

NAIST-IS-MT1051039

修士論文

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 画像のためのトーンマッピング

北浦 真樹

2012年2月2日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

北浦 真樹

審査委員：

横矢 直和 教授 (主指導教員)

小笠原 司 教授 (副指導教員)

神原 誠之 准教授 (副指導教員)

佐藤 智和 准教授 (副指導教員)

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 画像のためのトーンマッピング*

北浦 真樹

内容梗概

ハイダイナミックレンジ (HDR) 画像を，一般的なローダイナミックレンジ (LDR) ディスプレイに適切に表示させるためには，トーンマッピングにより HDR 画像のダイナミックレンジを適切に圧縮する必要がある．従来手法では，一般的に画素間の輝度の大小関係を保存する潜在的な制約が存在するため，利用できる LDR 画像のダイナミックレンジには制限が生じる．本研究では，明領域と暗領域の明度分布と空間分布が二分される HDR 画像を対象とし，各領域が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間の視覚には違和感が生じないと仮定する．この仮定のもと，HDR 画像を明領域と暗領域へ分割し，各領域に異なるトーンマッピングを独立に適用する．実験において，提案手法により生成された，ダイナミックレンジを有効に利用して表現された結果画像を示す．また，主観評価実験により提案手法と従来手法の実験結果を比較することで，本研究で設定した仮定の妥当性と提案手法の有効性を検証し，さらに提案手法に適した画像の特性に関して考察する．

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

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1051039, 2012年2月2日.

Tone Mapping for HDR Images with Dimidiate Luminance and Spatial Distributions of Bright and Dark Regions*

Masaki Kitaura

Abstract

This thesis proposes a novel tone mapping method in consideration of characteristics of human visual perception for a high dynamic range (HDR) image with dimidiated luminance and spatial distributions of bright and dark regions. In order to represent an HDR image with a standard low dynamic range (LDR) display, it is necessary to appropriately compress the dynamic range of HDR image by tone mapping. Conventional methods implicitly have the restriction to keep the magnitude relationship between luminance values of pixels so that they cannot use dynamic range effectively. In this study, we focus on an HDR image with dimidiated luminance and spatial distributions of bright and dark regions as target images. We assume that human visual perception does not feel a sense of discomfort even if the 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. In experiments, we show that the proposed tone mapping method produces the image represented by using a dynamic range effectively. In addition, we confirm

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1051039, February 2, 2012.

that the proposed tone mapping method is useful through subjective evaluation and discuss the features of the HDR images suitable for our method.

Keywords:

tone mapping, high dynamic range, segmentation

目次

1. はじめに	1
2. トーンマッピングの従来研究と本研究の位置付け	5
2.1 トーンマッピングの従来研究の概要	5
2.2 グローバルトーンマッピング	6
2.3 ローカルトーンマッピング	7
2.4 本研究の位置付け	14
3. 明領域と暗領域に独立に輝度変換を適用するトーンマッピング	18
3.1 提案手法の概要	18
3.2 提案手法に適した画像の判別基準	18
3.3 HDR 画像の領域分割	21
3.4 明領域と暗領域の輝度変換	23
4. 実験	25
4.1 提案手法によるトーンマッピング実験	25
4.1.1 実験環境	25
4.1.2 提案手法の適用結果と考察	26
4.2 総合的な満足度を評価した主観評価実験	31
4.2.1 実験環境	31
4.2.2 主観評価実験結果	33
4.2.3 定性的観点に基づく比較と考察	60
4.3 視認性, アーティファクトの影響 (違和感), 総合的な満足度を評価した主観評価実験	61
4.3.1 実験環境	61
4.3.2 主観評価実験結果	63
4.3.3 定性的観点に基づく比較と考察	89
4.3.4 適用可能な画像についての考察	89

5. まとめ	93
謝辞	94
参考文献	95
付録	98
A. GrabCut アルゴリズム	98
B. Reinhard らのトーンマッピング	100
C. Fattal らのトーンマッピング	102

目 次

1	ダイナミックレンジの比較 [1]	2
2	露出条件の異なる画像 (露出時間:左端 1/1000[s] , 右端 1/4[s])[3]	2
3	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 画像の 例 (対数変換後)	3
4	Zone System[13]	8
5	Zone System における輝度の読み取り (上:middle-gray の決定 , 下: 明領域と暗領域の決定)[13]	9
6	アナログ写真現像工程における覆い焼き (左) と焼き込み (右)	9
7	Yee らの手法の処理の流れ [16]	11
8	Chen らの手法の処理の流れ [17]	12
9	一次元画像空間における Fattal らの手法の処理の流れ (各グラフの 縦軸は異なるスケールで表記)	13
10	提案手法のアイデアを表す輝度変換関数	16
11	提案手法のフローチャート	19
12	本研究における明領域と暗領域の分割例	20
13	グラフカットにおいて構築するグラフ	22
14	図 12(a) を入力とした領域分割画像	22
15	図 12(a) を入力とした提案手法のトーンマッピング結果	23
16	Reinhard らの手法を用いた各領域の輝度変換の様子	24
17	明領域の複数領域への分割	24
18	実験カメラと HDR 画像合成ソフトウェア	26
19	撮影した露出画像 (露出時間 : [s])	26
20	トーンマッピング結果 (撮影画像から合成した HDR 画像)	28
21	トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:room[4])	29
22	トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:memorial[4])	30
23	主観評価実験に用いた資料	32
24	画像 No.1 の主観評価実験結果	34
25	画像 No.2 の主観評価実験結果	35

26	画像 No.3 の主観評価実験結果	36
27	画像 No.4 の主観評価実験結果	37
28	画像 No.5 の主観評価実験結果	38
29	画像 No.6 の主観評価実験結果	39
30	画像 No.7 の主観評価実験結果	40
31	画像 No.8 の主観評価実験結果	41
32	画像 No.9 の主観評価実験結果	42
33	画像 No.10 の主観評価実験結果	43
34	画像 No.11 の主観評価実験結果	44
35	画像 No.12 の主観評価実験結果	45
36	画像 No.13 の主観評価実験結果	46
37	画像 No.14 の主観評価実験結果	47
38	画像 No.15 の主観評価実験結果	48
39	画像 No.16 の主観評価実験結果	49
40	画像 No.17 の主観評価実験結果	50
41	画像 No.18 の主観評価実験結果	51
42	画像 No.19 の主観評価実験結果	52
43	画像 No.20 の主観評価実験結果	53
44	画像 No.21 の主観評価実験結果	54
45	画像 No.22 の主観評価実験結果	55
46	画像 No.23 の主観評価実験結果	56
47	画像 No.24 の主観評価実験結果	57
48	画像 No.25 の主観評価実験結果	58
49	実験実施前に提案手法に適していると想定していた画像一覧 . . .	59
50	実験実施前に提案手法に適していないと想定していた画像一覧 . .	59
51	主観評価実験に用いた資料	62
52	画像 No.1 の主観評価実験結果	64
53	画像 No.2 の主観評価実験結果	65
54	画像 No.3 の主観評価実験結果	66

55	画像 No.4 の主観評価実験結果	67
56	画像 No.5 の主観評価実験結果	68
57	画像 No.6 の主観評価実験結果	69
58	画像 No.7 の主観評価実験結果	70
59	画像 No.8 の主観評価実験結果	71
60	画像 No.9 の主観評価実験結果	72
61	画像 No.10 の主観評価実験結果	73
62	画像 No.11 の主観評価実験結果	74
63	画像 No.12 の主観評価実験結果	75
64	画像 No.13 の主観評価実験結果	76
65	画像 No.14 の主観評価実験結果	77
66	画像 No.15 の主観評価実験結果	78
67	画像 No.16 の主観評価実験結果	79
68	画像 No.17 の主観評価実験結果	80
69	画像 No.18 の主観評価実験結果	81
70	画像 No.19 の主観評価実験結果	82
71	画像 No.20 の主観評価実験結果	83
72	画像 No.21 の主観評価実験結果	84
73	画像 No.22 の主観評価実験結果	85
74	画像 No.23 の主観評価実験結果	86
75	画像 No.24 の主観評価実験結果	87
76	画像 No.25 の主観評価実験結果	88
77	4.2 節の実験結果から分類した提案手法に適している画像一覧	91
78	4.2 節の実験結果から分類した提案手法に適していない画像一覧	91
79	4.3 節の実験結果から分類した提案手法に適している画像一覧	92
80	4.3 節の実験結果から分類した提案手法に適していない画像一覧	92

表 目 次

1	攝影環境	25
---	----------------	----

1. はじめに

デジタルカメラやディスプレイ，プリンターなどデジタル画像を扱う機器において，画像の表現可能な明るさの範囲の指標であるダイナミックレンジは，一般にシーンや画像における最も明るい部分と最も暗い部分の明暗の比，つまり輝度の最高値と最低値の比によって定義される．図1に示すように，実世界のダイナミックレンジは，およそ $10^8 : 1$ であり，シーンに直接的に光源が写り込んでいる場合は，より広くなる．また，太陽光により照らされる屋外の領域と室内灯などにより照らされる屋内の領域の両方が混在するシーンにおいては，ダイナミックレンジはさらに広いものとなる．人の視覚が本来持つダイナミックレンジは $10^4 : 1$ 程度であるが，そのダイナミックレンジを周囲の環境の照明条件に合わせて適応的に変化させることで，実世界のダイナミックレンジに対応することができる．これに対して，一般に市販されているデジタルカメラやディスプレイ等の機器では，記録・表示可能なダイナミックレンジに制限が存在し，そのダイナミックレンジは通常 $100:1$ 程度，高性能なものであっても $1000:1$ 程度である [1]．その結果，ダイナミックレンジが足りずに画像中で白とびや黒つぶれなどが生じ，実世界のシーンを正確に記録・表示することができない．

デジタル機器において扱うことができるダイナミックレンジが制限されてしまう問題を解決する方法の一つとして，ハイダイナミックレンジ (HDR) 画像の取得が挙げられ，近年，市販のデジタルカメラなどの機能として搭載されており注目が高まっている．一般的に利用されるローダイナミックレンジ (LDR) 画像は各画素が256階調，つまりデータ量が8bitである階調値を保存しているのに対し，HDR画像の各画素は8bitより大きな階調値を保存しているため，標準的なLDR画像に比べて広いダイナミックレンジを記録することが可能となる．HDR画像は，一般的に図2のように露出の異なる条件下で撮影された複数枚のLDR画像を合成することで生成され [2]，撮影したシーンの輝度情報を正確に記録することができる．その結果，LDR画像で，ダイナミックレンジが足りないために黒つぶれや白とびが生じていた領域において，HDR画像ではその領域のテクスチャ等の情報を記録することが可能となる．

しかし，HDR画像を生成することにより実世界の正確なダイナミックレンジ

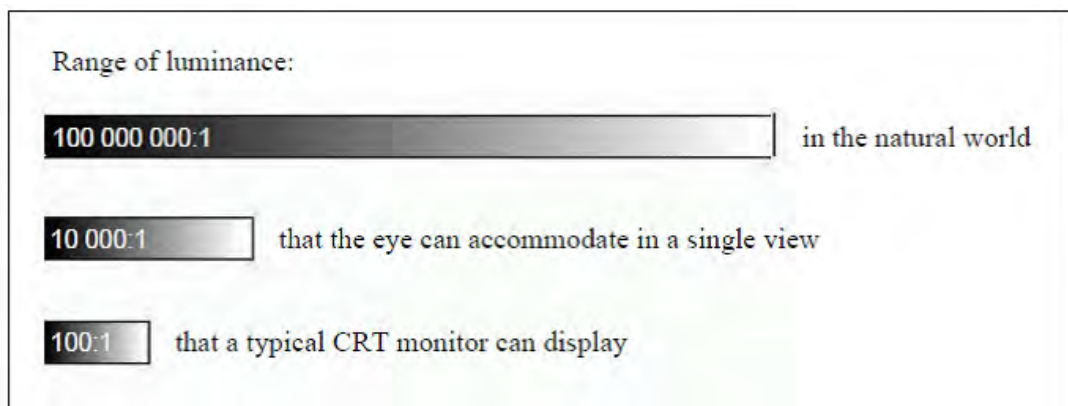


図 1 ダイナミックレンジの比較 [1] .



図 2 露出条件の異なる画像 (露出時間:左端 1/1000[s], 右端 1/4[s])[3] .

を記録することは可能となるが、表示可能な階調値が 8bit である一般的な LDR ディスプレイでは、各画素が 8bit より大きな階調値を保存している HDR 画像を、そのまま適切に表示することができない。そこで、HDR 画像のダイナミックレンジを適切に圧縮するトーンマッピングが必要となる。トーンマッピングとは、HDR 画像のダイナミックレンジを圧縮することで、通常のディスプレイで表示可能なダイナミックレンジを持つ LDR 画像を生成する輝度変換処理を意味する。

これまでに様々なトーンマッピング手法が提案されているが、既存のトーンマッピング手法では適切に再現できないシーンが存在する。明るい陽光に照らされる屋外などの明領域と暗い室内灯などに照らされる屋内などの暗領域の両方が含まれるシーンである。明領域と暗領域の詳細なテクスチャを再現するためには、各領域を表現するためにより広いダイナミックレンジがそれぞれ必要となるが、従来手法では適用前後で画素間の輝度値の大小関係を保存するという制約が存在す



図 3 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 画像の例 (対数変換後) .

るため、各領域で利用できるダイナミックレンジが限られてしまう。その結果、HDR 画像に記録されているテクスチャ等の情報を全て保存することはできない。

ここで、今までに述べたようなシーンを含む画像の多くは、明領域と暗領域の明度分布と空間的分布が二分されているという特徴を持つことに着目する。明領域と暗領域とは明度の分布が二分されており、また、屋内と屋外のように空間的にも領域が二分されている。そこで、本研究では、このような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 画像を対象とし、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。本研究で対象とする明領域と暗領域の明度分布と空間分布が明確に分かれる画像の例を図 3 に示す。本研究では、図 3 のようなシーンを捉えた画像において、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、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。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画像中の明領域と暗領域の詳細なテクスチャを保存した画像を生成することができる．このように画像の明領域，暗領域の両方のコントラストが強調された画像は，次のような場面に用いられる．例えば，車載カメラなどにおいては，トンネルの出入り口において，トンネル内（暗領域）とトンネル外（明領域）の両方の視覚的情報が求められる．ここで，明領域と暗領域の詳細なテクスチャを再現するためには，領域毎に適したコントラスト強調を適用することが有効である．また，撮影するシーンにテクスチャの重要性が高い絵画などの対象が含まれる場合，その対象と周辺環境でそれぞれ撮影に適する露出が異なる．つまり，テクスチャを保存したい対象毎にコントラスト強調を適用することが有効となる．このように，明度が異なる領域毎のコントラスト強調が求められる場面において，提案手法により生成された画像は有用であると考えられる．

以下，2章では，トーンマッピングの従来研究と本研究の位置付けについて述べる．3章では，明領域と暗領域に独立に輝度変換を行うトーンマッピングについて詳述する．4章では，提案手法により生成した実験結果を示し，主観評価実験において，従来手法と比較することで提案手法の有効性を検証する．最後に，5章でまとめと今後の課題について述べる．

2. トーンマッピングの従来研究と本研究の位置付け

2.1 トーンマッピングの従来研究の概要

トーンマッピングの最終的な目標は、人の視覚が捉えたシーンをディスプレイやプリンタなどの表示機器で忠実に再現することである [4]。人が知覚するシーンの印象は、画像の明るさとコントラストに大きく依存しているため、トーンマッピングでは、HDR 画像のダイナミックレンジの圧縮と適切な階調の保存が重要な課題となる。HDR 画像のダイナミックレンジを LDR 画像のダイナミックレンジへの圧縮することは、単純に HDR 画像の輝度のスケーリングにより解決できる。しかし、単純な輝度のスケーリングでは、LDR 画像に変換した際に HDR 画像が持っていた詳細な情報 (コントラスト) の損失を引き起こす。そこで、コントラスト等の詳細な画像情報を保存しながら HDR 画像のダイナミックレンジを LDR 画像のダイナミックレンジに圧縮することを目標として、トーンマッピングの研究がなされている。

従来のトーンマッピング手法は、画像全体に一律な輝度変換を行うグローバルトーンマッピングと、画像の局所毎に異なった輝度変換を行うローカルトーンマッピングに大別できる。グローバルトーンマッピングは、トーンマッピング手法の中でも最も簡単な手法に分類され、一律な変換関数を用いて画像全体の輝度変換を行う。一般的にグローバルトーンマッピングは計算コストが低く、実時間で処理を行うことができるため、実世界のシーンをそのまま光源として利用するイメージベースドライティングなどの実時間での処理が必要となる応用 [5] において用いられる。しかし、グローバルトーンマッピングは画像全体に一律な輝度変換をおこなうことで、利用できるダイナミックレンジに限界が生じ、画像中のテクスチャ等の情報の視認性が失われてしまうという欠点がある。

そこで、シーンの再現性を高めるために画像の局所毎に異なった輝度変換を行うローカルトーンマッピングが近年注目されている。一般的にローカルトーンマッピングでは、画像中の局所領域における注目画素と近傍画素の輝度情報を考慮して輝度変換を行うため、グローバルトーンマッピングに比べて計算コストは高くなる。しかし、局所毎に変換関数を設定可能であるため、局所毎に適したダイナ

ミックレンジの設定が可能となり，HDR 画像のテクスチャ等の情報や局所的なコントラストを維持したまま輝度変換ができる．また，画像の局所領域毎に異なった輝度変換を適用することができるため，人の視覚システムの特徴である局所的な明暗順応を再現することが可能となる．このローカルトーンマッピングの課題の一つとして，ハロ (halo) と呼ばれる視覚的なアーティファクトがあげられる．ハロアーティファクトは，トーンマッピング適用後の輝度が急激に変化しコントラストが反転することにより生じる原画像に存在しない影のような効果を指す．隣接画素間で輝度の大小関係を保存する制約を持つローカルトーンマッピングでは，輝度の整合性を維持しようとする結果，このアーティファクトが生じてしまう．以下，2.2 節でグローバルトーンマッピングの従来研究，2.3 節でローカルトーンマッピングの従来研究について詳述する．

2.2 グローバルトーンマッピング

ディスプレイ上で人の視覚システムに知覚される画像の輝度と，物理量としての実世界のシーンの輝度の対応付けを目的としたトーンマッピング手法が Tumblin-Rushmeier ら [6, 7, 8] によって提案されている．Tumblin-Rushmeier らの手法では，経験的手法により構築された人の視覚システムで知覚される輝度と物理量の輝度間の関係性を示した理論 [9] を用いて，HDR 画像に保存された実世界の正確な輝度とディスプレイ上で表示する輝度を対応付けながらダイナミックレンジを圧縮する．Tumblin-Rushmeier らが知覚される輝度と実世界の輝度の関係に着目したのに対して，Ward ら [10] はディスプレイ上で知覚されるコントラストと実世界のシーンのコントラストの対応付けを目的として，輝度変換を行う手法を提案した．その後，Larson ら [11] は，Ward らの手法を拡張し，ヒストグラム上での輝度分布を考慮したトーンマッピング手法を提案した．Larson らの手法は，シーンに存在する物体の視認性と画像のコントラストを高めることが目的であり，経験的手法によって作成された人の視覚システムのモデルを用いてヒストグラム上で輝度調整を行う．Drago ら [12] は，より広いダイナミックレンジを扱うために対数関数を利用したトーンマッピング手法を提案した．Drago らの手法では，底の値が小さい対数関数曲線の急激な傾きが低輝度画素の輝度変換に適しており，

一方、底の値が大きい対数関数曲線の比較的なだらかな傾きが高輝度画素の圧縮に適しているという見解に基づいて、入力画像のシーンに応じて適応的に対数の底の値を変化させる。

これらのグローバルトーンマッピングは、アイデアが単純で計算コストが低いため、リアルタイム性が要求される場合の応用には適している。しかし、入力画像に一樣に輝度変換を施すことで全ての画素間で輝度値の大小関係が保存されてしまうため、局所領域の詳細なテクスチャを表現する微小なコントラストは失われてしまう。その結果、局所的に詳細なテクスチャ等の情報が記録されている HDR 画像においては、記録されているシーンを忠実に再現することが困難となる。

2.3 ローカルトーンマッピング

局所的な領域の詳細なコントラストが失われてしまうグローバルトーンマッピングに対し、ローカルトーンマッピングは画像の局所毎に異なった輝度変換を適用できるため、局所毎により広いダイナミックレンジを利用することができる。その結果、HDR 画像が記録している詳細なコントラストを保存した LDR 画像を生成することができる。ここでは、各手法が着目する局所性の違いによりローカルトーンマッピングの従来手法を以下のように分類する。

分類 1 グローバルトーンマッピング後に局所的に輝度補正する手法。

分類 2 領域ごとに輝度変換する手法。

分類 3 画素単位の局所領域で輝度変換する手法。

まず、分類 1 のグローバルトーンマッピング後に局所的に輝度補正をおこなうローカルトーンマッピング手法として、Reinhard ら [13, 14] の手法があげられる。Reinhard らは、トーンマッピングにアナログ写真の現像過程に利用される二つの技術のアイデアを利用した。写真工学において広く用いられている露出決定手法の一つである Zone System[15] と局所的な露出操作技術である Dodging-and-burning である。Zone System とは、実際に撮影現場で行われるフィルムの感度測定の手法である。図 4 に示す通り、ゾーン (Zone) とは個々に設定された幅を持つ輝度領

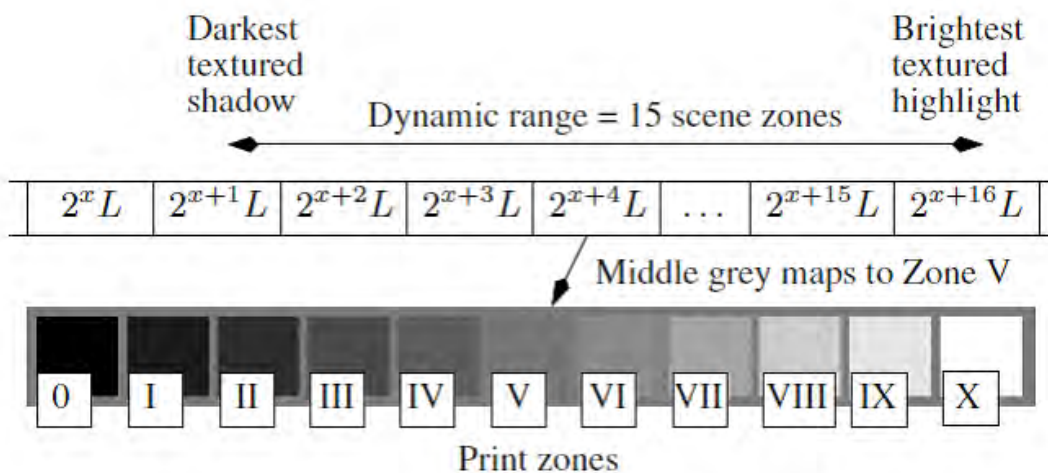


図 4 Zone System[13].

域と定義され、シーンはグレースケールレベルの黒色から白色に相当する複数のゾーンから成り立っている。Zone System において、カメラマンはシーンの再現性を高めるために、撮影現場で測定された輝度情報を利用する。その際に、図 5 に示す「読み取り」と呼ばれる作業を通して、カメラマンは主観的に中間階調の領域 (middle-gray) を決定する。次に、中央のゾーンに該当する middle-gray に基づいて、再度読み取りを行って出力ダイナミックレンジの高輝度部と低輝度部に該当する領域を決定し、それぞれ最上位のゾーンと最下位のゾーンに割り振った後、シーンの全ての輝度を適切なゾーンに割り当てる。

Reinhard らのトーンマッピングにおいては、入力 HDR 画像の対数平均輝度値が middle-gray の値に設定され、middle-gray の値を基準に画像全体にグローバルトーンマッピングを適用する。その後、Dodging-and-burning のアイデアを利用した局所的な輝度補正を行う。アナログ写真の現像過程においては、図 6 のように穴を開けた厚紙などを通して露出の足りない部分にのみ光を当て (焼き込み:dodging)、切った厚紙に針金などの持ち手を付けたもので過露出である部分を隠す (覆い焼き:burning) 処理を施す。その結果、現像される写真の黒つぶれや白とびを軽減させることができる。トーンマッピングにおいて、この Dodging-and-

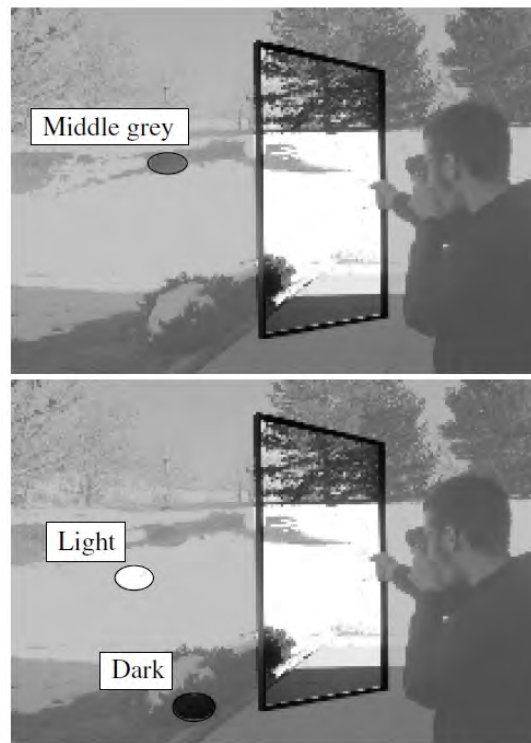


図 5 Zone System における輝度の読み取り (上 : middle-grey の決定 , 下 : 明領域と暗領域の決定)[13] .

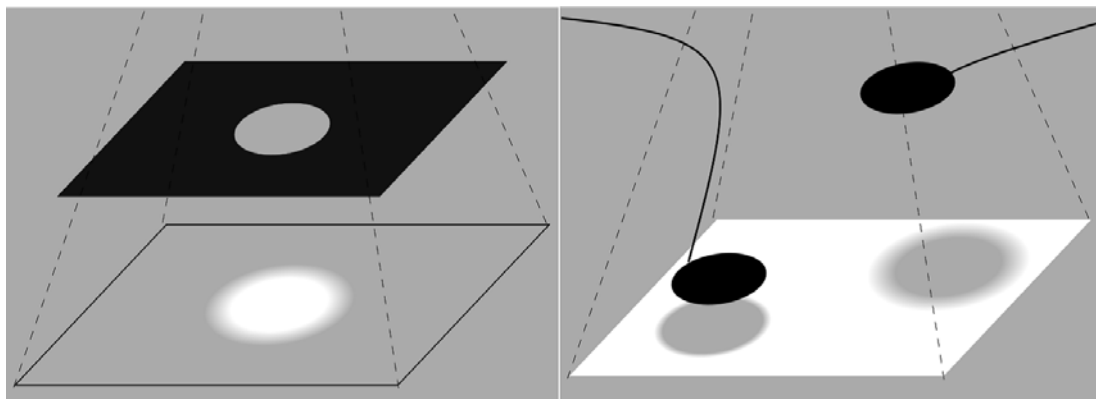


図 6 アナログ写真現像工程における覆い焼き (左) と焼き込み (右) .

burning のアイデアを利用することで、低輝度部を明るく、また高輝度部を暗くし、適用後の白とびや黒つぶれを軽減し局所的なテクスチャなどの画像情報を保存する。このように Reinhard らの手法は、グローバルトーンマッピング後に局所的に輝度補正をおこなう。この Reinhard らの手法は、ローカルトーンマッピング手法の中では、処理が簡単であり計算コストが低いため広く利用される。しかし、局所的な情報に対する考慮が十分でなく表示に利用できるダイナミックレンジが限られてしまう。そのため、1 章で述べた明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像のように各領域で広いダイナミックレンジが必要とされる画像においては、明領域と暗領域の微小なコントラストを保存することができず、各領域の詳細なテクスチャを表現できない。

次に、分類 2 の画像の領域毎にトーンマッピングをおこなう手法として Yee ら [16] や Chen [17] らによって提案されている。Yee らや Chen らの手法は、ともに人の視覚特性を模倣している。ここでいう特性とは、局所的な明度順応 (Local Adaptation) と呼ばれる働きを指す。人の視覚は、本来、認識できるダイナミックレンジには制限があるが、周辺環境の明るさに応じて、そのダイナミックレンジを適応的に調整することで、実世界のシーンの広いダイナミックレンジに対応することができる。これは、周辺環境の明るさに応じて、光彩が光量を調整することにより実現されている。例えば、昼間の明るい環境においては光彩を通過する光量を低減させ、一方、夜間や室内などの暗い環境においては光彩を通過する光量を増加させることで様々な照明環境下に対応することができる。Yee らや Chen らの手法は、明領域や暗領域という画像上の輝度の分布を考慮し、局所的な明暗順応を模倣して、領域分割後にトーンマッピングを行う。

Yee らは、人の視覚の局所的な明暗順応に対応する輝度値を算出し、その輝度値を利用して局所毎に適した輝度変換をおこなうトーンマッピング手法を提案している。Yee らのアルゴリズムは、以下の 4 ステップからなる。

1. 領域分割。
2. グループ分け。
3. 統合。

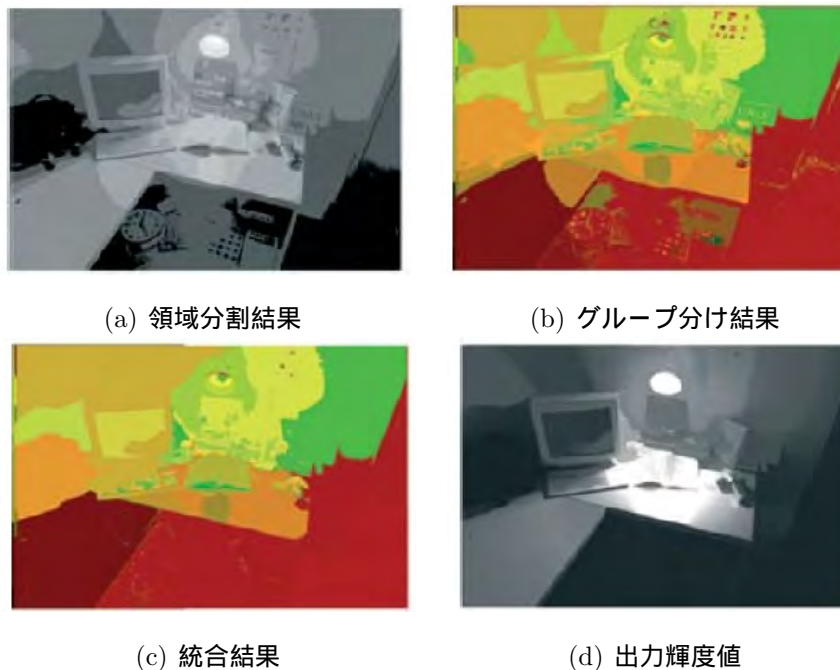


図 7 Yee らの手法の処理の流れ [16] .

4. レイヤー平均化 .

まず，領域分割ステップ (1) において HDR 画像のヒストグラム上の輝度分布に基づいて複数の領域 (カテゴリー) に分割する．次に，グループ分けステップ (2) において，カテゴリーを空間的な連続性に応じて集団 (グループ) にまとめる．統合ステップ (3) においては，小グループを一つのグループに統合した後，各グループには対応する輝度値が与えられ，層 (レイヤー) が形成される．ヒストグラムのビンの大きさを微小に変化させ領域分割を繰り返し行うことで，複数のレイヤーが生成される．最後に，複数のレイヤーに与えられた輝度値を平均化する (4) ことで，人の視覚の局所的な明暗順応に対応する各領域の輝度値を得ることができる．上記のプロセスで得られた各領域の局所的な明暗順応に対応する輝度値を参照し，各領域に輝度変換をおこなう．Yee らの手法は，ハロアーティファクトが生じず，各領域の詳細なテクスチャ等の情報を保存した画像を生成できる．Yee らの手法の処理の流れを図 7 に示す．図 7(a) は領域分割結果，図 7(b) はグループ分け結果である．また，図 7(c) は統合結果，図 7(d) が Yee らの手法により算

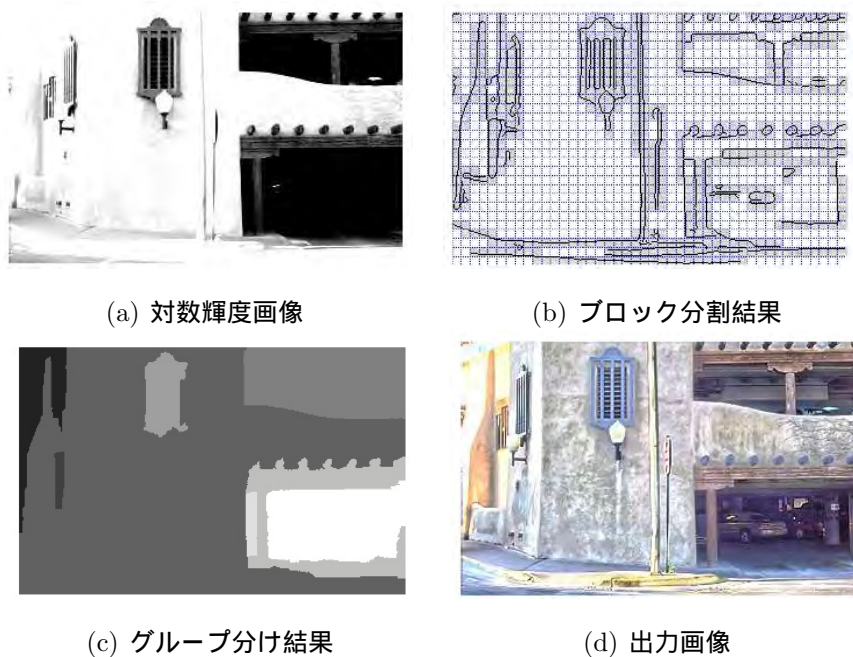


図 8 Chen らの手法の処理の流れ [17] .

出された局所的な明暗順応に対応する輝度値である .

また , Chen らも同様に , 人の視覚の局所的な明暗順応を模倣した , 領域分割に基づくトーンマッピング手法を提案している . Chen らの手法においても , 領域の情報に基づいて局所的な明暗順応に対応する輝度値を求め , その輝度値を利用して視覚的に重要である領域の詳細な情報を保存するトーンマッピングを行う . Chen らの手法のアルゴリズムは , 以下の 3 ステップからなる .

1. ブロック分割 .
2. グループ分け .
3. 領域に基づいたトーンマッピング .

ブロック分割ステップ (1) においては , Canny エッジ検出器を用いて対数輝度画像から検出したエッジによって画像をブロックに分ける . グループ分けステップ (2) において , 分割されたブロックをブロックの輝度に応じて統合しグループ化する . 各グループから局所的な明暗順応に対応した輝度値を算出し , 各領域毎に

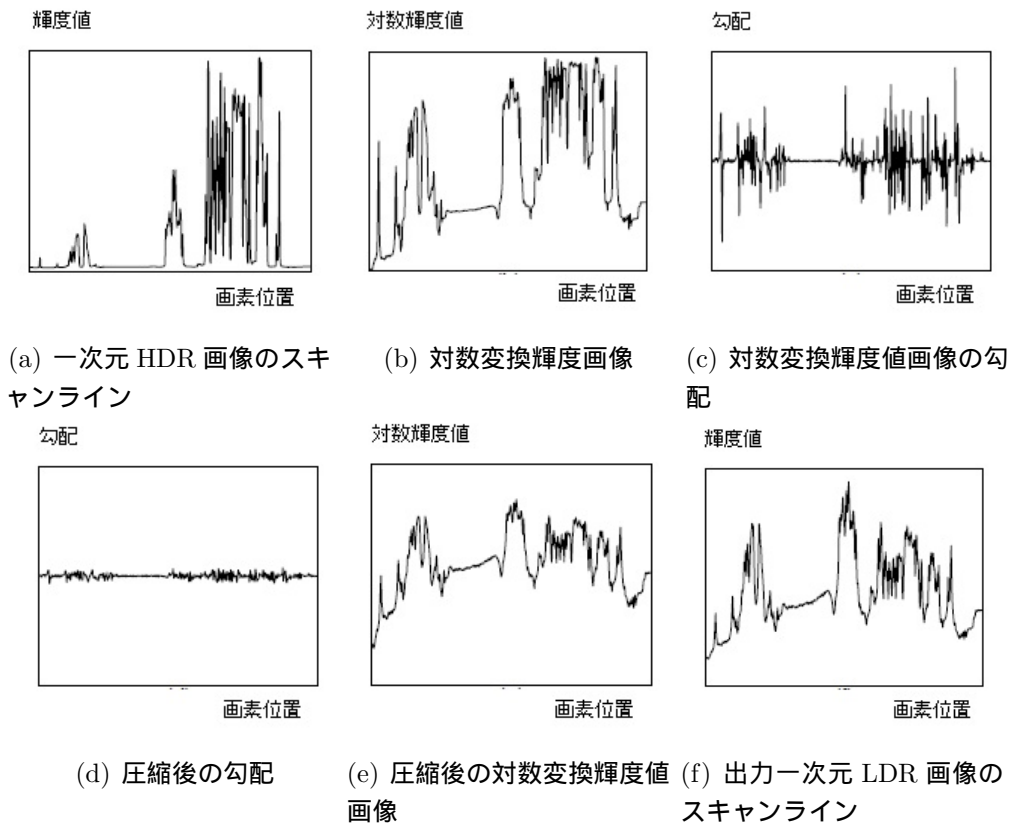


図 9 一次元画像空間における Fattal らの手法の処理の流れ (各グラフの縦軸は異なるスケールで表記) .

ローカルトーンマッピングを適用し (3) , 最後に画像全体の輝度の整合性を維持するために輝度変化を単調にする後処理を施す . その結果 , Chen らの手法も領域毎の詳細なテクスチャ等の情報を保存した画像を生成できる . Chen らの手法の流れを 8 に示す . 図 8(a) は入力 HDR 画像を対数変換した画像 , 図 8(b) はブロック分割結果 , 図 8(c) はグループ分け結果 , そして図 8(d) が Chen らの手法により生成された画像である .

さらに , 分類 3 のより細かい画素単位の局所領域毎にトーンマッピングをおこなう手法が Fattal ら [3] により提案されている . Fattal らの手法は , 人の視覚システムの特徴から , 画像の輝度の勾配変化に着目する . 画像中で輝度勾配が大きな部分はエッジとなり , 輝度勾配が小さな部分は局所的なテクスチャ等を表現する

コントラストとなる。つまり、HDR 画像における輝度勾配が大きな部分のダイナミックレンジの圧縮を強め、輝度勾配が小さな部分のダイナミックレンジを保存することで、ダイナミックレンジを削減しつつ、画像の局所的なテクスチャ等の情報を保存することができる。Fattal らの手法では、対数輝度空間における輝度から輝度勾配を求め、原画像の画素と対応する空間的座標における対数空間におけるコントラストの大きさを算出する。勾配が小さい部分より、勾配が大きい部分を弱める、つまりコントラストが小さい部分よりもコントラストが大きい部分の圧縮を強める。最後に、対数輝度空間において弱められた勾配を原画像の輝度空間に戻すことで詳細なテクスチャ等の情報を表現した視認性の高い LDR 画像を生成する。Fattal らの手法を一次元の画像空間において表現した処理過程を図 9 に示す。図 9(a) が HDR 画像のダイナミックレンジであり、図 9(b) が図 9(a) の対数空間輝度である。図 9(c) が図 9(b) の勾配であり、図 9(d) が減衰された勾配となる。図 9(e) は図 9(d) から構築された対数空間輝度であり、図 9(f) は図 9(e) を指数変換した LDR 画像のダイナミックレンジを表す。実際の二次元の画像空間の処理では、対数輝度画像から算出した勾配を圧縮関数を用いて圧縮し、圧縮後の勾配を求める。その圧縮後の勾配を用いてポアソン方程式を解くことで圧縮後の対数輝度画像を算出する。最後に、圧縮後の対数輝度画像を指数変換することで、出力の LDR 画像が生成される。Fattal らの手法は、画素単位の局所領域毎にトーンマッピングするため、局所的なテクスチャ等の情報を十分に保存した画像を生成することができる。しかし、画素単位の局所領域に着目する結果、明領域と暗領域の境界部などの輝度分布が大きく変化する部分では、適用後の輝度が急激に変化することでコントラストが反転し、2.1 節で述べたハロアーティファクトが生じてしまう。

2.4 本研究の位置付け

本研究では、トーンマッピング適用前後の画像中の画素の輝度値の大小関係に着目する。一般にグローバルトーンマッピングは、輝度変換関数として単調増加関数を利用して、画像全体に一樣な輝度変換を行うため、それぞれ入力 HDR 画像と出力 LDR 画像中の全ての画素間での輝度値の大小関係が保存される。その

結果，コントラストを保持したまま圧縮可能なダイナミックレンジには限界があり，多くの HDR 画像において詳細なテクスチャ等の情報を保存した輝度変換を行うことができない．

次に，ローカルトーンマッピングの中でもグローバルトーンマッピングの処理に近い Reinhard らの手法では，グローバルトーンマッピング後の局所的な輝度補正により，微小な輝度値の大小関係の逆転が生じる．その結果，グローバルトーンマッピングと比較して，ダイナミックレンジをより有効に利用するため画像中の詳細なテクスチャ等の情報を保存できる．しかし，局所的な輝度値の大小関係の反転は微小であり，LDR 表示可能なダイナミックレンジには限界があるため，明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像では明領域と暗領域のテクスチャは十分に表示されない．

また，画像中の領域毎にトーンマッピングを適用する Yee らや Chen らの手法は，各領域にそれぞれトーンマッピングを適用することで，局所的に輝度値の大小関係には逆転が生じるため，各領域のダイナミックレンジをより有効に利用した画像を生成できる．しかし，汎用性を考慮しているため，画像全体の輝度分布の整合性を維持する必要がある．その結果，領域境界部における隣接する画素間での輝度値の大小関係の逆転には限界が生じるため，各領域で利用できるダイナミックレンジが制限されてしまう．

さらに，画素単位の領域毎にトーンマッピングをおこなう Fattal らの手法は，HDR 画像の詳細なテクスチャを表現する微小なコントラストを十分に保存することができる．しかし，画像全体で隣接する画素間での輝度値の大小関係を保存する潜在的な制約が存在するため，明領域と暗領域の境界部などの輝度分布が大きく変化する部分では，コントラストが反転しアーティファクトが生じる．

以上のように，程度の違いはあるが，従来のトーンマッピング手法には共通して輝度値の大小関係を保存する制約が存在し，その結果，出力に利用できるダイナミックレンジが制限されてしまう．そこで提案手法では，対象を明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像に限定し，明度分布と空間的分布が明確に二分される場合は明領域と暗領域の境界部で輝度値の大小関係が逆転しても人の視覚には違和感が生じないと仮定した上で，各領域の境界部で輝度値の大小関係の逆

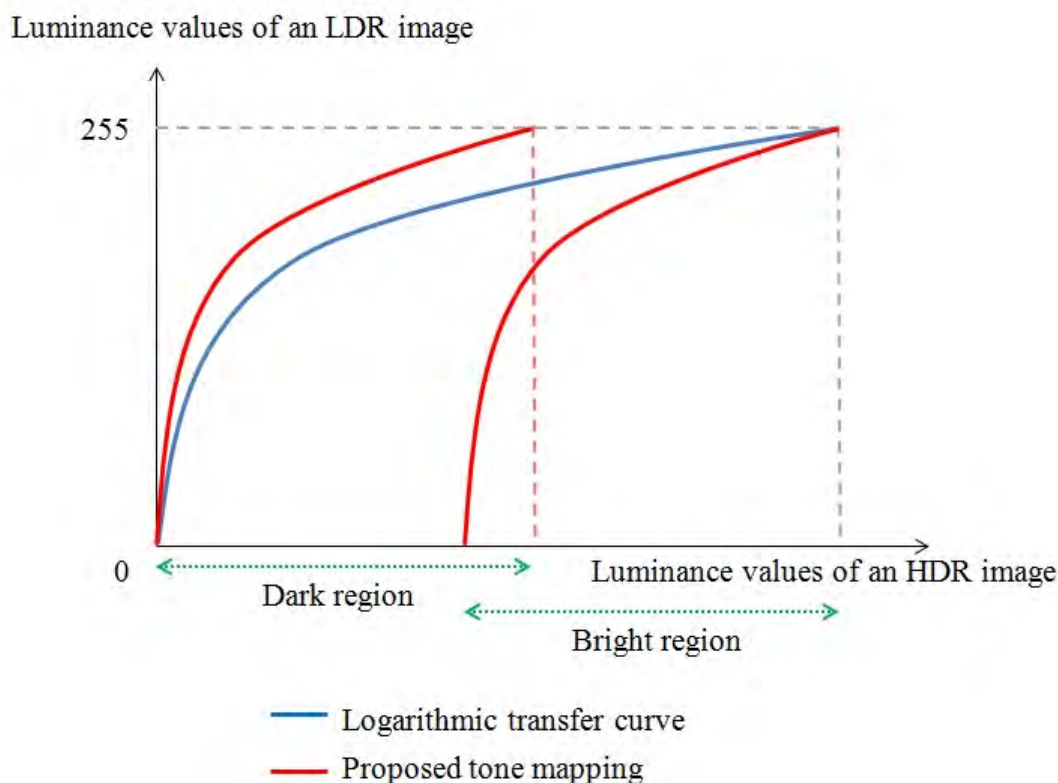


図 10 提案手法のアイデアを表す輝度変換関数。

転を許した輝度変換をおこなう。その結果、従来手法では困難であった明領域と暗領域のダイナミックレンジを最大限に利用することが可能となり、ダイナミックレンジを有効に利用した LDR 画像を生成することができる。図 10 に HDR 画像と LDR 画像間の輝度値の関係性を表現した輝度変換関数を示す。青い線が最も簡単なトーンマッピング手法の一つである対数変換の変換関数曲線であり、赤い線が提案手法のアイデアを表す変換関数曲線である。提案手法では、明領域と暗領域の領域間での輝度値の大小関係の逆転を許すため、領域境界部で変換に利用される出力輝度値は制限されず、図 10 のように明領域、暗領域ともに出力の 256 階調を最大限に利用することができる。

また、提案手法においても、Yee らや Chen らの手法のアイデアと同様に、領域分割により画像を明領域と暗領域に分割するが、輝度情報に基づいて領域分割

を行っていた Yee らや Chen らの手法とは異なり，領域境界で輝度値の大小関係が逆転しても人の視覚に違和感を与えないという仮定を成立させるために，人の視覚が認識する領域へ分割する必要がある．そのため，提案手法ではインタラクティブな領域分割手法を適用する．以上より，提案手法はあらゆる HDR 画像において有効というわけではないが，明度分布と空間的分布が明確に二分される HDR 画像に対しては，従来手法では生成が困難であったダイナミックレンジを有効に利用した LDR 画像を生成することができる．

3. 明領域と暗領域に独立に輝度変換を適用するトーンマッピング

3.1 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，そのような画像においては，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仮定する．その仮定のもと，人の視覚が認識する領域に基づいて，入力 HDR 画像を明領域と暗領域へインタラクティブに領域分割し，各領域に対して独立に輝度変換をおこなう．以上のようなアプローチにより，各領域のダイナミックレンジを効率的に利用し表示可能な LDR 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．

また，提案手法のフローチャートを図 11 に示す．

3.2 提案手法に適した画像の判別基準

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ているという特徴を持つ画像を対象とする．明度分布が二分されるとは，ヒストグラム上での輝度の分布が二峰性の谷となる部分により分かれることを指す．例えば，図 3 では屋外部と屋内部のように大域的に明るい領域と暗い領域を含んでいる．次に，空間的分布が二分されるとは，シーンが物理空間的意味において不連続であることを指す．図 3 では，屋外領域と屋内領域は空間的な連続性の観点において分離している．以上の観点から，図 12(a) の場合は，明領域が図 12(b)，暗領域が図 12(c) のように分割される．

提案手法においては，人の視覚が認識する明度分布と空間的分布が二分されている領域に基づいて領域分割をおこなう必要があるため，インタラクティブな領

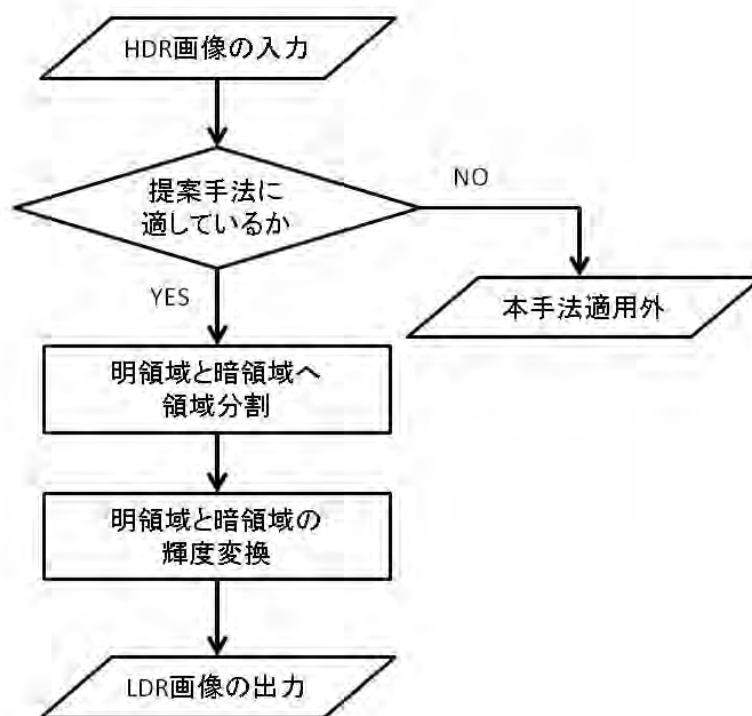


図 11 提案手法のフローチャート.



(a) 入力 HDR 画像 (対数変換後)



(b) 明領域



(c) 暗領域

図 12 本研究における明領域と暗領域の分割例 .

領域分割手法を適用する . つまり , 処理過程にユーザのインタラクションが介入するため , 領域分割を行う前に提案手法に適した画像であるかそうでないかの判別ができることが望ましい . 本研究では , 提案手法を適用した結果に対して主観評価実験をおこなうことで , 提案手法に適した画像の特性を検証する .

3.3 HDR 画像の領域分割

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明度分布と空間的分布が二分される明領域と暗領域へ正確に分割することが必要となる。そのため、ユーザーが分割する領域を指定し、かつ領域の境界に対してインタラクティブに操作を加えることができる領域分割手法を用いる。本研究ではインタラクティブに分割する領域を指定することができ、また境界処理に対してロバストな領域領域手法の一つである GrabCut アルゴリズム [18] を適用する。

GrabCut アルゴリズムは、Boykov ら [19] のグラフカットを用いたインタラクティブな領域分割手法に反復的なパラメータ推定とユーザーインタラクションを単純化するラベリング処理を加えて拡張した領域領域手法である。物体と背景の色分布をモデル化し、グラフカットによるエネルギー最小化 [19, 20] を用いて領域分割を行う。得られた領域分割結果から、色分布を再学習し反復的にエネルギー最小化を行うことで高精度な領域分割を実現している。GrabCut で用いるグラフカットとは、グラフ理論におけるエネルギー最小化問題の解法であり、ソース (source) とシンク (sink) と呼ばれるターミナルと、ノード (node) で構成されているグラフ (図 13) を最大フロー最小カット定理に基づいて 2 つの部分集合に分割する。グラフカットを領域分割で利用するには、予めいくつかの画素を背景もしくは物体に割り振るようにラベル付けを行い、ソースとシンクを定める。次に画像上の各画素をノードと定めグラフを構築する。そして、ターミナルとノードの辺 (t-link) とノード間の辺 (n-link) より与えられるコストを定義し、そのコストが最小となるように最大フロー最小カット定理に基づき分割する。GrabCut では、ある画素 p がターミナルの画素と輝度値が類似しているほど t-link のコストが大きくなる。また、ノード間では周辺の画素と輝度値が類似しているほど n-link のコストが小さくなるように定められている。GrabCut は以下のステップを繰り返すことで領域抽出を行う。

STEP1 ユーザが矩形によりオブジェクトを含む領域を指定する。

STEP2 矩形の外側を背景画素へとラベル付けし、背景と物体の色分布をモデ

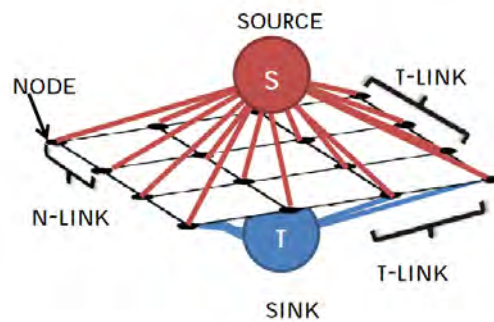


図 13 グラフカットにおいて構築するグラフ .

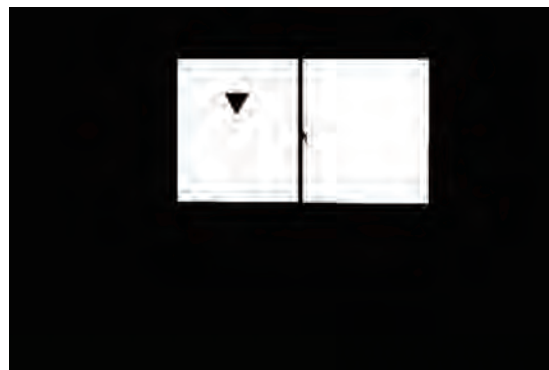


図 14 図 12(a) を入力とした領域分割画像 .

ル化する .

STEP3 STEP2 に加え , 必要であればインタラクティブにラベル付けを行いモデルを更新する .

STEP4 Graph Cut を行う .

STEP5 ユーザが領域抽出の結果に修正を加えたい場合は , STEP3 に戻り必要に応じてモデルを更新する .

図 12(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 14 に示す . 図 14 では , 明領域が白色 , 暗領域が黒色で指定されている . GrabCut に



図 15 図 12(a) を入力とした提案手法のトーンマッピング結果 .

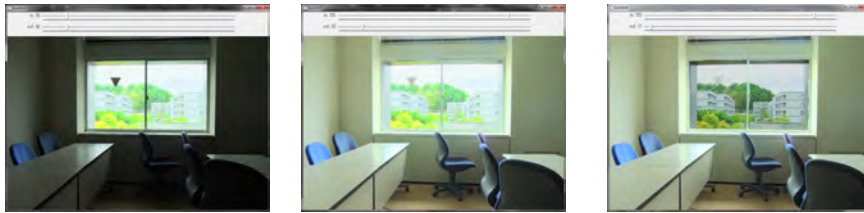
については，付録 A で詳述する .

3.4 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 . そのため，従来のトーンマッピング手法を各領域の輝度変換に利用する . 適用するトーンマッピング手法の例としては，Reinhard らの手法，Fattal らの手法などがあげられる . それらの手法に関しては，付録 B,C で詳述する .

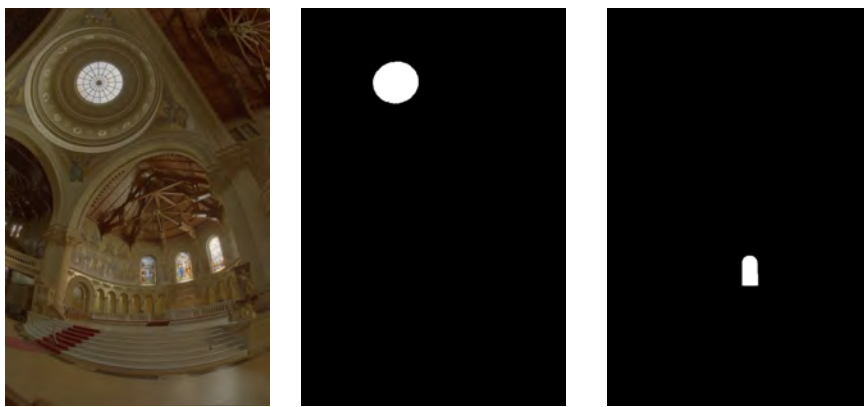
ステップ (1) において生成された図 14 のような領域分割画像をマスクとして利用し，各領域の輝度変換をおこなう . Reinhard らの手法を適用した各領域の輝度変換の様子を図 16 に示す . ここで，Reinhard らの手法で用いられているパラメータは，図 16(b)，16(c) のように各領域毎でユーザが主観的に適すると思われる値を設定する .

また，明度分布と空間的分布が二分されるという条件を満たし，かつ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，図 17 のようにさらに小領域に分割し，それらの領域に対しても同様に独立に輝度変換をおこなう . その結果，分割された各小領域で，ダイナミックレンジを有効に利用することができる .

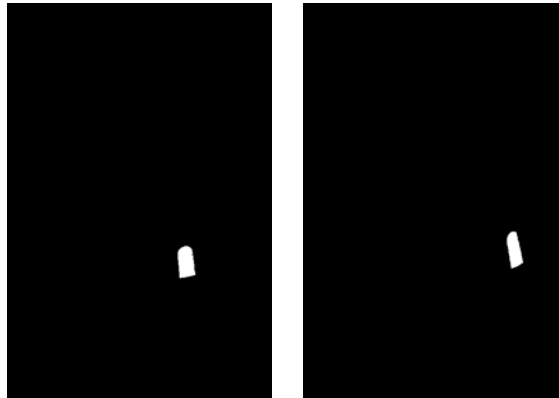


(a) パラメータ設定前の出力画像 (b) 暗領域のパラメータ設定 (c) 明領域のパラメータ設定

図 16 Reinhard らの手法を用いた各領域の輝度変換の様子。



(a) 入力 HDR 画像 (対数変換後) (b) 領域分割画像 1 (c) 領域分割画像 2



(d) 領域分割画像 3 (e) 領域分割画像 4

図 17 明領域の複数領域への分割。

4. 実験

4.1 提案手法によるトーンマッピング実験

4.1.1 実験環境

実験において，提案手法を明度分布と空間的分布が二分される HDR 画像に適用し，明領域と暗領域のテクスチャの視認性の高い LDR 画像を生成できることを確認する．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，図 18(a) のデジタル一眼レフカメラ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，図 18(b) のハイダイナミックレンジ画像編集ソフトウェア [21, 22] を用いて HDR 画像に合成した．撮影環境の詳細を表 1 に示す．また，その撮影環境下で撮影した露出画像例を図 19 に示す．なお，本実験では提案手法に適すと考えられる屋外領域と屋内領域を含んだシーンを選び撮影した．また，後者のベンチマーク HDR 画像は，文献 [4] とウェブサイト [23] にて公開されている HDR 画像から選択し利用した．

表 1 撮影環境．

撮影場所	情報科学研究科 B 棟 (B311, リフレッシュコーナー)
撮影カメラ	PENTAX K-7
1 シーンの露出画像枚数	4 枚
各画像の露出時間	1/60, 1/15, 1/8, 1/4 [s]
画像のサイズ (画素)	4672 × 3104
水平・水平方向の解像度	72 [dpi]
ISO 感度	ISO-200
焦点距離	21 [mm]



(a) K-7, PENTAX

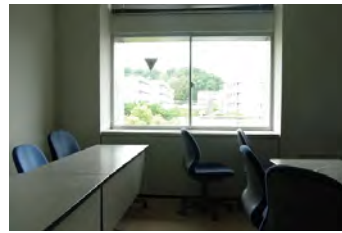


(b) LuminanceHDR[22]

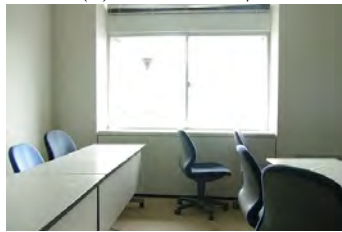
図 18 実験カメラと HDR 画像合成ソフトウェア .



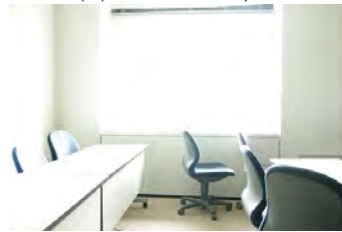
(a) 露出時間:1/60



(b) 露出時間:1/15



(c) 露出時間:1/8



(d) 露出時間:1/4

図 19 撮影した露出画像 (露出時間 : [s]) .

4.1.2 提案手法の適用結果と考察

複数枚の入力 HDR 画像に対し, Reinhard[13] らの手法, Fattal[3] らの手法, 提案手法を適用した結果を示す. 図 20 が撮影画像から合成した HDR 画像, 図 21, 図 22 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 20(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 21(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 21(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ハロ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 20(c),21(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 22(c) のスタ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．次節で，Reinhard ら，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．



(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法

図 20 トーンマッピング結果 (撮影画像から合成した HDR 画像) .



(a) Reinhard

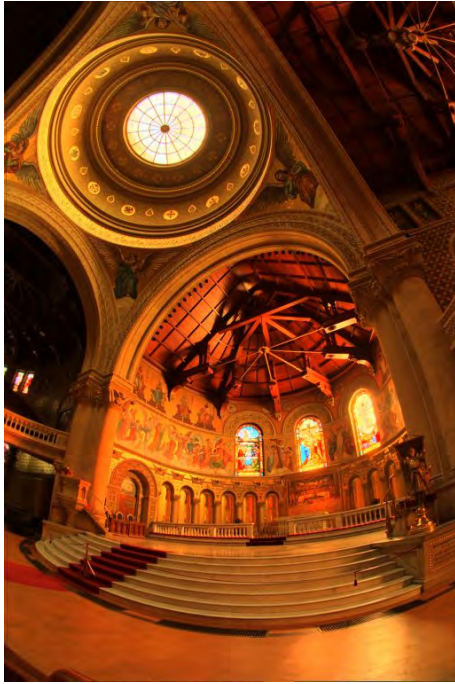


(b) Fattal



(c) 提案手法

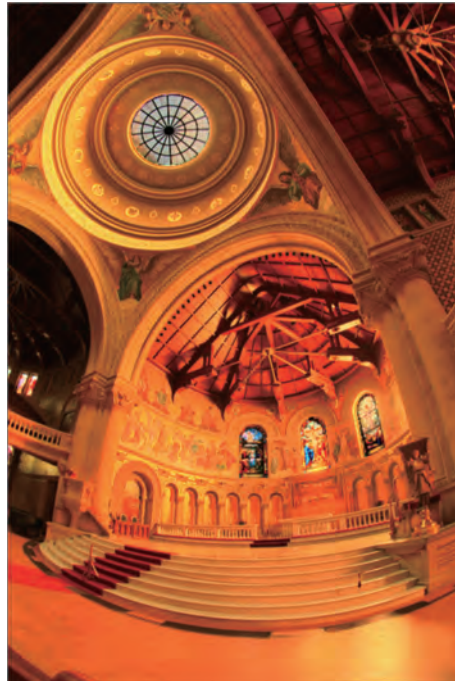
図 21 トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:room[4]) .



(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法

図 22 トーンマッピング結果 (ベンチマーク HDR 画像:memorial[4]) .

4.2 総合的な満足度を評価した主観評価実験

4.2.1 実験環境

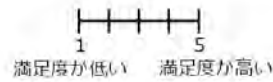
提案手法の有効性と提案手法が有効な HDR 画像の特性を検証するために、25 枚の HDR 画像を入力画像とし、従来手法と提案手法により生成された LDR 画像に対する主観評価実験をおこなった。HDR 画像は撮影画像から合成した HDR 画像 3 枚とベンチマーク HDR 画像 22 枚からなり、それぞれの HDR 画像に対して、Reinhard らの手法、Fattal らの手法、提案手法を適用した結果を用いた。各手法の結果画像をランダムに提示し、被験者 11 名が各画像を評価した。評価基準として、トーンマッピングにおける課題となるテクスチャが認識できるかという視認性、アーティファクトなどによる違和感の有無、の二点を図 23(a) に示すように被験者に事前に説明した上での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。本主観評価実験において、PC ディスプレイに提示した資料例を図 23(b) に示す。また、本主観評価実験において提案手法が有効な HDR 画像の特性を検証するために、提案手法に適すると想定した HDR 画像と不適と想定した HDR 画像を選定し利用した。

主観評価実験

以降のスライドは、HDR画像にトーンマッピングを適用した結果画像です。

あなたがカメラで次のシーンを撮影した場合、以下のトーンマッピングにおける観点を踏まえた上で(a)から(c)の画像の満足度を5段階で評価してください。

トーンマッピングにおける観点
✓視認性 - テクスチャの見えやすさ(白と黒のつぶれ)
✓違和感 - グラセーションや影のようなアーティファクトの有無

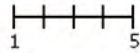


各画像に対する評価を別紙Excelシートに記入してください。気付いた点等があれば、コメント欄に記入をお願いします。

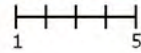
(a) 事前説明資料

No.1

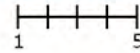
(a)



(b)



(c)

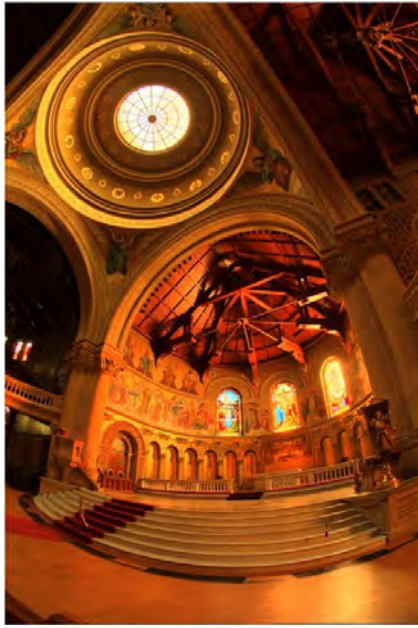


(b) 実験資料例

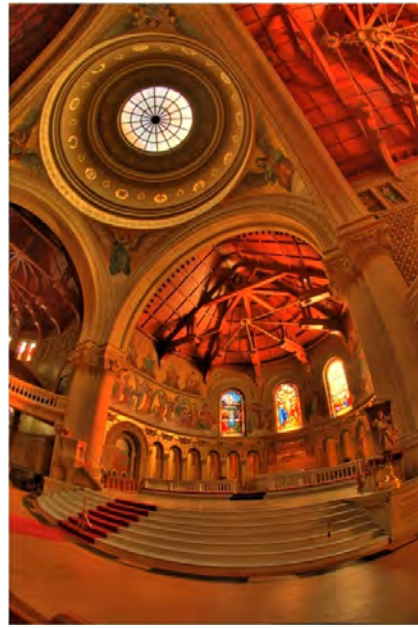
図 23 主観評価実験に用いた資料。

4.2.2 主観評価実験結果

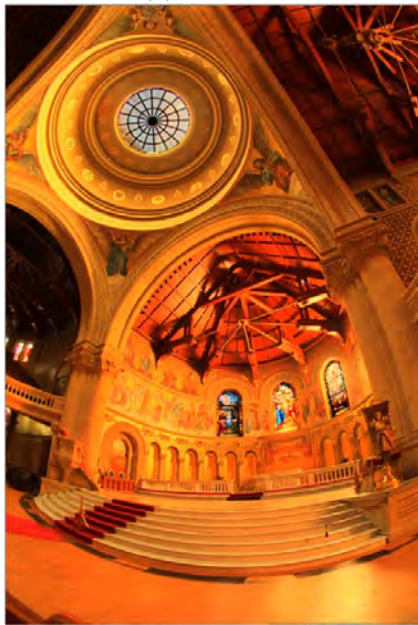
主観評価実験の全結果を図 24 から図 48 に示す。(d) に該当する満足度は、左から Reinhard らの手法、Fattal らの手法、提案手法各画像に対する満足度の平均値を示している。また、本実験前に著者が主観的に提案手法に適していると想定した HDR 画像は、図 24、25、26、28、29、30、31、32、33、34、36、40、41、42 である。提案手法に適していると想定した HDR 画像の一覧を図 49 に示す。逆に、不適と想定した HDR 画像は、図 27、35、37、38、39、43、44、45、46、47、48 である。提案手法に不適と想定した HDR 画像の一覧を図 50 に示す。まず、Reinhard らの手法と提案手法の評価結果を比較する。提案手法に適すると想定していた HDR 画像において、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。不適と想定していた HDR 画像である図 39、43、45、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。提案手法に適すると想定していた図 25、30、31、32、33、36、40 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、適すると想定していた HDR 画像である図 24、26、28、29、34、41、42 においては、Fattal らの手法と同等、もしくは Fattal らの手法より低い満足度であった。提案手法に不適と想定していた HDR 画像に対しては、概して Fattal らの手法の方が満足度が高かった。



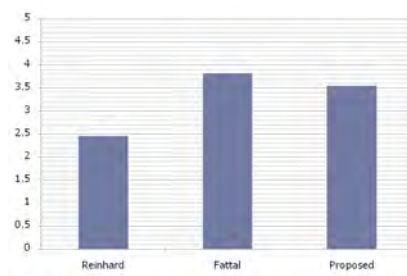
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 24 画像 No.1 の主観評価実験結果 .



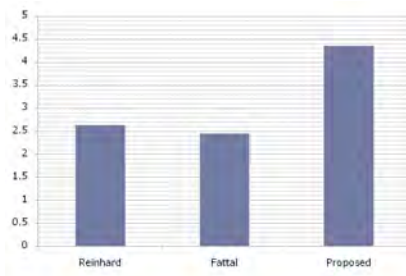
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 25 画像 No.2 の主観評価実験結果 .



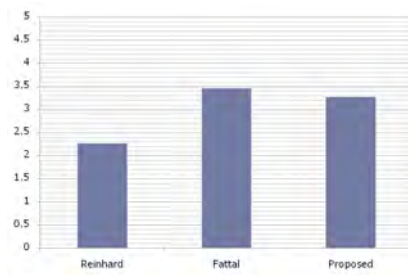
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 26 画像 No.3 の主観評価実験結果 .



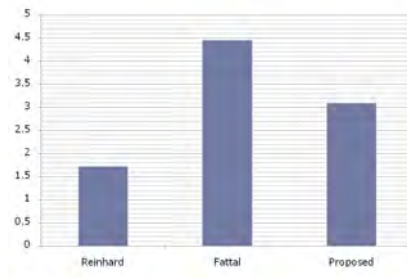
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

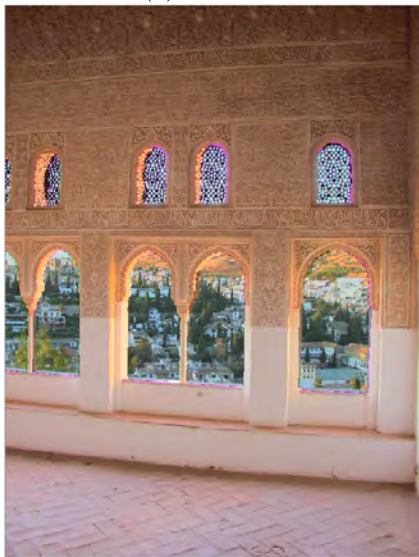
図 27 画像 No.4 の主観評価実験結果 .



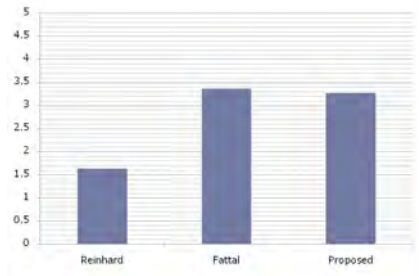
(a) Reinhard



(b) Fattal

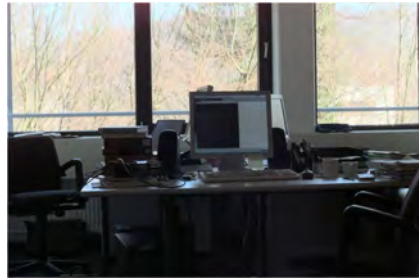


(c) 提案手法

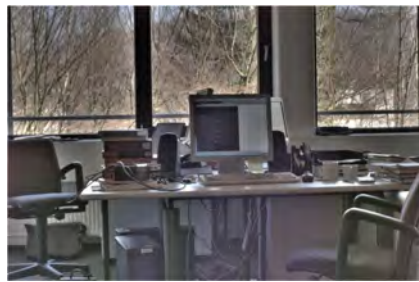


(d) 満足度

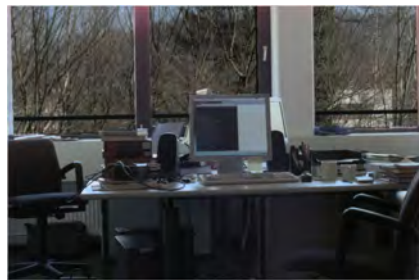
図 28 画像 No.5 の主観評価実験結果 .



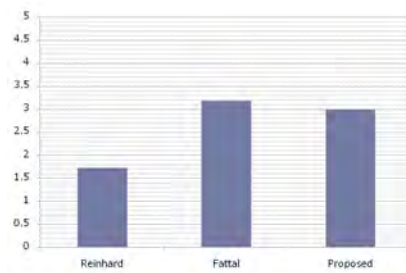
(a) Reinhard



(b) Fattal

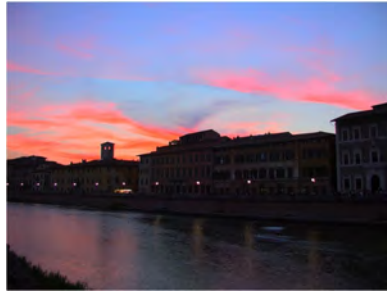


(c) 提案手法



(d) 満足度

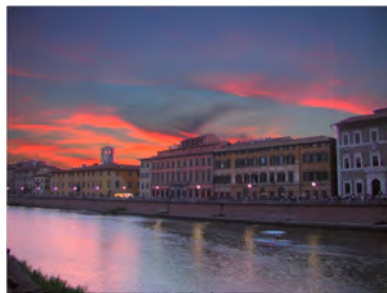
図 29 画像 No.6 の主観評価実験結果 .



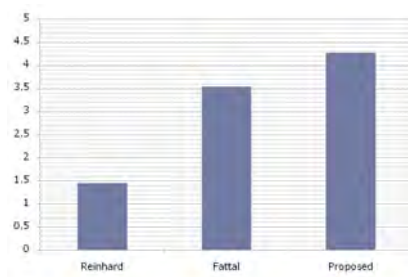
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 30 画像 No.7 の主観評価実験結果 .



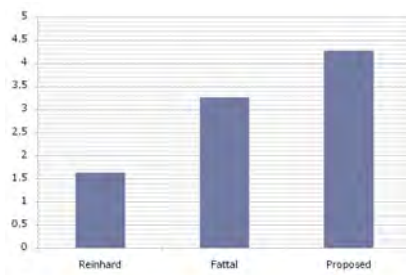
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 31 画像 No.8 の主観評価実験結果 .



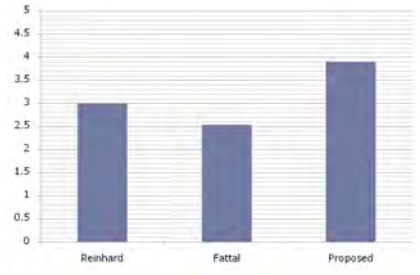
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 32 画像 No.9 の主観評価実験結果 .



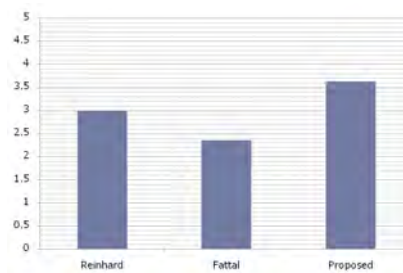
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 33 画像 No.10 の主観評価実験結果 .



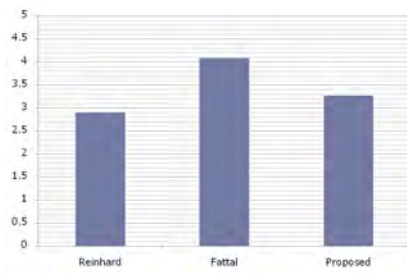
(a) Reinhard



(b) Fattal

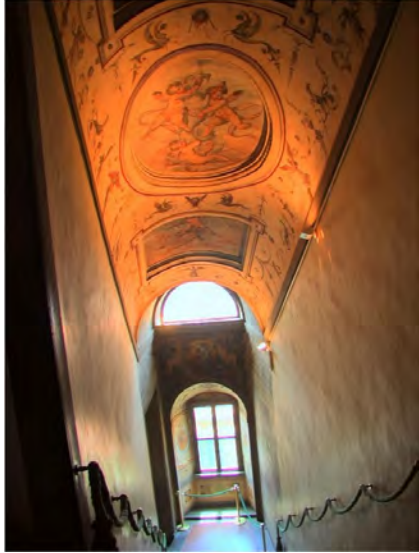


(c) 提案手法



(d) 満足度

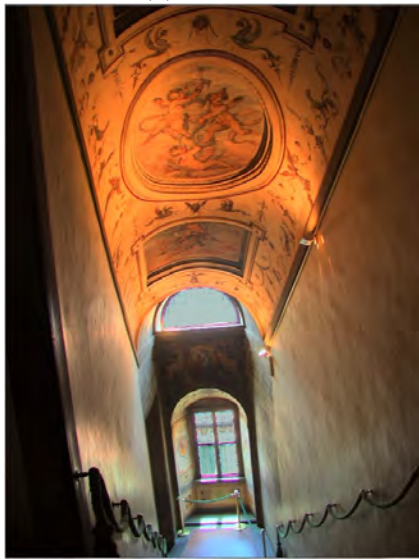
図 34 画像 No.11 の主観評価実験結果 .



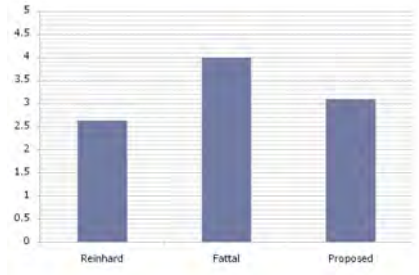
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 35 画像 No.12 の主観評価実験結果 .



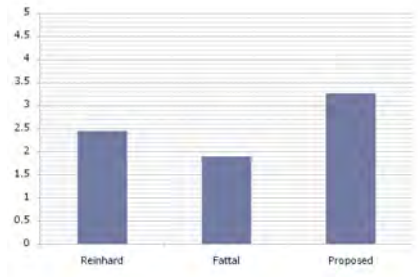
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 36 画像 No.13 の主観評価実験結果 .



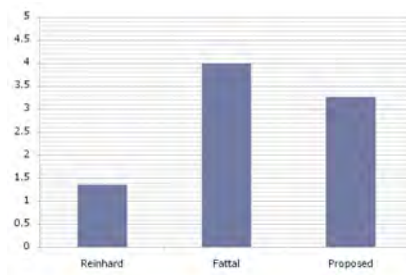
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 37 画像 No.14 の主観評価実験結果 .



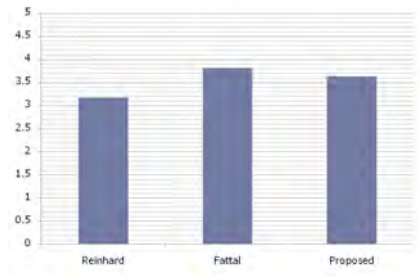
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 38 画像 No.15 の主観評価実験結果 .



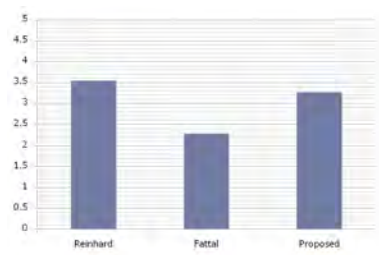
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 39 画像 No.16 の主観評価実験結果 .



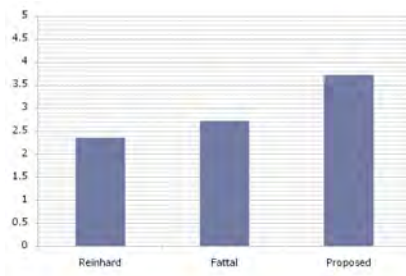
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 40 画像 No.17 の主観評価実験結果 .



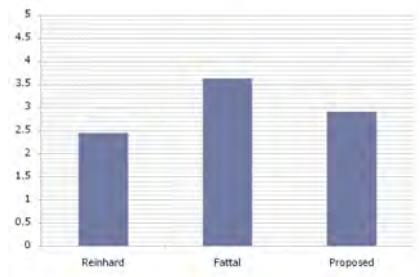
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 41 画像 No.18 の主観評価実験結果 .



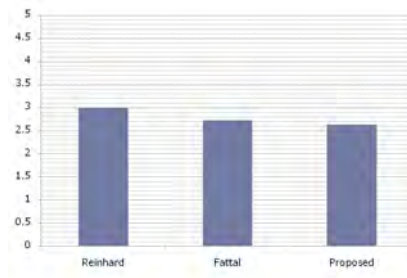
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

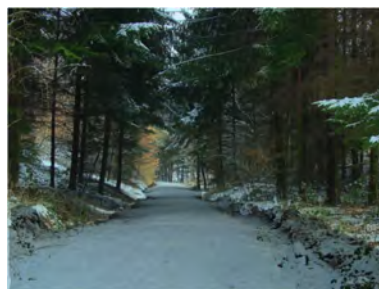
図 42 画像 No.19 の主観評価実験結果 .



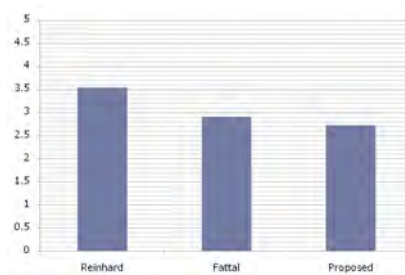
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 43 画像 No.20 の主観評価実験結果 .



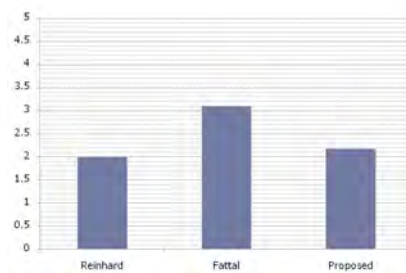
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 44 画像 No.21 の主観評価実験結果 .



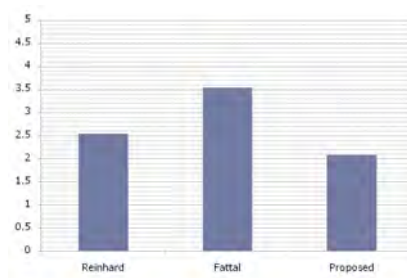
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 45 画像 No.22 の主観評価実験結果 .



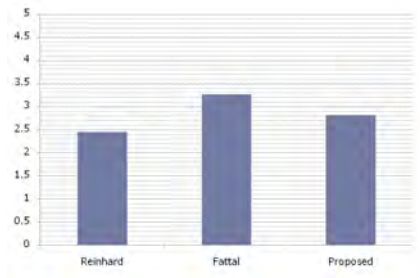
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 46 画像 No.23 の主観評価実験結果 .



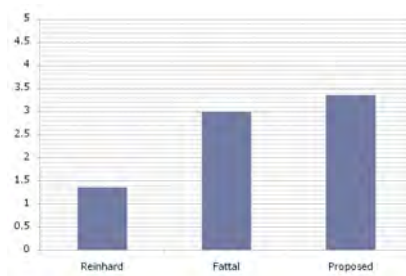
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 47 画像 No.24 の主観評価実験結果 .



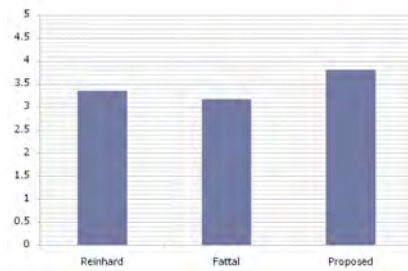
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 満足度

図 48 画像 No.25 の主観評価実験結果 .

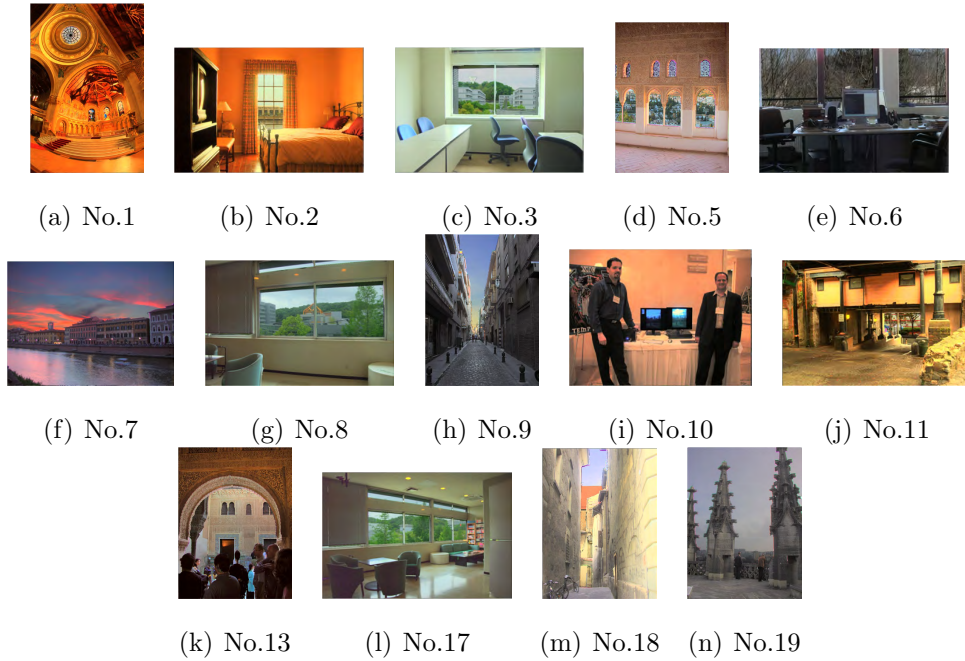


図 49 実験実施前に提案手法に適していると想定していた画像一覧 .

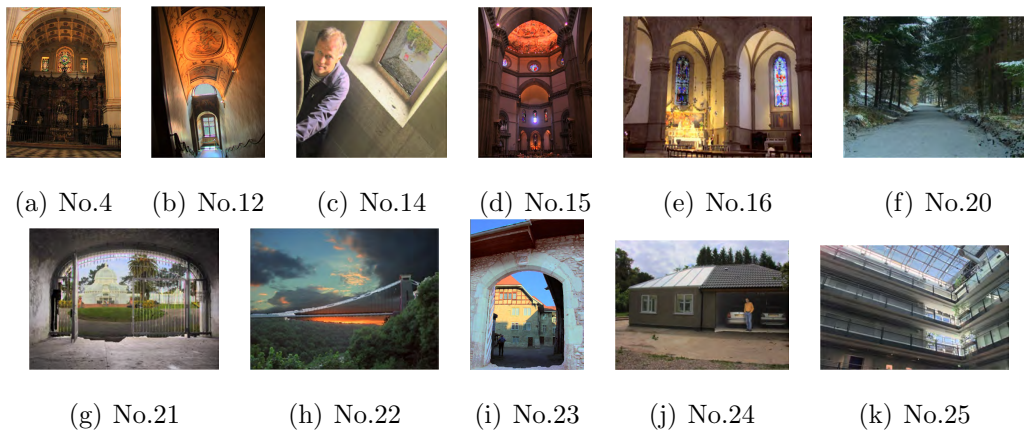


図 50 実験実施前に提案手法に適していないと想定していた画像一覧 .

4.2.3 定性的観点に基づく比較と考察

まず，提案手法と従来手法の結果を定性的観点から考察する．提案手法に適すると想定していた HDR 画像では，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 39 のように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 43，45 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，提案手法に適していると想定していた HDR 画像である図 24，26，29，34 において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 25，31，33，36 など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，本主観評価実験における提案手法の結果を絶対評価した場合，満足度の 5 段階評価の中央値である 3 を絶対評価の基準と設定すると，図 24 から 40，47，48 は提案手法が 3 より高い満足度が得られる画像を生成している．逆に，図 41 から 46 においては提案手法の生成した画像の満足度は低かった．以上の結果から，本実験で利用した HDR 画像の多くで提案手法は満足度の高い画像を生成していると考えられ，相対評価の場合と同様の結論が得られる．

4.3 視認性，アーティファクトの影響（違和感），総合的な満足度を評価した主観評価実験

4.3.1 実験環境

提案手法の有効性をより細かく評価するために，評価項目を増やして主観評価実験をおこなった．4.2 節の主観評価実験で用いた HDR 画像に対して，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．各手法の結果画像をランダムに提示し，被験者 10 名が各画像を評価した．評価基準は，

1. 暗い部分や明るい部分の画像情報を認識することができるか（視認性）
2. 不自然なグラデーションや影のような効果が気にならないか（違和感）
3. 提示画像に対して総合的に満足できるか（満足度）

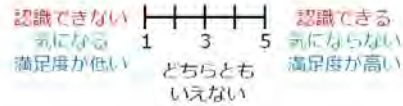
とし，各項目に対して値 3 を評価の基準として，5 段階で評価した．ここでは，5 を最高値，1 を最低値とした．本主観評価実験において，PC ディスプレイに提示した資料例を図 51(b) に示す．

主観評価実験

以降のスライドは、HDR画像にトーンマッピングを適用した結果画像です。

(a)から(c)の画像に対する**視認性**、**違和感**、**満足度**をそれぞれ5段階で評価してください。

- ✓ **視認性** - 暗い部分や明るい部分の画像情報(何が写っているか、どのような模様か等)を認識することができるか。
- ✓ **違和感** - 不自然なグラデーションや影のような効果が気にならないか。
- ✓ **満足度** - 提示画像に対して総合的に満足できるか。



各画像に対する評価を別紙Excelシートに記入してください。

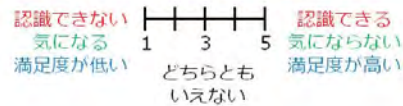
(a) 事前説明資料

No.1

(a)

(b)

(c)

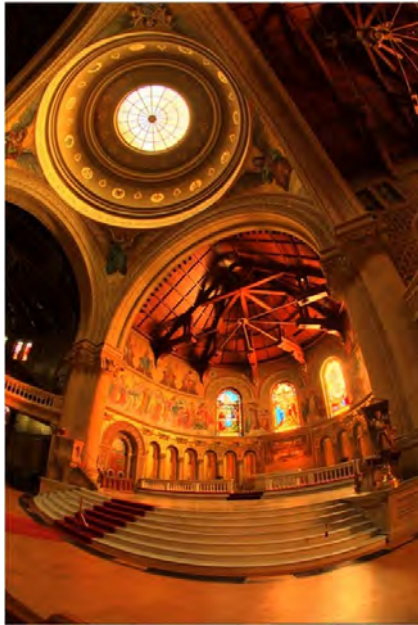


(b) 実験資料例

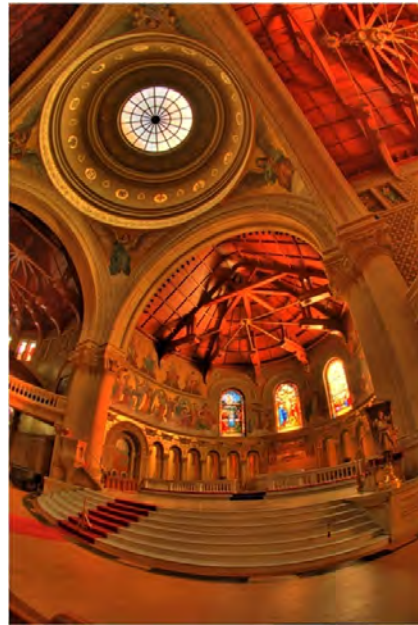
図 51 主観評価実験に用いた資料。

4.3.2 主観評価実験結果

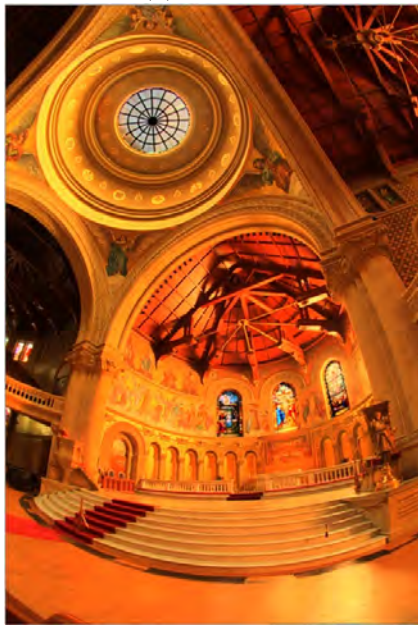
主観評価実験の全結果を図 52 から図 76 に示す。(d) は、左から Reinhard らの手法, Fattal らの手法, 提案手法各画像に対する視認性, 違和感, 満足度の平均値を示している。本実験前に著者が主観的に提案手法に適していると想定した HDR 画像, 不適と想定した HDR 画像は, 4.2 節の実験と同様に図 49, 図 50 に示す画像である。まず, Reinhard らの手法と提案手法の評価結果を比較する。提案手法に適すると想定していた HDR 画像, 不適と想定していた HDR 画像ともに概して Reinhard らの手法に比べて, 提案手法を適用した場合の方が視認性は高かった。違和感に関しては, 全体的に提案手法より Reinhard らの手法の結果の方が違和感が小さいという結果となった。Fattal らの手法と提案手法の評価結果を比較において, 提案手法に適していると想定していた HDR 画像では, 図 53, 54 などのように提案手法の方が視認性が高い画像は存在するが, 概して同等程度の視認性となったが, 図 72 から図 76 などの適していないと想定していた画像においては Fattal らの手法の方が視認性は高かった。また, 違和感に関しては, 図 53, 60, 61, 64, 70 などの画像では, Fattal らの手法の違和感は大きいという結果となった。



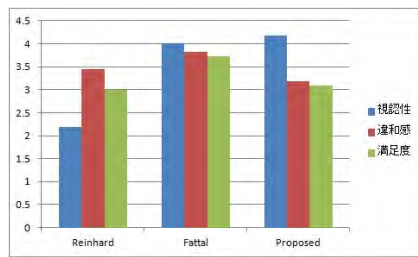
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

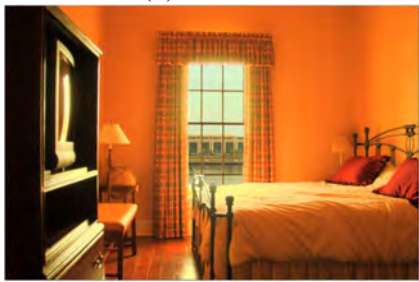
図 52 画像 No.1 の主観評価実験結果 .



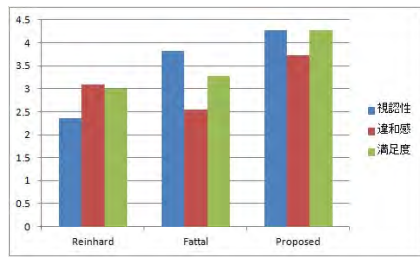
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 53 画像 No.2 の主観評価実験結果 .



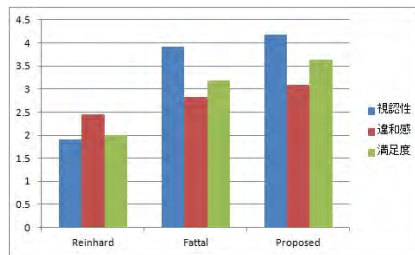
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 54 画像 No.3 の主観評価実験結果 .



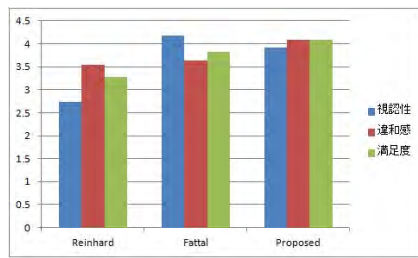
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

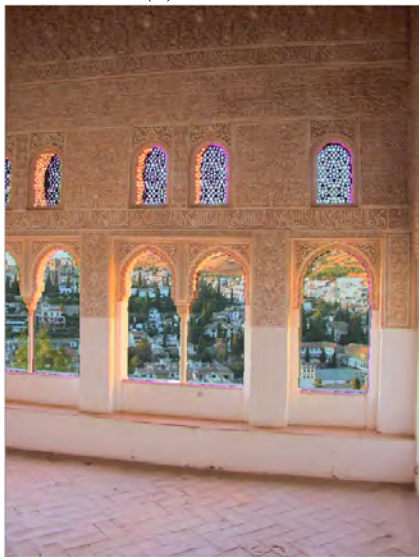
図 55 画像 No.4 の主観評価実験結果 .



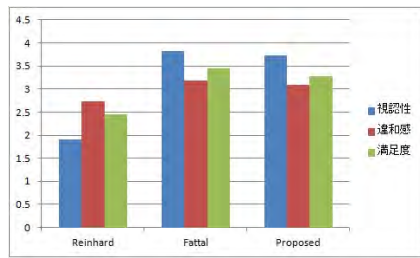
(a) Reinhard



(b) Fattal

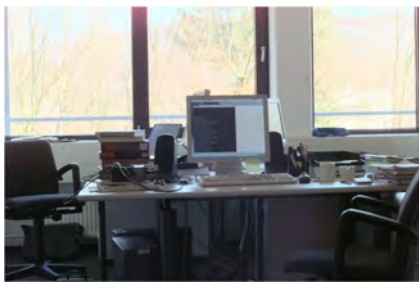


(c) 提案手法

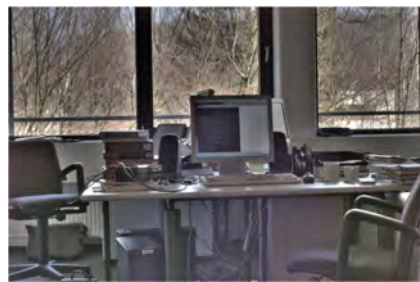


(d) 評価結果

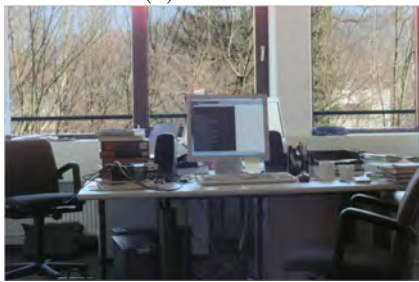
図 56 画像 No.5 の主観評価実験結果 .



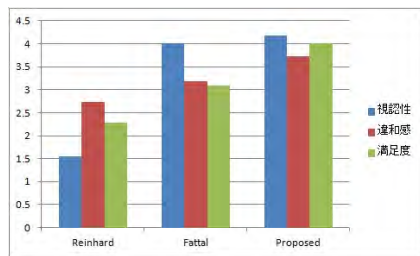
(a) Reinhard



(b) Fattal

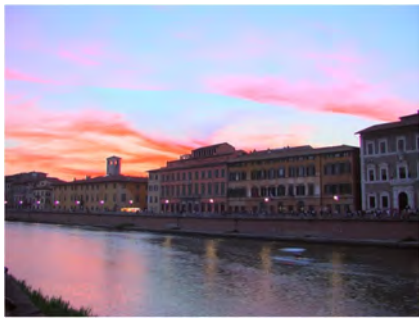


(c) 提案手法



(d) 評価結果

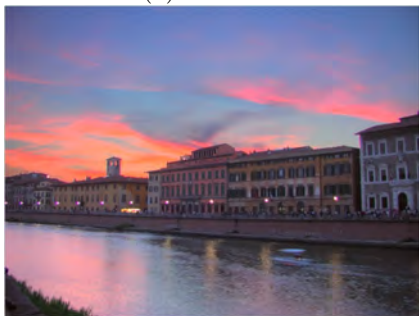
図 57 画像 No.6 の主観評価実験結果 .



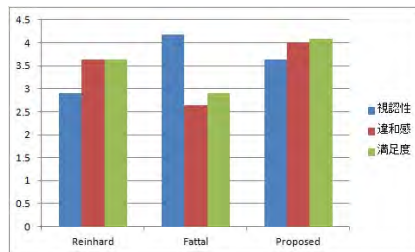
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 58 画像 No.7 の主観評価実験結果 .



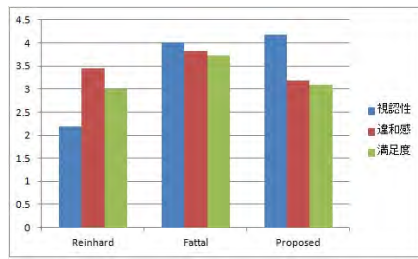
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 59 画像 No.8 の主観評価実験結果 .



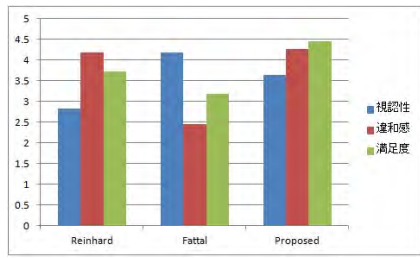
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 60 画像 No.9 の主観評価実験結果 .



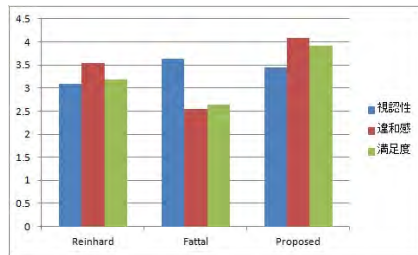
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 61 画像 No.10 の主観評価実験結果 .



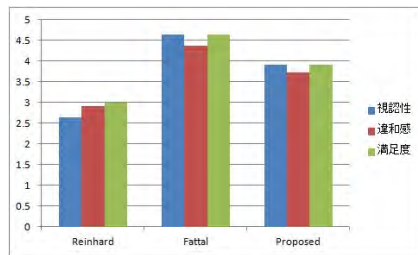
(a) Reinhard



(b) Fattal

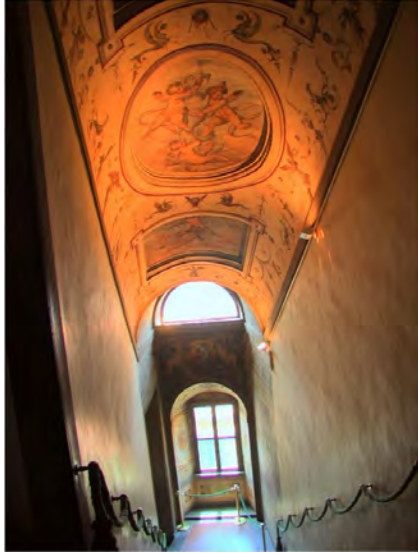


(c) 提案手法



(d) 評価結果

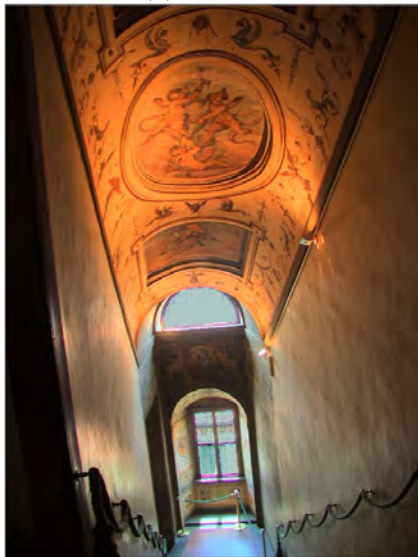
図 62 画像 No.11 の主観評価実験結果 .



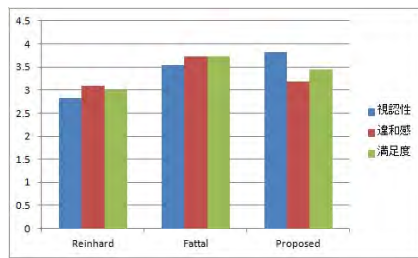
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 63 画像 No.12 の主観評価実験結果 .



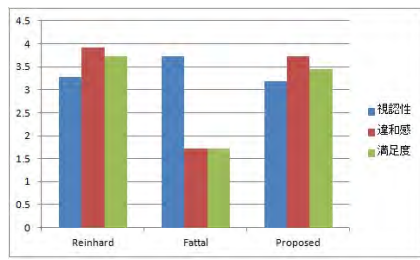
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 64 画像 No.13 の主観評価実験結果 .



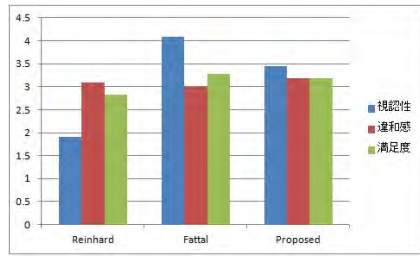
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 65 画像 No.14 の主観評価実験結果 .



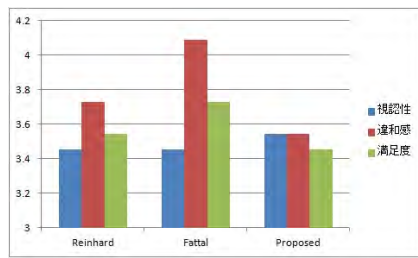
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 66 画像 No.15 の主観評価実験結果 .



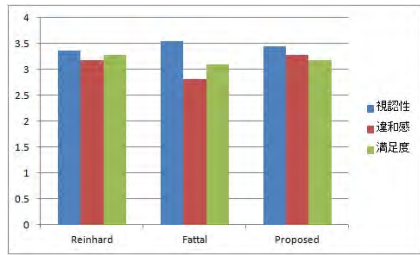
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 67 画像 No.16 の主観評価実験結果 .



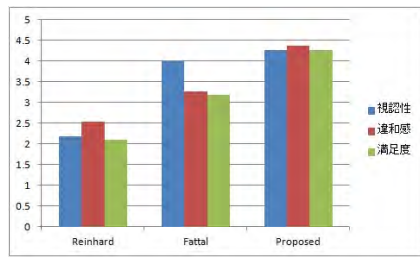
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 68 画像 No.17 の主観評価実験結果 .



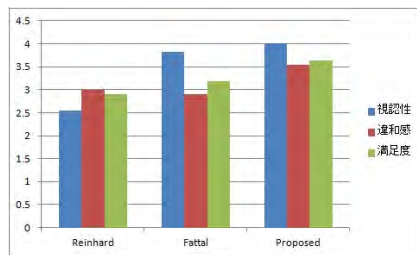
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 69 画像 No.18 の主観評価実験結果 .



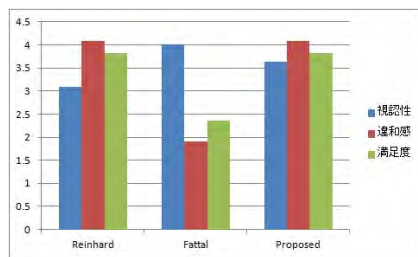
(a) Reinhard



(b) Fattal

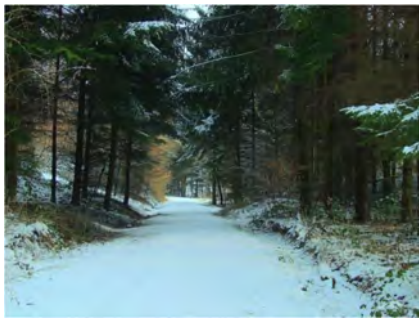


(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 70 画像 No.19 の主観評価実験結果 .



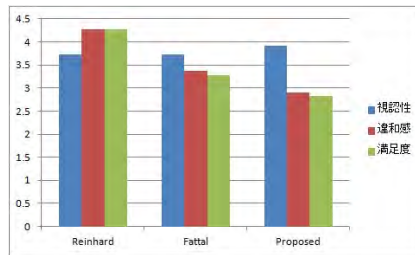
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 71 画像 No.20 の主観評価実験結果 .



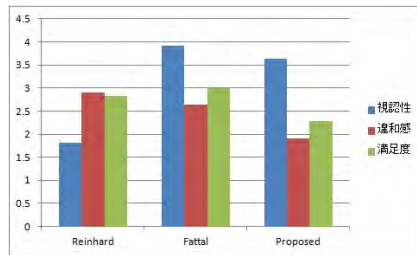
(a) Reinhard



(b) Fattal

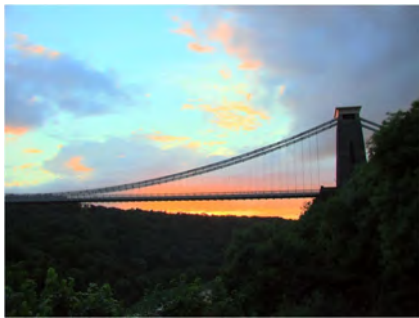


(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 72 画像 No.21 の主観評価実験結果 .



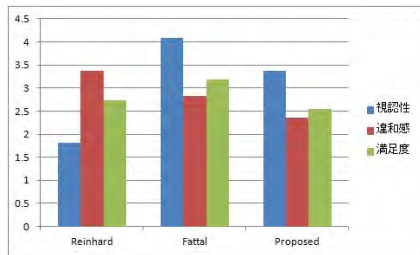
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 73 画像 No.22 の主観評価実験結果 .



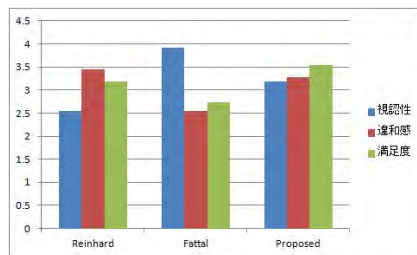
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 74 画像 No.23 の主観評価実験結果 .



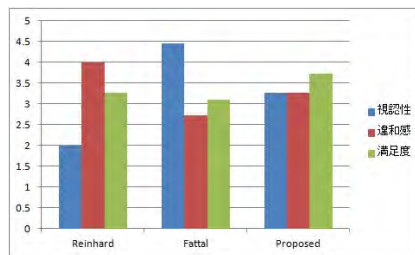
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 75 画像 No.24 の主観評価実験結果 .



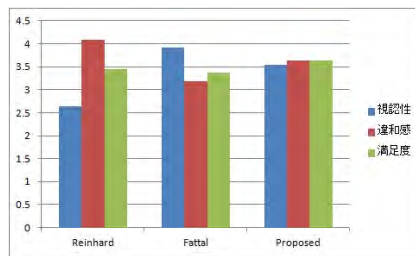
(a) Reinhard



(b) Fattal



(c) 提案手法



(d) 評価結果

図 76 画像 No.25 の主観評価実験結果 .

4.3.3 定性的観点に基づく比較と考察

提案手法と従来手法の結果を定性的観点から考察する．提案手法の有効性を考える上で最も重要となる視認性において，提案手法に適すると想定していた HDR 画像では，概して提案手法が Reinhard らの手法に比べて高い結果を得られたことから，各領域にそれぞれトーンマッピングを適用することで視認性の高い画像を生成できるということがわかる．Reinhard らの手法より提案手法の方が全体的に違和感が大きくなった要因としては，領域の境界部で輝度値の逆転を許したことの影響と領域が正確に分割されていないことによるアーティファクトの影響によるものと考えられる．また，Fattal らの手法と比較した場合に，ほぼ同等程度の視認性を得ることができたことから，視認性という観点において提案手法の有効性を確認できた．さらに，Fattal らの手法ではコントラストの反転によるアーティファクトによる影響により違和感が大きな画像が存在したが，適すると想定していた画像において提案手法では Fattal らの手法に比べ違和感の値が小さかったため，画像によっては視認性が高く人の視覚に自然に見える画像を生成することができると考えられる．以上から，明領域と暗領域に Fattal らの手法を適用すれば，視認性が高く，またコントラストの反転によるアーティファクトの少ない画像を生成できると考えられる．

4.3.4 適用可能な画像についての考察

本研究で定義した二分される明度分布と空間的分布の条件を考慮した上で，二つの主観評価実験の結果と考察から実験に用いた HDR 画像を提案手法が適用可能な画像とそうでない画像に分類する．まず，4.2 節の主観評価実験結果から図 25, 30, 31, 32, 33, 36, 40 は Fattal らの手法より満足度が高い画像，図 24, 26, 28, 29 は Fattal らの手法と同等の満足度が得られる画像に分類でき，これらは提案手法に適している画像だと言える．図 77 に提案手法に適している画像の一覧を示す．また，その他の画像は提案手法に適さない画像に分類でき，図 78 に提案手法に適さない画像の一覧を示す．4.2 節の主観評価実験において，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ほぼ想定通りの結果となった。

次に、4.3節の主観評価実験の結果に関しては、視認性と違和感を考慮した総合的な満足度によって分類する。図53, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 68, 69はReinhard, Fattalらの手法より満足度が高い画像であり、これらは提案手法に適している画像だと言える。図79に提案手法に適している画像の一覧を示す。また、その他の画像は提案手法に適さない画像に分類し、図80に提案手法に適さない画像の一覧を示す。本実験においても、4.2節の実験結果と同様に、提案手法に適すると想定していた画像において、比較的高い視認性と小さな違和感、また高い満足度が得られたことからほぼ想定通りだと言える。

ここで、提案手法に適用可能な画像の定性的な特性としては、本研究の明度分布と空間的分布が二分されるという定義に加え、明領域と暗領域にテクスチャが存在する、つまり明領域と暗領域の明度分布の偏りが小さくないことが考えられる。また、明領域に高輝度画素が、もしくは暗領域に低輝度画素が集中し従来手法では白とびや黒つぶれが高い割合で生じるHDR画像に対しては提案手法は特に有効である。しかし、提案手法に適していると想定していた図26, 29などにおいては提案手法の満足度は比較的低く、また、適していないと想定していた図47, 48においては高い満足度が得られた。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。

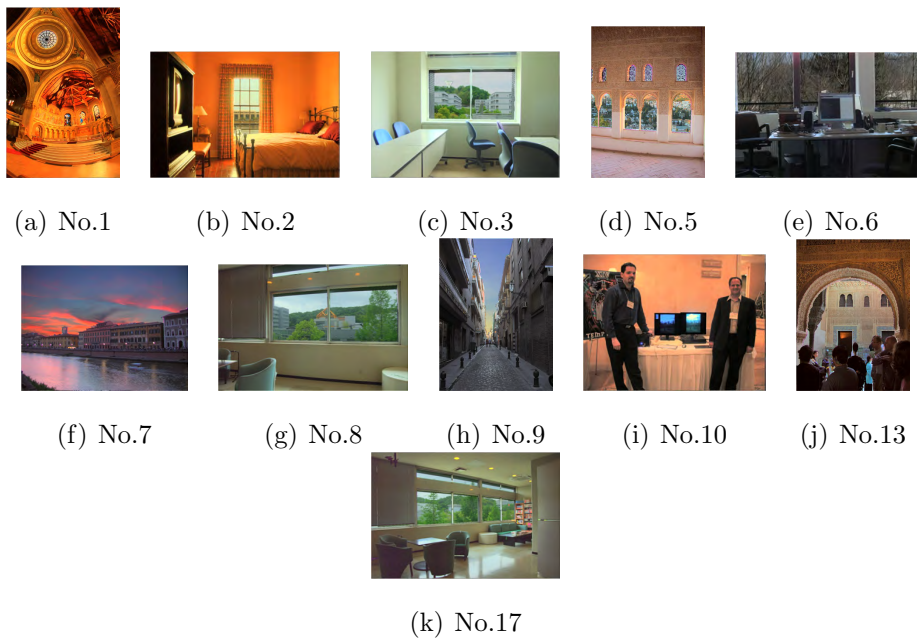


図 77 4.2 節の実験結果から分類した提案手法に適している画像一覧 .

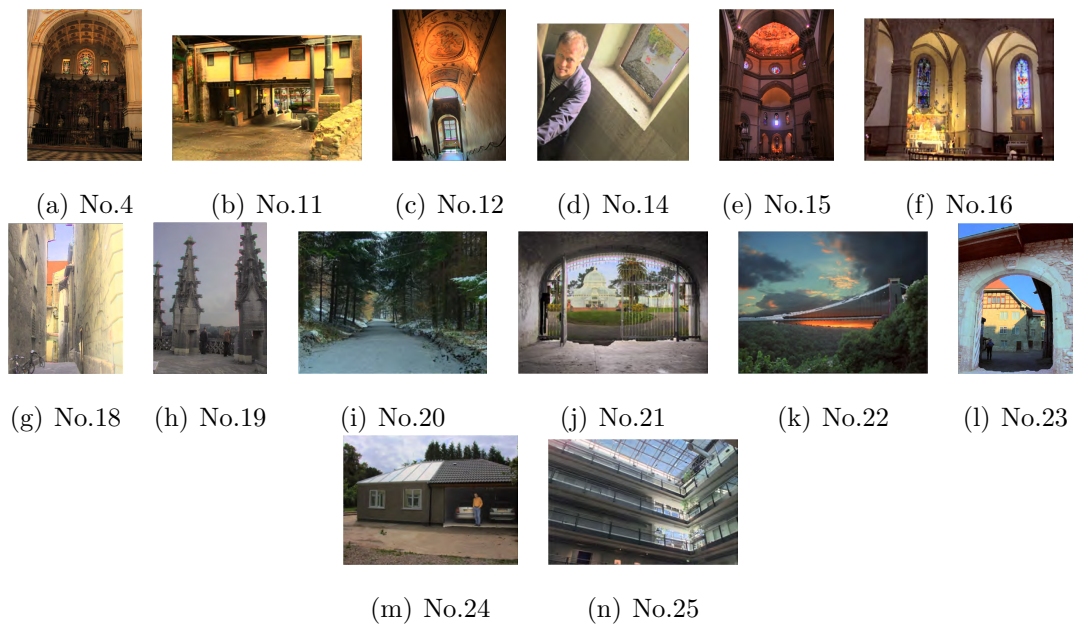


図 78 4.2 節の実験結果から分類した提案手法に適していない画像一覧 .

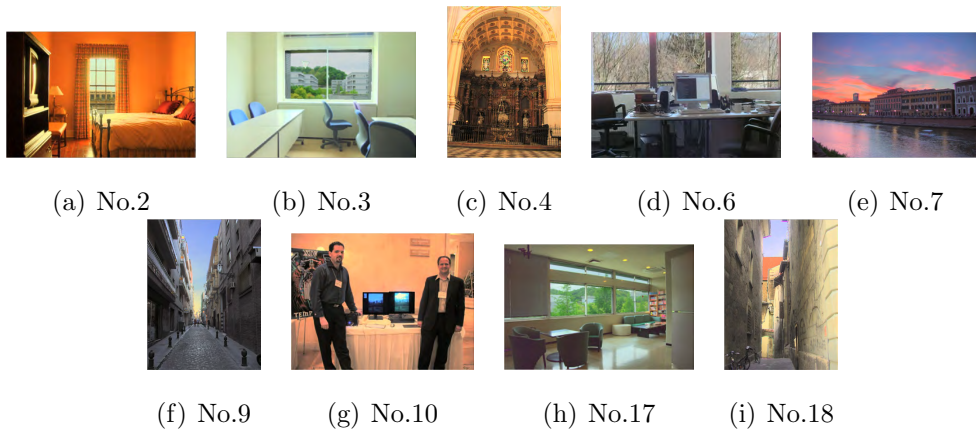


図 79 4.3 節の実験結果から分類した提案手法に適している画像一覧 .

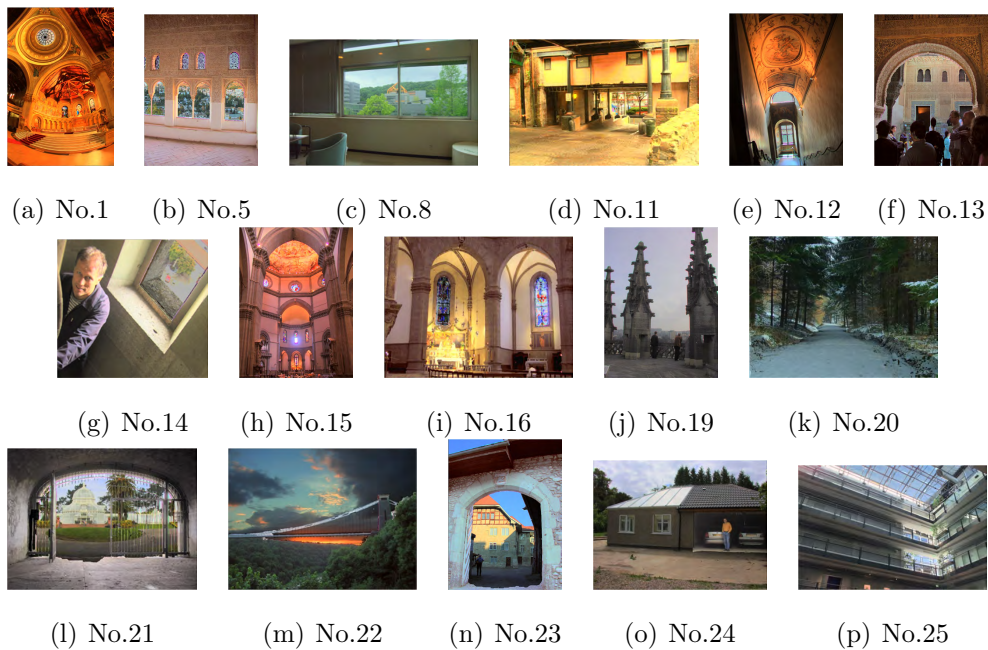


図 80 4.3 節の実験結果から分類した提案手法に適していない画像一覧 .

5. 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 画像を対象と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た。この仮定に基づき、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。二回の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視認性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。また、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。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

本研究の全過程を通して，懇切なる御指導，御鞭撻を賜りました視覚情報メディア研究室 横矢直和 教授に心より感謝致します．また，本研究の遂行にあたり，有益な御助言，御鞭撻を頂いたロボティクス研究室 小笠原司 教授に厚く御礼申し上げます．そして，本研究を行うにあたり，始終温かい御指導と多大なる御助言，御鞭撻を賜った環境知能学研究室 神原誠之 准教授に心より感謝致します．特に，神原誠之 准教授には本研究のテーマ設定から本論文の執筆，その他の発表論文の添削，発表練習，また日々の研究室生活に至るまで温かく細やかな御指導を頂きました．さらに，本研究を通じて，貴重な御助言，御鞭撻を頂いた視覚情報メディア研究室 佐藤智和 准教授に深く御礼申し上げます．また，本研究を進めるにあたり，的確な御助言，御鞭撻を頂いた視覚情報メディア研究室 河合紀彦 助教に深く感謝致します．さらに，本研究の遂行にあたり，有益な御助言や御指摘を頂きました視覚情報メディア研究室 大倉史生 氏に深く感謝いたします．また，研究室での生活を支えていただいた視覚情報メディア研究室事務補佐員 中村美奈 女史に厚く御礼申し上げます．最後に，研究活動だけでなく日々の生活においても大変お世話になった視覚情報メディア研究室の諸氏に心より感謝致します．

参考文献

- [1] K. Devlin. A review of tone reproduction techniques. Technical Report, CSTR-02-005, Department of Computer Science, University of Bristol, 2002.
- [2] P. Debevec and J. Malik. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In Proceedings of SIGGRAPH '97, pp. 369-378, 1997.
- [3] R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman. Gradient domain high dynamic range compression. In Proceedings of SIGGRAPH '02, Vol. 21, pp. 249-256, 2002.
- [4] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec. *High Dynamic Range Imaging*. Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [5] P. Debevec. Rendering with natural light. In Proceedings of SIGGRAPH '98, Electronic Art and Animation Catalog, pp. 166, 1998.
- [6] J. Tumblin and H. Rushmeier. Tone reproduction for realistic computer generated images. Technical Report GIT-GVU-91-13, Graphics, Visualization, and Useability Center, Georgia Institute of Technology, 1991.
- [7] J. Tumblin and H. Rushmeier. Tone reproduction for computer generated images. In IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 13, pp. 42-48, 1993.
- [8] J. Tumblin and G. Turk. LCIS:A boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction. In Proceedings of of SIGGRAPH '99, pp. 83-90, 1999.
- [9] J. C. Stevens and S. S. Stevens. Brightness function:effects of adaptation. Journal of The Optical Society of America, Vol. 53, pp. 375-385, 1963.
- [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] G. W. Larson, H. Rushmeier, and C. Piatko. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, pp. 291-306, 1997.
- [12] F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. *Computer Graphics Forum*, Vol. 3, pp. 22, 2003.
- [13] 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.
- [14] E. Reinhard. Parameter estimation for photographic tone reproduction. *Journal of Graph. Tolls*, Vol. 7(1), pp. 45-52, 2002.
- [15] A. Adams. *The Negative*. The Ansel Adams Photography series. Little, Brown and Company, 1981.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Y. Boykov and M. P. Jolly. Interactive graph cuts for optimal boundary and region segmentation of objects in n-d images. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, Vol. 1, pp. 105-112, 2001.

- [20] V. Kolmogorov and R. Zabih. What energy functions can be minimized via graph cuts? In PAMI, Vol.26, pp. 147-159, 2002.
- [21] R. Mantiuk, G. Krawczyk, R. Mantiuk, and H. P. Seidel. High dynamic range imaging pipeline: Perception-motivated representation of visual content. In Proceedings of SPIE, Vol. 6492, pp. 37-40, 2007.
- [22] Qtpfsgui project homepage. <http://qtpfsgui.sourceforge.net/>, 2009.
- [23] R. Mantiuk. [http://cdb.paradice-insight.us/corpora/Corpus Rafael Mantiuk/](http://cdb.paradice-insight.us/corpora/Corpus_Rafael_Mantiuk/), 2011.
- [24] J. Holm. Photographics tone and colour reproduction goals. In CIE Expert Symposium '96 on Colour Standards for Image Technology, pp. 51-56, 1996.
- [25] B. K. P. Horn. Determining lightness from an image. CVGIP, Vol. 3, pp. 277-299, 1974.
- [26] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing(2nd ed.). Cambridge University Press, New York, 1992.

付録

A. GrabCut アルゴリズム

RGB 色空間の画素 $z_n \in z$ からなる画像に対して，RGB 色空間を扱うために K 個のクラスからなる混合正規分布モデル (Gaussian Mixture Model:GMM) を適用する．ここで，クラス $k_n \in 1, \dots, K$ が各画素に割り当てられる．画像の領域分割結果は，各画素の不透明度 $\underline{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ によって表現される．ここで， α は $\alpha_n \in 0, 1$ を満たし，0 は背景，1 は前景となる．Boykov らの手法 [19] では，モデル $\underline{\theta}$ は画像の前景と背景のグレーレベルでのヒストグラムとなり，

$$\underline{\theta} = h(z; \alpha), \alpha = 0, 1 \quad (1)$$

で定義されていたが，GrabCut では GMM モデルを導入するために混合重み係数 π ，平均 μ ，共分散 Σ を加えて，

$$\underline{\theta} = \pi(\alpha, \mathbf{k}), \mu(\alpha, \mathbf{k}), \Sigma(\alpha, \mathbf{k}), \alpha = 0, 1, \mathbf{k} = 1, \dots, K. \quad (2)$$

と再定義する．領域分割では，既知データである z とモデル $\underline{\theta}$ から未知である不透明度 $\underline{\alpha}$ を導出することが目的となる．GrabCut で用いるエネルギー関数は，Boykov らの手法で定義されたエネルギー関数に，GMM のクラスを表す変数 \mathbf{k} を加え次のように再定義する．

$$E(\underline{\alpha}, \mathbf{k}, \underline{\theta}, \mathbf{z}) = \mathbf{U}(\underline{\alpha}, \mathbf{k}, \underline{\theta}, \mathbf{z}) + \mathbf{V}(\underline{\alpha}, \mathbf{z}). \quad (3)$$

データ項である U は，次の式となる．

$$U(\underline{\alpha}, \mathbf{k}, \underline{\theta}, \mathbf{z}) = \sum_{\mathbf{n}} D(\alpha_{\mathbf{n}}, \mathbf{k}_{\mathbf{n}}, \underline{\theta}, \mathbf{z}_{\mathbf{n}}). \quad (4)$$

ここで，正規確率分布 D は次の式となる．

$$\begin{aligned} D(\alpha_n, k_n, \underline{\theta}, \mathbf{z}_{\mathbf{n}}) &= -\log \pi(\alpha_n, k_n) + \frac{1}{2} \log \det \Sigma(\alpha_n, k_n) \\ &+ \frac{1}{2} [z_n - \mu(\alpha_n, k_n)]^\top \Sigma(\alpha_n, k_n)^{-1} [z_n - \mu(\alpha_n, k_n)]. \end{aligned} \quad (5)$$

また，平滑化項 V は次のようになる．

$$V(\underline{\alpha}, \mathbf{z}) = \gamma \sum_{(\mathbf{m}, \mathbf{n}) \in \mathbf{C}} [\alpha_{\mathbf{n}} \neq \alpha_{\mathbf{m}}] \exp -\beta \|\mathbf{z}_{\mathbf{m}} - \mathbf{z}_{\mathbf{n}}\|^2. \quad (6)$$

以上のエネルギー関数を用いて，反復的にエネルギー最小化を行う．

B. Reinhardらのトーンマッピング

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 [7, 10, 24] 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．

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left(\sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (7)$$

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 は画像における総画素数， δ 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．

$$L(x,y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x,y) \quad (8)$$

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る．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 (8) に加える．

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y)}{1 + L(x,y)} \quad (9)$$

ここで $L_d(x,y)$ は画素 (x,y) の出力輝度値となる．式 (9) 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 (9) 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 (9) 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 (9) を次のように拡張する．

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y) \left(1 + \frac{L(x,y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x,y)} \quad (10)$$

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 (9) 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ぬ。また、値が無限に設定された場合は式 (9) 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。

C. Fattalらのトーンマッピング

対数輝度画像から算出した勾配を圧縮し，ポアソン方程式を解くことで圧縮後の勾配を求め，指数変換により原画像の画像空間に変換する．Fattalらは，急激な輝度変化が生じる部分（エッジ）は輝度勾配が大きくなり，その一方，テクスチャ等の詳細な情報は，より小さな勾配に対応付くという観点から，様々な空間的なスケールで勾配情報を検出し，勾配の大きさを圧縮する．大きな勾配を持った領域のダイナミックレンジの圧縮を強くし，小さな勾配を持った領域は弱めることで，ダイナミックレンジを圧縮しつつ詳細な情報を保存する．

入力画像 $L(x, y)$ から密度画像 $D(x, y) = \log(L(x, y))$ を計算し，勾配 $\nabla G(x, y)$ を求める．

$$\nabla G(x, y) = (D(x+1, y) - D(x, y), D(x, y+1) - D(x, y)). \quad (11)$$

勾配は，圧縮関数 $\Phi(x, y)$ をかけることにより弱められ，圧縮後の勾配 $\nabla G'(x, y)$ が算出される．

$$\nabla G'(x, y) = \nabla G(x, y)\Phi(x, y). \quad (12)$$

Hornら [25] のアプローチと同様に，圧縮後の密度関数 $D'(x, y)$ はポアソン方程式を解くことで求めることができる．

$$\nabla^2 D'(x, y) = \text{div} G'(x, y). \quad (13)$$

ここで，この偏微分方程式を解くことで，可能な限り $G'(x, y)$ に近い勾配を持った密度画像 $D'(x, y)$ を求めることができる．このことは，以下の積分を最小化することと一致する．

$$\int \int \|\nabla D'(x, y) - G(x, y)\|^2 dx dy = \int \int \left(\frac{\delta D'(x, y)}{\delta x} - G_x(x, y) \right)^2 + \left(\frac{\delta D'(x, y)}{\delta y} - G_y(x, y) \right)^2 dx dy. \quad (14)$$

変分原理に従って， $D'(x, y)$ は次のオイラー・ラグランジェ方程式を満たす．

$$2 \left(\frac{\delta^2 D'(x, y)}{\delta x^2} - \frac{\delta G_x(x, y)}{\delta x} \right) + 2 \left(\frac{\delta^2 D'(x, y)}{\delta y^2} - \frac{\delta G_y(x, y)}{\delta y} \right) = 0. \quad (15)$$

項を再配置し変形することでこのポアソン方程式が導かれ、完全多重格子手法 [26] を用いて解くことができる。圧縮後の密度画像を指数変換することで、次のように出力輝度値 $L_d(x, y)$ が算出される。

$$L_d(x, y) = \exp(D'(x, y)). \quad (16)$$

Fattal らの手法において、圧縮関数 $\Phi(x, y)$ の選択は出力画像の見た目に大きな影響を与える。テクスチャ等の詳細な情報を保存するためには、圧縮関数は大きな勾配のみを弱める必要がある。Fattal らの手法では、エッジは様々なスケールの画像に存在するという観点に基づいて、圧縮関数を決定する。各スケールで大きな勾配を検出するために、多重解像度エッジ検出方法を適用する。その結果、ある解像度のスケールで検出された大きな勾配を弱めるだけでなく、その減衰が最大の解像度の勾配に対しても伝搬するようになり、また、視覚的なアーティファクトの低減にも繋がる。まず、密度画像からガウシアンピラミッド D_0, D_1, \dots, D_d を生成する。例えば、最も粗いレベルにおいては画像の解像度は 32×32 とするよう、レベル d ごとに解像度の大きさを決定する。各レベル s において、勾配 $\nabla G_s(x, y)$ は中心差分を用いて次のように導出される。

$$\nabla G_s(x, y) = \left(\frac{D_s(x+1, y) - D_s(x-1, y)}{2^{s+1}}, \frac{D_s(x, y+1) - D_s(x, y-1)}{2^{s+1}} \right). \quad (17)$$

各レベルの各画素に対して、勾配の大きさに基づいてスケール因子が計算される。

$$\Phi_s(x, y) = \frac{\alpha}{\|\nabla G_s(x, y)\|} \left(\frac{\|\nabla G_s(x, y)\|}{\alpha} \right)^\beta. \quad (18)$$

このスケール因子は、ユーザーが決定する二つのパラメータ α, β を持つ。 $\beta < 1$ の場合、 α より大きな勾配は弱められる一方、 α より小さな勾配は弱められたため、ダイナミックレンジを圧縮しつつ、テクスチャ等の詳細な情報を保存したトーンマッピングを行う。