 は，画像 Ocean について，実験手順に従いそれぞれ計算された TMQI のスコアをグラフにしたものである．

ここで図 3 における提案法 1~4 は，実験に使用した TMO と CE の組み合わせを示し，以下同様に表記する (表 1 参照)．図 3 より，トーンマッピング処理のみに比べ，提案法は使用した TMO によらず，高い TMQI のスコアを与えることがわかる．また，その他 2 つの画像についても同様のことを行い，表 2 に TMQI のスコアをまとめている．

表 2 から，どの画像においても，提案法は TMQI を改善できることがわかる．

また，表 3 に TMQI の構成要素である S 値，表 4 に N 値のスコアをまとめた．表 3 より，12 パターンのうち 2 つではトーンマッピング処理のみの方がスコアが高いが，その他では提案法の方がスコアが高く，中でも提案法 3 の値が一番よい．S の値が高いということは，元の HDR 画像と生成された LDR 画像の類似度が高いことを示しているため，提案法の方が多くの場合で類似度の高い画像の生成に成功したことになる．表 4 より，N のスコアはトーンマッピング処理のみの場合よりも提案法の方が使用した TMO によらず高い値をとっているが，中でも提案法 1 または 2 が最高値をとっていることがわかる．N の値が高いということは，生成された LDR 画像が，統計的により自然度の高い画像であることを示すので，提案法では従来法よりも全ての場合でより自然な画像の生成ができたことである．

また，図 4 は処理画像例である．トーンマッピング処理のみの画像だと暗い部分の彩りや形が見えにくいだが，提案法ではそれらの改善がみられることも視覚的にわかる．

これらから，トーンマッピング処理を行う際にコントラスト強調を組み合わせて実行することで，より高品質な画像を得ることができることが確認できた．

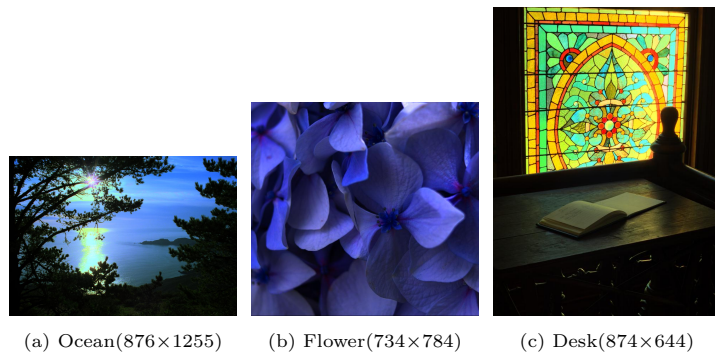


図 2 実験で用いた HDR 画像 (pfm フォーマット)

表 2 実験結果 (TMQI)

TMO	画像	TM のみ	提案法 1	提案法 2	提案法 3	提案法 4
	Ocean	0.8480	0.8895	0.8916	0.9097	0.8964
Reinhard's global	Flower	0.8086	0.8383	0.8387	0.8379	0.8309
	Desk	0.8259	0.9125	0.9127	0.9099	0.9021
	Ocean	0.8792	0.8841	0.8861	0.9100	0.9139
Reinhard's local	Flower	0.7919	0.8400	0.8404	0.8222	0.8182
	Desk	0.7189	0.9063	0.9075	0.8243	0.8059
	Ocean	0.7660	0.8903	0.8912	0.8605	0.8172
Tumblin	Flower	0.7538	0.8367	0.8372	0.8398	0.7893
	Desk	0.7526	0.9087	0.9087	0.8731	0.8204
	Ocean	0.7514	0.8899	0.8931	0.9204	0.8065
Ward's global	Flower	0.7841	0.8385	0.8390	0.8359	0.8081
	Desk	0.7322	0.9145	0.9155	0.8880	0.7840

表 3 実験結果 (Structural Fidelity)

TMO	画像	TM のみ	提案法 1	提案法 2	提案法 3	提案法 4
	Ocean	0.9248	0.6369	0.6397	0.9168	0.8304
Reinhard's global	Flower	0.9816	0.8481	0.8509	0.9897	0.9600
	Desk	0.7968	0.7069	0.7093	0.8566	0.8277
	Ocean	0.9085	0.6390	0.6411	0.9032	0.8472
Reinhard's local	Flower	0.9521	0.8472	0.8486	0.9724	0.9647
	Desk	0.6512	0.7157	0.7186	0.7690	0.7718
	Ocean	0.8432	0.6355	0.6465	0.9206	0.9180
Tumblin	Flower	0.8181	0.8427	0.8450	0.9775	0.9431
	Desk	0.7393	0.6928	0.6953	0.8960	0.8362
	Ocean	0.7761	0.6536	0.6561	0.8964	0.8795
Ward's global	Flower	0.9284	0.8487	0.8499	0.9845	0.9695
	Desk	0.6562	0.7661	0.7682	0.8230	0.7374

5. おわりに

本研究では、HDR 画像に対して既存のトーンマッピング処理とコントラスト強調を組み合わせたトーンマッピング法について提案した。提案法では、HDR 画像の持つ輝度の分布に関わらず、高品質な LDR 画像の生成が可能である。HDR 画像に基づいた画質評価基準の一つである TMQI を用いた画質評価実験を実施することによって、提案法が従来のトーンマッピング法と比較して、より高品質な LDR 画像を生成可能であることが示された。

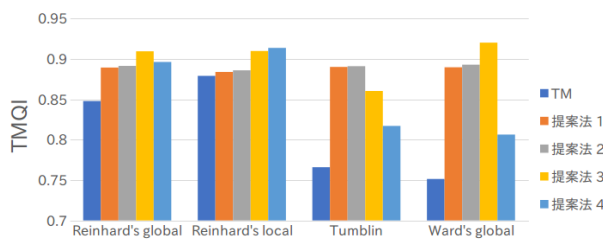
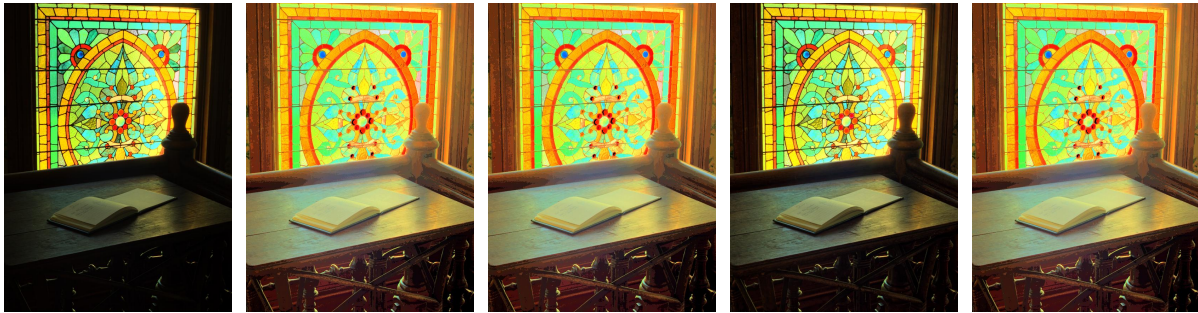


図 3 画像 Ocean を用いた実験結果

表 4 実験結果 (Statistical Naturalness)

TMO	画像	TM のみ	提案法 1	提案法 2	提案法 3	提案法 4
	Ocean	0.2094	0.9462	0.9547	0.5459	0.6053
Reinhard's global	Flower	0.0188	0.2591	0.2574	0.1013	0.1027
	Desk	0.2683	0.9499	0.9457	0.6447	0.6630
	Ocean	0.3849	0.9040	0.9311	0.5690	0.6859
Reinhard's local	Flower	0.0022	0.2685	0.2685	0.0623	0.0559
	Desk	0.0282	0.8877	0.8900	0.2999	0.2089
	Ocean	0.0061	0.9554	0.9587	0.2733	0.0919
Tumblin	Flower	0.00004	0.2585	0.2577	0.1196	0.0018
	Desk	0.0443	0.9535	0.9481	0.3699	0.1918
	Ocean	0.0141	0.9108	0.9274	0.6433	0.0899
Ward's global	Flower	0.0004	0.2594	0.2599	0.0986	0.0247
	Desk	0.0613	0.9145	0.8429	0.5667	0.1580



(a) TM(Reinhard's global)
TMQI:0.8259

(b) 提案法 1
TMQI:0.9125

(c) 提案法 2
TMQI:0.9127

(d) 提案法 3
TMQI:0.9099

(e) 提案法 4
TMQI:0.9021

図 4 実験結果の例

文 献

- [1] Z. Zhu, Z. Li, S. Wu, and P. Fränti, "Noise reduced high dynamic range tone mapping using information content weights," Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2015 IEEE International Conference on, pp.1255–1259, 2015.
- [2] J. Duan and G. Qiu, "Fast tone mapping for high dynamic range images," Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on, vol.2, pp.847–850, IEEE, 2004.
- [3] 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, 2014.
- [4] S.-L. Lee and C.-C. Tseng, "Color image enhancement using histogram equalization method without changing hue and saturation," Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 2017 IEEE International Conference on, pp.305–306, 2017.
- [5] 木下裕磨, 吉田太一, 塩田さやか, 貴家仁志, "単一画像に基づく擬似的多重露出画像合成法," 信学技報, vol.117, no.113, pp.7–12, 2017.
- [6] Y.-S. Chiu, F.-C. Cheng, and S.-C. Huang, "Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction and cumulative intensity distribution," Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference on, pp.2946–2950, 2011.
- [7] H. Yeganeh and Z. Wang, "Objective quality assessment of tone-mapped images," IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.2, pp.657–667, 2013.
- [8] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda, "Photographic tone reproduction for digital images," ACM Transactions on Graphics (TOG), vol.21, no.3, pp.267–276, 2002.
- [9] M. Čadík, M. Wimmer, L. Neumann, and A. Artusi, "Evaluation of hdr tone mapping methods using essential perceptual attributes," Computers & Graphics, vol.32, no.3, pp.330–349, 2008.
- [10] J. Tumblin, J.K. Hodgins, and B.K. Guenter, "Two methods for display of high contrast images," ACM Trans. Graph., vol.18, no.1, pp.56–94, Jan. 1999. <http://doi.acm.org/10.1145/300776.300783>
- [11] G. Ward, "A contrast-based scalefactor for luminance display," Graphics Gems IV, ed. by P.S. Heckbert, pp.415–421, Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1994. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=180895.180934>
- [12] "High dynamic range image examples". <http://www.anyhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>
- [13] "Github - openexr". <https://github.com/openexr/>