



Nagoya City University Academic Repository

学位の種類	博士（生体情報）
報告番号	甲第1594号
学位記番号	第16号
氏名	義如
授与年月日	平成29年3月24日
学位論文の題名	悪条件下で撮影された画像の視認性改善に関する研究
論文審査担当者	主査： 田中 豪 副査： 中村 篤， 田上 英明， 村上 和人（愛知県立大学）

名古屋市立大学 博士学位論文

悪条件下で撮影された画像の
視認性改善に関する研究

2017年

義 如

名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科

要旨

風景や物体を撮影する際に、さまざまな原因で対象物体の視認性が良くない場合がある。本研究では「照明光の不足」と「ヘイズの写り込み」という二つの問題について考える。

人間の視覚システムは、さまざまな明るさの状況において対象物体を認識することができる。特に、照明光が不足している場合でも対象物体の認識が可能である。しかし、カメラで撮影した写真では、照明光の不足により暗部が生じ、被写体の視認性が著しく低下することがある。この状況を改善する手法として、Jobson らにより提案された multiscale retinex が広く知られており、更にそれを発展した手法も提案されている。

Retinex 理論は、人間の視覚システムが色をどのように捉えるのかをモデル化した理論である。デジタル画像を対象とした場合、retinex 処理は以下の二つの仮定の下で行われる。(1) 画素値は照明光と被写体の反射率の積である。(2) 照明光は空間的に滑らかに変化している。すなわち、照明成分を取り出した画像における画素値の変化は滑らかである。(2) の仮定を満たす方法で照明光分布を推定し、(1) の仮定に基づいて反射率を推定する。単純な Retinex 処理では、照明光不足による視認性の悪さは改善されるが、照明成分が除去されてしまうので出力画像が不自然な印象のものになってしまう。

本研究では、入力画像の明暗順序と整合性の良い、自然な出力画像を得る MSR 手法を提案する。提案手法では、まずカラー画像を HSV 色空間で考えることで色相・飽和度・明度を分離し、明度のみを処理する。この方式により、retinex 処理によって偽色（実際の被写体には存在しない色）の発生を避けることができる。次に、入力画像の明度成分を推定し、それに基づいて反射率成分も推定する。続いて、出力画像の画素値の明暗関係が自然なものとなるように、統合した照明成分を提案した修正関数により修正する。修正関数は、入力画像の明るい部分はそのまま保存し、暗い部分が明るくなるようにする効果をもつ。これが提案手法の重要な点である。結果として、提案手法では明暗関係が自然な出力画像を得ることができることを実験により確認した。

また、「ヘイズの写り込み」は、気象条件によって霧やもやなどのヘイズがあり、それが写真に写り込んでしまうことである。ヘイズの存在は被写体の視認性を著しく低下させる。近年、画像中のヘイズを取り除く研究が行われている。一般的に、ヘイズ除去手法では大気散乱モデルに基づいた処理を行う。大気散乱モデルは、ヘイズにおける光の透過率と環境光並びに撮影された画像の画素値の関係をモデル化したものである。透過率と環境光が推定できれば、ヘイズがない風景や物体の本来の色を推定することができる。He らは大気散乱モデルと暗チャンネル法に基づく手法を提案し、広く応用されている。暗チャンネル法では、撮影されたヘイズ画像から暗チャンネル画像を作成し、そ

れを用いて環境光並びにヘイズ画像における透過率分布を推定する。He らの手法は、多くの画像に対して良好な結果を得ることができる。ただし、He らの手法は Laplacian matrix を用いた soft matting 処理などを行うので計算量が大きく、処理に時間がかかる。更に、画像によっては、推定した透過率分布が不正確であり、局所的にヘイズが残留するという問題がある。また、詳細は明らかにされていないが、ヘイズ除去処理後の画像に対して明度調整を行うことで画質を調整している。

本研究では、パラメータの設定によりヘイズ除去強度を調整できるヘイズ除去手法を提案する。提案手法では、まず暗チャネル方法で環境光を推定する。また、ヘイズ画像の特徴を考慮し、各画素の値から透過率分布を求める。すなわち、提案手法での透過率分布は画素単位の細かい変化を反映したものとなる。結果として、He らの手法における局所的なヘイズの残留という問題を解決できる。ただし、画素単位の透過率分布を用いて処理を行うと、ヘイズ除去結果における鮮鋭さが失われることがある。この状況を回避するために、提案手法では、推定された透過率分布に対してバイラテラルフィルタによる処理を行う。この処理は soft matting に代わる効果がある一方で、処理時間は soft matting ほどにはかからない。続いて、パラメータを含む補正関数で透過率を補正する。これにより、ヘイズ除去処理の強度を調整できる。ただし、画像ごとに適切なパラメータを設定しなければならない問題があるともいえる。本論文ではヘイズ除去結果の定量評価指標も提案する。提案手法を用いることで処理強度が少しずつ変化した画像群を得ることができ、それらを用いて定量評価指標の妥当性を検討する。定量評価指標が確立されれば、それを用いて画像ごとの最適パラメータを自動で決定することが可能になる。定量評価指標として 3 種類のものを検討し、その内の一つが主観的な評価との対応がよいことを実験的に確認した。

以上のように、本論文では、風景や物体など自然画像の視認性の向上を目的とし、retinex 処理とヘイズ除去処理についてそれぞれ新規な手法を提案した。ヘイズ除去に関しては、処理結果の定量評価指標も提案した。実験によりそれらの有効性を確認した。

目次

要旨	3
第 1 章 序論	1
第 2 章 画像処理の基礎知識	5
2.1 デジタル画像	5
2.2 HSV 色空間	6
2.2.1 RGB 値から HSV 値への変換	6
2.2.2 明度 V のみの変換	7
2.3 CIEXYZ 色空間	7
2.4 CIELAB 色空間	8
第 3 章 Retinex 処理	9
3.1 従来の Retinex 処理手法	10
3.1.1 Single-Scale Retinex (SSR)	10
3.1.2 Multiscale Retinex (MSR)	11
3.1.3 Retinex 処理の問題点	12
3.1.4 照明成分の調整を伴う MSR	13
3.2 提案手法	13
3.2.1 照明成分と反射率成分の推定	13
3.2.2 照明成分の修正	14
3.2.3 出力処理	15
3.3 実験	15
3.3.1 各手法の比較	15
3.3.2 明暗順序の定量評価	17
第 4 章 ヘイズ除去	21
4.1 従来のヘイズ除去手法	22
4.1.1 ヘイズ除去の枠組み	22
4.1.2 環境光の推定	22

4.1.3	透過率分布の推定	23
4.1.4	従来手法の問題点	23
4.2	提案手法	25
4.2.1	透過率分布の推定方法	25
4.2.2	透過率分布の補正	26
4.2.3	鮮鋭化処理	27
4.2.4	出力処理	28
4.3	ヘイズ除去結果の定量評価	28
4.3.1	ヘイズ除去処理の考察	28
4.3.2	ヘイズ除去画像の定量評価指標	28
4.4	実験	29
4.4.1	透過率推定簡略化の効果	29
4.4.2	透過率補正の効果	30
4.4.3	鮮鋭化処理の効果	30
4.4.4	定量評価指標の検討	32
4.4.5	異なるヘイズ除去手法の比較	36
4.4.6	計算時間	37
第 5 章 結論		39
謝辞		41
引用文献		43
関連発表論文一覧		49
関連学会発表一覧		51
解説		53
用語集		57

第 1 章

序論

悪条件下で風景や物体を撮影したデジタル写真では、対象物体の視認性が良くない場合がある。例えば、照明不足の場合は、暗くて被写体を認識しにくい。また、霧やもやなどのヘイズが写り込み、被写体の視認性が良くないことがある。本研究では、「シーン照明不足」と「ヘイズが写り込む」という二つの問題について考える。

上述したように、カメラで撮影した写真では、シーンの照明不足により暗部の被写体の視認性が著しく低下することがあるが、人間の視覚システムでは、さまざまな明るさのシーンにおいて対象物体を認識することができる。特に、シーンの照明成分が不足している場合でも、人間の視覚システムは自分自身の調整により、対象物体の認識が可能である。人間の視覚システムが色をどのように捉えるのかをモデル化した色彩理論 (retinex 理論) が Land と McCann により発表された [1, 2]。この知見は映像の画質改善などの技術に用いられている。近年、Jobson らにより提案された single-scale retinex [3] と multiscale retinex (MSR) [4] が広く知られており、更にそれらを発展した手法も提案されている。

デジタル画像を対象とした場合、retinex 処理は以下の二つの仮定の下で行われる。(1) 画素値 I は照明 L と被写体の反射率 R の積である。(2) 照明は空間的に滑らかに変化している。すなわち、照明成分を取り出した画像における画素値の変化は滑らかである。(2) の仮定を満たす方法で照明光分布を推定し、(1) の仮定に基づいて反射率 R を推定する。Retinex 処理では照明不足による視認性の悪さは改善されるが、照明成分が除去されてしまうので出力画像が不自然なものになってしまう。本研究では、入力画像の明暗順序と整合性の良い、自然な出力画像を得る MSR 手法を提案する。

Retinex 処理の例を図 1.1 に示す。図 1.1(a) は入力画像であり、図 1.1(b) は出力画像である。図 1.1(a) に示すように、入力画像の一部 (犬の背) が暗く、この部分の被写体の視認性が良くない。Retinex 処理により、出力画像における暗部の被写体の視認性が向上していることが分かる。

また、「ヘイズが写り込む」というのは、気象条件によって霧やもやなどのヘイズがあり、それが画像に写り込んでしまうことである。ヘイズの存在は、被写体の視認性を著しく低下させる。近年、画像中のヘイズを取り除く研究が行われている。一般的に、多くの手法は大気散乱モデルに基づいた処理を行う。大気散乱モデルでは、光の透過率と環境光を基に取得画像の画素値がモデル化

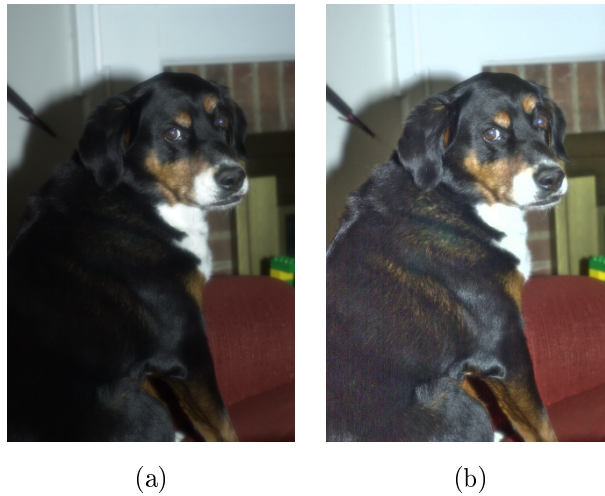


図 1.1 Retinex 処理の例 (a) 入力画像, (b) 出力画像



図 1.2 ヘイズ除去処理の例 (a) 入力画像, (b) 出力画像

される．透過率と環境光が推定できれば，ヘイズがない風景や物体の本来の色を推定することができる．He らは暗チャンネル法に基づくヘイズ除去手法を提案し [5]，広く応用されている．暗チャンネル法では，暗チャンネル画像と入力ヘイズ画像より環境光を推定する．更に，推定した環境光と暗チャンネル画像を用いて透過率分布を推定する．その後，環境光と透過率分布のデータを用いてヘイズ除去処理が行われる．He らの手法は多くの画像に対して良好な結果を得ることができる．ただし，He らの手法は Laplacian matrix を用いた soft matting 処理などを行うので計算量が大きく，処理に時間がかかる．更に，画像によっては，推定した透過率分布が不正確であり，局所的にヘイズが残留するという問題がある．本研究では，新しいヘイズ除去手法とヘイズ除去結果の定量評価指標を提案する．

ヘイズ除去の例を図 1.2 に示す．図 1.2(a) は入力画像であり，図 1.2(b) は出力画像である．図 1.2(a) に示すように，入力画像は風景の写真であり，ヘイズにより遠くにある被写体（山と空の部分）の視認性が悪い．ヘイズ除去処理により，入力画像のヘイズの部分除去し，被写体の視認性が改善されていることが分かる．

本論文では、風景や物体など自然画像の視認性の向上が目的である。MSR 手法とヘイズ除去手法についてそれぞれ新規な手法を提案し、それらの有効性を確認した。本論文は、五つの章から構成される。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、画像処理の基礎知識について説明する。特に、提案手法に関する画像処理の理論と知識を述べる。

第 3 章では、retinex 理論並びに提案手法を述べる。提案手法は、推定した被写体の反射率と修正した照明成分を用いてカラー画像の明度成分のみを変換する新しい MSR 手法である。提案手法は、出力画像の明度分布が自然なものとなることを意図している。出力画像の全体の明暗順序を考慮し、入力画像における明るい部分はそのまま保存し、暗い部分を明るくする。それを実現するために、提案手法では新しい明度修正関数を用いる。提案手法による retinex 処理結果は視認性が良く、また明暗の順序関係も入力画像と合い、良好であることを実験により確認した。

第 4 章では、ヘイズ除去について提案手法を述べる。本研究では、パラメータ設定によりヘイズ除去処理の強度を調整できる手法を提案した。提案手法では、画像ごとにパラメータを適切な値にすることで良好なヘイズ除去が可能である。また、鮮鋭なヘイズ除去結果を得るためにバイラテラルフィルタ [6] による透過率分布の平滑化処理も行う。なお、提案手法では画素ごとの情報を透過率分布へ直接反映しているため、従来手法とは異なり、局所的なヘイズ残留を防ぐこともできる。更に、処理結果の画質を評価する手法として、入力画像及び出力画像の明度と彩度を用いて、ヘイズ除去結果の定量評価指標も提案する。実験により提案手法の有効性を確認した。

第 5 章は結論である。本研究の成果を総括する。

第 2 章

画像処理の基礎知識

2.1 デジタル画像

画像は、二次元の平面上に色が分布した集合と考えることができる。デジタル画像とは、デジタル信号により記録された画像である。一般的なデジタルカラー画像は、R（赤）、G（緑）、B（青）という 3 原色によって表現されている。図 2.1 はカラー画像を三つの原色成分に分けた例である。

デジタル画像は画素と呼ばれる構成単位をもつ。図 2.2 に示すように、デジタル画像は画素を単位とした格子からなる。したがって、それぞれの画素は平面デカルト座標系で表示できる。本論文では、画像の最も左上の画素の座標を $(0, 0)$ とする。画素の座標は i 行目、 j 列目で表示できる。例として、図 2.2 に示した色の濃い画素の座標は (i, j) である。

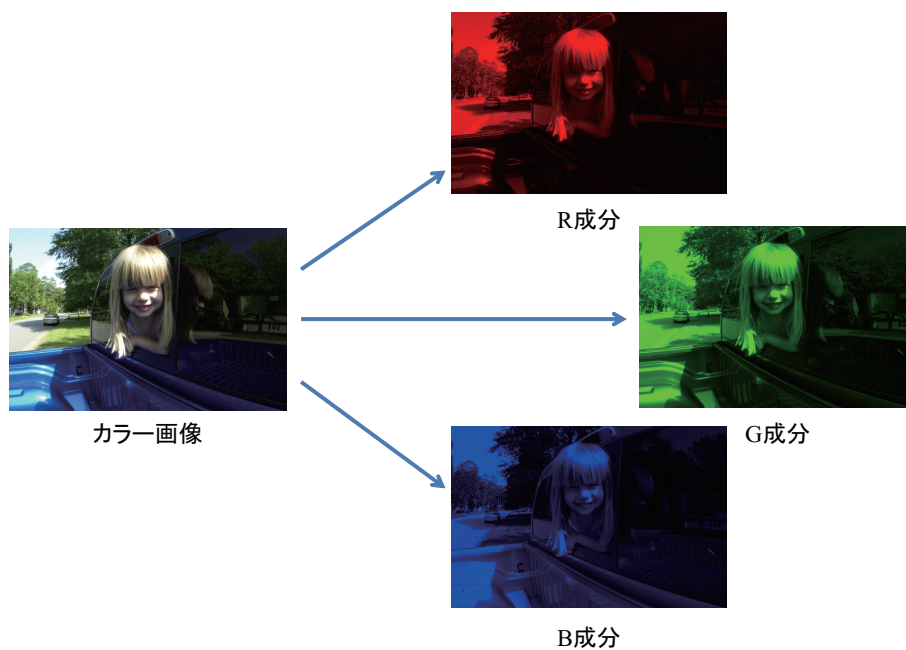


図 2.1 カラー画像と 3 原色

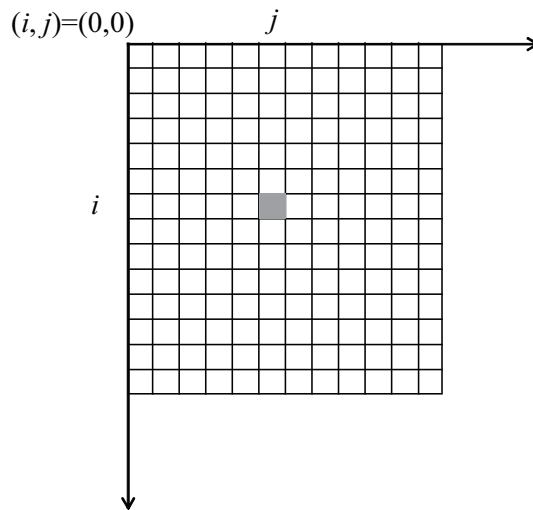


図 2.2 デジタル画像と画素の座標

一般に、デジタル画像では、各画素において一つの色成分あたり 8 ビットで色情報が記録されている。画素値を 2 進数で表現すると 00000000 から 11111111 までということになる。10 進数では、RGB 値の取りうる範囲は 0~255 となる。画像処理とは、各画素の値を変更する操作である。

2.2 HSV 色空間

色相・彩度（飽和度）・明度を表す色空間として、HSV 色空間 [7-9] がある。H, S, V はそれぞれ色相 (hue), 飽和度 (saturation), 明度 (value) である。ここでは、[0, 1] に規格化されたノンリニア RGB 値 [7] をそれぞれ r, g, b で表す。

2.2.1 RGB 値から HSV 値への変換

まず、明度 V を以下で定める。

$$V = \max(r, g, b). \quad (2.1)$$

ここで、 \max は最大値をとる演算を意味する。 $V = 0$ のとき、 $S = 0$, H は不定と定める。 $V \neq 0$ のとき、まず飽和度 S を以下で定義する。

$$S = \frac{V - v}{V}, \quad (2.2)$$

$$v = \min(r, g, b). \quad (2.3)$$

ここで、 \min は最小値をとる演算である。色相 H は以下のようにして定義する。

$$H = \begin{cases} \frac{\pi}{3} \frac{g-b}{V-v}, & r = V \text{ のとき,} \\ \frac{\pi}{3} \left(2 + \frac{b-r}{V-v} \right), & g = V \text{ のとき,} \\ \frac{\pi}{3} \left(4 + \frac{r-g}{V-v} \right), & b = V \text{ のとき.} \end{cases} \quad (2.4)$$

ただし、 $H < 0$ のときは H の値に 2π を加える。定義から分かるように、 $H \in [0, 2\pi)$, $S \in [0, 1]$, $V \in [0, 1]$ である。

2.2.2 明度 V のみの変換

RGB 値を共通に k 倍する変換について考える。すなわち、

$$r' = kr, \quad (2.5)$$

$$g' = kg, \quad (2.6)$$

$$b' = kb \quad (2.7)$$

とする変換を考える。式 (2.5)~(2.7) を式 (2.1)~(2.4) に代入すると、変換後の HSV 値 (H', S', V') は、

$$H' = H, \quad (2.8)$$

$$S' = S, \quad (2.9)$$

$$V' = kV \quad (2.10)$$

となることが分かる。すなわち、式 (2.5)~(2.7) で表される変換は、 H , S を保存し、 V のみを変換する変換である。

2.3 CIEXYZ 色空間

CIEXYZ 色空間 [7-9] は国際照明委員会 (CIE) が 1931 年に定めた色空間である。この CIEXYZ 色空間は、色空間を相互に変換するときの基本的な色空間として広く使われている。CIEXYZ 色空間の 3 要素 XYZ は、 $[0, 1]$ に規格化したリニア RGB 値 [7] から以下の式により計算できる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

XYZ 色空間から RGB 色空間へ逆変換するときは、式 (2.11) の変換行列の逆行列により、

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

となる。

2.4 CIELAB 色空間

RGB 色空間や HSV 色空間や CIEXYZ 色空間 [7-9] における 2 色間の差（色空間内の距離）は人間が実際に感じる色の差を反映できていないという欠点がある。これは、色の値が同じだけ変化したとき、人間がそれを見たときに感じられる変化が等しくないという意味である。この問題を解決するため、人間が知覚する色の差を反映するように CIELAB 色空間 [7] が規定された。なお、CIELAB 色空間は CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間とも呼ばれる。

$L^*a^*b^*$ 色空間における L^* , a^* , b^* 成分は

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16, \quad (2.13)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \quad (2.14)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (2.15)$$

で定義される。ここで、

$$f(x) = \begin{cases} x^{1/3}, & x > 0.008856, \\ 7.78x + 16/116, & x \leq 0.008856 \end{cases} \quad (2.16)$$

である。なお、 X_n , Y_n , Z_n は、対象と同一照明下の標準白色に対する三刺激値である。通常、 $Y_n = 1$ に標準化されている。この場合、色度座標から計算したそれぞれの三刺激値は $X_n = 0.9505$, $Y_n = 1$, $Z_n = 1.0891$ である。

また、 $L^*a^*b^*$ 色空間における彩度 C^* は

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2.17)$$

で定義される。

第 3 章

Retinex 処理

Retinex とは、retina（網膜）と cortex（大脳皮質）を組み合わせた新しい単語であり、Land と McCann が発表した色彩理論である [1, 2]。これは、人間の脳が色や光をどのように捉えるのかをモデル化した理論である。Retinex 理論では、一般的に画素値は「物体を照らす照明光とその物体の反射率との積」で表される。この知見は画質改善などの技術に活かされている。

デジタル写真では、照明不足により被写体の視認性が悪くなる場合がある。この状況を改善する手法として、Jobson らにより提案された single-scale retinex (SSR) [3] や multiscale retinex (MSR) [4] が広く知られている。更に、MSR を改良した手法も提案されている。MSR 処理では、まず、画素値は照明と被写体の反射率の積であると仮定する。次に、画像中の照明分布を推定し、それを用いて被写体の反射率成分を得る。最終的に、得られた反射率成分と照明成分を調整し、その積を出力とする。しかし、従来手法では照明成分の調整に不十分な点があり、出力画像が不自然なものになってしまうという問題があった。本章では、照明成分の新しい調整法を示し、自然な出力画像を得る手法を提案する。

人間の視覚システムは、さまざまな明るさのシーンにおいてオブジェクトを認識することができる。特に、シーンの照明成分が不足している場合でも、オブジェクトの認識が可能である。しかし、カメラで撮影した写真では、シーンの照明不足により、暗部の被写体の視認性が著しく低下することがある。

近年、retinex 処理に関する研究が多く行われている [10–30]。特に、Kimmel らは、全体的な明るさを調整する新しい方法を提案した [11]。田中らは、変換係数を入力画像のデータに基づいて画素ごとに決定することで、被写体の視認性が良く、かつ自然な印象の出力画像を得る手法を提案した [12]。Jang らは画像のハイライト領域の色度を用いる MSR 手法を提案した [14]。また、彼らの手法では CIELAB 空間 [7] における低彩度の画素を補正することも行う。Terai らは入力画像と MSR 出力画像の明度の比率を用いることでカラー画像のコントラストを改善する手法を提案した [16]。Wang らは、bright-pass filter を提案し、これを用いた retinex 手法を提案した [17]。この手法では、画像の視認性改善だけではなく、出力画像の自然さも考慮されているが、出力画像における明暗順序（明るさの分布）が原画像の明暗順序と合わないことがある。

本章では、入力画像の明暗順序と整合性の良い、自然な出力画像を得る MSR 手法を提案する。

なお、ここではカラー画像を対象として記述するが、提案手法はモノクロ画像にも適用可能である。

3.1 従来の Retinex 処理手法

Retinex 理論は、人間の視覚システムが色をどのように捉えるのかをモデル化した理論である。人間の目が観測する色（光）は対象物体を照らす照明とその対象物体の反射率との積で表されると考えられる。デジタル画像を対象とした場合、retinex 処理は以下の二つの仮定の下で行われる。

- (1) 画素値 I は照明 L と被写体の反射率 R の積である。
- (2) 照明は空間的に滑らかに変化している。すなわち、照明成分を取り出した画像における画素値の変化は滑らかである。

仮定 (1) は、

$$I_c(x, y) = L_c(x, y)R_c(x, y). \quad (3.1)$$

と表現できる。ここで、 (x, y) は画素の座標である。 c はスペクトルバンドを表し、通常のデジタルカラー画像の場合、RGB の 3 バンドである。

一般的な retinex 手法では、まず画像中の照明分布 L を推定し、それを用いて被写体の反射率分布 R を得る。その後 (L や) R を調整し、視認性の良い画像とする。

3.1.1 Single-Scale Retinex (SSR)

まず、バンド $c \in \{r, g, b\}$ での（調整した）反射率 \tilde{R}_c を以下のように推定する。

$$\tilde{R}_c(x, y) = \log \frac{I_c(x, y)}{\tilde{L}_c(x, y)}, \quad (3.2)$$

$$\tilde{L}_c(x, y) = (G * I_c)(x, y), \quad (3.3)$$

$$G(x, y) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.4)$$

ここで、 $*$ は畳み込み演算を表す。 G はガウス関数である。 σ はガウス関数の標準偏差であり、SSR 処理のスケールという。また、 K は規格化定数であり、

$$\iint G(x, y) dx dy = 1 \quad (3.5)$$

を満すように決められる。 \tilde{L} は I の重み付き局所平均であり、仮定 (2) を満たしたものである。Retinex 処理においては、これを照明成分に対応するもの（照明画像）と考える。式 (3.1), (3.2) から、SSR 出力は反射率 R を対数関数により調整したものであるといえる。

\tilde{R} のとる値はディスプレイ（入力画像 I ）のレンジと合っておらず、調整が必要である。ゲイン

パラメータ α とオフセットパラメータ β によって調整した I^{SSR} が SSR 出力値となる [3].

$$I_c^{\text{SSR}}(x, y) = \alpha \tilde{R}_c(x, y) + \beta. \quad (3.6)$$

SSR 処理の結果はパラメータ σ の値に影響される. 小さいスケールでの SSR 処理はダイナミックレンジ圧縮の効果が大きく, 大きいスケールでの SSR 処理は演色性の面で優れている [14].

3.1.2 Multiscale Retinex (MSR)

SSR での出力画像のダイナミックレンジ圧縮と演色性のトレードオフの問題を解決するため, Jobson らは MSR を提案した [4]. MSR 出力 R_c^{MSR} は, 以下の式で示すように, 複数のスケールでの SSR 出力画像の重み付き和である.

$$R_c^{\text{MSR}} = \sum_{n=1}^N w_n I_{n,c}^{\text{SSR}}. \quad (3.7)$$

ここで, N はスケール数であり, $I_{n,c}^{\text{SSR}}$ は n 番目のスケールの SSR 出力結果における c バンドの値である. n 番目のスケールでは, 標準偏差が σ_n のガウス関数 G_n により式 (3.3) の処理を行う. w_n は n 番目のスケールに対する重みであり,

$$\sum_{n=1}^N w_n = 1 \quad (3.8)$$

と制限する.

一般的な MSR 手法では, $N = 3$, $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ とする. 図 3.1 は, この条件下での MSR 処理の例である. 入力画像のサイズは 500×328 画素であり, $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (5, 25, 80)$ とし

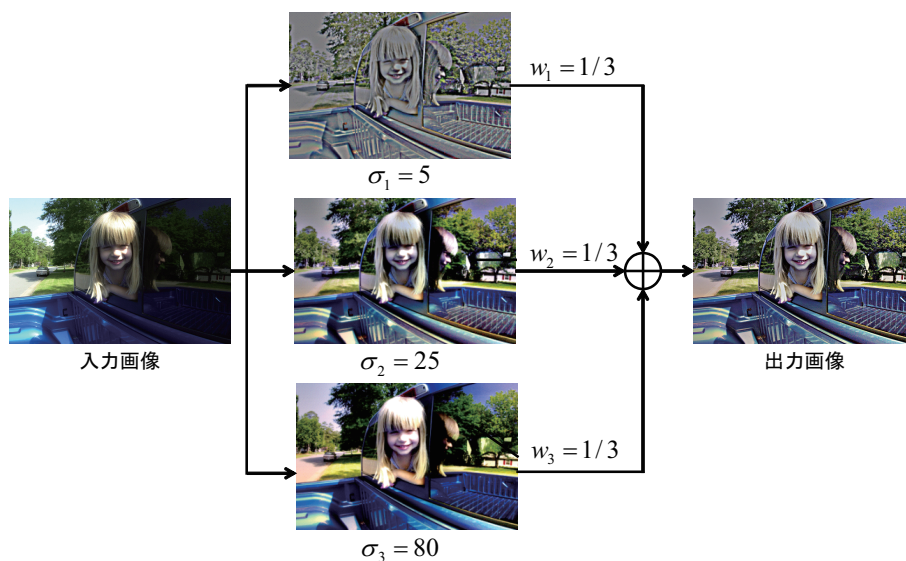


図 3.1 MSR 処理の流れ

た. なお, 重みは $(w_1, w_2, w_3) = (0.3, 0.1, 0.6)$ [14] や $(w_1, w_2, w_3) = (0.25, 0.5, 0.25)$ [18] とする場合もある.

3.1.3 Retinex 処理の問題点

3.1.1 節, 3.1.2 節で述べた SSR, MSR では, 各色成分を独立に処理し, 反射率成分を調整したものを出力としている. これらの処理では, 各色成分を独立に処理するので偽色が発生するという問題がある. また, 照明不足による視認性の悪さは改善されるが, 照明成分が除去されてしまうので出力画像が不自然なものになってしまう.

例として, 図 3.2(a) の入力画像を各色成分を独立に処理する SSR 及び MSR で処理した結果をそれぞれ図 3.2(b), (c) に示す. 図 3.2(b), (c) は図 3.2(a) と比べて色が正しくない (偽色が生じている) ことが分かる. Jobson らは色修正を考慮した MSR (MSR with color restoration) も提案しているが [4], 色修正のためのパラメータが追加され, 複雑なものとなっている. 図 3.2(d) に示した Terai らの手法 [16] は, 明度成分 Y とその MSR 処理結果 Y' を用いて $k(x, y) = Y'(x, y)/Y(x, y)$ とし, 各画素の RGB 値を式 (2.5)~(2.7) の要領で変換する. 2.2 節で説明したように, これは V のみを変換することと同値であり, 色相 H と飽和度 S が保存される. Terai らの手法は, 色修正のためのパラメータを導入せずに偽色の抑制を実現している.

図 3.2 が示すように, 入力画像では右の影の部分の視認性が悪いが, SSR, MSR, Terai らの手法での出力画像では視認性が改善されている. ただし, 入力画像では左上の部分明るい, SSR, MSR, Terai らの手法での出力画像では, 原画像よりも暗くなっている. 更に, 画像全体

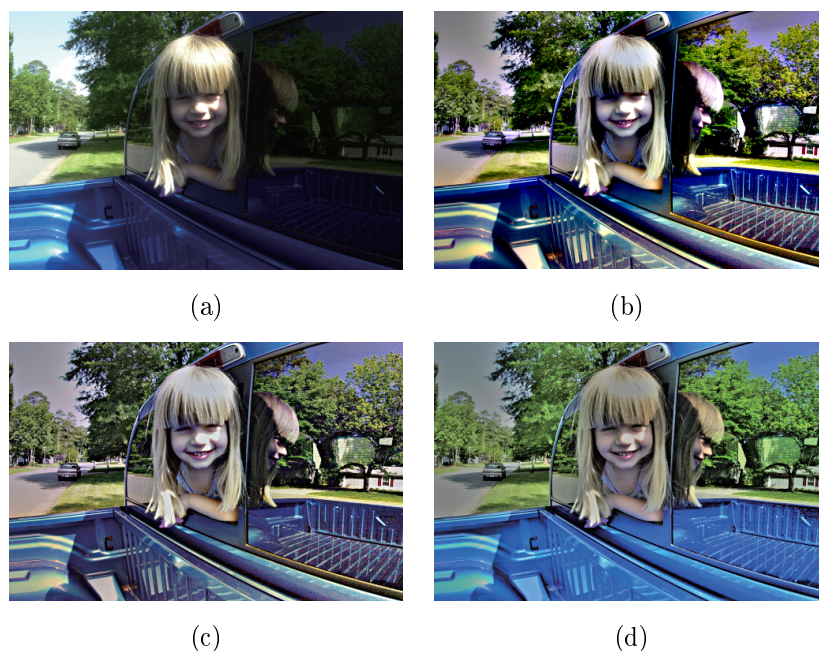


図 3.2 Retinex 処理の例 (a) 入力画像 (girl), (b) SSR, (c) MSR, (d) Terai らの手法

を観察すると、SSR、MSR、Terai らの手法での処理した画像では、入力画像における暗い部分が入力画像の明るい部分よりも明るくなっており、不自然であるという問題がある。

3.1.4 照明成分の調整を伴う MSR

3.1.2 節で述べた MSR では、反射率成分を調整したものを出力値としており、図 3.2 で見られたように不自然な結果となることが多い。Kimmel らは、画像全体の明るさを調整する方法を提案した [11]。彼らの手法では、まず、入力画像から照明成分 L を抽出し、式 (3.1) に基づいて反射率成分 R を得る。次に、 L をガンマ変換し、 L' とする。最後に、調整した照明成分 L' と反射率成分 R の積を出力値とする。カラー画像に対しては、偽色の発生を避けるために、HSV 色空間の明度成分 V だけを処理する。

Wang らは、これまでの retinex 処理と異なり、画像の照明成分を推定するときに Gaussian filter や bilateral filter [6] の代わりに bright-pass filter を提案し、それを使う手法を提案した [17]。彼らの手法では、画像の視認性だけでなく、出力画像の明暗順序の自然さを保つことも意図されている。Wang らの手法では、bright-pass filter を使うことで、反射率が $[0, 1]$ に制限されることが保証される。照明成分は bi-log 変換で調整する。この調整した照明成分と反射率成分の積により、最終的な出力画像を得る。

3.2 提案手法

本研究では、推定した被写体の反射率と修正した照明成分を用いて、カラー画像の明度成分 V のみを変換する新しい MSR 処理を提案する。提案手法は、出力画像の明度分布が自然なものとなることを意図している。

3.2.1 照明成分と反射率成分の推定

提案手法では、

$$V(x, y) = L(x, y)R(x, y) \quad (3.9)$$

であると仮定する。まず、スケール n における推定照明成分 \tilde{L}_n を

$$\tilde{L}_n(x, y) = (G_n * V)(x, y) \quad (3.10)$$

で得る。これを用いて、スケール n での推定反射率 \tilde{R}_n を

$$\tilde{R}_n(x, y) = \begin{cases} 0, & \tilde{L}_n(x, y) = 0, \\ V(x, y)/\tilde{L}_n(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.11)$$

で得る. 更に, 統合照明成分 \tilde{L} 及び統合反射率 \tilde{R} をそれぞれ

$$\tilde{L}(x, y) = \sum_{n=1}^N w_n \tilde{L}_n(x, y), \quad (3.12)$$

$$\tilde{R}(x, y) = \sum_{n=1}^N w_n \tilde{R}_n(x, y) \quad (3.13)$$

で定義する. なお, w_n は式 (3.8) を満たすようにする.

3.2.2 照明成分の修正

入力画像の明るい部分をそのまま保存し, 暗い部分を明るくするように照明成分を修正する. 修正関数 $f(x)$ は,

$$f(x) = (1 - x^{\gamma_2}) \times h(x) + x^{\gamma_2} \times x, \quad (3.14)$$

$$h(x) = 1 - (1 - x)^{\gamma_1} \quad (3.15)$$

と定義する. ここで, γ_1 と γ_2 はパラメータである. 修正照明成分 \hat{L} は,

$$\hat{L}(x, y) = f(\tilde{L}(x, y)) \quad (3.16)$$

で得られる. 図 3.3(a) は修正関数 f の例である. 図から分かるように, 照明が暗いほど修正度合いが大きい. 逆に, 元々照明が十分明るい部分は, あまり変化させる必要がないので, 修正度合いは抑制されている. これが提案手法の重要な点である.

$f(x)$ は, $h(x)$ と x にそれぞれ $1 - x^{\gamma_2}$ と x^{γ_2} という重みをかけて足し合わせたものである. 図 3.3(b) に $h(x)$ の例と x を示す. 暗い部分 (x が 0 に近い部分) では明るくする必要があるので, $f(x)$ は $h(x)$ に近い方が良い. 逆に, 明るい部分 (x が 1 に近い部分) では明度を修正する必要がないので, $f(x)$ は x に近い方が良い. 式 (3.14) はそれを実現したものである. ただし, γ_1 と γ_2 の設定によっては f が単調増加関数とならないことがあるので注意が必要である.

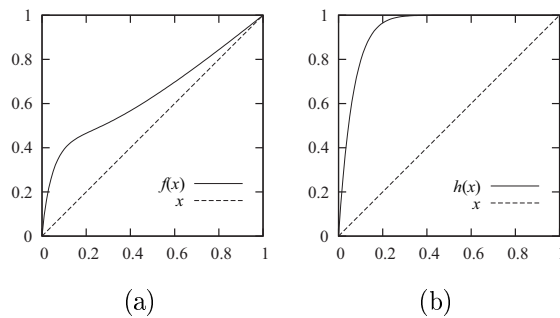


図 3.3 関数形状の例 (a) f の例 ($\gamma_1 = 15, \gamma_2 = 0.2$), (b) h の例 ($\gamma_1 = 15$)

3.2.3 出力処理

提案手法で処理した明度成分 V' は

$$V'(x, y) = \hat{L}(x, y)\tilde{R}(x, y) \quad (3.17)$$

で得る. また, 画素 (x, y) に対する修正係数 $k(x, y)$ を

$$k(x, y) = \begin{cases} 0, & V(x, y) = 0, \\ V'(x, y)/V(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.18)$$

で定める. 提案手法での出力画像 I' は

$$I'_c(x, y) = k(x, y)I_c(x, y) \quad (3.19)$$

で得る. これは 2.2 節で説明したように, 色相 H 及び飽和度 S を保つ変換となっている. なお, (r, g, b) を (H, S, V) に変換し, 明度のみを変換した (H, S, V') を (r, g, b) に逆変換しても同じ結果が得られる. この方が変換の意味が明確であるが, 計算量の観点からは, H や S を計算しない式 (3.19) の方が優れている.

3.3 実験

実験により提案手法の有効性を確認する. 実験には 256 階調のカラー画像を用いた. 比較手法としては, Jobson らの MSR [4] と近年提案された Wang らの手法 [17] を考える. Jobson らの MSR おけるパラメータは $N = 3$, $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (5, 25, 80)$, $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$, $\alpha = 170$, $\beta = 120$ とした. Wang らの手法にはパラメータはない. 提案手法におけるパラメータは $N = 3$, $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (5, 20, \infty)$, $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$, $\gamma_1 = 15$, $\gamma_2 = 0.2$ とした. なお, $\sigma_3 = \infty$ は, 式 (3.10) から分かるように, \tilde{L}_3 を V の平均値とすることを意味する.

3.3.1 各手法の比較

図 3.4 は画像 shoe に対する各手法の処理結果である. Jobson らの手法 (図 3.4(b)) では視認性が改善されているが, 靴の白い部分のデータ (汚れ) が失われているなど, 画像全体のバランスには問題がある. Wang らの手法 (図 3.4(c)) と提案手法 (図 3.4(d)) は比較的良好である. ただし, Wang らの手法での結果は, 原画像の明暗順序が保たれていない部分がある. 図 3.5 は画像の平均明度 Y をしきい値として 2 値化した画像である. 画像の左上のと右下の部分は, 入力画像 (図 3.5(a)) では平均よりも暗い. Jobson らの手法の結果では, 左上部分の明暗関係は入力画像と合っているが, 右下の部分が明るくなってしまっている. Wang らの手法での結果では, この二つ部分が平均よりも明るくなっている. これらは不自然な結果であるといえる. 提案手法では, 出力画像の明暗関係は基本的に入力画像と合っている.

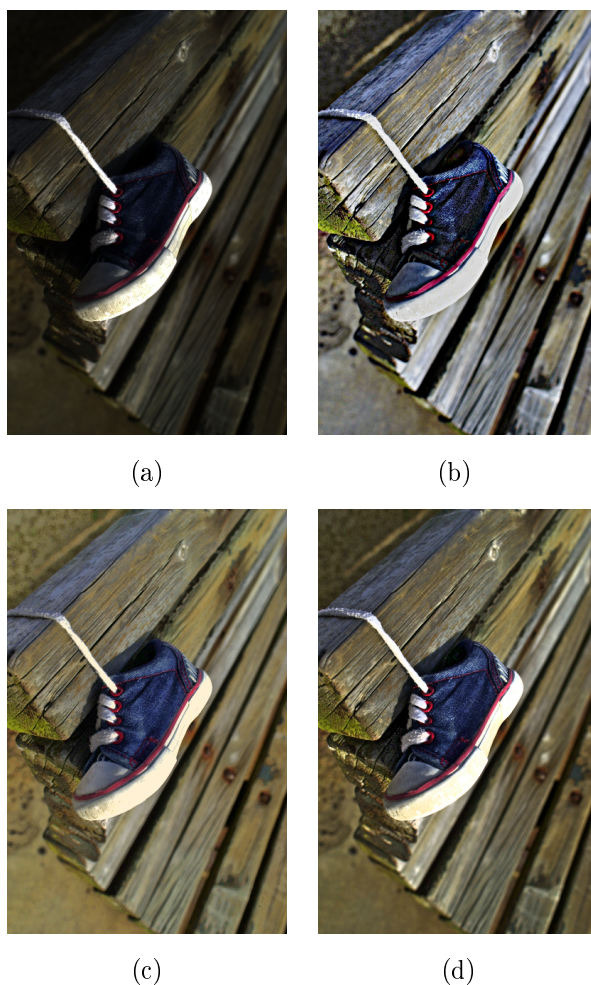


図 3.4 画像 shoe の処理結果 (a) 入力画像, (b) Jobson らの手法, (c) Wang らの手法, (d) 提案手法

図 3.6 は画像 parking に対する処理結果である。MSR での結果 (図 3.6(b)) は、視認性が改善したが、画像全体の明暗のバランスが悪くなってしまい、色も変化している。Wang らの手法での結果 (図 3.6(c)) は、暗部の視認性が改善しているが、shoe の場合と同様、原画像の明暗関係と合っていない。提案手法での結果 (図 3.6(d)) は、明度分布が良好であるといえる。図 3.7 は、parking の一番左の街灯の部分を拡大した画像である。図 3.7(a)~(c) から分かるように、MSR または Wang らの手法で処理すると、街灯は入力画像よりも暗くなってしまふ。一方、提案手法 (図 3.7(d)) では、街灯の明度は保存されている。更に、定量的な説明をするために、街灯の発光部分 (図 3.7(a) の正方形の黒線で囲まれている部分) を選び、その中の画素の平均値を計算する。図 3.7(a)~(d) の RGB 成分の平均値はそれぞれ、(253,253,254), (226,225,215), (186,192,253), (254,254,254) である。明るい部分は入力画像そのままでも十分であり、提案手法が最も入力画像に近いことが分かる。

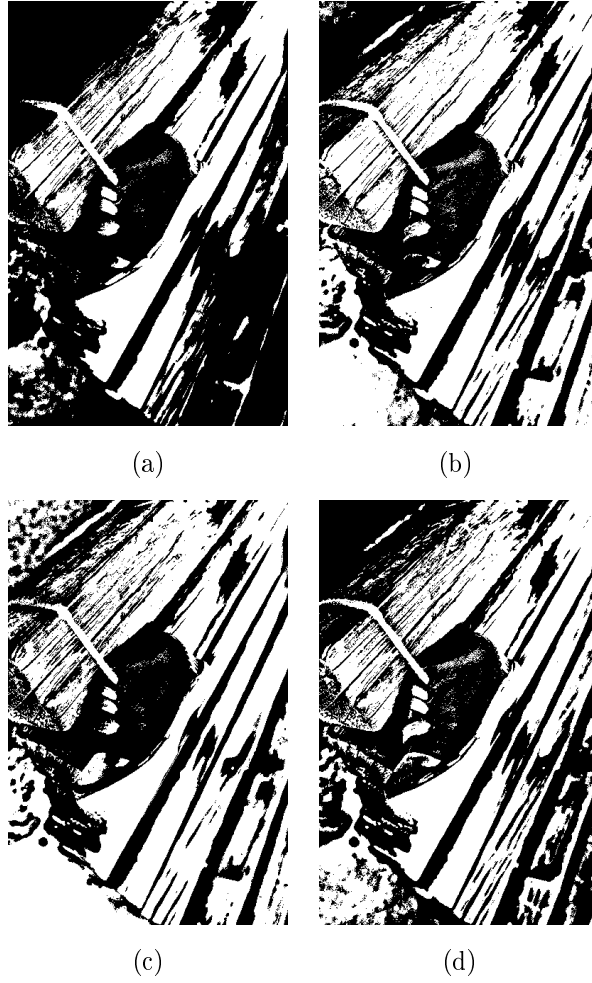


図 3.5 画像 shoe の 2 値化処理結果 (a) 入力画像, (b) Jobson らの手法, (c) Wang らの手法, (d) 提案手法

3.3.2 明暗順序の定量評価

Wang らは明暗順序の定量評価指標 lightness-order-error (LOE) を定義した [17]. 本論文では, 以下のように規格化した LOE を考える.

$$\text{LOE} = \frac{1}{M_W M_H} \sum_{x=1}^{M_W} \sum_{y=1}^{M_H} D(x, y), \quad (3.20)$$

$$D(x, y) = \frac{1}{M_W M_H} \sum_{x'=1}^{M_W} \sum_{y'=1}^{M_H} U(V(x, y), V(x', y')) \oplus U(V'(x, y), V'(x', y')), \quad (3.21)$$

$$U(i, j) = \begin{cases} 1, & i \geq j, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.22)$$



図 3.6 画像 parking の処理結果 (a) 入力画像, (b) Jobson らの手法, (c) Wang らの手法, (d) 提案手法

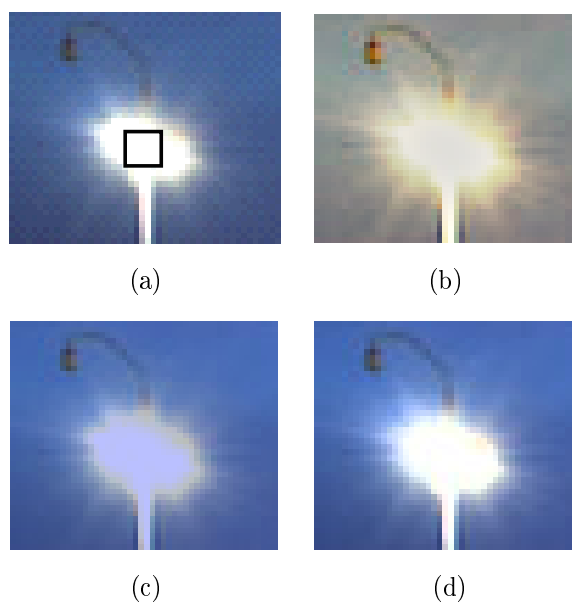


図 3.7 画像 parking の処理結果の一部 (a) 入力画像, (b) Jobson らの手法, (c) Wang らの手法, (d) 提案手法

ここで, M_W は画像の幅, M_H は画像の高さであり, \oplus は排他的論理和を表す. LOE は, 入力・出力画像それぞれにおける画素対 (画素 (x, y) と (x', y') の対) の明度 V について, 明暗の関係が逆転した対を数え上げたものである. ただし, 計算量が膨大なので, 実際にはダウンサンプリングし

表 3.1 各手法による処理結果に対する LOE の比較

画像	手法		
	Jobson らの手法	Wang らの手法	提案手法
girl	0.2663	0.0973	0.0970
parking	0.2097	0.0782	0.0549
shoe	0.1297	0.1628	0.0922

た画像に対して LOE を計算する．ダウンサンプリングの圧縮率 d は

$$d = \frac{50}{\min(M_W, M_H)} \quad (3.23)$$

で決定し，実際には $dM_W \times dM_H$ 画素の画像に対して LOE を計算する [17]．

各手法の結果に対して LOE を求めたものを表 3.1 に示す．LOE は明暗の関係が逆転した対を数え上げたものであるので，小さい方が良い．提案手法の LOE は従来手法と同程度か小さい．特に，図 3.5 でも見られたように，shoe について提案手法と Wang らの手法の差が顕著である．

本章では，推定した反射率成分と調整した照明成分を乗じることで自然な出力画像を得る手法を提案した．提案手法は入力画像の明度成分 V だけを処理するので比較的高速である．提案手法の特長は，入力画像の明部の変換は抑制しつつ，暗部の視認性を改善する点にある．提案手法による出力画像は視認性が良く，明暗順序の定量評価においても良好なものであることを実験により確認した．

第4章

ヘイズ除去

霧やもやなどのヘイズが写りこんだ写真では、被写体の視認性が良くない。近年、画像中のヘイズを取り除く研究が数多く行われている [5,31-54]。Tan らはマルコフ確率場の枠組みに基づいた上で、画像中のコントラストとエッジの関係より目的関数を構成し、ヘイズを除去する方法を提案した [31]。Fattal は画像中の各画素の透過率が表面の陰影と局所的には無相関であるという仮説に基づく手法を提案した [32]。また、Tarel らは median filter [55] を用いることで高速な手法を提案した [33]。更に、bilateral filter (BF) [6] を用いる手法も提案されている [34,35]。古川らの手法 [34] は BF を拡張した min-max BF を用いた高速な手法である。小寺の手法 [35] では、まず、最小値フィルタを用いてヘイズ画像中の透過率分布を推定する。次に BF で透過率分布の平滑化処理を行い、結果として鮮鋭なヘイズ除去画像を得る。

He らは暗チャンネル法に基づくヘイズ除去手法を提案した [5]。暗チャンネル法では、暗チャンネル画像と入力ヘイズ画像より環境光を推定する。更に、推定した環境光を用いて透過率分布を推定する。その後、環境光と透過率分布のデータを用いてヘイズ除去処理が行われる。He らの手法は、多くの画像に対して良好な結果を得ることができるようである。ただし、He らの手法では、出力画像の画質を向上させるために、手順が明らかにされていない何らかの処理がヘイズ除去処理後に行われている。また、彼らの手法は Laplacian matrix を用いた soft matting 処理などを行うので計算量が大きく、処理に時間がかかる。更に、画像によっては、推定した透過率分布が不正確であり、局所的にヘイズが残留するという問題がある。

本章では、新たなヘイズ除去手法を提案する。従来手法と同様、提案手法では、画像中の環境光と透過率分布を推定し、それらの情報を用いてヘイズ除去を行う。提案手法では、画像中のヘイズ濃度を入力画像の各画素値から求め、透過率分布を推定する。画素ごとの情報を透過率分布へ直接反映するので、従来手法とは異なり、局所的なヘイズ残留を防ぐことができる。また、バイラテラルフィルタを用いて透過率分布を平滑化することで、結果的に出力画像を鮮鋭化する。提案手法は、パラメータ設定によりヘイズ除去処理の強度を調整でき、画像ごとにパラメータを適切な値にすることで良好なヘイズ除去が可能である。

ヘイズ除去処理はこれまで多く提案されてきたが、処理結果の画質を評価する手法はあまり研究されていない。本研究では、入力画像及び出力画像の明度と彩度を用いて、ヘイズ除去結果を定量

的に評価する方法も提案する．提案定量評価指標の妥当性を実験により示す．また，提案した指標を用いて種々のヘイズ除去手法の定量的な比較を行う．

4.1 従来のヘイズ除去手法

ここでは，代表的なヘイズ除去手法である He らの手法 [5] を説明する．彼らの手法では，暗チャンネル法と soft matting 処理により，環境光と透過率分布を推定する．

4.1.1 ヘイズ除去の枠組み

一般的なヘイズ除去手法では，次の大気散乱モデル

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{J}(x)t(x) + \mathbf{A}(1 - t(x)) \quad (4.1)$$

を仮定する．ここで， \mathbf{I} はヘイズのある観測画像（入力画像）， x は画素の座標， t は透過率， \mathbf{A} は環境光である． \mathbf{J} はヘイズのない画像（出力画像）である．He らの手法でもこのモデルが使われている．

ヘイズ除去は， \mathbf{I} から \mathbf{A} 及び t を推定し，ヘイズ除去画像 \mathbf{J} を取得する処理である．具体的には， \mathbf{J} は，

$$\mathbf{J}(x) = \frac{\mathbf{I}(x) - \mathbf{A}}{\max(t(x), t_0)} + \mathbf{A} \quad (4.2)$$

で得られる．ここで， t_0 は $t(x) \approx 0$ の場合のオフセットであり，小さな正の実数である． t_0 は，多くの手法において 0.1 と設定されている．

4.1.2 環境光の推定

He らの手法では，暗チャンネル法で環境光を推定する．暗チャンネル法は，最小値フィルタを用いた方法である．暗チャンネル法で取得した画像を暗チャンネル画像と呼ぶ．入力画像 $\mathbf{I} = (I^R, I^G, I^B)$ に対して，その暗チャンネル画像 I^{dark} は以下の式で定義される．

$$I_{\lambda}^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega_{\lambda}(x)} \left(\min_{c \in \{R, G, B\}} I^c(y) \right). \quad (4.3)$$

ここで， c は色チャンネルである． $\Omega_{\lambda}(x)$ は，中心画素を x とした $\lambda \times \lambda$ 画素の正方領域である．He らの手法では， $\lambda = 15$ と設定されている．暗チャンネル画像中の低輝度画素は主に有色の物体や影に対応する．

環境光 $\mathbf{A}_{\lambda} = (A_{\lambda}^R, A_{\lambda}^G, A_{\lambda}^B)$ は，暗チャンネル画像に基づいて以下の式で推定される．

$$A_{\lambda}^c = I^c(\arg \max_{x \in S_{\lambda}} Y(x)). \quad (4.4)$$

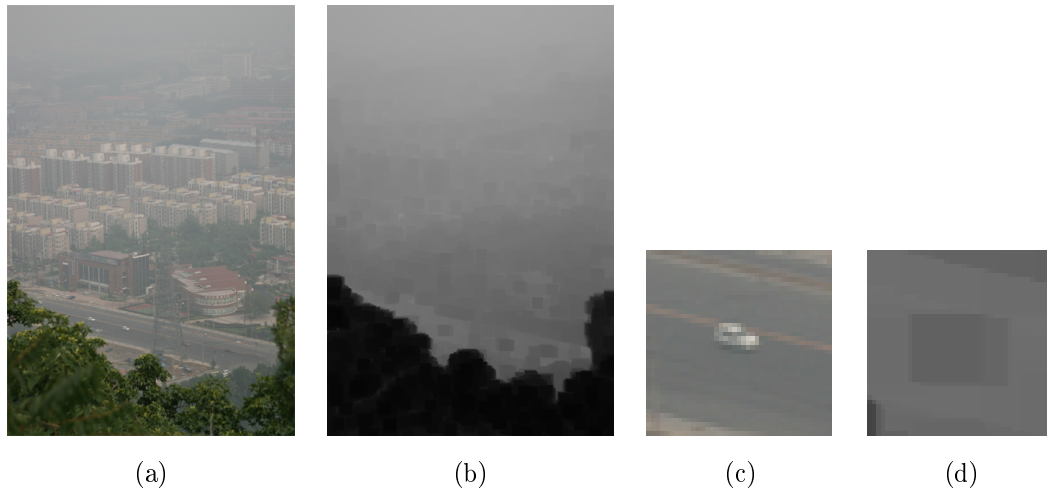


図 4.1 ヘイズ画像 Canon (a) 入力画像, (b) 画像 (a) の暗チャンネル画像 I_{15}^{dark} , (c) 画像 (a) の一部, (d) 画像 (c) の暗チャンネル画像 I_{15}^{dark}

ここで, S_λ は暗チャンネル画像 I_λ^{dark} において上位 0.1% の大きい画素値を持つ画素の集合である. 式 (4.4) は, I_λ^{dark} における高輝度の画素のうち, 入力画像の明度 Y が最大のものを環境光と推定するものである. このようにすることで, 入力画像中の白色の物体等を誤って環境光と推定することを避けることができる.

例として, ヘイズ画像 Canon とその暗チャンネル画像 I_{15}^{dark} をそれぞれ図 4.1(a) と 4.1(b) に示す. 図 4.1(c) は図 4.1(a) の白い車の部分を拡大したものである. 図 4.1(d) は図 4.1(c) に対応する暗チャンネル画像 I_{15}^{dark} であり, 白い車は消えていることが分かる. このように, I_{15}^{dark} を使用することで, 明るい色の物体を誤って環境光と推定することを避けることができる.

4.1.3 透過率分布の推定

He らの手法では, まず, I_{15}^{dark} と環境光の値から基本的な透過率分布の推定を行う. 次に, 色線仮説 [56] に基づき, matting Laplacian matrix により soft matting 処理を行うことで透過率分布の補正を行う. 更に, BF を使用して透過率分布の改善を行い, 最終的な透過率の推定値 t とする.

4.1.4 従来手法の問題点

He らの手法では, 多くの場合良好な透過率分布 t を推定できる. しかし, 計算が複雑であり, 処理時間が長いという問題点がある.

更に, t の推定結果について, 図 4.2 に示すような問題点がある. 図 4.2(a) は入力画像 (ヘイズ画像) であり, 図 4.2(b) は最終的な処理結果である. 図 4.2(b) から分かるように, 全体的には処理結果は良好である. ただし, 図 4.2(b) の四角で囲んだ部分で示すように, 局所的にヘイズが残留するという問題点がある. これは透過率分布の推定に間違いがあることが原因である. 図 4.2(a) の透過

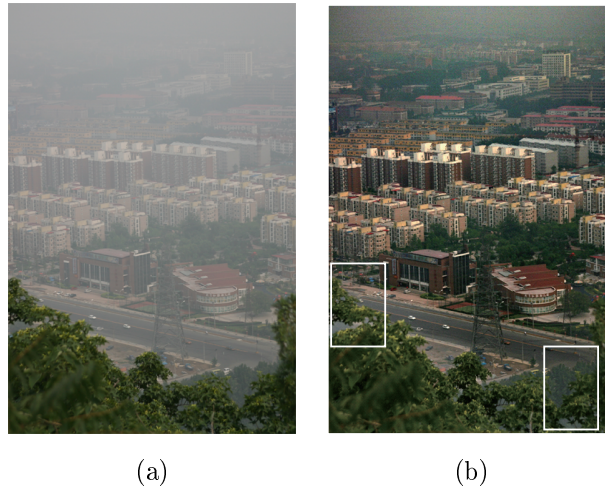


図 4.2 He らの手法での処理結果の一例 (a) ヘイズ画像 (Canon), (b) 出力画像



図 4.3 He らの手法で得られる Canon の透過率分布

率分布の推定結果を図 4.3 に示す. 図 4.4 は図 4.2 の左の四角で囲んだ部分の拡大画像である. 図 4.4(c) に示されているように, 手前の植物の間にヘイズが残留している. これは図 4.4(b) から分かるように, 手前の植物とその間の部分で透過率がほぼ等しいと推定されていることが原因である.

また, He らの手法では, 式 (4.2) で得られた画像 J が最終的な出力画像ではない. J に対し調整が施される [5]. 一般的に観測画像 I の画素値は環境光 A より小さいので, 式 (4.2) から考えると, 出力画像は観測画像より暗くなるはずである. しかし, 図 4.4(a), (c) を比較すると分かるように, 出力画像は入力画像より少し明るくなっている. 何らかの調整がなされていることは文献 [5] にも記述されているが, 具体的にどのような調整かは記されていない.

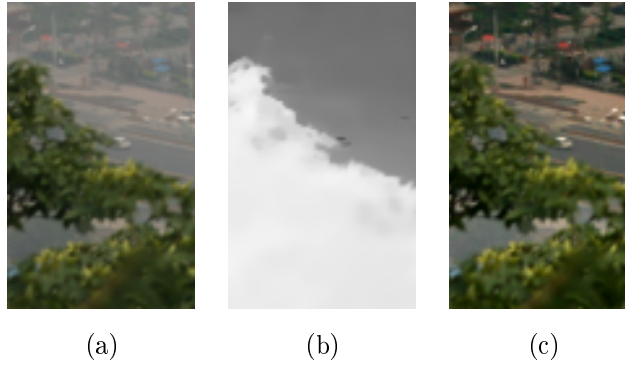


図 4.4 図 4.2 及び図 4.3 の部分拡大図 (図 4.2(b) の左の四角囲み部分) (a) ヘイズ画像, (b) 透過率分布, (c) 出力画像

4.2 提案手法

提案手法では, 他の多くの手法と同様, 大気散乱モデルに基づき処理を行う. すなわち, 入力画像 I から A 及び t を推定し, 式 (4.2) により出力画像 J を得る. 提案手法では, 透過率分布の新しい推定手法を提案する. 簡便な方法で推定した透過率分布 \tilde{t} に 2 段階の補正を加える. 1 段階目はパラメータによる透過率補正であり, ヘイズ除去処理の強度を調節する. これには出力画像の明るさを調節する効果もある. 2 段階目は BF による透過率分布の平滑化処理である. 透過率分布を平滑化することで, 出力画像が鮮鋭なものとなる. この平滑化処理は, 形式的には小寺の手法 [35] と同じであり, 出力画像の画質向上を目的としている.

4.2.1 透過率分布の推定方法

提案手法における画像の透過率分布の推定方法の概念を説明する. ヘイズを含む一般的な自然画像を観察した結果, ヘイズについて以下の特性があるといえる.

一般的なヘイズ画像では, ヘイズの部分は白色あるいは明るい灰色である. これは, ヘイズの強い画素では R, G, B の値がほぼ同じであり, かつ高い値となるということである. 逆に, ヘイズではない部分では, R, G, B の値がほぼ同じ値となることは少ない.

提案手法では, このヘイズ特性に基づき, 各画素の透過率の推定を行う. 基本的には, 各画素成分の最小値が可能な最大値 (255) に占める比率に基づき,

$$\tilde{t}(x) = 1 - \frac{1}{255} I_1^{\text{dark}}(x). \quad (4.5)$$

で求めた \tilde{t} を透過率の推定値と考える.

He らの手法では $\lambda = 15$ であったので, 提案手法の方が計算量が小さい. 更に, 画素ごとの情報を直接反映しており, 局所的なヘイズ残留を防ぐこともできる. また, He らの手法や小寺の手法では, 透過率分布を求めるにあたり, 環境光の推定値を使用する. すなわち, 環境光の推定の正確

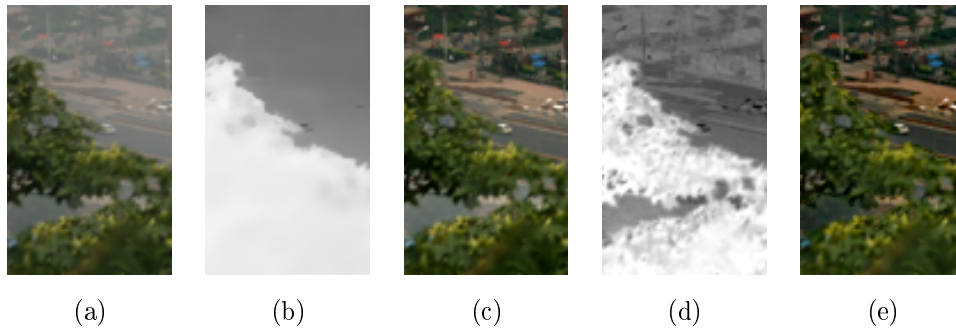


図 4.5 図 4.2 及び図 4.3 の部分拡大図 (図 4.2(b) の左の四角囲み部分) (a) ヘイズ画像, (b) He らの手法での透過率分布, (c) He らの手法での出力画像, (d) 提案手法の \tilde{t} における透過率分布, (e) 提案手法の \hat{t} における出力画像



図 4.6 透過率分布 \tilde{t} を用いた提案手法による処理結果 (a) ヘイズ画像 (house), (b) (a) の処理結果

さが透過率の推定精度にも影響する。提案手法では、通常、環境光は明るい（画素値は非常に大きい）と考え、環境光の推定値を使用する代わりに画素の取りうる最大値 255 を採用している。環境光の推定と透過率の推定の処理を分離することで、透過率の推定精度が環境光の推定精度に影響されるのを防ぐことができる。

ここで、図 4.5 を例として、提案手法の透過率の推定精度を説明する。図 4.5(a)~(c) は図 4.4 と同じであるが、比較を容易にするために図 4.5 に再掲した。図 4.5(d) は提案手法で推定した透過率分布 \tilde{t} である。図 4.5(d) に示すように、従来手法よりも提案手法の方が透過率の推定精度が高いといえる。また、図 4.5(e) は \hat{t} を用いて得られたヘイズ除去結果である。植物の葉の隙間のヘイズが正確に除去されていることが分かる。この \hat{t} は \tilde{t} を補正したものであり、次節で説明する。

4.2.2 透過率分布の補正

前節の推定透過率 \tilde{t} の定義は単純なものであるが、良好なヘイズ除去が実現できることがある。例えば、図 4.6 に示す例では良好にヘイズを除去できる。しかし、入力画像によってはヘイズ除去

処理の強度が過剰または不足となることがある。

ヘイズ除去の意味合いから考えると、ヘイズではない部分では処理強度を小さくし、ヘイズ部分では処理強度を大きくするのが良い。実際、式 (4.2) では、ヘイズではない部分（透過率 t が 1 に近い画素）では処理は行われず、ヘイズが強まるほど (t が小さくなるほど) 処理強度が大きくなる。この意味合いを維持したまま、 t の推定値に補正を加える。提案手法では、

$$\hat{t}(x) = \begin{cases} 0, & f(\tilde{t}(x)) < 0, \\ f(\tilde{t}(x)), & 0 \leq f(\tilde{t}(x)) \leq 1, \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$f(x) = (\beta - \alpha)x + \alpha \quad (4.7)$$

により、補正した推定透過率 \hat{t} を得る。ここで、 f は透過率を補正する単調増加関数である。 α 及び β は実数のパラメータであり、 $\alpha \leq \beta$ とする。 α 及び β の値を調整することで、さまざまな処理強度の出力画像を得ることができる。例えば、 α と β がそれぞれ 0, 1 のとき、 \hat{t} は \tilde{t} と同じである。

推定透過率 \tilde{t} は 1×1 の最小値フィルタにより得られるので、画素単位の細かい明暗が反映されている。それを補正した推定透過率 \hat{t} にも画素単位の明暗が反映されているが、その結果としてヘイズ除去結果において鮮鋭さが失われることがある。これを解決するため、提案手法では次節で説明する鮮鋭化処理を行う。

4.2.3 鮮鋭化処理

提案手法では、透過率分布は基本的に式 (4.5) により得られる。 \tilde{t} には画素ごとの情報が直接反映されている。その後の補正処理 (式 (4.6)) も画素ごとの処理であるので、画素ごとの情報が直接透過率分布に反映されているという状況は保持されている。このことは局所的なヘイズの残留 (透過率の推定誤り) を防ぐ効果がある。しかし一方では、ヘイズ除去結果の鮮鋭さの観点から考えると不利な面がある。 \hat{t} には画素単位の細かい明暗が反映されており、その結果としてヘイズ除去結果において鮮鋭さが失われることがある。提案手法では、小寺の方法 [35] に倣い、BF により透過率分布の平滑化を行う。

平滑化した透過率 \bar{t} は、

$$\bar{t}(x) = B(B(\hat{t}); x) \quad (4.8)$$

で表示できる。ここで、 B は BF による処理を表す。具体的には、

$$B(\hat{t}; x) = \frac{\sum_{y \in \Omega_{\mathcal{N}'}(x)} \hat{t}(y) G_1(x, y) G_2(x, y)}{\sum_{y \in \Omega_{\mathcal{N}'}(x)} G_1(x, y) G_2(x, y)}, \quad (4.9)$$

$$G_1(x, y) = \exp\left(-\frac{(d(x, y))^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (4.10)$$

$$G_2(x, y) = \exp\left(-\frac{(\hat{t}(x) - \hat{t}(y))^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (4.11)$$

である．ここで， $d(x, y)$ は画素 x と y のユークリッド距離である． λ' はフィルタサイズであり， σ_1 と σ_2 はフィルタリング処理の程度を決めるパラメータである． $B(\hat{t})$ はバイラテラルフィルタで処理した透過率を表し， $B(\hat{t}; x)$ は画素 x に対応する $B(\hat{t})$ の値である．式 (4.8) に示されているように，提案手法では BF 処理を 2 回行う．

4.2.4 出力処理

提案手法において，環境光は式 (4.4) において $\lambda = 15$ として推定する．すなわち， \mathbf{A}_{15} とする．したがって，出力画像 \mathbf{J} は式 (4.2) により，

$$\mathbf{J}(x) = \frac{\mathbf{I}(x) - \mathbf{A}_{15}}{\max(\bar{t}(x), t_0)} + \mathbf{A}_{15} \quad (4.12)$$

で得られる．ここで， t_0 は，他の多くの手法に倣い $t_0 = 0.1$ とする．

4.3 ヘイズ除去結果の定量評価

本章では，まずヘイズ除去処理の考察を 4.3.1 節で行う．次に，ヘイズ除去画像の定量評価指標について 4.3.2 節で説明する．

4.3.1 ヘイズ除去処理の考察

ヘイズ除去処理は基本的に彩度強調処理であると考えることができる．ヘイズ領域は白に近く（彩度が低く），ヘイズ除去はそれを改善する処理だからである．一方で，一般的に，大気散乱モデルを用いるヘイズ除去手法で得た出力画像は画像全体が入力画像より暗くなる．式 (4.4) から分かるように環境光の値は入力画像のほぼ全ての画素より大きい一方で，透過率は 1 以下の正の実数である．これらと式 (4.2) における \mathbf{J} と \mathbf{I} の関係を考慮すると，たいていの場合，出力画像 \mathbf{J} は入力画像 \mathbf{I} より暗くなるのが分かる．

したがって，ヘイズ除去結果の良し悪しは入力画像と出力画像の明度（明るさ）と彩度（鮮やかさ）のバランスで評価できると考えられる．本研究では，入力画像に比べて明度があまり低下せず，彩度が高い出力画像を良いと考える．

4.3.2 ヘイズ除去画像の定量評価指標

前節で説明したように，ヘイズ除去処理は入力画像と出力画像の明度（明るさ）と彩度（鮮やかさ）のバランスで評価できると考えられる．大気散乱モデルに基づくヘイズ除去では，出力画像の

明度と彩度は式 (4.2) の \mathbf{A} と t で決まる。提案手法では、パラメータ α と β により、透過率 t をコントロールでき、ひいてはヘイズ除去の処理強度をコントロールできる。例えば、 β を小さい値と設定する場合（同時に α も小さくなる）、 \hat{t} の値も小さくなり、ヘイズ除去強度が大きくなる。この場合、出力画像全体の彩度が高くなるが、明度が低くなってしまふ。したがって、明度と彩度のバランスは画像全体を評価する情報と考えることができる。本研究では、明度と彩度を用いて、ヘイズ除去処理の定量評価指標 $e(P, Q)$ を提案する。 $e(P, Q)$ の定義は

$$e(P, Q) = \frac{\langle P^{\text{out}} \rangle \langle Q^{\text{out}} \rangle}{\langle P^{\text{in}} \rangle \langle Q^{\text{in}} \rangle} \quad (4.13)$$

である。ここで、 P と Q はそれぞれ明度と彩度を意味する。 P^{in} と P^{out} はそれぞれ入力画像と出力画像の明度である。 $\langle \cdot \rangle$ は全画素の平均値を意味する。例として、入力画像の画素 x の明度を $P^{\text{in}}(x)$ で表す場合、 $\langle P^{\text{in}} \rangle$ は

$$\langle P^{\text{in}} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n P^{\text{in}}(x) \quad (4.14)$$

で計算できる。ここで、 n は入力画像の画素数である。 $\langle P^{\text{out}} \rangle$, $\langle Q^{\text{in}} \rangle$, $\langle Q^{\text{out}} \rangle$ は $\langle P^{\text{in}} \rangle$ と同様に計算する。結果として、 $e(P, Q)$ の値が大きいほど、明度と彩度のバランスがよいといえる。すなわち、出力画像の画質が良いといえる。

4.4 実験

実験により提案手法の様々な有効性を確認する。実験には 256 階調のカラー画像を用いた。比較手法としては、He らの手法 [5]、古川らの手法 [34] 及び小寺の手法 [35] を考える。 t_0 の値は各手法共通で 0.1 とした。提案手法におけるバイラテラルフィルタのパラメータは $\lambda' = 13$, $\sigma_1 = 2$, $\sigma_2 = 0.13$ とした。パラメータ α 及び β については、画像ごとに適切な値を設定する必要がある。また、提案した定量評価指標の妥当性についても実験により確認する。

4.4.1 透過率推定簡略化の効果

図 4.6 に示したように、 \hat{t} を用いてもある程度良い結果が得られる場合がある。また、提案手法は画像の細部において有効性が認められる。比較対象として、古川らの手法による house の処理結果を図 4.7 に示す。図 4.7 から分かるように、古川らの手法では全体的にはヘイズを除去できている。図 4.8 は house の左上の一部分の拡大画像である。図 4.8(b) に示すように、古川らの手法では細部（葉の間）にヘイズが残留している。図 4.8(c) は提案手法での処理結果であるが、葉の間のヘイズも良好に除去できており、残留がない。これは、 \hat{t} が 1 画素ごとの値を直接反映しているからである。



図 4.7 古川らの手法による house のヘイズ除去結果

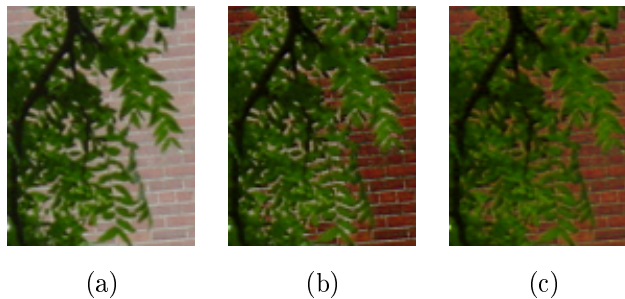


図 4.8 House の部分拡大図 (左上の一部) (a) ヘイズ画像, (b) 古川らの手法, (c) 提案手法 (\hat{t} による処理結果)

4.4.2 透過率補正の効果

4.2.2 節で述べたように, 透過率分布 \tilde{t} では入力画像によっては処理の強度が過剰あるいは不足となる場合がある. 図 4.9(a) は \tilde{t} ではヘイズの除去効果が足りない例である. 図 4.9(b) は, 補正した透過率分布 \hat{t} による処理結果であり, 十分なヘイズ除去が実現されている. このように, 提案手法では α 及び β を適切な値にすることで良好なヘイズ除去が可能である. ただし, 画像ごとに α と β の最適値は異なる.

図 4.10 は図 4.4 に対応したもの (図 4.2(b) の左の四角囲みの部分の拡大図) である. この結果が示すように, 提案手法では \hat{t} においても局所的なヘイズの残留が発生しにくい.

4.4.3 鮮鋭化処理の効果

提案手法における鮮鋭化処理の効果を画像 train (図 4.11(a)) を用いて示す. 図 4.11(b) は入力画像の一部であり, 図 4.11(c), (d) は提案手法による処理結果の一部である. 図 4.11(c) では, 図 4.11(b) と比較するとヘイズが除去されているが, 被写体の鮮鋭さはそれほどではない. 図 4.11(d) では鮮鋭化処理の効果が確認でき, この処理を導入する意義が確認できる.

また, バイラテラルフィルタのパラメータ値の影響について, people (図 4.12(a)) を用いて述べる. 図 4.12(b) は入力画像 (図 4.12(a)) の一部である. 図 4.12(c) は \hat{t} での処理結果であり, 鮮鋭

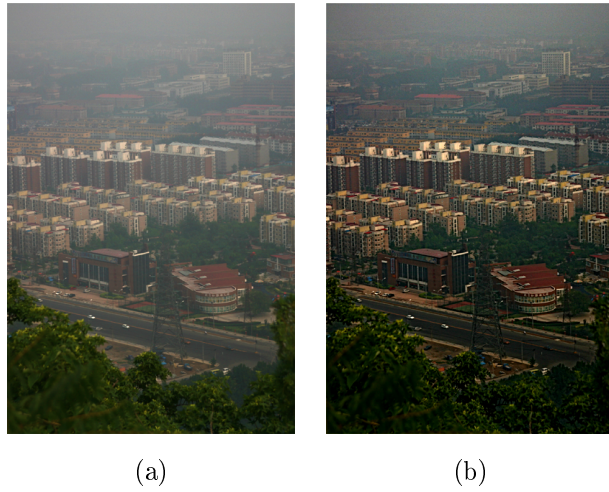


図 4.9 透過率補正の効果 (a) \tilde{t} での処理結果, (b) 補正した透過率分布 \hat{t} での処理結果 $((\alpha, \beta) = (-0.1, 1.4))$

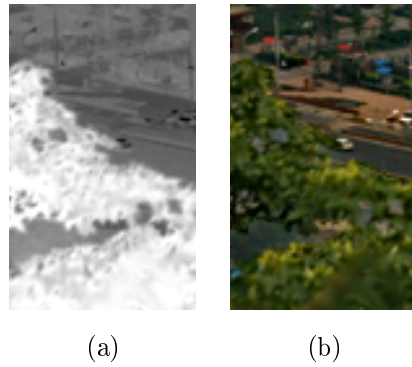


図 4.10 図 4.4 と対応する画像 (a) 透過率分布 \hat{t} , (b) \hat{t} での処理結果

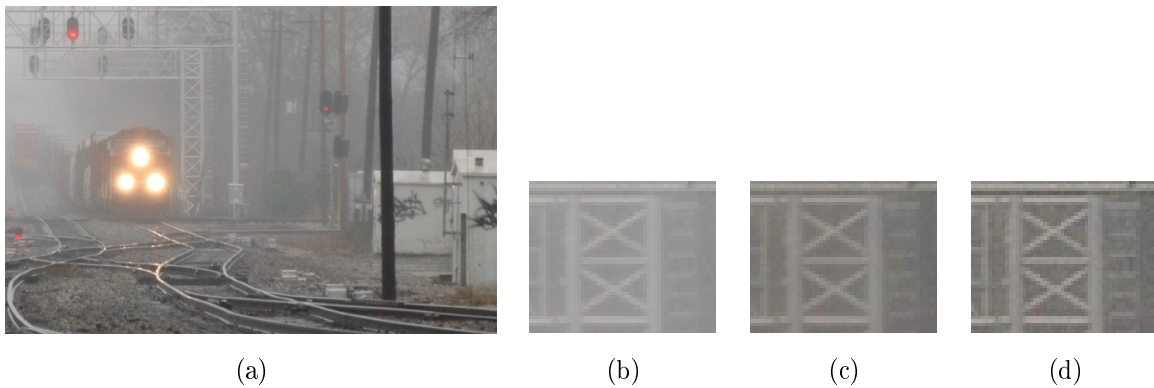


図 4.11 提案手法における鮮鋭化処理の効果 (a) ヘイズ画像 (train), (b) ヘイズ画像 (一部分を拡大), (c) 鮮鋭化処理なし, (d) 鮮鋭化処理あり ($\lambda' = 13, \sigma_1 = 2, \sigma_2 = 0.13$)

ではない. 図 4.12(d) は \bar{t} での処理結果であるが, パラメータ値が不適切なので鮮鋭化の効果が小さい. 図 4.12(e) は, 適切なパラメータにより鮮鋭化処理を行った結果である.

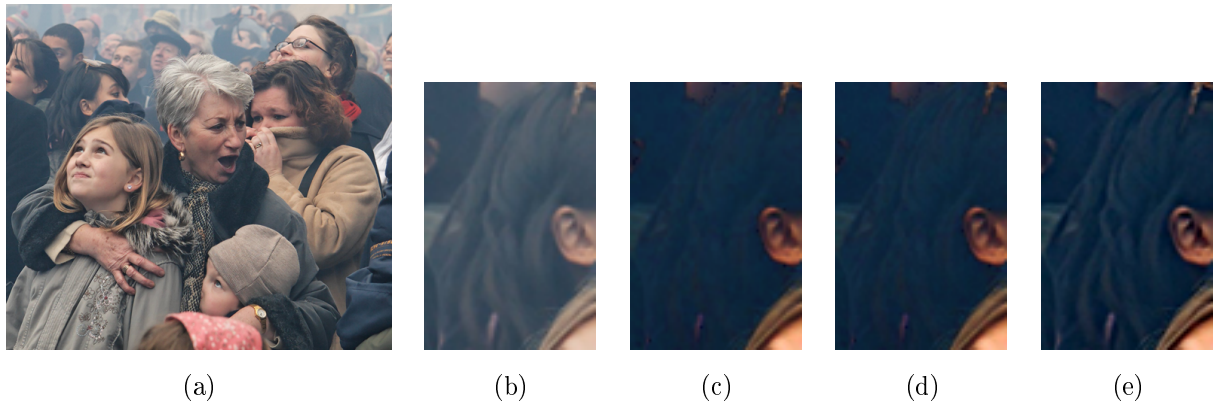


図 4.12 提案手法におけるバイラテラルフィルタ処理のパラメータ値の影響 ($(\alpha, \beta) = (0.00, 0.95)$) (a) ヘイズ画像 (people), (b) (a) の一部, (c) \hat{t} での処理結果 (鮮鋭化処理なし), (d) \bar{t} での処理結果 ($(\lambda', \sigma_1, \sigma_2) = (3, 0.3, 0.13)$), (e) \bar{t} での処理結果 ($(\lambda', \sigma_1, \sigma_2) = (13, 2, 0.13)$)

表 4.1 各色空間と明るさ・鮮やかさを表す量

色空間	HSV	XYZ	$L^*a^*b^*$
明るさ	V	Y	L^*
彩やかさ	S	—	C^*



図 4.13 実験画像 road

4.4.4 定量評価指標の検討

明るさ及び彩やかさに相当する量にはさまざまなものがある。その例を表 4.1 に示す。本実験では、 $e(V, S)$, $e(Y, S)$, $e(L^*, C^*)$ について考える。提案手法は、パラメータ α 及び β を連続的に変化させることにより、ヘイズ除去処理の強度を連続的に変化させることができる。本節では、その性質を用いて e についての検討を行う。

まず、図 4.13 に示した画像 road を用いた実験結果について述べる。 α を $[-0.5, 1.0]$, β を $[0.0, 1.5]$ の範囲で 0.1 刻みで変化させた場合の $e(V, S)$, $e(Y, S)$, $e(L^*, C^*)$ の値をそれぞれ図 4.14(a)~(c) に示す。これらの図では、値が大きいセルほど黄色に近い色とした。3 種類の e について、値がピークとなる (α, β) は、それぞれ $(0.0, 1.1)$, $(0.2, 0.9)$, $(0.0, 1.5)$ である。 $e(L^*, C^*)$ の真のピークの位置は $\beta > 1.5$ の領域にあるかもしれないが、 α , β の意味を考えると $[0, 1]$ から大きく外れた値は不適切なので、上記の範囲で実験を行った。 $(\alpha, \beta) = (0.2, 0.9)$ の場合を中心としたさまざまな (α, β) でのヘイズ除去結果を図 4.15 に示す。図 4.15 には $e(V, S)$, $e(Y, S)$ の値がピーク

$\alpha \setminus \beta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
-0.5	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.27	0.54	0.76
-0.4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.26	0.57	0.83	1.01
-0.3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.25	0.62	0.96	1.24	1.51
-0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.28	0.76	1.30	1.77	2.08	2.22
-0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.13	0.49	1.19	2.05	2.39	2.44	2.38	2.28
0.0	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.14	0.23	0.36	0.93	1.75	2.58	2.60	2.40	2.20	2.04	1.90
0.1	0.08	0.12	0.16	0.23	0.32	0.43	0.61	1.25	2.01	2.58	2.54	2.23	2.01	1.85	1.72	1.62
0.2	0.22	0.29	0.37	0.45	0.57	0.78	1.38	2.06	2.45	2.46	2.15	1.90	1.74	1.62	1.52	1.44
0.3	0.38	0.45	0.54	0.68	0.87	1.42	2.04	2.34	2.31	2.12	1.85	1.67	1.55	1.45	1.37	1.31
0.4	0.51	0.60	0.71	0.92	1.50	1.99	2.24	2.20	2.07	1.83	1.63	1.50	1.40	1.32	1.26	1.21
0.5	0.63	0.73	0.94	1.40	1.94	2.15	2.12	1.98	1.83	1.61	1.47	1.37	1.28	1.22	1.17	1.13
0.6	0.75	0.96	1.37	1.87	2.07	2.05	1.89	1.81	1.62	1.45	1.34	1.26	1.19	1.14	1.10	1.08
0.7	0.96	1.33	1.80	2.00	1.99	1.86	1.74	1.62	1.45	1.32	1.23	1.16	1.11	1.07	1.05	1.04
0.8	1.30	1.72	1.93	1.93	1.81	1.69	1.61	1.47	1.31	1.22	1.15	1.09	1.05	1.03	1.02	1.02
0.9	1.64	1.86	1.87	1.77	1.65	1.55	1.48	1.33	1.21	1.13	1.07	1.03	1.01	1.01	1.00	1.00
1.0	1.79	1.81	1.73	1.61	1.51	1.45	1.35	1.22	1.13	1.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(a)

$\alpha \setminus \beta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
-0.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.11	0.25	0.42
-0.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.10	0.25	0.45	0.63
-0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.09	0.25	0.50	0.76	1.02
-0.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.10	0.29	0.65	1.05	1.37	1.58
-0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.19	0.46	1.05	1.49	1.72	1.82	1.83
0.0	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.06	0.10	0.17	0.47	0.93	1.60	1.86	1.87	1.82	1.75	1.68
0.1	0.04	0.06	0.09	0.13	0.19	0.27	0.39	0.82	1.34	1.87	1.99	1.86	1.74	1.65	1.57	1.50
0.2	0.14	0.19	0.25	0.32	0.41	0.58	1.03	1.53	1.92	2.03	1.85	1.69	1.58	1.50	1.43	1.37
0.3	0.28	0.34	0.41	0.54	0.70	1.13	1.62	1.92	1.98	1.87	1.67	1.54	1.45	1.38	1.32	1.26
0.4	0.41	0.49	0.59	0.77	1.26	1.65	1.90	1.92	1.86	1.68	1.52	1.42	1.34	1.28	1.22	1.18
0.5	0.54	0.63	0.82	1.21	1.66	1.87	1.88	1.81	1.70	1.52	1.40	1.32	1.25	1.19	1.15	1.12
0.6	0.67	0.86	1.21	1.64	1.83	1.85	1.74	1.69	1.54	1.39	1.30	1.22	1.17	1.12	1.09	1.07
0.7	0.88	1.20	1.61	1.80	1.81	1.72	1.64	1.55	1.40	1.29	1.21	1.15	1.10	1.06	1.05	1.04
0.8	1.19	1.56	1.76	1.77	1.69	1.60	1.54	1.42	1.28	1.20	1.13	1.08	1.04	1.03	1.02	1.01
0.9	1.51	1.71	1.74	1.67	1.57	1.49	1.44	1.30	1.19	1.12	1.07	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00
1.0	1.67	1.70	1.64	1.55	1.46	1.42	1.32	1.20	1.12	1.06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(b)

$\alpha \setminus \beta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
-0.5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.10	0.21
-0.4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.09	0.21	0.35
-0.3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.09	0.22	0.40	0.60
-0.2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.10	0.27	0.53	0.84	1.13
-0.1	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.08	0.18	0.44	0.80	1.10	1.30	1.43
0.0	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.13	0.19	0.36	0.64	0.98	1.21	1.33	1.40	1.43
0.1	0.05	0.07	0.08	0.11	0.14	0.18	0.23	0.31	0.51	0.79	1.04	1.22	1.30	1.34	1.36	1.35
0.2	0.11	0.14	0.17	0.20	0.24	0.30	0.39	0.60	0.85	1.06	1.20	1.27	1.30	1.30	1.30	1.28
0.3	0.19	0.22	0.25	0.30	0.35	0.45	0.65	0.87	1.05	1.18	1.24	1.26	1.26	1.25	1.24	1.22
0.4	0.26	0.29	0.33	0.39	0.51	0.68	0.88	1.04	1.15	1.21	1.23	1.23	1.21	1.20	1.18	1.16
0.5	0.32	0.36	0.41	0.51	0.69	0.89	1.02	1.12	1.18	1.20	1.20	1.19	1.17	1.15	1.13	1.11
0.6	0.37	0.43	0.53	0.69	0.87	1.00	1.10	1.14	1.17	1.17	1.16	1.14	1.12	1.10	1.08	1.07
0.7	0.44	0.54	0.68	0.86	0.98	1.06	1.11	1.14	1.15	1.14	1.12	1.10	1.08	1.06	1.05	1.04
0.8	0.54	0.68	0.84	0.96	1.04	1.09	1.11	1.12	1.12	1.10	1.08	1.06	1.04	1.03	1.02	1.01
0.9	0.67	0.82	0.94	1.01	1.06	1.08	1.09	1.10	1.08	1.06	1.04	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00
1.0	0.80	0.91	0.98	1.03	1.06	1.07	1.07	1.07	1.05	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(c)

図 4.14 提案手法による road のへイズ除去結果に対する評価指標の値の分布 (a) $e(V, S)$, (b) $e(Y, S)$, (c) $e(L^*, C^*)$

となる場合が含まれている．また， $e(L^*, C^*)$ の値がピークとなる $(\alpha, \beta) = (0.0, 1.5)$ の場合のへイズ除去結果を図 4.16 に示す．

図 4.15 に示したように， $e(V, S)$ の値がピークとなる画像は全体的に暗い．road 以外の画像についても同様の傾向がある．これは V の定義 (式 (2.1)) に起因すると考えられる． V は RGB 成分の最大値であるので，他の 2 成分の値が小さくても十分明るいと判定されてしまう． $e(V, S)$ は HSV 色空間の要素を用いるという点では分かりやすいが，明度の精度が悪いと考えられる． $e(Y, S)$ は色空間が異なる要素同士の組み合わせとなるが，明度の正確性を高めた指標である．図 4.15 中央に示したように， $e(Y, S)$ の値がピークとなる画像では，適切な明るさとへイズ除去が両立されていることが比較的多い．この考え方を推し進めると，CIELAB 色空間における明度 L^* と彩度 C^* を用いた $e(L^*, C^*)$ は更に良好な結果となるように思われる．しかし，図 4.16 に示したように， $e(L^*, C^*)$ の値がピークとなる画像は必ずしも良好ではなく，むしろ不適切な画像であることが多い．更に，



図 4.15 提案手法による road のヘイズ除去処理結果 (括弧内の値は (α, β) を意味する)



図 4.16 提案手法による road のヘイズ除去結果 $((\alpha, \beta) = (0.0, 1.5))$

画像によっては、 $e(L^*, C^*)$ の値の分布に明確なピークが存在しない場合もある。

他の画像に対する例として、図 4.17 (house) 及び図 4.18 (Tiananmen) を示す. (a) は原画像であり, (b), (c) はそれぞれ $e(V, S)$, $e(Y, S)$ の値がピークとなる画像である. 図 4.17(b), (c) は大きな差はなく, どちらも良好なヘイズ除去結果であるといえる. 図 4.18 は, $e(V, S)$ の方が $e(Y, S)$ よ



図 4.17 提案手法による画像 house のヘイズ除去結果 (a) 原画像, (b) $e(V, S)$ の値がピークとなる画像 ($(\alpha, \beta) = (0.0, 1.0)$), (c) $e(Y, S)$ の値がピークとなる画像 ($(\alpha, \beta) = (-0.1, 1.0)$)

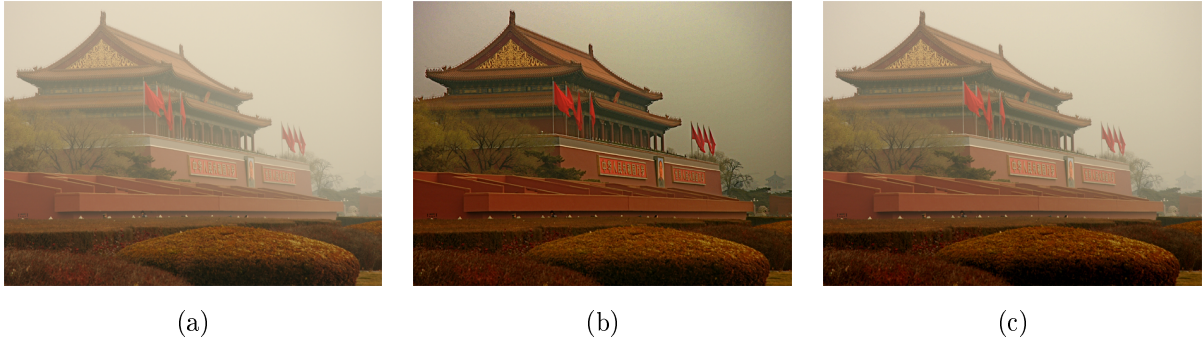


図 4.18 提案手法による画像 Tiananmen のヘイズ除去結果 (a) 原画像, (b) $e(V, S)$ の値がピークとなる画像 ($(\alpha, \beta) = (-0.1, 1.0)$), (c) $e(Y, S)$ の値がピークとなる画像 ($(\alpha, \beta) = (0.6, 0.9)$)

りも良好な例である．図 4.18(c) はヘイズ除去が不十分である．図 4.17, 図 4.18 のように $e(V, S)$ が $e(Y, S)$ と同等以上である場合もあるが，実験したところでは，多くの画像において $e(Y, S)$ の方が $e(V, S)$ と同等以上の結果を示していた．

なお，house や Tiananmen に対しては， $e(L^*, C^*)$ の値の分布に明確なピークが存在しない．図 4.19(a) は house に対する $e(L^*, C^*)$ の値の分布である． $(\alpha, \beta) = (0.2, 1.2)$ を中心として 1.01 という値をとるパラメータの組み合わせが多数存在し，最適なパラメータを特定しにくい．図 4.19(b) は Tiananmen に対する $e(L^*, C^*)$ の値の分布である．右下の領域に 1.00 という値が分布している．特に， $(\alpha, \beta) = (1.0, 1.0)$ のときは，式 (4.7) から分かるように \hat{t} は恒等的に 1 となり，この場合，式 (4.2) から分かるように $\mathbf{J} = \mathbf{I}$ となる．式 (4.13) より，入力画像 \mathbf{I} と出力画像 \mathbf{J} が等しいときは $e = 1$ となる． $\alpha \neq \beta$ の場合，基本的に出力画像は入力画像と異なるが，図 4.19(b) の右下の領域のパラメータ設定で得られる画像はほぼ原画像に等しい．すなわち， $\langle L^{*out} \rangle / \langle L^{*in} \rangle \approx 1$ かつ $\langle C^{*out} \rangle / \langle C^{*in} \rangle \approx 1$ であり，結果として $e(L^*, C^*) \approx 1$ となっている．このように，原画像（にほぼ等しい画像）を最良の画像として評価してしまうという点においても $e(L^*, C^*)$ は問題がある．

$\alpha \setminus \beta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
-0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	0.16	0.29	0.41	0.55	0.70	0.82	0.91
-0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.09	0.20	0.36	0.52	0.69	0.83	0.93	0.97
-0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.12	0.26	0.47	0.67	0.84	0.95	0.99	1.00
-0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.07	0.17	0.37	0.63	0.84	0.96	1.00	1.00
-0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.11	0.27	0.52	0.79	0.95	0.99	1.00	1.00
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.20	0.41	0.67	0.89	0.98	1.00	1.01	1.00	1.00
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.15	0.31	0.53	0.76	0.95	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.11	0.24	0.41	0.62	0.82	0.97	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
0.3	0.00	0.00	0.01	0.04	0.09	0.18	0.32	0.50	0.68	0.86	0.99	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00
0.4	0.00	0.01	0.04	0.08	0.15	0.25	0.40	0.56	0.73	0.88	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	0.01	0.03	0.07	0.12	0.20	0.33	0.46	0.61	0.76	0.90	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	0.99
0.6	0.03	0.06	0.10	0.16	0.26	0.38	0.53	0.65	0.78	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
0.7	0.06	0.09	0.14	0.21	0.31	0.43	0.56	0.68	0.80	0.92	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00
0.8	0.08	0.12	0.17	0.26	0.36	0.48	0.59	0.70	0.81	0.92	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00
0.9	0.10	0.15	0.22	0.30	0.41	0.51	0.61	0.71	0.82	0.93	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.13	0.19	0.26	0.35	0.44	0.54	0.63	0.72	0.82	0.92	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(a)

$\alpha \setminus \beta$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
-0.5	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.14	0.24	0.36	0.46	0.51	0.58
-0.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.10	0.19	0.33	0.46	0.59	0.81	0.89
-0.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.07	0.14	0.27	0.62	0.83	0.90	0.93	0.95
-0.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.14	0.43	0.70	0.88	0.92	0.95	0.96	0.97
-0.1	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.13	0.26	0.43	0.65	0.84	0.94	0.96	0.97	0.97	0.98
0.0	0.02	0.02	0.02	0.06	0.11	0.16	0.25	0.39	0.58	0.77	0.90	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98
0.1	0.04	0.08	0.11	0.13	0.17	0.24	0.34	0.50	0.68	0.83	0.93	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99
0.2	0.11	0.12	0.14	0.17	0.22	0.31	0.44	0.60	0.74	0.86	0.95	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
0.3	0.13	0.15	0.18	0.22	0.29	0.39	0.53	0.66	0.78	0.89	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.4	0.15	0.18	0.22	0.27	0.37	0.47	0.59	0.70	0.81	0.90	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.5	0.18	0.21	0.26	0.33	0.43	0.53	0.63	0.73	0.83	0.92	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
0.6	0.21	0.25	0.31	0.39	0.48	0.57	0.67	0.76	0.85	0.93	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
0.7	0.25	0.29	0.37	0.45	0.52	0.61	0.69	0.78	0.86	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.8	0.28	0.34	0.42	0.49	0.56	0.63	0.71	0.79	0.88	0.95	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.9	0.32	0.39	0.46	0.52	0.59	0.65	0.72	0.80	0.89	0.96	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0	0.37	0.43	0.49	0.55	0.61	0.67	0.74	0.81	0.90	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

(b)

図 4.19 提案手法によるヘイズ除去結果に対する $e(L^*, C^*)$ の値の分布 (a) house, (b) Tiananmen

4.4.5 異なるヘイズ除去手法の比較

本節では、異なるヘイズ除去手法により得られた画像について、 $e(Y, S)$ による定量的評価を行う。実験に用いる手法は He らの手法 [5]、古川らの手法 [34]、小寺の手法 [35] 及び提案手法とし、 t_0 の値は各手法共通で 0.1 とした。また、提案手法での処理強度パラメータ α 及び β については、画像ごとに $e(Y, S)$ が最大の値となるように設定する。

画像 Canon 及び画像 train に対するヘイズ除去結果をそれぞれ図 4.20, 図 4.21 に示す。また、定量評価指標 $e(Y, S)$ 並びに明度比 $\langle Y^{\text{out}} \rangle / \langle Y^{\text{in}} \rangle$ と彩度比 $\langle S^{\text{out}} \rangle / \langle S^{\text{in}} \rangle$ の値をそれぞれ表 4.2, 表 4.3 に示す。

まず、Canon の結果について述べる。小寺の手法 (図 4.20(d)) ではヘイズがあまり除去されておらず、明度比の値は比較的大きいものの、彩度比の値が小さい。古川らの手法による結果 (図 4.20(c)) は画像全体が暗く、それは明度比の値に表れている。それらに比べると、提案手法 (図 4.20(e)) は明度と彩度のバランスがとれており、 e の値も大きい。最も評価値が大きいのは He らの手法 (図 4.20(b)) であり、実際、主観的にも最も良いヘイズ除去画像であるといえる。

train の結果についても、明度と彩度のバランスが良い He らの手法と提案手法の評価値 e が大きく、主観的な評価と対応しているといえる。ただし、ヘイズ画像 (図 4.21(a)) と比較すると、He らの手法による結果 (図 4.21(b)) では機関車の三つの前照灯の大きさが変化してしまっている。今回提案した指標は明度や彩度の平均値を評価するものであるため、このような被写体の変化を評価することはできない。また、出力画像の効果について、古川らの手法 (図 4.21(c)) と小寺の手法

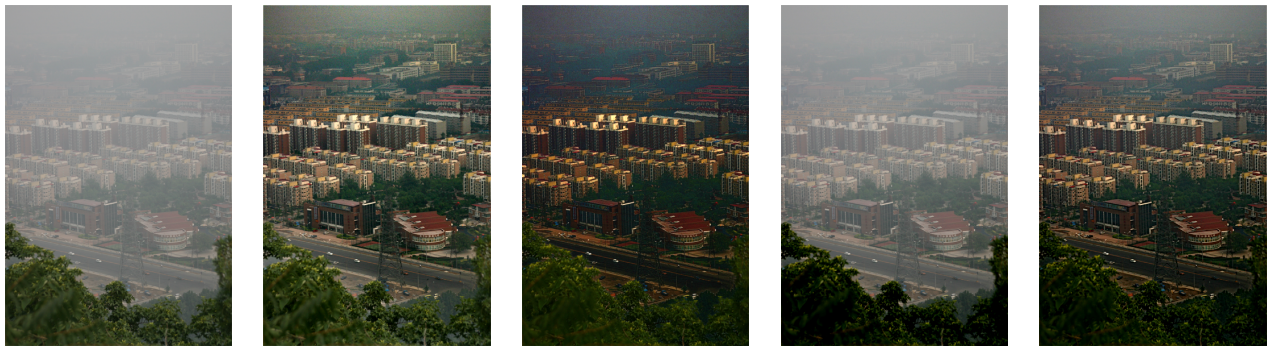


図 4.20 画像 Canon に対するヘイズ除去結果 (a) ヘイズ画像, (b) He らの手法, (c) 古川らの手法, (d) 小寺の手法, (e) 提案手法 $((\alpha, \beta) = (-0.2, 0.9))$

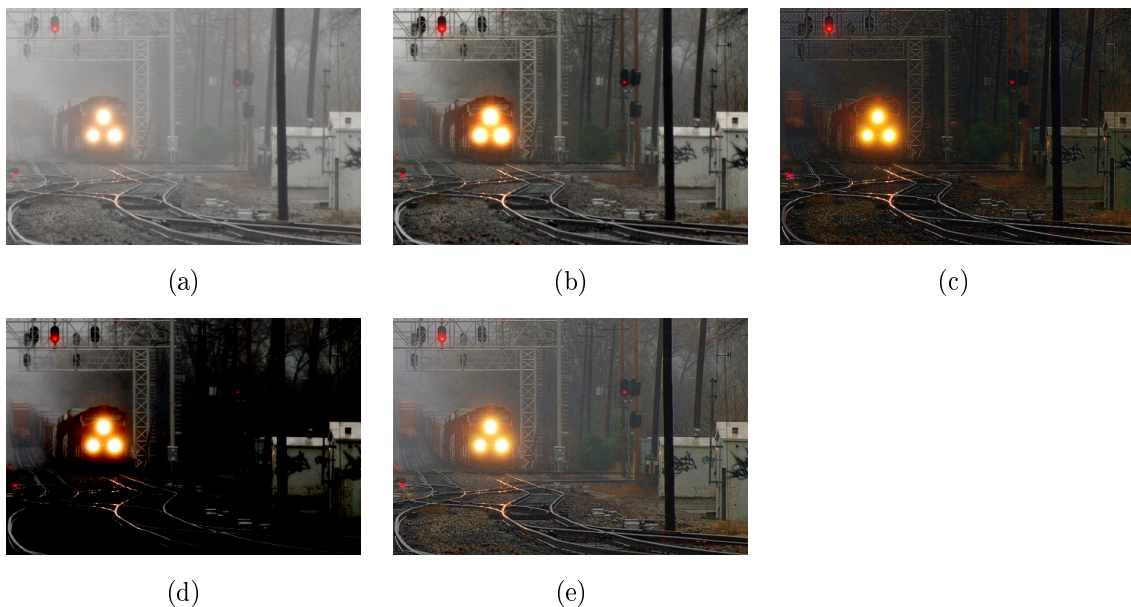


図 4.21 画像 train に対するヘイズ除去結果 (a) ヘイズ画像, (b) He らの手法, (c) 古川らの手法, (d) 小寺の手法, (e) 提案手法 $((\alpha, \beta) = (0.4, 0.9))$

(図 4.21(d)) の結果は全体的に暗く、出力画像の視認性が悪い。He らの手法 (図 4.21(b)) は良好な結果であるが、これは“後処理”の結果である。提案手法の (図 4.21(e)) の方が優れた結果であるといえる。

4.4.6 計算時間

提案手法の計算時間は、画像サイズに比例する。本節では、サイズが 600×400 画素の画像の処理時間を示す。He らの手法、古川らの手法、小寺の手法、提案手法の計算時間はそれぞれ、25.8 秒、2.7 秒、2.1 秒、3.4 秒であった。なお、実験は以下の環境で行った。中央処理装置は Intel®

表 4.2 画像 Canon に対する定量評価指標の値

指標	へイズ除去手法			
	He ら	古川ら	小寺	提案
$e(Y, S)$	1.62	1.40	0.79	1.52
$\langle Y^{\text{out}} \rangle / \langle Y^{\text{in}} \rangle$	0.64	0.40	0.80	0.50
$\langle S^{\text{out}} \rangle / \langle S^{\text{in}} \rangle$	2.55	3.45	1.00	3.02

表 4.3 画像 train に対する定量評価指標の値

指標	へイズ除去手法			
	He ら	古川ら	小寺	提案
$e(Y, S)$	2.24	1.39	0.81	2.33
$\langle Y^{\text{out}} \rangle / \langle Y^{\text{in}} \rangle$	0.62	0.18	0.20	0.55
$\langle S^{\text{out}} \rangle / \langle S^{\text{in}} \rangle$	3.62	7.69	4.01	4.24

Core™ i7-3770 3.40 GHz である。メインメモリは 8.00 GBytes である。オペレーティングシステムは 64-bit Windows 10 である。He らの手法のソースコードは MATLAB® を使用して記述されている。他の手法のソースコードは C 言語で書かれており、Microsoft Visual C++ 2010 Express (version 10.0.40219.1 SP1Rel) で実行した。なお、He らは soft matting の代わりに guided filter を提案している [57]。論文 [57] では、 600×400 画素の画像に対して、guided filter の計算時間は 0.04 秒であり、soft matting は 10 秒程度かかることが報告されている。

上記の提案手法の計算時間 (3.4 秒) は単一のパラメータセットでの結果である。図 4.14 や図 4.19 では長方形の表とするために 256 セットのパラメータの組み合わせを示しているが、 $\alpha > \beta$ の場合は意味がないので、それらを除いた 201 セットで計算時間を計測する。すなわち、 $\alpha = -0.5, -0.4, \dots, 1.0$ と $\beta = \alpha, \alpha + 0.1, \dots, 1.5$ の組み合わせで計算時間を計測する。この場合、提案手法の計算時間は $3.4 \times 201 \approx 683$ 秒である。提案手法の計算は、 \tilde{t} の計算、 \hat{t} の計算と \bar{t} の計算の三つの部分に分けることができる。 \tilde{t} の計算と \bar{t} の計算 (BF 処理) にかかる時間はそれぞれ 1.0 と 2.4 秒である。すなわち、計算時間のほぼ全てはこれらの部分にかかっており、 \hat{t} の計算時間はほとんどない。加えて、 $e(Y, S)$ の計算時間もほとんどない。また、全てのパラメータセット (α, β) に対して \tilde{t} は共通であるので、一回だけ計算すればよい。したがって、図 4.21(e) のような最後の出力画像を得るためには、提案手法では $1.0 + 2.4 \times 201 \approx 483$ 秒程度かかることが推定できる。実際に計測したところ、計算時間は 487 秒であった。

第 5 章

結論

本論文では、風景や物体など自然画像の視認性の向上を目的とする画像処理手法を提案した。具体的には、retinex 理論に基づく手法とヘイズ除去手法についてそれぞれ新規な手法を提案し、それらの有効性を確認した。

第 2 章では、画像処理の基礎知識について述べた。

第 3 章では、retinex 理論並びに新しい retinex 処理手法について述べた。提案手法では、修正関数により照明成分を修正する。これは、出力画像の明度分布が自然なものとなることを意図している。入力画像の明るい部分はそのまま保存し、暗い部分を明るくし、出力画像全体の明暗バランスが良いことを目指している。実験により、提案手法は良好な結果を得ることを確認した。

第 4 章では、ヘイズ除去について述べた。パラメータ設定によりヘイズ除去処理の強度を調整できる手法を提案した。提案手法では、画像ごとにパラメータを適切な値にすることにより、良好なヘイズ除去が実現できた。また、BF による透過率分布の平滑化処理を行うことで、出力画像は鮮鋭なものとなることを確認した。提案手法の特性として、パラメータの値を変化させることでヘイズ除去処理の強度を調整できることがある。この特性を利用し、様々な処理強度の出力画像を得ることで、出力画像の画質について系統的な評価を行った。入力画像及び出力画像の明度と彩度を用いて、ヘイズ除去結果の定量評価を行う指標を提案し、上記の実験によりその有効性を確認した。

以上のように、本論文では、自然画像の画質を向上を目指し、retinex 理論に基づいた手法、ヘイズ除去手法並びにヘイズ除去における画質の評価指標を提案した。Retinex についての提案手法は推定した反射率成分と調整した照明成分を乗じることで自然な出力画像を得る手法である。提案手法の特長は、入力画像の明度成分 V だけを処理するので比較的高速である点と、入力画像の明部の変換は抑制しつつ、暗部の視認性を改善する点にある。ヘイズ除去についての提案手法は、処理強度が調整可能な新しいヘイズ除去手法である。また、ヘイズ除去結果に対する定量評価指標について、実験を通してその妥当性及び有効性も確認した。これらより、悪条件下で撮影された画像の視認性改善について新たな処理方式を提案し、その有効性を確認したといえる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり，名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科准教授，田中豪先生に丁寧な全心全力を注いだご指導を頂きまして，心からの深く感謝の意を表します。

また，共に研究・勉強に励んだ安井明代さん，孟夢さん，イスラムアリさん，閻錦韜さん，徐霽翔さん，付新宇さんに感謝致します。最後に，本研究の一部は，公益財団法人名鉄国際育英会とロータリー米山記念奨学会の研究助成を受け行ったものであり，ここに記し，深く感謝の意を表します。

引用文献

- [1] E.H. Land and J.J. Mccann, “Lightness and retinex theory,” *Journal of the Optical Society of America*, vol. 61, no. 1, pp.1–11, 1971.
- [2] E.H. Land, “An alternative technique for computation of the designator in the retinex theory of color vision,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 83, pp. 3078–3080, May 1986.
- [3] D.J. Jobson, Z. Rahman, and G. A. Woodell, “Properties and performance of a center/surround retinex,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.6, no.3, pp.451–462, March 1997.
- [4] D.J. Jobson, Z. Rahman, and G. A. Woodell, “A multiscale retinex for bridging the gap between color image and the human observation of scenes,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.6, no.7, pp.965–976, July 1997.
- [5] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Single image haze removal using dark channel prior,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.33, no.12, pp.2341–2353, Dec. 2011.
- [6] C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral filtering for gray and color images,” *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.839–846, Bombay, India, Jan. 1998.
- [7] 高木幹雄, 下田陽久 (監修), 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [8] M.K. Agoston, *Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms*, Springer-Verlag London, London, 2005.
- [9] 日本色彩学会, 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2011.
- [10] D.J. Jobson, Z. Rahman, and G.A. Woodell, “The spatial aspect of color and scientific implications of retinex image processing,” *The International Society for Optical Engineering*, vol.4388, pp.117–128, 2001.
- [11] R. Kimmel, M. Elad, D. Shaked, R. Keshet, and I. Sobel, “A variational framework for retinex,” *International Journal of Computer Vision*, vol.52, no.1, pp.7–23, April 2003.
- [12] 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “データ依存型 Multiscale Retinex によるデジタル画像の画質改善,” *電子情報通信学会論文誌 (D)*, vol.J91-D, no.9, pp.2422–2425, Sept. 2008.
- [13] I. Jang, B. Choi, S.D. Kim and J.B. Ra, “Sub-band decoposed multiscale retinex with space varying gain,” *Proceedings of 15th IEEE International Conference on Image Processing*,

pp.3168–3171, 2008.

- [14] I. Jang, K. Park, and Y. Ha, “Modified multi-scaled retinex using chromaticity of highlight region for correcting color distortion,” 16th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings, pp.50–55, 2008.
- [15] I. Jang and T. Lee, “Adaptive color enhancement based on multi-scaled retinex using local contrast of the input image,” Proceedings of 2010 International Symposium on Optomech-
atronic Technologies, pp.1–6, Toronto, Canada, Oct. 2010.
- [16] Y. Terai, T. Goto, S. Hirano, and M. Sakurai, “Color image contrast enhancement by retinex model,” Proceedings of 13th IEEE International Symposium on Consumer Elec-
tronics, pp.932–933, Kyoto, Japan, 2009.
- [17] S. Wang, J. Zheng, H. Hu, and B. Li, “Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.9, pp.3538–3548, Sept. 2013.
- [18] E. Zhang, H. Yang, and M. Xu, “A novel tone mapping method for high dynamic range image by incorporating edge-preserving filter into method based on retinex,” Applied Mathematics and Information Sciences, vol.9, no.1, pp.411–417, March 2015.
- [19] M. Elad, “Retinex by two bilateral filters,” Proceedings of 5th International Conference on Scale-Space and PDE Methods in Computer Vision, pp. 217–229, Hofgeismar, Germany, April 2005.
- [20] Z. Rahman, D.J. Jobson and G.A. Woodell, “Investigating the relationship between image enhancement and image compression in the context of the multi-scale retinex,” Journal of Visual Communication and Image Representation, vol.22, no.3, pp.237–250, April 2011.
- [21] Z. Rahman, D.J. Jobson and G.A. Woodell, “Retinex processing for automatic image en-
hancement,” Journal of Electronic Imaging, vol.13, no.1, pp.100–110, Jan. 2004.
- [22] A.B. Petro, C. Sbert and J.M. Morel, “Multiscale retinex,” Image Processing On Line, vol.4, pp.71-88, 2014.
- [23] L. Meylan and S. Susstrunk, “High dynamic range image rendering using a retinex-based adaptive filter,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.15, no.9, pp.2820–2830, 2006.
- [24] L. Meylan and S. Susstrunk, “Color image enhancement using a retinex-based adaptive filter,” Proceedings of IST Second European Conference on Color in Graphics, Image, and Vision, vol.2, pp.359–363, 2004.
- [25] D.H. Choi, I.H. Jang, M.H. Kim and N.C. Kim, “Color image enhancement using single-scale retinex based on an improved image formation model,” Proceedings of 16th European Signal Processing Conference, pp.1–5, 2008.
- [26] D.H. Brainard and B.A. Wandell, “Analysis of the retinex theory of color vision,” Journal of the Optical Society of America A, vol.3, no.10, pp.1651–1661, Oct. 1986.

- [27] G.D. Finlayson, S.D. Hoedley and M.S. Drew, “Removing shadows from images using retinex,” Proceedings of IST/SID Tenth Color Imaging Conference, pp.73–79, Scottsdale, 2002.
- [28] K. Kawasaki and A. Taguchi, “A multiscale retinex based on wavelet transformation,” Proceedings of 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, pp.33–36, Nov. 2014.
- [29] X. Jin, J. Bao and J. Du “Image enhancement based on selective-retinex fusion algorithm,” Journal of Software, vol.7, no.6, pp.1187–1194, June 2012.
- [30] M. C. Hanumantharaju, M. Ravishankar, D. R. Rameshbabu, and S. Ramachandran, “Color image enhancement using multiscale retinex with modified color restoration technique,” Proceedings of Second International Conference on Emerging Applications of Information Technology, pp.93–97, Kolkata, India, Feb. 2011.
- [31] R.T. Tan, “Visibility in bad weather from a single image,” Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1–8, Anchorage, AK, USA, June 2008.
- [32] R. Fattal, “Single image dehazing,” ACM Transaction on Graphics, vol.27, no.3, pp.72:1–72:9, Aug. 2008.
- [33] J.P. Tarel and N. Hautiere, “Fast visibility restoration from a single color or gray level image,” Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, pp.2201–2208, Kyoto, Japan, Sept. 2009.
- [34] 古川翔太, 福田孝弘, 古賀崇了, 末竹規哲, 内野英治, “Min-Max バイラテラルフィルタを用いたヘイズ除去の一提案,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2013-50, vol.113, no.343, pp.127–130, Dec. 2013.
- [35] 小寺宏暉, “大気透過モデルを用いたシーンの遠近分離による鮮鋭化効果,” 日本色彩学会視覚情報基礎研究会論文集, CSA-FVI-2014-13, pp.19–22, Sept. 2014.
- [36] Y.Y. Schechner, S.G. Narasimhan, and S.K. Nayar, “Instant dehazing of images using polarization,” Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.1, pp.325–332, Dec. 2001.
- [37] Y.Y. Schechner, S.G. Narasimhan, and S.K. Nayar, “Polarization-based vision through haze,” Applied Optics, vol.42, no.3, pp.511–525, Jan. 2003.
- [38] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, “Contrast restoration of weather degraded images,” IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.25, no.6, pp.713–724, 2003.
- [39] L. Schaul, C. Fredembach, and S. Susstrunk, “Color image dehazing using the near-infrared,” Proceedings of 16th IEEE International Conference on Image Processing, Cairo, Egypt, Nov. 2009.
- [40] W.L. Jun and Z. Rong, “Image defogging algorithm of single color image based on wavelet transform and histogram,” Applied Mathematical Sciences, vol.7, no.79, pp.3913–3921, 2013.

- [41] Z. Lin and X. Wang, “Dehazing for image and video using guided filter,” *Open Journal of Applied Sciences*, vol.2, no.4B, pp.123–127, 2012.
- [42] H. Zhang, Q. Liu, F. Yang, and Y. Wu, “Single image dehazing combining physics model based and non-physics model based methods,” *Journal of Computational Information Systems*, vol.9, no.4, pp.1623–1631, 2013.
- [43] N. Ke and J. Chen, “Real-time visibility restoration from a single image,” *Proceedings of 20th IEEE International Conference on Image Processing*, pp.923–927, Sept. 2013.
- [44] X. Fan, Y. Wang, R. Gao, and Z. Luo, “Haze editing with natural transmission,” *The Visual Computer*, vol.32, no.1, pp.1–11, Jan. 2015.
- [45] B. Huo and F. Yin, “Image dehazing with dark channel prior and novel estimation model,” *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, vol.10, no.3, pp.13–22, March 2015.
- [46] S. Sharma and S. Bhalla, “Improved haze removal of underwater images using particle swarm optimization,” *International Journal of Computer Applications*, vol.122, no.4, pp.13–18, July 2015.
- [47] A. Kumari and S.K. Sahoo, “Real time visibility enhancement for single image haze removal,” *Procedia Computer Science*, vol.54, pp.501–507, 2015.
- [48] Y. Tian, C. Xiao, X. Chen, D. Yang, and Z. Chen, “Haze removal of single remote sensing image by combining dark channel prior with superpixel,” *Electronic Imaging, Visual Information Processing and Communication VII*, pp.VIPC-229.1–VIPC-229.6, Feb. 2016.
- [49] Y. Ru and G. Tanaka, “Proposal of haze removal method with adjustable processing degree,” *Proceedings of 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, pp.359–362, Naha, Japan, July 2016.
- [50] 福元伸也, 松元貴寛, 川崎 洋, 古川 亮, 福田悠人, 山口拓真, “連続画像における強いむらのあるヘイズ除去手法の提案,” *画像の認識理解シンポジウム論文集*, pp.1111–1118, 2011.
- [51] C. Xiao and J. Gan, “Fast image dehazing using guided joint bilateral filter,” *The Visual Computer*, vol.28, no.6, pp.713–721, June 2012.
- [52] 于 子涵, 井上光平, 浦浜喜一, “バイラテラル最小値/最大値フィルタによるヘイズ除去,” *映像情報メディア学会誌*, vol.68, no.7 pp.J316–J319, 2014.
- [53] W. Kesjindatanawaj, S. Ongkittikul and S. Srisuk, “Fast image dehazing using guided joint bilateral filter,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering Explore*, vol.10, pp.301–307, May 2015.
- [54] J. Zhang, L. Li, Y. Zhang, and G. Yang, “Video dehazing with spatial and temporal coherence,” *The Visual Computer*, vol.27, pp.749–757, June 2011.
- [55] J. W. Tukey, “Nonlinear (nonsuperposable) methods for smoothing data,” *Proceedings of Congress Record EASCON*, p.673, Washington DC, USA, Oct. 1974.

- [56] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss, “A Closed-form solution to natural image matting,” IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.30, no.2, pp.228-242, Feb. 2008.
- [57] K. He, J. Sun, and X. Tang, “Guided image filtering,” IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.35, no.6, pp.1397–1409, June 2013.

関連発表論文一覧

1. Yi Ru and Go Tanaka, “Proposal of multiscale retinex using illumination adjustment for digital images,” IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E99-A, no.11, pp.2003–2007, Nov. 2016.
2. Yi Ru and Go Tanaka, “Proposal of dehazing method and quantitative index for evaluation of haze removal quality,” IEICE Transaction on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol.E100-A, no.4, April 2017.

関連学会発表一覧

1. 義 如, 田中 豪, “透過率推定処理の簡略化による高速なヘイズ除去手法,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2014-68, vol.114, no.370, pp.7-12, Dec. 2014.
2. 吉田 武史, 義 如, 田中 豪, “過剰変換を抑制したカラー画像のための multiscale retinex,” 2015 年電子情報通信学会総合大会論文集, no.A-20-4, p.281, March 2015.
3. 義 如, 田中 豪, “照明成分の調整を伴う multiscale retinex の一検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2015-4, vol.115, no.75, pp.19-24, June 2015.
4. Yi Ru and Go Tanaka, “Balanced multiscale retinex using lightness adjustment for color images,” Proceedings of 2015 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, pp.171-174, Narashino, Japan, Aug. 2015.
5. 義 如, 田中 豪, “ヘイズの色特性に基づいたヘイズ除去手法の一提案,” 2016 年電子情報通信学会総合大会論文集, no.A-15-4, p.214, March 2016.
6. 義 如, 田中 豪, “処理強度が調整可能なヘイズ除去手法を用いたヘイズ除去処理の定量評価手法の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 SIS2016-3, vol.116, no.81, pp.11-16, June 2016.
7. Yi Ru and Go Tanaka, “Proposal of haze removal method with adjustable processing degree,” Proceedings of 31st International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.359-362, Naha, Japan, July 2016.

解説

近年、科学技術の発展に伴い、画像を撮影することは身近なこととなった。ただし、カメラで風景や物体を撮影する際には、さまざまな原因で対象物体の視認性が良くない場合がある。例えば、照明不足の場合、被写体が見えにくい。また、霧やもやなどのヘイズが写り込み、被写体の視認性が良くないことがある。本研究では、悪条件下で撮影された画像の視認性改善を行う。具体的には「シーン照明不足」と「ヘイズが写り込む」という二つの問題について考える。

人間の視覚システムは、さまざまな明るさのシーンにおいて対象物体を認識することができる。特に、シーンの照明が不足している場合でも、人間の視覚システムは自分自身の調整により、対象物体の認識が可能である。しかし、カメラで撮影した写真では、シーンの照明不足により、写真の暗部の被写体の視認性が著しく低下することがある。この状況を改善する手法として、retinex 理論という人間の視覚システムが色をどのように捉えるのかをモデル化した色彩理論が Land と McCann により発表された。これは、人間の脳が色や光をどのようにとらえるのかをモデル化した理論である。Retinex 理論は画像の画質改善などの技術にも適用されている。例えば、Jobson らにより提案された single-scale retinex [3] と multiscale retinex (MSR) [4] が広く知られており、更にそれらを発展した手法が提案されている。

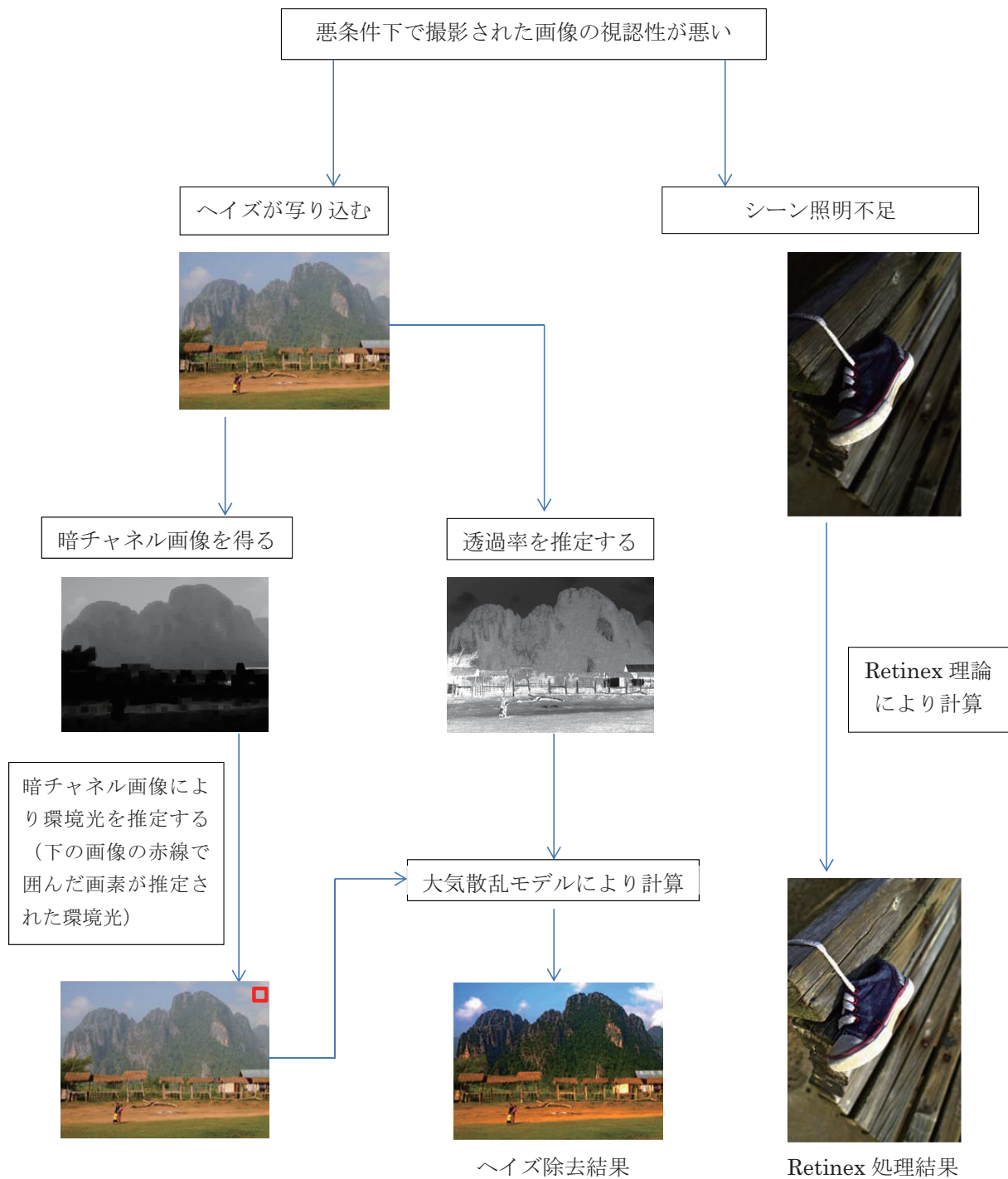
デジタル画像を対象とした場合、retinex 処理は以下の二つの仮定の下で行われる。(1) 画素値 I は照明 L と被写体の反射率 R の積である。(2) 照明は空間的に滑らかに変化している。すなわち、照明成分を取り出した画像における画素値の変化は滑らかである。(2) の仮定を満たす方法で照明光分布を推定し、(1) の仮定に基づいて反射率 R を推定する。Retinex 処理では照明不足による視認性の悪さは改善されるが、照明成分が除去されてしまうので出力画像が不自然なものになってしまう。本研究では、入力画像の明暗順序と整合性の良い、自然な出力画像を得る MSR 手法を提案する。

また、「ヘイズが写り込む」というのは、気象条件によって霧やもやなどのヘイズがあり、それが画像に写り込んでしまうことである。ヘイズの存在は、被写体の視認性を著しく低下させる。近年、画像中のヘイズを取り除く研究が行われている。一般的に、多くの手法は大気散乱モデルに基づいた処理を行う。大気散乱モデルは、ヘイズにおける光の透過率、環境光、取得画像の画素値の関係をモデル化したものである。透過率と環境光が推定できれば、ヘイズがない風景や物体の本来の色を推定することができる。例えば、He らは暗チャンネル法に基づく手法を提案し [5]、広く応用されている。暗チャンネル法では、暗チャンネル画像と入力ヘイズ画像より環境光を推定する。更に、推定した環境光と暗チャンネル画像を用いて透過率分布を推定する。その後、環境光と透過率分布の

データを用いてヘイズ除去処理が行われる。He らの手法は、多くの画像に対して良好な結果を得ることができる。ただし、He らの手法は Laplacian matrix を用いた soft matting 処理などを行うので計算量が大きく、処理に時間がかかる。更に、画像によっては、推定した透過率分布が不正確であり、局所的にヘイズが残留するという問題がある。

本研究では、新しいヘイズ除去手法を提案する。提案手法では、画素ごとの情報を透過率分布へ直接反映しており、局所的なヘイズ残留を防ぐことができる。また、提案手法では、鮮鋭なヘイズ除去結果を得るためにバイラテラルフィルタ [6] による透過率分布の平滑化処理も行う。更に、処理結果の画質を評価する手法として、入力画像及び出力画像の明度と彩度を用いたヘイズ除去結果の定量評価指標も提案する。

本研究では、風景や物体など自然画像の視認性の向上が目的である。MSR 手法とヘイズ除去手法についてそれぞれ新規な手法を提案し、それらの有効性を確認した。



用語集

1. 視認性：視認性とは，色・コントラスト・解像度等の要因による画像の見やすさを総合的に表わしたものである。
2. 色空間：色空間は，一般的に 3 種類程度の数値または色成分を組み合わせて色を記述する方法である．この空間では色を座標で指定できる．また，色空間が数値による場合，その変数はチャンネルと呼ばれる．色空間の幾何学的形態は，立方体・円柱・錐体・球など多様なものがある。
3. Retinex：Retinex とは，retina（網膜）と cortex（大脳皮質）を組み合わせた造語であり，Land と McCann が発表した色彩理論である．これは，人間の脳が色や光をどのように捉えるのかをモデル化した理論である．Retinex 処理では，各画素の色は「物体を照らす照明光とその物体の反射率との積」であると考えられる。
4. 大気散乱モデル：大気中の光の散乱は，空気中に存在する粒子により，光が各方向に反射することである．ヘイズ（霧など）は光の散乱で白くなっているといえる．大気散乱モデルは，ヘイズにおける光の透過率・環境光・観測光の関係をモデル化したものであり，1976 年に McCartney らによって提案された．これは広く知られており，コンピュータビジョンや画像処理の分野でよく使われている。