

論文

Single-Scale Retinex モデルにおけるコントラストとハローの改善

小池 芳明*, 堀内 隆彦*, 斎藤 了一*, 富永 昌治*

(2008.8.7 受理)

Improvement of Contrast and Haloing Artifact for Single-Scale Retinex Model

Yoshiaki KOIKE*, Takahiko HORIUCHI*, Ryoichi SAITO* and Shoji TOMINAGA*

A digital camera is hard to catch luminance change of a scene including highlights and shadows, while human vision has the ability to sense a very wide range of scene luminance. The Retinex algorithm is known as a human perception-based image processing algorithm which is useful for contrast improvement for the very wide range scene. The MSR (Multi-Scale Retinex) algorithm previously proposed for suppressing halo artifacts, which integrates multiple SSR (Single-Scale Retinex), has the problem of high computation cost. This paper proposes a fast Retinex algorithm without halo artifacts by compressing dynamic range of a luminance-surround field in the SSR and using the bilateral filtering.

Keywords: Retinex, Image appearance, Dynamic range compression, HDR image

人の視覚は、一時に 10^5 を超える明暗の変化を知覚でき、 10^9 以上の広いダイナミックレンジをもつ外界に順応するのに対して、デジタルカメラは明暗変化の激しいシーンを取得するのが困難である。Retinex アルゴリズムは、人の知覚に基づいた画像処理手法であり、コントラスト改善に有用である。MSR (Multi-Scale Retinex) モデルは、複数の SSR (Single-Scale Retinex) 出力を合成することによって、SSR 出力の問題点であったハローを軽減することに成功したが、演算量が大いという問題点があった。本論文では、SSR モデルにおける周辺輝度場を Bilateral filter で表現し、さらにダイナミックレンジを圧縮することによって、SSR モデルの演算量の小さい簡易な枠組みでハローを軽減できる Retinex の改善アルゴリズムを提案する。提案モデルは、陰影の激しい自然画像のダイナミックレンジの圧縮に安定に動作し、暗部の見えの改善に効果的であった。本論文では、HDR 画像に対しても提案手法を応用することを試みて、有効性を検証している。

キーワード: レチネックス, 画質改善, ダイナミックレンジ圧縮, HDR 画像

1. はじめに

照明光の不均一な分布や極端な明暗差を含む高いダイナミックレンジシーンでは、デジタルカメラによる臨場感溢れる再現が困難であり、再現されたデジタル画像と人間の視覚による見えとでは著しく異なる場合がある。これは、主に以下の2つの理由によると考えられる。一つ目の理由として、人間の視覚による見えは、照明光の影響を除去しながら物体そのものの色を識別することができる明暗恒常性や色恒常性を備え、広範囲の輝度レンジに適応的に対応できることが挙げられる。二つ目の理由として、入力系のイメージセンサのダイナミックレンジが人間の視覚に比べて圧倒的に狭いこと、および出力系のディスプレイデバイスが狭いレンジしか再現できないことが挙げら

れる。

人間の視覚特性を反映する画像再現の手法として Retinex がよく知られている。これは Land¹⁻⁶⁾ が考案した視覚モデルを基に、McCann⁷⁾ が発展させた長い歴史をもつ古典的な視覚計算モデルであるが、最近再び注目を集めている⁸⁾。簡潔で処理効果の高い Retinex 手法の一つとして Center/Surround (C/S) 型 Retinex モデル⁹⁾ が知られており、これは注目画素の輝度と周辺輝度場 (Luminance-surround field) の比からシーンの反射率画像を求めるものである。この型に沿う手法として、周辺輝度場を単一のガウシアン関数の畳み込み積分によって表現する Single-Scale Retinex (SSR) 手法、および SSR を多重化した Multi-Scale Retinex (MSR) 手法が提案された¹⁰⁾。さらに Kotera らによって線形モデルに拡張された¹¹⁾。

しかし、SSR 手法は処理が簡易であるが、再現画像のコントラストの低下やハローが出現する問題点があった。一方、MSR 手法は標準偏差や荷重などのパラメータ数が多く、パラメータの設定方法が不明確であるのに加えて、複数の SSR に

* 千葉大学大学院 融合科学研究科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

* Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

より再現画像を出力する必要があるため、演算時間を要するという問題点があった。

本論文では、低コントラストとハローの出現の問題点を改善して、単一の周辺輝度場から処理を行う SSR で、MSR 相当の再現画像を得ることができる Retinex アルゴリズムを提案する。提案手法では、SSR の周辺輝度場の生成に Bilateral filter¹²⁾を用いることによって、周辺輝度場の明暗境界（エッジ）を保持し、ハローの影響を抑制する。また、周辺輝度場を適切にレンジ圧縮することによって、再現画像の低コントラストを抑制する。実験を通じて、演算量の小さい SSR の枠組みでありながら、MSR に匹敵する再現画像を生成できることを示す。さらに、提案手法を HDR 画像のレンジ圧縮に応用することを試みる。

2. Retinex の従来アルゴリズムと問題点

Retinex は、カメラで撮像された画像を I 、物体の反射率を R 、照明光分布を L とすると、 I は L と R の積で近似できるという理論に基づいている。したがって、何らかの方法で照明光分布 L を推定することによって、画像 I と照明光分布 L の

比から反射率画像 R を得ることができる。この反射率画像を、照明光の影響を取り除いた再現画像とする。

C/S モデルは最も簡潔な方法として知られており、画像にガウスぼけ関数を畳み込むことによって、注目画素周辺の L を推定する。このときカーネルの異なる SSR を荷重することで MSR モデルへと発展してきた^{13~18)}。代表的な MSR モデル¹⁸⁾は、対数空間で処理を行うが、出力値が安定しないという問題や、RGB 各チャンネルで独立に処理を行うためにカラーバランスが崩れやすいといった問題点があった。これに対して Kotera らは log を取らずに Retinex 処理を全て線形空間で処理し、カラーバランスを保持する線形 SSR モデル¹¹⁾を提案した。この線形 SSR モデルでの反射率の画像は次のように表わせる。

$$SSR(s, \sigma_m) = A \frac{I_i(s)}{S(s, \sigma_m)} \quad (1)$$

$$S(s, \sigma_m) = \langle g_{\sigma_m}(s) \otimes Y(s) \rangle \quad (2)$$

$$Y = 0.299 \times I_R + 0.587 \times I_G + 0.114 \times I_B \quad (3)$$

ここで、 s は画素位置、 σ_m は周辺輝度場のサイズを表すパラメータである。 $\otimes$ は畳み込み演算を示す。 $I_i(s)$ は入力画像の

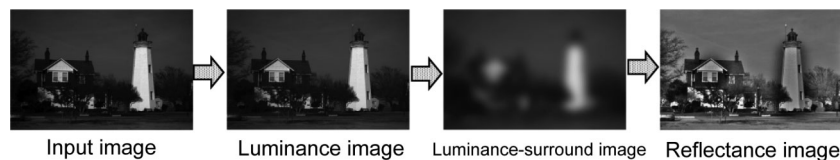


Fig. 1 Procedure of the conventional linear SSR algorithm.

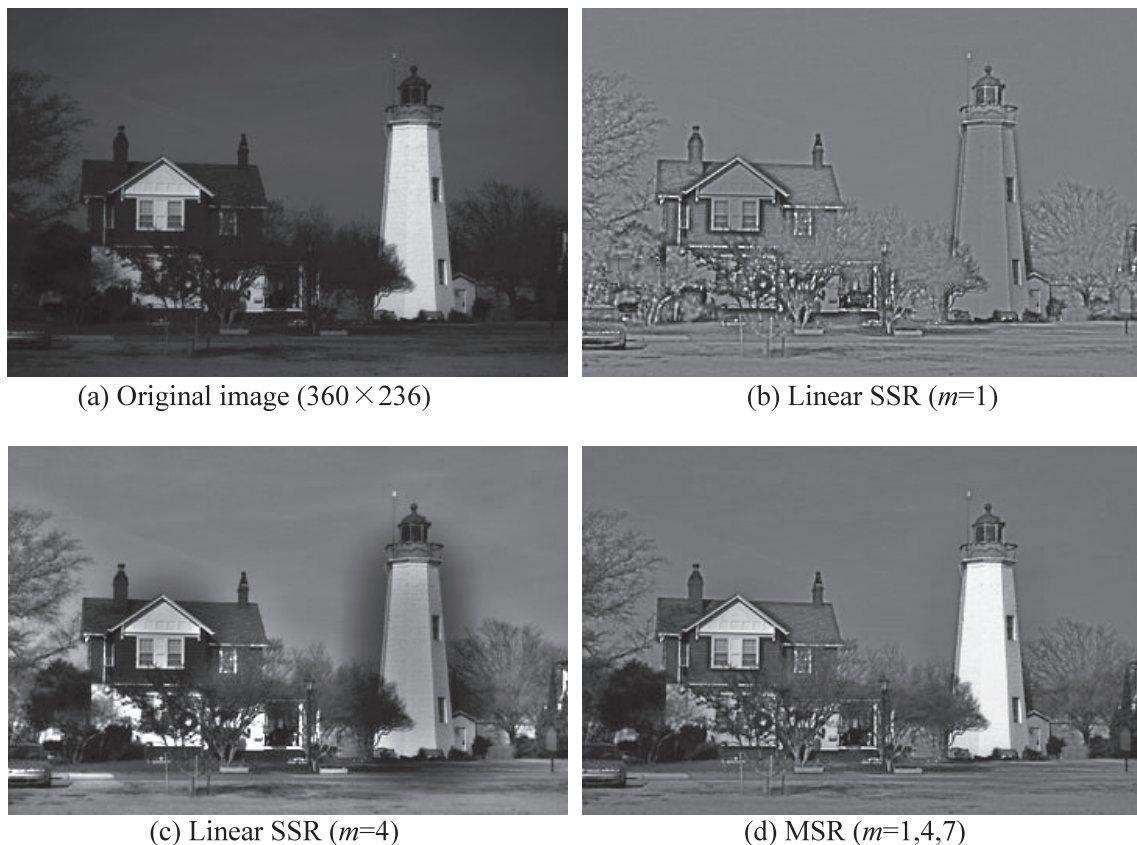


Fig. 2 Reproduced images by the conventional SSR and MSR algorithms.

i -チャンネルにおける輝度値で、 $[0,1]$ に正規化されている。 Y は $[0,1]$ で正規化した輝度信号を表し、ガウス関数 g_{σ_m} と畳み込むことによって、式(2)の周辺輝度場 $S(s, \sigma_m)$ が求められる。ここで、ガウス関数の標準偏差は2の m 乗 (pixel) の形で与えられ、 m の値を変化させることによって、周辺輝度場における照明光分布のボケ具合が変化する。 A はゲイン係数であり、最終的な明るさを調節する。出力される反射率画像 $SSR(s, \sigma_m)$ の各画素値は、ゲイン係数の値によって必ずしも $[0,1]$ に収まるとは限らない。 $[0,1]$ を超えた場合には、クリッピングして出力する。線形 SSR 処理の流れを Fig. 1 に示す。

このアルゴリズムは、非常に簡潔で処理効果は高いものの、幾つかの問題点を持っている。 Fig. 2(a) の原画像 (360×236) に対する線形 SSR の出力結果例を、Fig. 2(b) および (c) に示す。 Fig. 2(b) で示されるように、式(2)における照明光分布推定のための標準偏差 σ_m が小さい場合には、各画素における原画像の輝度値と周辺輝度場の輝度値にほとんど変化がないためコントラストが低下し、暗部ノイズが増幅されたり、明部が極端に低下している。また Fig. 2(c) のように、 σ_m が大きい場合には、周辺輝度場が大きくボケるため、明暗差の激しいエッジ (明暗境界) の周辺に、ハローが発生している。これらの問題を解決するために、通常3~7種類の SSR を合成した MSR

$$MSR = \sum_{m=1}^M W_m SSR(s, \sigma_m) \quad (4)$$

が用いられ、Fig. 2(d) のような良好な出力結果を得る。ただし M は線形 SSR 画像の種類であり、 W_m は荷重係数である。

しかしながら、MSR を得るためには、複数の SSR 画像を合成するため、演算量が大きいという問題点があった。著者らの実験によると、Fig. 2 の画像を利用した場合、MSR の処理には SSR の約 90 倍の演算時間を要した。また、SSR 処理の標準偏差や荷重係数、合成枚数などのパラメータを設定する必要があり、画像ごとに最良のパラメータを見つけるのが困難であった。王らは文献 19 において、周辺輝度場を統合し、ガウシアンピラミッドによって演算量を削減する MSR アルゴリズムを提案した。しかしながら、依然として標準偏差や荷重係数、合成枚数などの多くのパラメータが存在し、これらの安定な設定と自動決定アルゴリズムの探索が課題となっている。

著者らは、コントラスト低下と暗部ノイズ増幅の問題を改善するために、クリッピングによって、線形 SSR の周辺輝度場のダイナミックレンジを圧縮する方法を考案した²⁰⁾。これにより Fig. 2(b) のような画像は改善した。しかしクリッピングした部分の情報が欠落するために、例えば Fig. 3(a) に適用した Fig. 3(b) の結果のように、タイヤ表面部分の明部や、顔などの暗部の部分で階調が乏しくなり、コントラストを十分に再現できないことがわかった。さらに σ_m を大きくするとハローが出現する問題があった。

3. 提案アルゴリズム

3.1 統合周辺場のレンジ圧縮

本論文では、周辺輝度場を適切にレンジ圧縮することによって、明部や暗部のコントラストを再現し、ハローの出現を軽減できる新しい SSR 手法を提案する。先に述べたように、再現画像が低コントラストとなる問題の原因は、原画像と周辺輝度場の輝度値がほぼ一定であるため、その比をとることによって出力画像のレンジが狭くなることであった。そこで、Fig. 4 に示されるように、周辺輝度場 $S(s, \sigma_m)$ の輝度ヒストグラムを $[S_{min}, S_{max}]$ の範囲にリスケールすることによって、レンジ圧縮後の周辺輝度場 $S'(s, \sigma_m) \in [S_{min}, S_{max}]$ を得る。これにより、もとの周辺輝度場の輝度ヒストグラムの分布形状を保つことができるため、再現画像のコントラストを保持することが可能となる。この方法をリスケール SSR と呼ぶことにする。具体的なアルゴリズムを以下に示す。

$$R_i(s, \sigma_m) = \frac{I_i(s)}{S'(s, \sigma_m)} \quad (5)$$

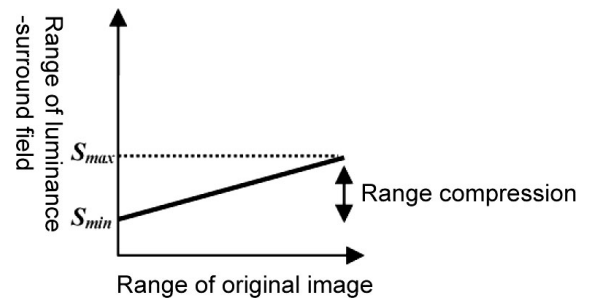


Fig. 4 Histogram rescaling of the luminance-surround field.

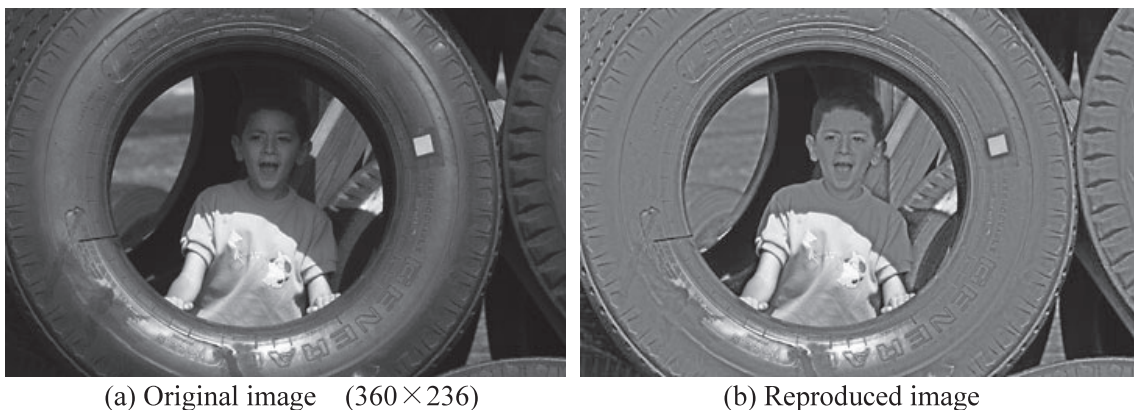
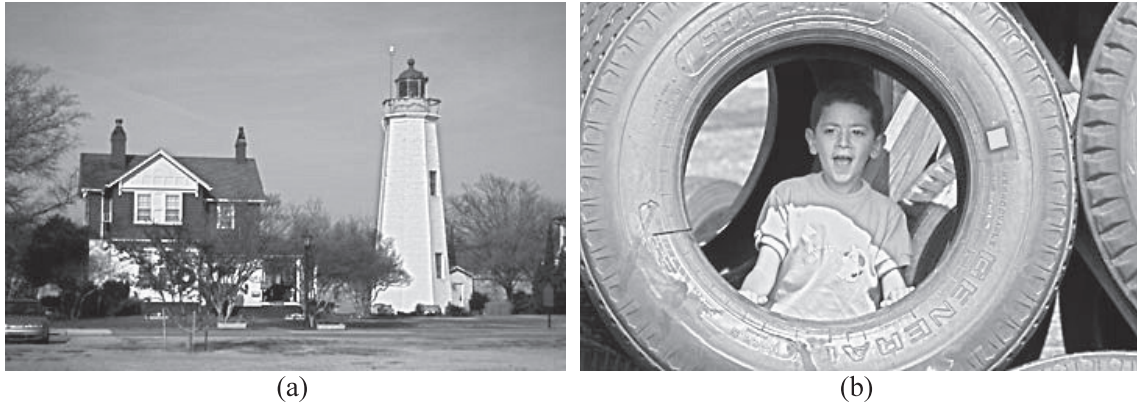
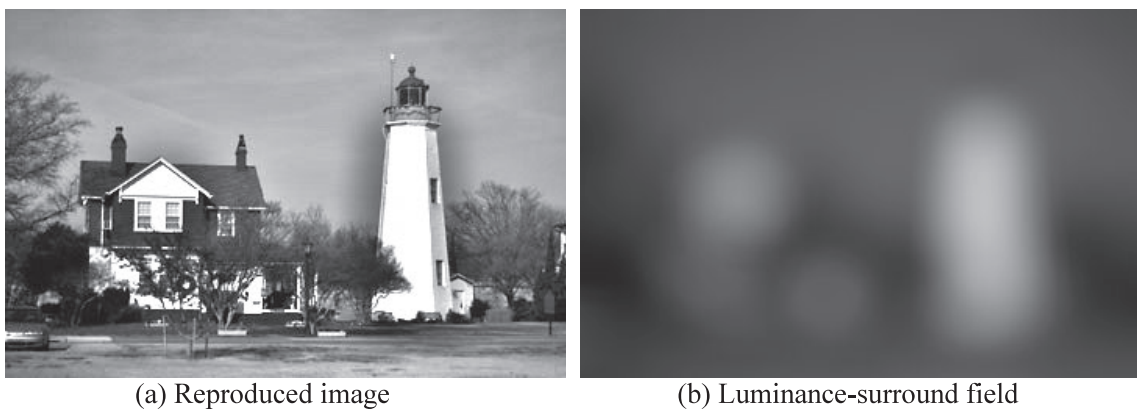


Fig. 3 A problem by using the clipping algorithm²⁰⁾.

Fig. 5 Reproduced images by the rescaling SSR ($m=1$).Fig. 6 Reproduced images by the rescaling SSR ($m=4$).

$$S'(s, \sigma_m) = S(s, \sigma_m)(S_{\max} - S_{\min}) + S_{\min} \quad (6)$$

$$S(s, \sigma_m) = \langle g_{\sigma_m}(s) \otimes Y(s) \rangle \quad (7)$$

従来の線形 SSR と比較して、周辺輝度場を式(6)においてリスケールしている点異なる。また、 $[S_{\min}, S_{\max}]$ によってレンジを自由に設定できるため、ゲイン係数 A も不要である。

Fig. 1(a)の画像に対して、 $m=1$ のリスケール SSR を適用した画像を Fig. 5(a)に示す。Fig. 2(b)と比較して、画像右の白い塔の明度が維持できており、また木々の枝葉などの暗部においても、極端な輝度増幅が抑えられていることがわかる。さらに、Fig. 3(a)の画像に対しても、適用結果を Fig. 5(b)に示す。Fig. 3(b)と比較してコントラストを保つことができていることがわかる。

次に、 $m=4$ のリスケール SSR を用いて処理した結果を Fig. 6(a)に示す。Fig. 5(a)と同様に、良好なコントラストは得られているが、Fig. 6(a)の塔の周りに見られるように、 σ_m の大きい SSR に生じていたハローの問題は解決されていない。つまり、リスケール SSR は従来手法と同様に、ハローの影響が少ない σ_m の小さい場合しか適用できない。 σ_m の小さい場合は局所領域の照明変化に追従しすぎるため、画像サイズの大きな場合において細部のコントラストの低下につながる。このようなハローの問題を改善する方法を次に

述べる。

3.2 Bilateral Filter による周辺輝度場の改良

前節のリスケール SSR はガウシアン関数の畳み込みによって周辺輝度場 $S'(s, \sigma_m)$ を求めている。このため、明暗差のあるエッジ部分でボケが発生し、これが原因となってハローが出現していた。Fig. 6(b)は Fig. 6(a)の再現画像を得るために、推定された周辺輝度場である。

本論文では、従来の Retinex と異なった周辺輝度場の算出を行う。すなわち、明暗差の大きいエッジを保持するような周辺輝度場を作成する。従来は、周辺輝度場を一種のボケ関数として作っていたため、原画像との比を取ることで、エッジ付近でハローが発生していた。そこで、本論文では、周辺輝度場の推定に Bilateral filter¹²⁾を利用する。Bilateral filter は、画像空間のユークリッド距離に基づいたガウシアン関数に加えて、輝度空間におけるユークリッド距離を用いたガウシアン関数によってフィルタの出力を決定する。このフィルタは画像レンダリングの分野でも有用とされている^{21, 22}。このフィルタ出力を用いれば、明暗差のある部分のエッジを保持しながら画像全体をぼかすことができ、結果的に出力画像のハローを抑制することができる。

Bilateral filter を用いた周辺輝度場 $S(s, \sigma_m, \sigma_d)$ は以下で定義される。

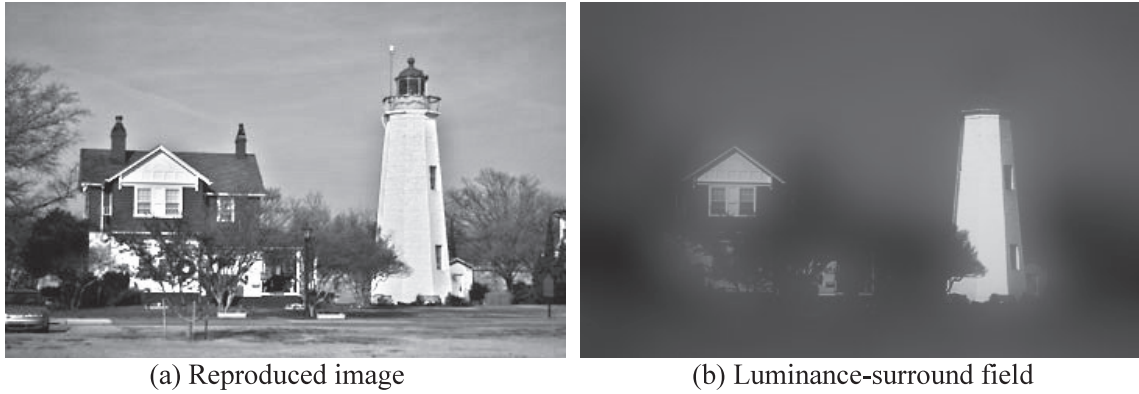


Fig. 7 An effectiveness of the Bilateral filtering for the luminance-surround field.

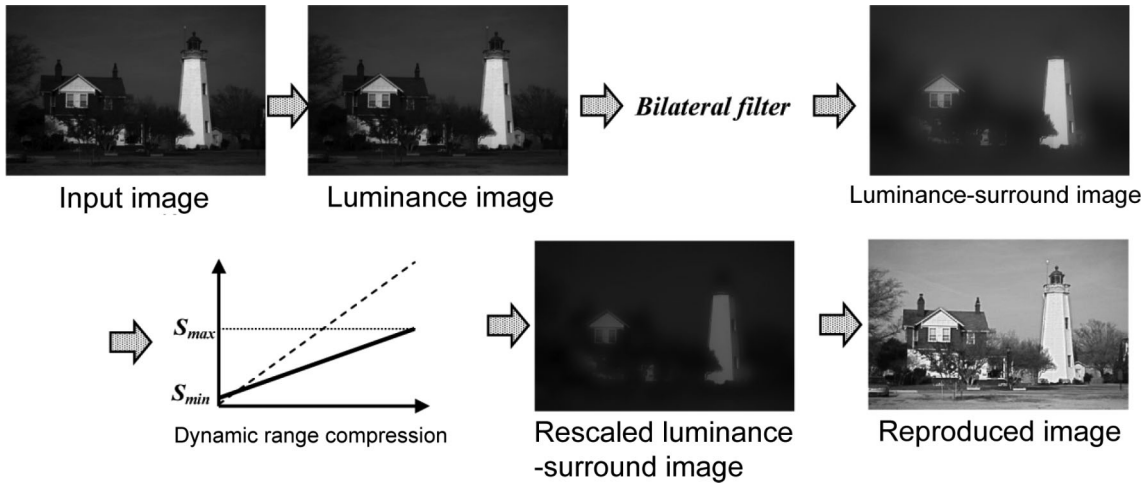


Fig. 8 Procedure of the proposed algorithm.

$$S(s, \sigma_m, \sigma_d) = \frac{1}{k(s)} \sum_{p \in \Omega} g_{\sigma_m}(p-s) g_{\sigma_d}(Y(p) - Y(s)) Y(p) \quad (8)$$

$$k(s) = \sum_{p \in \Omega} g_{\sigma_m}(p-s) g_{\sigma_d}(Y(p) - Y(s)) \quad (9)$$

$$g_{\sigma}(s|s=(a,b)) = K_m \exp\{-(a^2+b^2)/\sigma^2\} \quad (10)$$

ここで、 σ_m および σ_d は、それぞれ画像空間上での距離および輝度差のガウス関数 g_{σ} のための標準偏差であり、 Ω は周辺画素の集合である。また、係数 K_m は $\iint g_{\sigma}(a,b) da db = 1$ を満たすための正規化係数である。

Fig. 1(a) の画像に対して、 $m=4$ の Bilateral filter を用いた場合の周辺輝度場を Fig. 7(b) に、再現画像を Fig. 7(a) にそれぞれ示す。Fig. 6 と比較して、周辺輝度場はエッジ部分を保存していることがわかり、Fig. 6(a) と Fig. 7(a) の比較から、白い塔の周辺に出現するハローを軽減できていることが確認できる。本論文で提案する手法全体の処理の流れを、Fig. 8 にまとめる。

4. 実験

提案した手法の有効性を検証するために、種々の画像を用いた実験を行った。まず画像に対する予備実験の主観評価に基づいて、パラメータは全実験において $S_{\max}=0.8$, $S_{\min}=0.01$, σ_d

$=2^6$ と固定した。すなわち、画像ごとにパラメータを恣意的に調節することは行っていない。

Fig. 2 と Fig. 3 の画像に対する結果を Fig. 9 に示す。Fig. 2 と Fig. 3 で示した従来の SSR や MSR と比較して、明部および暗部でのコントラストが大幅に改善されている。また空の色も非常に鮮やかであり、より自然な再現結果が得られることを確認した。ハローの問題に関しても、 $\sigma_m=2^1 \sim 2^5$ までの種々のスケールを用いて再現実験を行ったが、ほとんど視認できなかった。

従来手法との比較を Fig. 10 に示す。Fig. 10(a) は原画像であり、Fig. 10(b), (c) は線形 SSR と MSR¹¹⁾ による再現画像、図 10(d) は提案手法による再現画像である。線形 SSR には不自然なハローが認められる。MSR の再現画像にはハローは認められないが、部分的にコントラストの低下が認められる。これに対して、提案手法では、Fig. 10(b) と同様に $m=3$ のカーネルを利用してもハローが視認されず、コントラストの高い再現画像が得られた。このように、提案手法のパラメータ値を固定しても、種々の画像に対して概ね安定して良好な結果が得られた。

演算時間は、画像サイズや使用する Bilateral filter のカーネルサイズに依存するが、提案手法は $m=1$ のとき MSR の約 1/60, $m=3$ のとき約 1/6 の演算時間と高速であった。

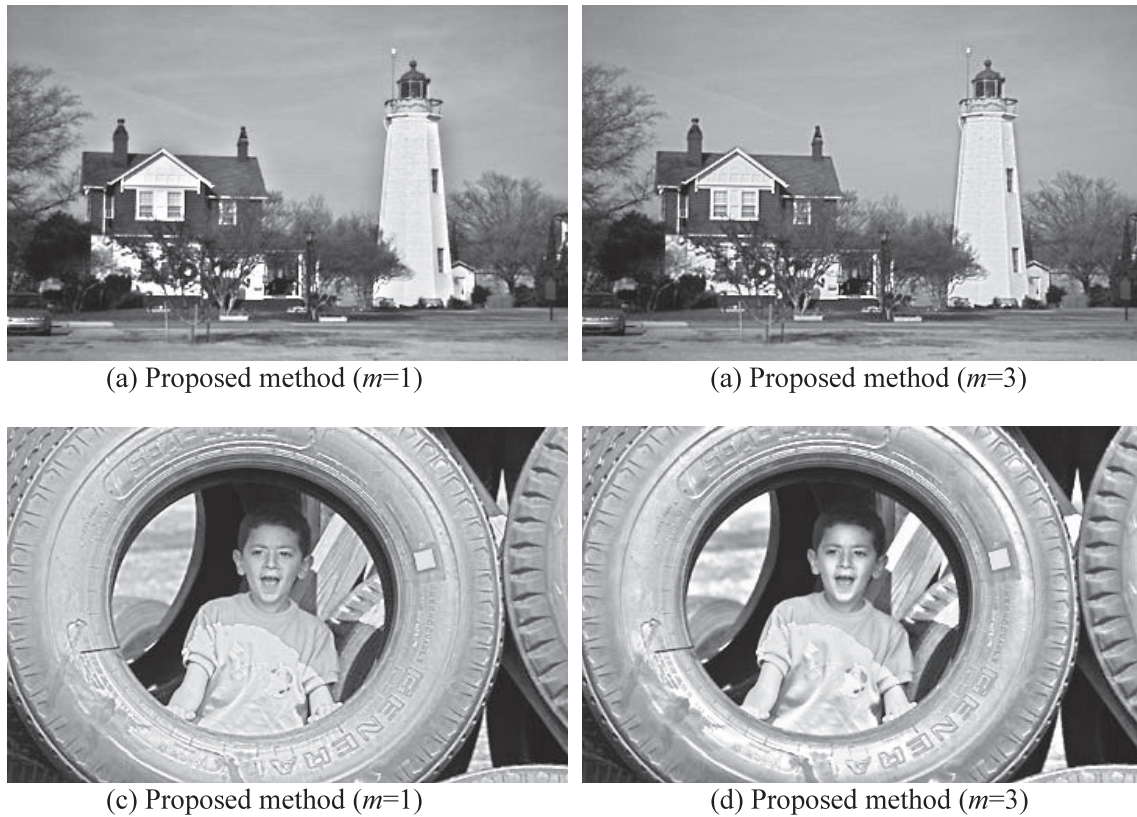


Fig. 9 Reproduced images by the proposed algorithm.

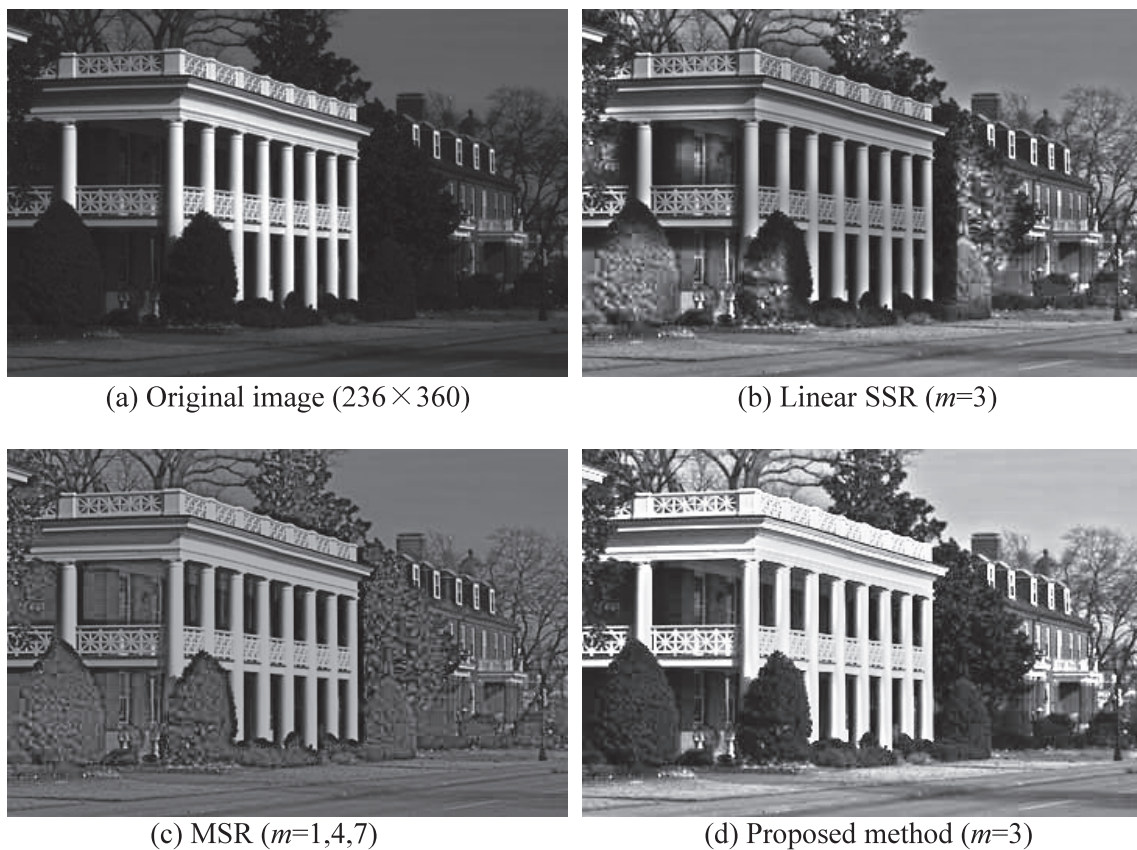
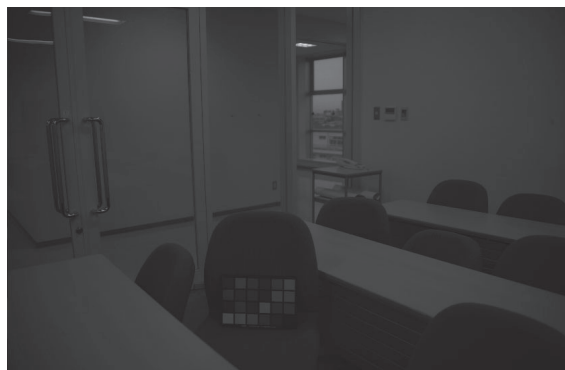


Fig. 10 Reproduced images for comparison experiments.



(a) Linear tone mapping



(b) Tone mapping by the proposed method

Fig. 11 A reproduced result by applying to an HDR image.

5. HDR 画像のトーンマッピングへの適用

近年、撮影するシーンが多様になり、影のような暗い領域からハイライトや非常に高輝度の領域を含む、いわゆる高ダイナミックレンジ (High Dynamic Range, HDR) シーンの画像獲得が目ざされている。HDR 画像は、1 チャンネルあたりの階調が通常の 8 bit より大きく、シーンの明部から暗部までの全ての階調で重要な情報を持っている。一方、ディスプレイ等の一般の出力デバイスは 8bit であるため、HDR から LDR (Low Dynamic Range) への適切なトーンマッピングが必要となる。そこで、提案手法の応用の一つとして、HDR 画像のトーンマッピングへの適用を試みた。HDR 画像のトーンマッピングは、近年精力的に研究されている画像工学の一分野である²³⁾。著者らは、これまでに視覚の局所的な順応モデルを考慮したトーンマッピング法を提案した²²⁾。ここでは、輝度刺激に対する網膜の応答反応に基づいて、実シーンの HDR 画像を圧縮してディスプレイに表示させることを目指した。本論文では、照明光分布を推定して反射率画像を獲得し、これを HDR の圧縮画像として再現できることを示す。すなわち、これまでの Retinex モデルの枠組みで、容易に HDR 画像のトーンマッピングが実現できることを示す。

本実験で利用した HDR 画像の撮影には、12 bit のセンサ出力をもつ Canon EOS を用いた。この出力を、グレーチャートを用いて、線形出力が得られるように較正した。実験では、露光時間を約 1/2 ずつ変化させて 5 枚の画像を撮影し、レンジ拡張することにより、16 bit 相当の HDR 画像を生成した²⁴⁾。また、グレーチャートを用いて、カラーバランスを調整した。計

算処理に用いたパラメータは、前章と同じ値を用いた。

実験したシーンは屋内の会議室であり、窓を通して屋外シーンを含んでいる。すなわち照明光は、室内では天井の蛍光灯、屋外では照度の高い日光である。明暗の評価のみならず色彩の評価を行うために室内にマクベスカラーチャートを置いた。

実験結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a) は、HDR 画像に対して、線形圧縮によってトーンマッピングを実行した結果である。明らかに室内が暗すぎ、不自然な再現画像となっていることがわかる。提案手法による再現画像を Fig. 11 (b) に示す。提案手法では、室内、廊下、屋外と、それぞれの照明光分布を飽和することなく推定し、また Bilateral filter で境界部分も分離できた。実際、実シーンと比較しても、色再現、コントラストともに視覚的に違和感なく再現できることを確認した。このように、HDR 画像に対しても提案手法を応用できることがわかった。

6. ま と め

本論文では、SSR の周辺輝度場を改善することによって、低コントラストとハローの出現の問題点を改善できる Retinex 手法を提案した。提案手法では、低コントラスト再現を改善するために、ヒストグラムリスキューによる周辺輝度場のレンジ圧縮を提案した。また、再現画像に生じるハローを改善するために、周辺輝度場の推定に Bilateral filter による畳み込み手法を提案した。実験を通じて、演算量の小さい SSR の枠組みでありながら、コントラストが高く、ハローの出現を軽減した MSR に匹敵する再現画像を生成できることを示した。また、提案手法の応用例の一つとして、HDR 画像のレンジ圧縮として提案手法を適用し、有効性を確認することができた。

提案アルゴリズムには、4 種類のパラメータが存在する。本論文では、実験的に求められた同一のパラメータを用いて検証実験を行った。今後、主観評価実験等を通じて、画像に依存した最適なパラメータを検証していく必要がある。

謝辞

最後に、本研究の遂行にあたり有益なご助言を賜った元千葉大学教授小寺宏暉先生に感謝します。

参 考 文 献

- 1) E.H. Land: "The Retinex", American Scientist, **52**, 247-264 (1964).
- 2) E.H. Land and J.J. McCann: "Lightness and the Retinex Theory", J. Opt. Soc. Am., **61**, 1-11 (1971).
- 3) E.H. Land: "The Retinex Theory of Colour Vision", Proc. Roy. Institution Gr. Britain, **47**, 23-58 (1974).
- 4) E.H. Land, "Recent Advances in the Retinex Theory and Some Implications for Cortical Computations: Color Vision and the Natural Image", Proc. Nat. Acad. Sci. USA, **80**, 5163-5169 (1983).
- 5) Jonathan Frankle and John McCann, "Method and Apparatus for Lightness Imaging," United States Patent No. 4, 384, 336, May 17 (1983).
- 6) E.H. Land, "An Alternative Technique for the Computation of the Designator in the Retinex Theory of Color Vision", Proc.

Nat. Acad. Sci. USA, **83**, 3078-3080 (1986).

- 7) J.J. McCann: "Lesson learned from Mondrians Applied to Real Images and Color Gamut", Proc. 7th Color Imaging Conference, 1-8 (1999).
- 8) J.J. McCann: "Retinex at 40", Special Section, J. Electronic Imaging, **13**, 6-145 (2004).
- 9) Z. Rahman, "Properties of a Center/Surround Retinex: Part 1. Signal Processing Design," NASA Contractor Report 198194 (1995).
- 10) Z. Rahman, D.J. Jobson, and G.A. Woodell, "Multiscale retinex for color rendition and dynamic range compression," Proc. SPIE 2847, 183-191 (1996).
- 11) H. Kotera and M. Fujita, "Appearance Improvement of Color Image by Adaptive Scale-Gain Retinex Model", Proc. 10th CIC, 166-171 (2002).
- 12) C. Tomasi and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images", Proc. ICCV, 839-846 (1998).
- 13) Z. Rahman, Properties of a Center/Surround Retinex: Part 1. Signal Processing Design, NASA Contractor Report 198194 (1995).
- 14) D.J. Jobson and G.A. Woodell, Properties of a Center/Surround Retinex: Part 2. Surround Design, NASA Technical Memorandum, 110188 (1995).
- 15) Z. Rahman, D.J. Jobson, and G.A. Woodell, "Multiscale retinex for color rendition and dynamic range compression", Proc. SPIE 2847, 183-191 (1996).
- 16) D.J. Jobson et al: "Properties and Performance of the Center/Surround Retinex", IEEE Trans., Image Proc., **6**, 451-462 (1997).
- 17) D.J. Jobson, Z. Rahman, and G.A. Woodell, "Properties and Performance of the Center/Surround Retinex", IEEE Trans. on Image Proc., **6**, 451-462 (1997).
- 18) Z. Rahman, D.J. Jobson, and G.A. Woodell, "Retinex processing for automatic image enhancement," Human Vision and Electronic Imaging VII, Proc. SPIE 4662, 390-401 (2002).
- 19) 王立杰, 小寺宏暉: 「統合周辺場を用いた Retinex モデルによるカラー画像の見えの改善」, 日本画像学会誌, **44**, 202-210 (2005).
- 20) 小池芳明, 堀内隆彦, 小寺宏暉: 「周辺輝度場のクリッピングによる Retinex の改善」, 2006 年映像情報メディア学会年次大会, 7-2, (2006).
- 21) F. Durand and J. Dorsey, "Fast bilateral filtering for the display of high dynamic range images," ACM Trans. Graphics Proceedings of SIGGRAPH 2002, 257-266 (2002).
- 22) L. Wang, T. Horiuchi and H. Kotera, "HDR image compression by local adaptation for scene and display using retinal model," IEICE Trans. Information and Systems, **E90-D**, 173-181 (2007).
- 23) E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik and P. Debevec, High dynamic range imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting, Morgan Kaufmann, (2006).
- 24) S. Tominaga, "Multichannel vision system for estimating

surface and illuminant functions," JOSA A, **13**, 2163-2173 (1996).



小池 芳明

2005 千葉大学工学部情報画像工学科卒業。2007 同大学院自然科学研究科博士前期課程修了。在学中、カラー画像の画質改善の研究に従事。現在、ソニー株式会社デジタルイメージング事業本部勤務。修士（工学）。



堀内 隆彦

1990 筑波大学第3学群情報学類卒。1995 年同大学院博士課程了。同年同大電子・情報工学系講師。1993~1995 日本学術振興会特別研究員。1998 岩手県立大学ソフトウェア情報学部助教授を経て、2003 より千葉大学工学部助教授。現在、同大学院融合科学研究科准教授。色彩工学、デジタル画像処理の研究に従事。博士（工学）。



斎藤 了一

1983 千葉大学工学部画像工学科卒業。同年、千葉大学工学部画像工学科（現：情報画像学科）技術専門職員。印刷複製、レーザダイレクト製版、異種メディア間の色再現・色変換等の研究に従事。工学博士。（正会員）。



富永 昌治

1970 大阪大学・基礎工・電気卒。1975 同大学院博士課程了。電総研大阪支所を経て、1976 大阪電気通信大学講師。1986~2006 同教授。2006 より千葉大学工学部教授。現在、同大学院融合科学研究科教授。視覚情報学、色彩情報処理、CG, CV などの研究に従事。IEEE IS & T, および SPIE フェロー。前日本色彩学会会長、工学博士。