

# 明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像のためのトーンマッピング

北浦 真樹<sup>†</sup> 大倉 史生<sup>†</sup> 神原 誠之<sup>†</sup> 横矢 直和<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{masaki-ki,fumio-o,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

あらまし 本研究では、明領域と暗領域の明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像に特化したトーンマッピング手法を提案する。明領域と暗領域へ領域が明確に分離できる場合には、各領域の境界部で輝度値の大小関係が逆転しても人間の視覚は違和感を感じないと仮定する。その仮定のもと、インタラクティブに領域を分割し、各領域に異なるトーンマッピングを独立に適用する。提案手法によりダイナミックレンジを有効に利用して表現された画像を示し、主観評価実験により本手法の有効性を確認する。

キーワード トーンマッピング, ハイダイナミックレンジ, 領域分割

## Tone-Mapping for HDR Images Divided with Dimidiate Luminance and Spatial Distributions of Bright and Dark Regions

Masaki KITAURA<sup>†</sup>, Fumio OKURA<sup>†</sup>, Masayuki KANBARA<sup>†</sup>, and Naokazu YOKOYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology (NAIST)

Takayama-cho 8916-5, Ikoma-shi, Nara, 630-0192 Japan

E-mail: †{masaki-ki,fumio-o,kanbara,yokoya}@is.naist.jp

**Abstract** This report proposes a novel tone mapping method focusing on an HDR image with dimidiated luminance and spatial distributions of bright and dark regions. We assume that human visual perception does not feel a sense of discomfort even if a magnitude relationship between luminance values of pixels near the boundary between bright and dark regions is reversed when these regions are definitely divided according to dimidiated luminance and spatial distributions. Under this assumption, we divide an HDR image into bright and dark regions and apply a different tone mapping function to each region independently. We show resulting images represented by using dynamic range effectively and confirm usefulness of the proposed method through subjective evaluation.

**Key words** tone mapping, high dynamic range, segmentation

### 1. はじめに

近年、実世界のシーンをより正確に捉え表現することが可能なハイダイナミックレンジ (HDR) 画像への注目が高まっている。HDR 画像を生成する代表的な手法として、露出の異なる複数の画像を合成する手法 [1] があり、HDR 画像は各画素が標準であるローダイナミックレンジ (LDR) 画像の 8bit 以上の階調値を保存している。そのため、HDR 画像を表現可能な階調値が 8bit である LDR ディスプレイに表示する際には、トーンマッピングによりダイナミックレンジを適切に圧縮する必要がある。これまでに様々なトーンマッピング手法が提案されており、従来手法の代表的なものとしては、光感度測定手法の一つである ZoneSystem [2] や局所的な露出操作技術である Dodging-and-burning といった写真の洗練された現像技術のア

イデアを利用した Reinhard [3] らの手法が挙げられる。また、人の視覚の動きの特性から勾配変化に着目し、低コントラスト部よりも高コントラスト部のダイナミックレンジの圧縮を強めることで詳細なテクスチャを表現できる Fattal [4] らの手法がある。しかし、これらの手法は画像中の画素の輝度値の大小関係を保存するという潜在的な制約があるため、LDR 表示可能な範囲に圧縮できるダイナミックレンジには限界がある。その結果、Reinhard らの手法では明領域や暗領域のテクスチャを十分に表現することができず、また Fattal らの手法では、局所的に輝度値の大小関係の整合を取ろうとするために、原画像に存在しない急激な輝度変化によるアーティファクトが発生するといった問題が生じる。

そこで、ダイナミックレンジを効率的に利用し、かつアーティファクトを低減させるために、人間の視覚の局所適応性に

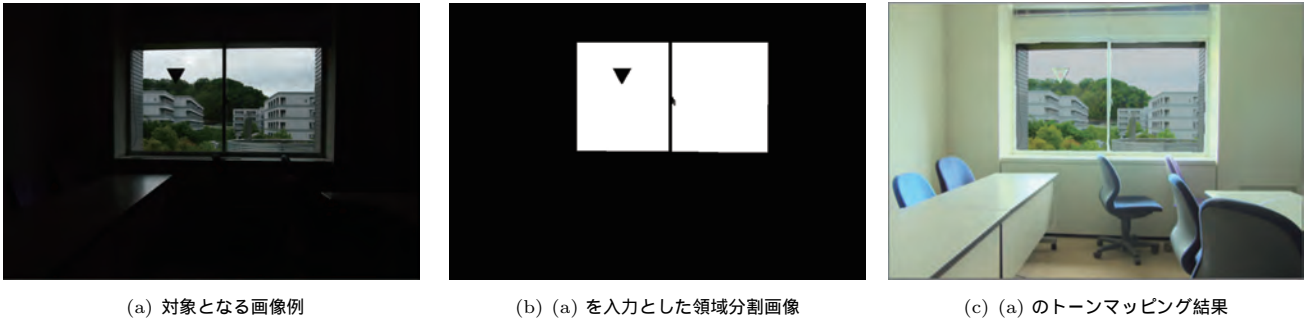


図 1 提案手法の流れ .

に基づき、画像上の明度分布の異なる領域の特徴を考慮したトーンマッピング手法が Yee [5] らや Chen [6] ら、Krawczyk [7] らにより提案されている。これらの手法は、入力となる HDR 画像に対して領域分割を行い、局所領域ごとに算出される適応輝度値を用いてトーンマッピングを適用する。これらの手法は、画像上の隣接しない画素の輝度値の大小関係の逆転を許すため、従来手法に比べてダイナミックレンジを効率的に利用することができる。しかし、適用後の画像の違和感を軽減させるために隣接する画素間では輝度値の大小関係を保存するという制約が必要となる。つまり、隣接する画素間での輝度値の変化量が画像全体で逐次的に制限される結果、表現に利用される各領域のダイナミックレンジが制限されてしまい、実際のシーンのダイナミックレンジを有効に利用して表現できない HDR 画像が存在してしまう。

本報告では、HDR 画像で一般的によく見られる屋内と屋外の両方が混在するシーンを撮影した画像のように、明領域と暗領域の明度分布と画像上の空間的分布が明確に分かれる HDR 画像に特化したトーンマッピング手法を提案する。本研究で対象とする明領域と暗領域の明度分布と空間的分布が明確に分かれる画像の例を図 1(a) に示す。本研究では、図 1(a) のようなシーンを表現する画像では、明領域と暗領域の領域間で輝度値の大小関係が逆転しても、人の視覚には違和感を与えないと仮定する。この仮定に従って、提案手法では人の視覚に基づいて画像を明領域と暗領域へ領域分割し、各領域に対して独立にトーンマッピングを適用する。図 2 に HDR 画像と LDR 画像間の輝度値の関係性を表現したトーンマッピングカーブを示す。提案手法では、対象となる画像を限定することで不連続な輝度変換を適用することが可能となり、その結果、出力画像のダイナミックレンジを有効に利用して表現された画像を生成することができる。

## 2. 明領域と暗領域を独立に輝度変換するトーンマッピング

### 2.1 提案手法の概要

本研究では、明度分布と空間的分布に基づいて領域が明領域と暗領域へ二分される HDR 画像を対象とし、各領域に独立にトーンマッピングを適用することで各領域のダイナミックレンジを効率的に利用し表現された画像の生成を目的とする。提案手法の処理の流れは以下の通りである。

(1) 入力 HDR 画像の明領域と暗領域への領域分割。

(2) 明領域と暗領域の輝度変換。

### 2.2 入力 HDR 画像の明領域と暗領域への領域分割

上記のステップ (1) の入力 HDR 画像の明領域と暗領域への領域分割において、人の視覚が認識する空間的な領域に基づいて領域を分割することが重要となるため、インタラクティブかつ領域の境界を考慮して分割が可能な手法を用いる必要がある。本研究ではインタラクティブに分割する領域を指定ことができ、また境界処理に対してロバストな手法の一つである GrabCut アルゴリズム [8] を適用する。図 1(a) を入力画像とし、GrabCut により領域分割をおこなった結果を図 1(b) に示す。図 1(b) では、明領域が白色、暗領域が黒色で指定されている。

### 2.3 明領域と暗領域の輝度変換

ステップ (2) において、分割した各領域に対しトーンマッピング手法を用いて独立に輝度変換を行う。本手法では、各領域に適用するトーンマッピング手法は限定しない。また、明領域と暗領域のいずれかの領域が複数領域から構成されている場合は、さらに小領域に分割し、それらの領域にも独立にトーンマッピングを適用する。本研究の実装においては、各領域に適用するトーンマッピング手法として、代表的なトーンマッピングの一つであり、幅広い種類の画像を想定して設計されている Reinhard [3] らのトーンマッピング手法を採用する。

### 2.4 Reinhard らのトーンマッピング

Reinhard らのトーンマッピングは、アナログ写真の現像技術として用いられる Zone System と Dodging-and-burning のアイデアに基づいて、入力となる HDR 画像のダイナミックレンジから出力画像のダイナミックレンジの中央部の輝度値となる基準値を算出し入力画像の輝度値を変換する。また、局所的に明るい部分の輝度値を下げ、暗い部分の輝度値を上げるように働く。まず、出力画像のダイナミックレンジの中央部の輝度値となる基準値を算出する。ここでは、過去の多くの階調再現に関する研究 [9] [10] [11] で用いられている対数平均輝度値をシーンの基準値の有効な概算値と見なす。対数平均輝度値  $\bar{L}_w$  は以下の式で算出することができる。

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left( \sum_{x,y} \log (\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (1)$$

ここで  $L_w(x,y)$  は画素  $(x,y)$  における入力輝度値であり、 $N$

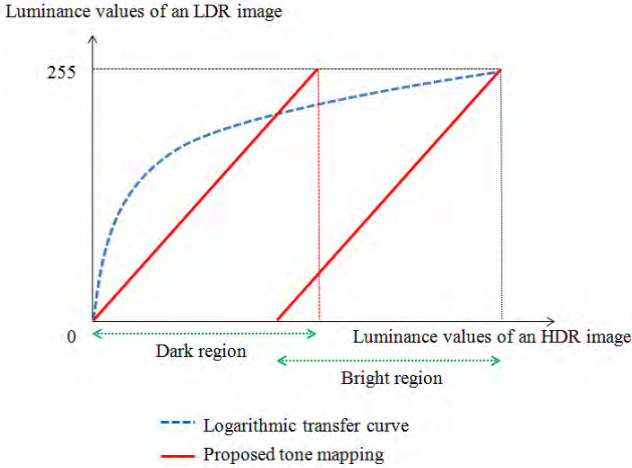


図 2 トーンマッピングカーブ.

は画像における総画素数,  $\delta$  は画像中に黒画素が存在した場合の特異点を避けるための定数である. 次に値  $\bar{L}_w$  を用いて画像全体にスケーリングを行う.

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x, y) \quad (2)$$

ここで  $L(x, y)$  はスケーリング後の画素  $(x, y)$  の輝度値であり,  $a$  はパラメータとなる. パラメータ  $a$  は, 画像全体の明るさに応じて異なった値を設定することができ, 上げる場合は通常 0.18 から 0.36, 0.72 と変化させ, 逆に下げる場合は 0.09, 0.045 と変化させて適当な値を設定する. この値  $a$  は, 上述のスケーリングを適用した結果に大きく影響を与える. 現代の写真の現像技術においては, 主に高輝度値を持つ画素のみの圧縮を強める変換曲線が用いられているため, 高輝度値を持つ画素に対して圧縮を強める制約を式 (2) に加える.

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (3)$$

ここで  $L_d(x, y)$  は画素  $(x, y)$  の出力輝度値となる. 式 (3) では, 高輝度値は近似的に  $1/L$  によってスケーリングされ, 一方低輝度値は 1 によってスケーリングされる. 式 (3) の分母の式が, これら 2 つのスケーリング間を滑らかに調和させるように働く. この変換式により, 全輝度値がディスプレイで表現可能なレンジへと圧縮される. しかし, 式 (3) は高輝度値の圧縮において必ずしも最適であるとは限らない. そこで, 高輝度値に対して写真の現像における焼き込みの効果を施すために式 (3) を次のように拡張する.

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2})}{1 + L(x, y)} \quad (4)$$

ここで,  $L_{white}$  は白色にマッピングされる最小の輝度値となる. この関数は, 式 (3) と線形変換との混合からなる.  $L_{white}$  がスケーリング後の最大輝度値, もしくはそれ以上の輝度値に設定された場合は焼き込みは行われない. また, 値が無限に設定された場合は式 (3) と同等の式となる. デフォルト設定として,  $L_{white}$  はシーンの最大輝度値とする.

本来, Reinhard らのトーンマッピング手法は画像全体に適用される. 本研究では, それぞれ明部のトーンマッピングの基準値  $\bar{L}_{w_{Light}}$  と暗部のトーンマッピングの基準値  $\bar{L}_{w_{Dark}}$  を領域毎に算出し, 各領域に独立に適用する.

### 3. トーンマッピング結果と主観評価実験

#### 3.1 HDR 画像の取得

本実験では, カメラで撮影した露出の異なる複数枚の画像から合成した HDR 画像とベンチマークとして公開されている HDR 画像を入力として利用した. 前者は, デジタル一眼レフカメラ (K-7, PENTAX) に搭載されているオートブラケット機能を利用して露出の異なる複数枚の画像を撮影し, ハイダイナミックレンジ画像編集ソフトウェア [12] を用いて HDR 画像に合成した. 後者は, 文献 [13] とウェブサイト [14] にて公開されているベンチマーク HDR 画像から選択し利用した.

#### 3.2 提案手法の結果と従来手法との比較

複数枚の入力 HDR 画像に対し, Reinhard [3] らの手法, Fattal [4] らの手法, 提案手法を適用した結果を示す. 図 3 が撮影画像から合成した HDR 画像, 図 4, 図 5 がベンチマーク HDR 画像を入力とした結果である. Reinhard らの手法は, 表現に必要であるダイナミックレンジが不足しており, 画像中に白とび, 黒つぶれが生じている領域が存在する. 例えば, 図 3(a) の屋内にあたる領域では低輝度画素の割合が大きく, また, 図 4(a) の屋外にあたる領域では高輝度画素が集中しているために, それぞれの領域のテクスチャを認識することが困難である. 次に, Fattal らの手法では, 明領域, 暗領域ともに広いダイナミックレンジで表現されており, 各領域のテクスチャを十分に認識することができる. しかし, 隣接する画素間での輝度値の大小関係を保存するために, 明領域と暗領域の境界部において急激な輝度変化が生じている. 例えば, 図 4(b) の窓枠周辺部に原画像には存在しないグラデーションのようなアーティファクトが発生している. その結果, 画像全体が絵画的に見えるといった効果が生じている.

提案手法の適用結果である図 3(c), 4(c) は, 明領域と暗領域に独立にトーンマッピングを適用することで, 有効にダイナミックレンジを利用して表現できている. また, Fattal らの手法の適用結果で見られたアーティファクトも生じていない. これは, 各領域に独立にトーンマッピングを適用することで領域の境界部での急激な輝度変化が生じないからである. また, 図 5(c) のステンドグラス部分のように, 従来手法では認識できなかったテクスチャを再現することができている. 次章で, Reinhard, Fattal らの手法と提案手法の実験結果を用いておこなった主観評価実験の結果を示し, 提案手法に適した画像の特性を検証する.

#### 3.3 主観評価実験

##### 3.3.1 主観評価実験の準備

提案手法の有効性と提案手法が有効な HDR 画像の特性を検証するために, 25 枚の HDR 画像を入力画像とし従来手法と提案手法により生成された画像に対する主観評価実験をおこなった. HDR 画像は撮影画像から合成した HDR 画像 3 枚とベン

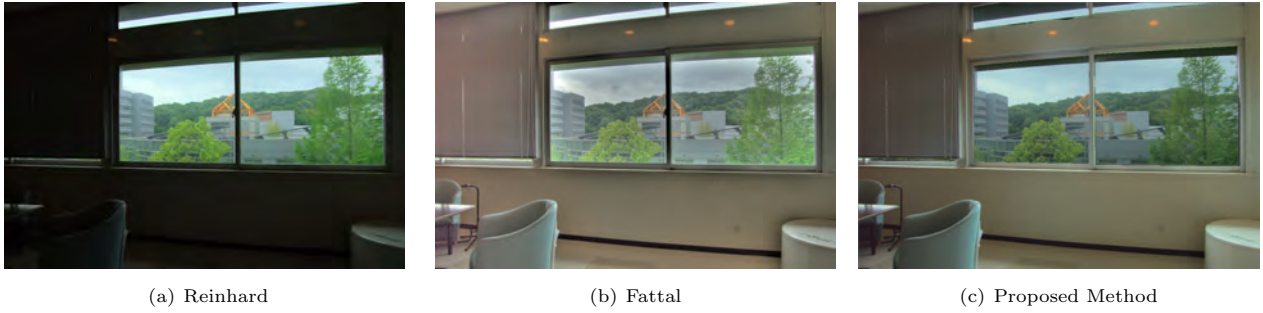


図 3 トーンマッピング結果 (撮影画像から合成した HDR 画像) .



図 4 トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:room [13]) .

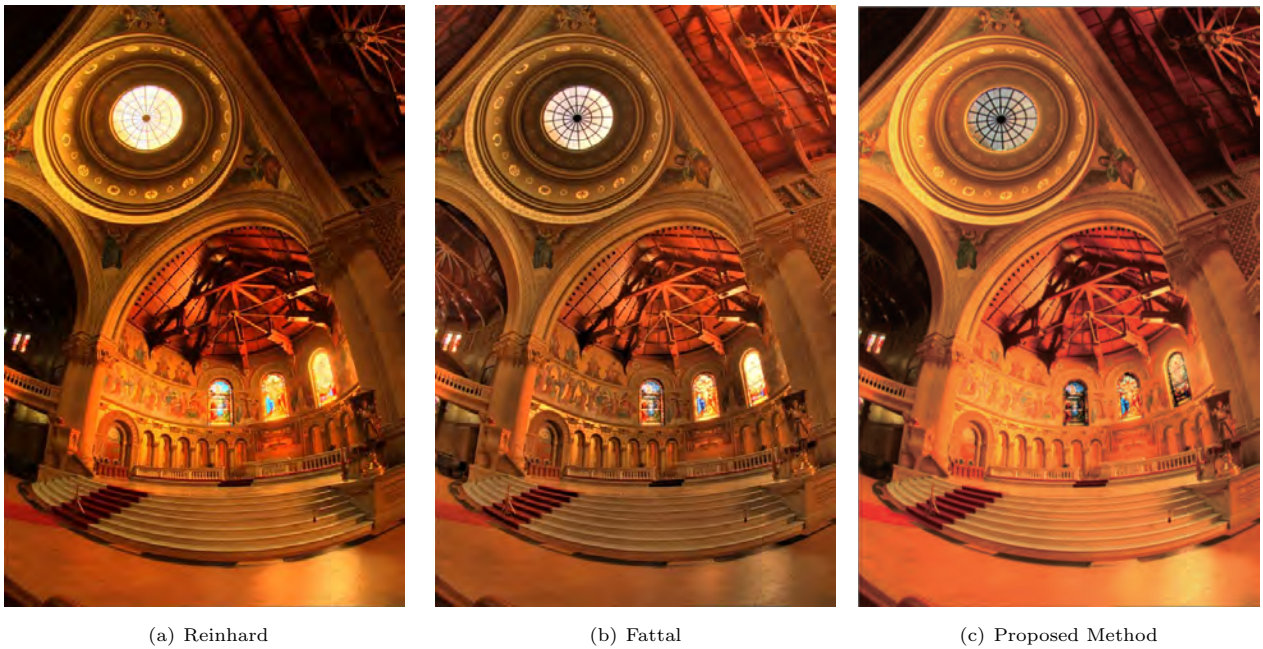


図 5 トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:memorial [13]) .

チマーク HDR 画像 22 枚からなり、それぞれの HDR 画像に対して、Reinhard らの手法、Fattal らの手法、提案手法を適用した結果を用いた。評価基準として、トーンマッピングにおける課題となるテクスチャが認識できるかという視認性、アーティファクトなどによる違和感の有無の二点を考慮した上で、画像に対する総合的な満足度を 5 段階で評価した。ここでは、5 を最高値、1 を最低値とした。

### 3.3.2 主観評価実験結果

主観評価実験結果を提案手法の満足度が高い順に図 6,7,8 に示す。ここでは、定性的観点から実験結果について述べる。ま

ず、Reinhard らの手法と提案手法の評価結果を比較する。図 6, 7, 8 において、概して Reinhard らの手法に比べて、提案手法を適用した場合の方が満足度は高かった。ただし、図 7(c), 8(d) においては、Reinhard らの手法の結果と同等、もしくは低い満足度となった。次に、Fattal らの手法と提案手法の評価結果を比較する。図 6(a)~(d), 7(c) において、Fattal らの手法より提案手法の結果の満足度が高かった。しかし、図 7(a), (b), (d) においては、Fattal らの手法と同等程度の満足度であった。また、図 8(a)~(d) では、Fattal らの手法の方が満足度が高かった。

### 3.3.3 主観評価実験結果の考察

まず、図 6,7, 8 において、概して提案手法が Reinhard らの手法に比べて高い満足度を得られた結果から、各領域にそれぞれトーンマッピングを適用することは効果的であるということが確認できる。図 7(c), 8(d) のように満足度が同等、もしくは提案手法の方が満足度が低い画像が存在する要因としては、入力である HDR 画像の明領域と暗領域の明度分布の偏りが小さく、各領域にトーンマッピングを適用したとしてもダイナミックレンジが十分に拡張されないことが考えられる。また、図 8(d) のように領域の境界部において輝度値の大小関係が逆転することで人の視覚に違和感を与えていたことも考えられる。

次に、Fattal らの手法と比較した場合に、図 7(a), (b), (d), 8(d) のように提案手法の満足度が低くなっていた要因は、Fattal らの手法の結果は各領域のテクスチャがより認識できた画像であったからだと考えられる。対して、図 6(a)~(c) の画像において提案手法の結果の満足度が高かったのは、Fattal らの手法の結果はアーティファクトの影響が大きく人の視覚に違和感を与えてしまっていたからだと考えられる。つまり、明度分布と空間的分布により領域が明確に二分される HDR 画像において、Fattal らの手法で人の視覚に違和感を与えるほどのアーティファクトの影響が生じてしまう場合は、提案手法はより適切な画像を生成することができる。

以上の主観評価実験の結果と考察より、明度分布と空間的分布により領域が明確に二分できる画像に対しては、明領域と暗領域の境界部において輝度値の大小関係が逆転しても人の視覚には違和感を与えないという仮定が妥当であることがわかる。また、同様に以上の結果と考察から、図 6 は提案手法に適している画像、図 7 は Fattal の手法と同等の満足度が得られる画像、図 8 は提案手法に適さない画像に分類できる。本実験の実施前に、我々が提案手法に適しており領域境界で輝度値の大小関係が逆転しても人の視覚には違和感を与えないと想定していた画像は、主観評価実験により比較的高い満足度が得られれば想定通りの結果となった。しかし、提案手法に適していると想定していた図 7(b), (d) においては提案手法の満足度は比較的低く、また、あまり適していないと想定していた図 6(c), (d) においては高い満足度を得られた。この要因は、先に述べたような白とびや黒つぶれの影響や、アーティファクトによる違和感の度合いが被験者個々人により異なっているからであると考えられる。従って、今回の主観評価実験結果により分類された画像の特性を検証し提案手法に適した HDR 画像の条件を明確に定義することで、提案手法の有用性を高める必要がある。

## 4. ま と め

本論文では、明度分布と空間的分布により領域が明確に二分される HDR 画像に特化したトーンマッピング手法を提案した。まず、明度分布と空間的分布により領域が明領域と暗領域に明確に分離できる場合には、各領域の境界部において輝度値の大小関係が逆転しても人の視覚には違和感を与えないという仮定を設定し、この仮定のもと各領域に独立に異なるトーンマッピングを適用し結果を示した。主観評価実験において、Reinhard

らの手法に比べて対象となると思われる画像に対しては概して高い満足度を得ることができたことから、明領域と暗領域の各領域に独立にトーンマッピングを適用することが有効であることを確認できた。Fattal らの手法と比較した場合、対象となると思われる画像の中で提案手法の結果の満足度が高い画像が複数あったことから、適した画像に対しては提案手法を適用することでより適した画像が生成できるということを確認した。また、提案手法に適していると想定していた HDR 画像に関して、全体的には想定していた結果が得られたが、提案手法に適していると想定していた画像の満足度が低かったり、適していないと想定していた画像の満足度が高いなどの想定とは異なった結果が得られた画像が存在することがわかった。今後の課題としては、今回の主観評価実験結果から分類された画像の特性を検証することで、提案手法に適した HDR 画像の条件を定義し判別方法を確立することが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省特別経費「アンビエント環境知能研究創出事業」および日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(A), No.23240024)による。

## 文 献

- [1] P. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. *In Proceedings of SIGGRAPH '97*, pp. 369-378, 1997.
- [2] A. Adams. *The negative*. The Ansel Adams Photography series. Little, Brown and Company, 1981.
- [3] E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J. Ferwerda. Photographic tone reproduction for digital images. *In Proceedings of SIGGRAPH '02*, Vol. 21, pp. 267-276, 2002.
- [4] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman. Gradient domain high dynamic range compression. *In Proceedings of SIGGRAPH '02*, Vol. 21, pp. 249-256, 2002.
- [5] Y. H. Yee and S. Pattanaik. Segmentation and adaptive assimilation for detail-preserving display of high-dynamic range images. *In The Visual Computer(VC)*, Vol. 19, pp. 457-466, 2003.
- [6] H.-T. Chen, T.-L. Liu, and T.-L. Chang. Tone reproduction: A perspective from luminance-driven perceptual grouping. *In Proceedings of CVPR '05*, Vol. 65, pp. 73-96, 2005.
- [7] G. Krawczyk, K. Myszkowski, and H.-P. Seidel. Lightness perception in tone reproduction for high dynamic range images. *In Proceedings of EUROGRAPHICS '05*, Vol. 24, pp. 635-645, 2005.
- [8] C. Rother, V. Kolmogorov, and A. Blake. GrabCut: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts. *In Proceedings of SIGGRAPH '04*, Vol. 23, pp. 309-314, 2004.
- [9] J. Tumblin and H. Rushmeier. Tone reproduction for computer generated images. *In IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 13(6), pp. 42-48, 1993.
- [10] G. Ward. A contrast-based scale factor for luminance display. *In Graphics Gems IV*, P. Heckbert, Ed. Academic Press, Boston, pp. 415-421, 1994.
- [11] J. Holm. Photographic tone and colour reproduction goals. *In CIE Expert Symposium '96 on Colour Standards for Image Technology*, pp. 51-56, 1996.
- [12] QtPfsGui project homepage. <http://qtpfsgui.sourceforge.net/>, 2009.
- [13] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec. *High Dynamic Range Imaging*. Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [14] R. Mantiuk. <http://cdb.paradise-insight.us/corpora/CorpusRafaelMantiuk/>, 2011.



(a) No.1



(b) No.2

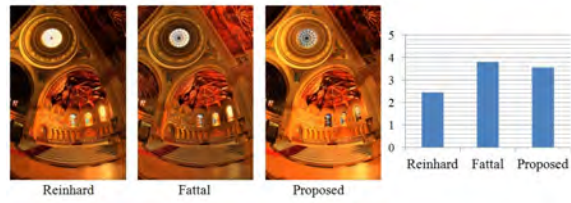


(c) No.3



(d) No.4

図 6 提案手法に適している画像に対する主観評価実験の満足度 .



(a) No.5



(b) No.6



(c) No.7



(d) No.8

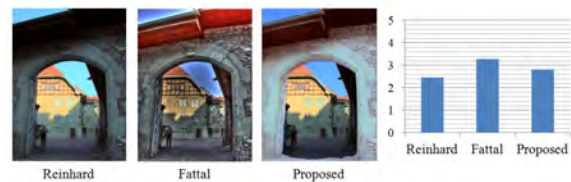
図 7 提案手法への適, 不適の判別が困難な画像に対する主観評価実験の満足度 .



(a) No.9



(b) No.10



(c) No.11



(d) No.12

図 8 提案手法に適していない画像に対する主観評価実験の満足度 .