

博士論文

色空間の形状を考慮したヒストグラム指定法に基づく
コントラスト強調に関する研究

(A Study on Contrast Enhancement Based on Histogram Specification
Taking Account of Color Space Shape)

平成31年3月

植田 祥明

山口大学大学院創成科学研究科

論文要旨

デジタル撮像システムは我々の生活に浸透しており、人物や風景の撮影のみならず、生産現場の自動化や防犯、医療診断支援など、その利用用途は多岐にわたる。とりわけ最近では、携帯電話やタブレット端末、車載カメラなどに小型のカメラが搭載されており、顔認証や運転支援などに用いられている。しかし、レンズやイメージセンサの小型化が望まれる携帯端末のカメラでは、ハードウェアの制約により手軽に高品質な画像を得ることが困難である。そこで、品質の良い画像を生成するために、コントラスト強調や彩度強調、雑音除去、鮮鋭化など、様々な画質改善手法の開発が望まれている。特に、画素分布を広げることで明暗差を強調するコントラスト強調処理は、その性能を定量的に評価することが困難であり、様々なコントラスト強調処理が数多く提案されているものの、ユーザの経験と勘に基づく手動の処理が頻繁に用いられてきた。

これまでに提案されてきたコントラスト強調処理に関する手法は、(1)変換曲線に基づく手法、(2)ヒストグラム指定法に基づく手法、(3)Retinex理論に基づく手法などに分類される。(1)変換曲線に基づく手法では、あらかじめ変換関数の形状が定められているため処理が簡単であるという利点がある。しかし、きめ細やかな明度調整を行うためには複雑な変換曲線を手動で指定する必要があるという欠点がある。(2)ヒストグラム指定法に基づく手法では、目標のヒストグラムを与えるだけで自動的に変換曲線が生成され、コントラスト強調処理が行われるという利点がある。一方、目標のヒストグラムを適切に指定しなければ不自然な画像が得られてしまうという欠点がある。(3)Retinex理論に基づく手法では、光源の影響に左右されずにコントラスト強調処理が行われるという利点があるものの、設定すべきパラメータ数が多いことや、ハローなどのアーチファクトが発生するという欠点がある。本論文では、色空間の形状を考慮することで(2)の問題点を改善し、効果的なコントラスト強調を実現する方法について述べる。

第1章は序論である。

第2章では、従来のコントラスト強調法について述べる。ここでは、コントラスト強調の目的およびその枠組みについて述べる。ヒストグラム指定法に基づくコントラスト強調法の概要と位置付けについて説明し、主要な方法について述べる。はじめに、グレースケール画像を対象とした方法として、ヒストグラム均等化(Histogram Equalization: HE)、および勾配ノルムに基づくHEについて詳述する。勾配ノルムに基づくHEは、画像の勾配ノルムによって重み付けされたヒストグラムを用いることで過度な強調を抑制する方法である。次に、カラー画像を対象とした方法として、色空間の形状を考慮したHEについて詳述する。色空

間の形状を考慮した HE では，色空間の形状に基づいて理想的な明度分布を定義し，それを目標のヒストグラムとしてコントラスト強調が行われる．本章のまとめとして，従来手法の利点および欠点から得られる知見について述べる．

第 3 章では，HSV 色空間の形状を考慮した明度コントラスト強調法について述べる．提案手法では，過度な強調を抑制するために，HSV 色空間の形状と画像の勾配ノルムに基づく処理が行われる．ここでは，RGB 色空間から HSV 色空間への変換処理，およびその逆変換処理について述べ，HSV 色空間の彩度（Saturation）や明度（Value）の定義について詳述する．また，HSV 色空間の形状と明度（Value）の定義に基づき，色空間の形状を考慮した明度分布を定義する．従来手法から得られた知見に基づき，過度な強調を抑制するために，明度成分の勾配ノルムによって重み付けされたヒストグラムに基づく処理についても述べる．また，原画像の平均明度に応じて強調度合いが自動で調節される機構について述べる．種々の画像を用いた実験を通して，提案手法の有効性を検証する．

第 4 章では，RGB 色空間の形状を考慮した明度コントラストおよび彩度の同時強調法について述べる．提案手法では，各画素を白，黒，純色の凸結合によって表現し，凸結合の係数空間上で画素分布が取り扱われる．ここでは，色相保存条件について概説し，RGB 色空間における等色相平面が白，黒，純色の 3 点を頂点とする三角形であることを述べる．また，各画素を白，黒，純色の凸結合によって表現する方法について詳説する．さらに，ヒストグラム指定法によって，凸結合の係数空間上で画素分布を広げる処理について述べる．具体的には，係数分布を広げるために，各係数の平滑化ヒストグラムを目標のヒストグラムとする．このとき，平滑化度合いに応じてコントラストの強調度合いを調節することが可能であることを示す．種々の画像を用いた実験を通して，提案手法の有効性を検証する．

第 5 章は結論である．本研究の成果を総括するとともに，今後の課題について述べる．

本論文で使用する記号の一覧表

M	画像の画素数（縦）
N	画像の画素数（横）
(i, j)	画素の位置
$x(i, j)$	グレースケール画像の画素 (i, j) における画素値
k	画素値
h	ヒストグラム
$\delta(k, x(i, j))$	クロネッカーのデルタ
p	正規化ヒストグラム
P	正規化累積ヒストグラム
y_{gray}	ヒストグラム指定法によって出力された画素値
$t(\cdot)$	変換関数
P_{in}	原画像の正規化累積ヒストグラム
P_{tar}	目標の正規化累積ヒストグラム
p_{unif}	一様分布の正規化ヒストグラム
P_{unif}	一様分布の正規化累積ヒストグラム
$w(i, j)$	画素 (i, j) における勾配ノルムに基づく重み
$dv(i, j)$	グレースケール画像の垂直差分
$dh(i, j)$	グレースケール画像の水平差分
dv_{B}	後方垂直差分
dv_{F}	前方垂直差分
dh_{B}	後方水平差分
dh_{F}	前方水平差分
h_{w}	勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラム
P_{w}	勾配ノルムに基づく重み付き正規化累積ヒストグラム

y_{GNHE}	GNHE による処理結果の画素値
$H_{in}(i, j)$	HSI 色空間におけるカラー画像の画素 (i, j) の色相
$S_{in}(i, j)$	HSI 色空間におけるカラー画像の画素 (i, j) の彩度
$I_{in}(i, j)$	HSI 色空間におけるカラー画像の画素 (i, j) の明度
P_s	彩度の正規化累積ヒストグラム
S_{min}	彩度の最小値
S_{max}	彩度の最大値
$S'(i, j)$	彩度変換の際の一時的な変数
$S_{out}(i, j)$	変換後の彩度
α_m	村平らの手法における重み α
$I_{out}(i, j)$	村平らの手法における明度の処理結果
$x_r(i, j)$	入力画像の R 成分
$x_g(i, j)$	入力画像の G 成分
$x_b(i, j)$	入力画像の B 成分
$x_h(i, j)$	入力画像の色相成分
$x_s(i, j)$	入力画像の彩度成分
$x_v(i, j)$	入力画像の明度成分
$y_r(i, j)$	HSV 色空間において処理を行ったあと、RGB 色空間へ逆変換した際の R 成分
$y_g(i, j)$	HSV 色空間において処理を行ったあと、RGB 色空間へ逆変換した際の G 成分
$y_b(i, j)$	HSV 色空間において処理を行ったあと、RGB 色空間へ逆変換した際の B 成分
$H'(i, j)$	HSV 色空間へ変換する際の一時的な変数
$U(i, j)$	HSV 色空間へ変換する際の一時的な変数
$Q(i, j)$	HSV 色空間へ変換する際の一時的な変数
$T(i, j)$	HSV 色空間へ変換する際の一時的な変数
h_{ideal}	HSV 色空間の形状を考慮した明度分布
$w_v(i, j)$	画素 (i, j) における勾配ノルムに基づく重み
$dv_v(i, j)$	明度成分の垂直差分
$dh_v(i, j)$	明度成分の水平差分
dv_{vB}	明度成分の後方垂直差分

dv_{v_F}	明度成分の前方垂直差分
dh_{v_B}	明度成分の後方水平差分
dh_{v_F}	明度成分の前方水平差分
h_{v_w}	HSV 色空間における勾配ノルムによる重み付き明度分布
\overline{V}_{ideal}	HSV 色空間における理想的な明度分布の平均値
$p_{v_{mix}}$	混合された正規化ヒストグラム
w_{mix}	ヒストグラムの混合処理の重み
p_{ideal}	HSV 色空間の形状を考慮した明度成分の正規化ヒストグラム
p_{v_w}	明度の重み付き正規化ヒストグラム
$\Phi(\cdot)$	重みの調節関数
y_{v_w}	HSV 色空間の形状を考慮したコントラスト強調処理結果の明度成分
t_{v_w}	HSV 色空間の形状を考慮したコントラスト強調処理における明度の変換関数
$y_{r_{out1}}$	HSV 色空間の形状を考慮した提案手法の処理結果の R 成分
$y_{g_{out1}}$	HSV 色空間の形状を考慮した提案手法の処理結果の G 成分
$y_{b_{out1}}$	HSV 色空間の形状を考慮した提案手法の処理結果の B 成分
m_l	ヤードスティック法において左側に提示した手法
m_r	ヤードスティック法において右側に提示した手法
e_{sub}	被験者
M_s	ヤードスティック法における刺激の数
N_t	ヤードスティック法における被験者の数
t_y	ヤードスティック法において右側に提示した手法
$\hat{\alpha}_s$	ヤードスティック法における手法 s の評価
E	平均明度差
$y_v(i, j)$	処理結果画像の明度
$x'_r(i, j)$	画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と同じ色相を持つ画素の R 成分
$x'_g(i, j)$	画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と同じ色相を持つ画素の G 成分
$x'_b(i, j)$	画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と同じ色相を持つ画素の B 成分
$\mathbf{x}(i, j)$	RGB 色空間における画素
$\mathbf{x}'(i, j)$	画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と同じ色相を持つ画素

w	白色点 (= (1, 1, 1))
k	黒色点 (= (0, 0, 0))
$c(i, j)$	純色点
$c_r(i, j)$	純色の R 成分
$c_g(i, j)$	純色の G 成分
$c_b(i, j)$	純色の B 成分
$a(i, j)$	係数ベクトル
$a_w(i, j)$	凸結合における白の係数
$a_k(i, j)$	凸結合における黒の係数
$a_c(i, j)$	凸結合における純色の係数
f_w	白の係数ヒストグラム
f_k	黒の係数ヒストグラム
f_c	純色の係数ヒストグラム
σ_w	白の係数ヒストグラムに対するガウシアンカーネルの標準偏差
σ_k	黒の係数ヒストグラムに対するガウシアンカーネルの標準偏差
σ_c	純色の係数ヒストグラムに対するガウシアンカーネルの標準偏差
g_{w, σ_w}	白の係数ヒストグラムにおける平滑化ヒストグラム
g_{k, σ_k}	黒の係数ヒストグラムにおける平滑化ヒストグラム
g_{c, σ_c}	純色の係数ヒストグラムにおける平滑化ヒストグラム
F_w	白の係数の正規化累積ヒストグラム
F_k	黒の係数の正規化累積ヒストグラム
F_c	純色の係数の正規化累積ヒストグラム
G_{w, σ_w}	白の係数の平滑化ヒストグラムの正規化累積ヒストグラム
G_{k, σ_k}	黒の係数の平滑化ヒストグラムの正規化累積ヒストグラム
G_{c, σ_c}	純色の係数の平滑化ヒストグラムの正規化累積ヒストグラム
$a'_w(i, j)$	ヒストグラム指定法によって変換された白の係数
$a'_k(i, j)$	ヒストグラム指定法によって変換された黒の係数
$a'_c(i, j)$	ヒストグラム指定法によって変換された純色の係数
$a''_w(i, j)$	変換された白の係数を正規化したもの

$a_k''(i, j)$	変換された黒の係数を正規化したもの
$a_c''(i, j)$	変換された純色の係数を正規化したもの
$\mathbf{y}_{\text{out}2}(i, j)$	RGB 色空間の形状を考慮したコントラスト強調法の処理結果
h_G	Nikolova らの手法におけるガウス分布に従うヒストグラム
μ_G	h_G における平均
σ_G	h_G における標準偏差
l	h_G における左端点の相対度数
r	h_G における右端点の相対度数
L	濃淡レベル数
L^*	CIE LAB 色空間における明度成分
a^*	CIE LAB 色空間における赤—緑成分
b^*	CIE LAB 色空間における黄—青成分
C^*	LCh 色空間におけるクロマ

目次

論文要旨	i
本論文で使用する記号の一覧表	iii
第1章 序論	1
第2章 ヒストグラムを用いた従来のコントラスト強調法	6
2.1 緒言	6
2.2 コントラスト強調処理の目的と主要な方法	6
2.3 ヒストグラム指定法	9
2.4 ヒストグラム均等化	11
2.5 勾配ノルムに基づくヒストグラム均等化	14
2.6 色空間の形状を考慮したカラー画像に対する従来のヒストグラム均等化	18
2.7 結言	20
第3章 HSV 色空間におけるコントラスト強調	22
3.1 緒言	22
3.2 HSV 色空間	22
3.3 HSV 色空間における理想的な目標ヒストグラム	24
3.4 理想的なヒストグラムを用いた HSV 色空間におけるコントラスト強調	27
3.5 比較実験	29
3.5.1 実験準備	29
3.5.2 実験結果	30
3.5.3 実験結果の考察	33
3.5.4 一対比較法による数値評価	34
3.5.5 平均明度差に基づく客観評価	37
3.5.6 評価結果の考察	39

3.6 結言	39
第 4 章 RGB 色空間におけるコントラスト強調	41
4.1 緒言	41
4.2 RGB 色空間における等色相平面	42
4.3 等色相平面上での画素の表現	43
4.4 ヒストグラム指定法によるコントラスト強調	44
4.5 比較実験	46
4.5.1 実験準備	46
4.5.2 実験結果	47
4.5.3 パラメータの変化に応じた処理結果の変化	50
4.5.4 計算量および計算時間の比較	51
4.6 結言	51
第 5 章 結論	63
謝 辞	66
参考文献	67
付 録 A 式 (4.4), (4.5), (4.6) の導出	72
付 録 B 式 (4.2) の導出	74
付 録 C L^* および C^* の求め方	75

第1章 序論

本論文は、色空間の形状を考慮することで、カラー画像の効果的なコントラスト強調処理を実現するための新しい方法論について述べたものである。

デジタル撮像システムは我々の生活に浸透しており、人物や風景の撮影のみならず、生産現場の自動化や防犯、医療診断支援など、その利用用途は多岐にわたる。とりわけ最近では、携帯電話やタブレット端末、車載カメラなどに小型のカメラが搭載されており、顔認証や運転支援などに用いられている。しかし、レンズやイメージセンサの小型化が望まれる携帯端末のカメラでは、ハードウェアの制約により手軽に高品質な画像を得ることは困難である。そこで、品質の良い画像を生成するために、コントラスト強調や彩度強調、雑音除去、歪み補正など、様々な画質改善手法が開発されている^{1,2}。しかし、画素分布を広げることで明暗差を強調するコントラスト強調処理は、その性能を定量的に評価することが困難である。そのため、様々なコントラスト強調処理が数多く提案されているものの、ユーザの経験と勘に基づく手動の処理が頻繁に用いられてきた。

画像のコントラストとは、明暗差の大きさのことである。コントラストの低い画像は明暗差が小さく、視認性が低い傾向にある。このような画像は、撮影時のパラメータが適切に設定されていない場合や、暗所での撮影時に得られることが多い。コントラストの低い画像の特徴は明暗差が小さく、画素分布が偏っていることである。コントラスト強調処理の目的は、画素分布の偏りをならすことによってその明暗差を強調し、画像の視認性を改善することである。

デジタルカメラによって撮影された画像には、ノイズが重畳している場合が多い。特に暗所での撮影では、長時間の露光や高いISO感度によって撮影が行われるため、ノイズが増幅されて画像に現れる場合がある。このようなノイズは、画像処理エンジンによってある程度除去されているものの、完全に除去することは不可能である。本来、暗所で撮影された画像は明度の低い画素が多く存在しているため、このような画像に対しコントラスト強調を施すと画像全体の明度が引き上げられ、不自然な画像になってしまう。また、それに伴い、画像に重畳しているノイズがさらに強調されてしまう。したがって、良好な結果を得るために

は以下の2点を満たすことが重要である。

- 明度分布に応じ、適切にコントラストを強調すること
- 画像に重畳しているノイズの強調を抑制すること

また、カラー画像に対する処理では、変換前後で色相が変化することによって画像の印象が変化することがある¹。色相の変化を防ぐには、Naikらの色相保存条件³を満たすだけでなく、色空間の表現可能領域（色域）から飛び出ないことが必要となる。また、色相や明度だけでなく、彩度を低下させないように変換することも重要である。したがって、カラー画像に対しては、上記の2点に加え、以下の3点を満たすことが重要である。

- 色相を保存すること
- 色域内での処理を保証すること
- 可能な限り鮮やかさを低下させないこと

本論文では、これらの条件を満たす新たなコントラスト強調処理手法の開発を目的とする。

コントラスト強調処理に関する手法は、(1)変換曲線に基づく手法、(2)ヒストグラム指定法に基づく手法、(3)Retinex理論に基づく手法などに分類される。(1)変換曲線に基づく手法では、線形引き伸ばし⁴やガンマ変換⁵、S字変換⁶などによって入力画像の画素値が変換される。これらの手法はあらかじめ変換関数の形状が定められているため処理が簡単であるという利点がある。しかし、きめ細やかな明度調整を行うためには複雑な変換曲線を手動で指定する必要があるという欠点がある。画像編集ソフト等でコントラストを強調する場合も、GUI(Graphical User Interface)上で変換曲線を手動で調節する場合が多い。(2)ヒストグラム指定法⁷⁻⁹に基づく手法^{3,10-33}では、目標のヒストグラムを与えるだけで自動的に変換曲線が生成され、コントラスト強調処理が行われるという利点がある。一方、目標のヒストグラムを適切に指定しなければ不自然な画像が得られてしまうという欠点がある。(3)Retinex理論に基づく手法³⁴⁻³⁶では、光源の影響に左右されずにコントラスト強調処理が行われるという利点があるものの、設定すべきパラメータ数が多いことや、ハローなどのアーチファクトが発生するという欠点がある。本論文では、ハローなどのアーチファクトが発生しにくく、目標のヒストグラムを与えることによって自動的にコントラスト強調が行われるヒストグラム指定法に着目する。

ヒストグラム指定法に基づくグレースケール画像のコントラスト強調法として、ヒストグラム均等化 (Histogram Equalization: HE) やその発展手法が数多く提案されている。HEで

は、過度なコントラスト強調処理によって不自然な処理結果が出力されるおそれがある。このような問題に対し、ヒストグラムの度数に重み付けやクリッピングなどの処理^{11,16,21,30}を施すことで過度な強調を抑制することが可能である。他にも、画像の平均明度を保存する方法^{12,19}など、様々な手法によって処理の改善がなされている。

ヒストグラム指定法に基づくカラー画像のコントラスト強調法として、Naikらの手法³や村平らの手法²⁹、Nikolovaらの手法³¹などが提案されている。これらの方法では、明度成分に対しコントラスト強調を適用し、その処理前と処理後の明度に基づいてRGB値を変換する。このとき、各画素がRGB色空間の表示可能領域（色域）から飛び出さないように、色相保存に基づく変換が行われる。Naikらは、RGB色空間における色相保存条件を定義し、それに基づくコントラスト強調法を提案した³。Naikらの手法では、色相を保存することが可能であり、色域内での処理を保証した変換であるという利点を有するものの、画像の鮮やかさが低下してしまうという問題点があった。村平らは、Naikらの手法を画像の鮮やかさが上昇する手法へと改良することで、上記の問題の解決を図った。また、Nikolovaらは、線形引き伸ばしやExact Histogram Specification⁹、ヒストグラムの混合処理等を組み合わせることにより、従来手法よりも鮮やかな画像が得られるように改良を行った³¹。しかし、これらの手法は明度に対するコントラスト強調処理にどの手法を選ぶかがユーザに委ねられており、その性能によって処理結果が大きく変化するという問題点がある。また、明度のコントラスト強調処理には、グレースケール画像に対するコントラスト強調処理がそのまま用いられることが多いが、このような処理形態では色空間の性質が考慮されておらず、良好な結果が得られるとは限らない。したがって、カラー画像処理におけるコントラスト強調処理には、改良の余地がある。

そこで、本論文では、画像の色相を保存可能であり、色域内での処理を保証した新たなコントラスト強調処理手法について述べる。本論文は図1.1に示すように、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、従来のコントラスト強調法について述べる。ここでは、コントラスト強調の目的およびその枠組みについて述べる。ヒストグラム指定法に基づくコントラスト強調法の概要と位置付けについて説明し、主要な方法について述べる。はじめに、グレースケール画像を対象とした方法として、ヒストグラム均等化（HE）、および勾配ノルムに基づくHE（Gradient Norm-based HE: GNHE）について詳述する。GNHEは、画像の勾配ノルムによって重み付けされたヒストグラムを用いることで過度な強調を抑制する方法である。具体的には、度数

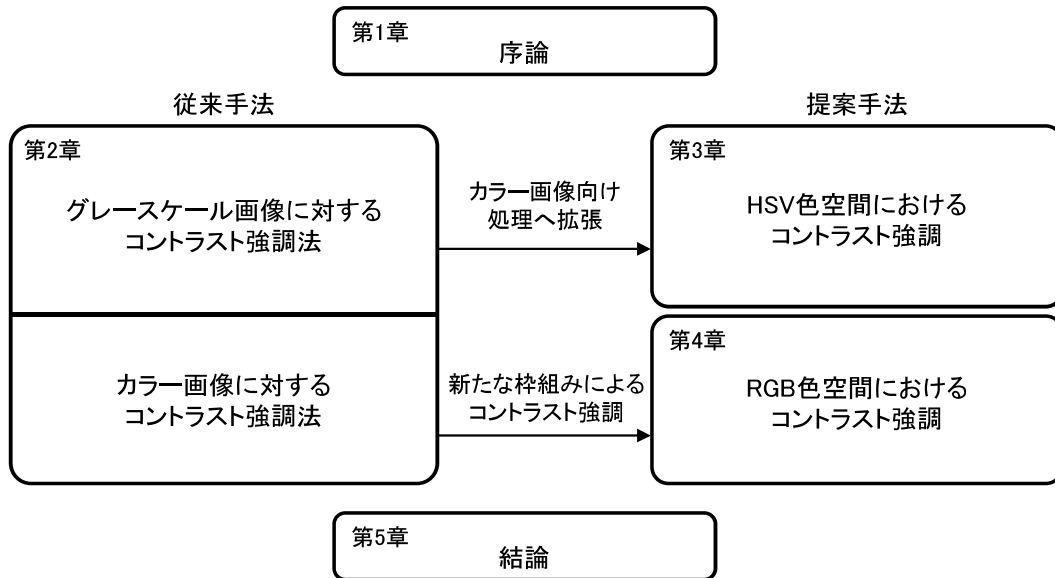


図 1.1: 本論文の構成

Fig.1.1: Framework of the thesis.

を重み付けすることによって，平坦部の明度差が大きくなるように変換が行われる．次に，カラー画像を対象とした方法として，色空間の形状を考慮した HE について詳述する．色空間の形状を考慮した HE では，色空間の形状に基づいて理想的な明度分布を定義し，それを目標のヒストグラムとしてコントラスト強調が行われる．このような方法では，画素分布が色空間の頂点付近に過剰に集中することなく，効果的なコントラスト強調が行われる傾向にある．本章のまとめとして，従来手法の利点および欠点から得られる知見について述べる．

第3章では，色相，彩度，明度からなる HSV 色空間において，色空間の形状を考慮した明度コントラスト強調処理について述べる．提案手法では，グレースケール画像に対する HE とは異なり，HSV 色空間の形状に着目し，理想的な明度分布を目標のヒストグラムに設定することで効果的なコントラスト強調が実現できることを示す．HSV 色空間における明度変換では，色相の保存および色域内処理の保証が容易に実現されるという利点がある．明度変換の際には，勾配ノルムに基づくヒストグラムを用いることで画像のざらつきを抑制したコントラスト強調を実現する．また，原画像の平均明度に基づいてコントラストの強調度合いを自動的に調整することで，過度な強調を抑制する仕組みについて述べる．さらに，種々の画像を用いた実験により，提案手法の有効性を検証する．

第4章では，RGB 色空間において，白，黒，純色の混合比に着目し，色空間内で効果的に画素分布を拡散させる方法について述べる．提案手法では，画素を白，黒，純色の凸結合で

表現し，その係数空間上で画素分布を拡散させることで，コントラストが改善される．具体的には，各係数のヒストグラムに対し平滑化処理を施し，平滑化ヒストグラムを用いてヒストグラム指定法が行われる．このとき，平滑化の度合いによって画素分布の拡がり度合いを調節することが可能となる．また，純色の混合比に関するパラメータを調整することで，結果画像の鮮やかさを調節することも可能である．

第5章は結論である．本研究を総括する．

第2章 ヒストグラムを用いた従来のコントラスト強調法

2.1 緒言

本章では、コントラスト強調処理の目的と主要な方法について述べる。また、ヒストグラム指定法に基づくコントラスト強調法の概要と位置付けについて述べる。具体的には、グレースケール画像を対象としたコントラスト強調法として、ヒストグラム均等化 (HE)，および勾配ノルムに基づく HE について詳述する。また、カラー画像を対象としたコントラスト強調法として、色空間の形状を考慮した明度コントラスト強調処理について述べる。

2.2 コントラスト強調処理の目的と主要な方法

コントラストとは画像の明暗差のことを表す。コントラストの高い画像は明暗差が大きく、視認性が良い。一方、コントラストの低い画像は明暗差が小さく、視認性が低い。ここでは、コントラストの低い画像の特徴について述べ、コントラスト強調処理の目的と主要な方法について述べる。

まず、コントラストの低いグレースケール画像とそのヒストグラムについて述べる。図 2.1 に、明暗差の小さい画像とそのヒストグラムを示す。図 2.1(a) は原画像、(b) は原画像のヒストグラムである。明暗差の小さい画像はメリハリがなく、視認性が低い。図 2.1 から、明暗差の小さい画像のヒストグラムは画素値の分布が偏っていることが分かる。図 2.1(a) に対しコントラスト強調処理を施した結果を図 2.2 に示す。図 2.2 から、明度コントラストが改善され、ヒストグラムの偏りが小さくなっていることが確認できる。

次に、コントラストの低いカラー画像とその画素分布について述べる。図 2.3 に、明暗差の小さいカラー画像とその色分布を示す。図 2.3(a) は原画像、(b) は RGB 色空間における原画像の画素分布である。図 2.3 から、明暗差の小さい画像は画素分布の広がりが小さく、画素分布が偏っていることが分かる。図 2.4 に、コントラストのカラー画像に対しコントラスト強調

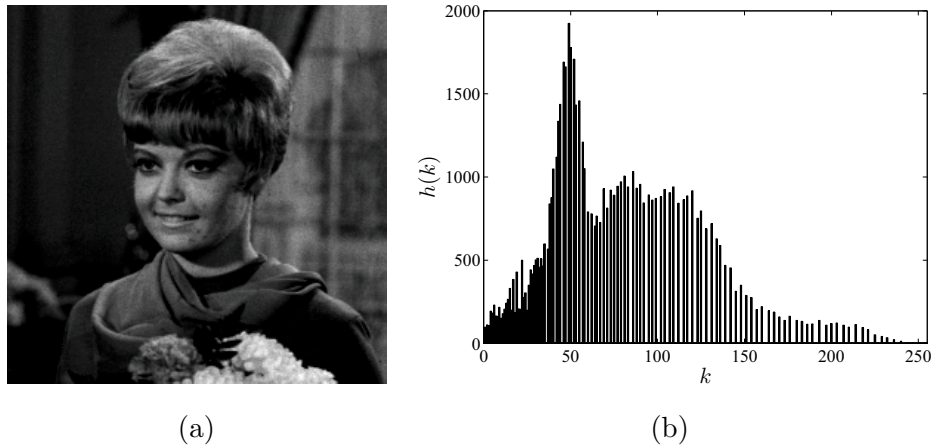


図 2.1: 画像 “Girl” の原画像とそのヒストグラム. (a) 原画像, (b) 原画像のヒストグラム
Fig.2.1: Original image “Girl” and its histogram. (a) Original image, (b) Histogram of the original image

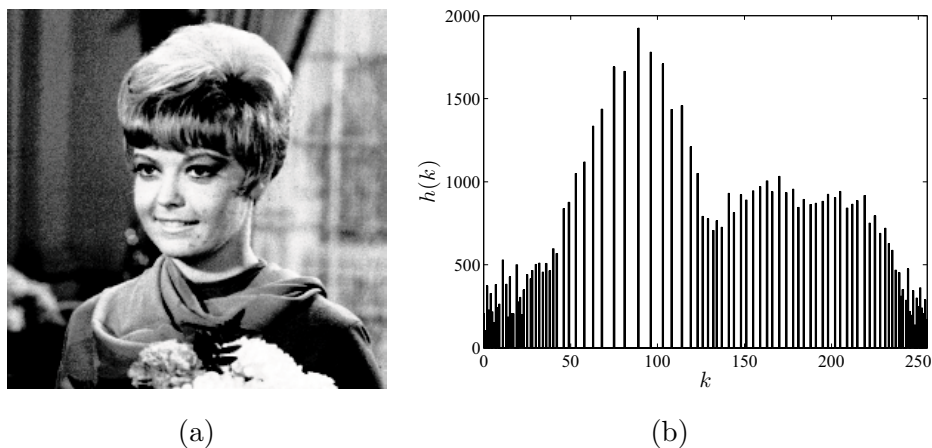


図 2.2: 画像 “Girl” に対するコントラスト強調処理結果とそのヒストグラム. (a) 結果画像,
(b) 結果画像のヒストグラム
Fig.2.2: Resultant image of the contrast enhancement for “Girl” and its histogram. (a)
Resultant image, (b) Histogram of the resultant image

処理を施した結果を示す. 図 2.4(a) は処理結果, (b) は処理結果の画素分布である. 図 2.4 から, コントラストの高いカラー画像は画素分布の広がり大きいことがわかる.

これらの比較から, 画像のコントラストを上げるためには, 画素分布の偏りをならし, 分布を広げる処理が必要であることが分かる. 従来から提案されてきたコントラスト強調法においても, 一般に画素分布を広げる処理が行われる. 先行研究として, 様々なアプローチに基づくコントラスト強調手法が数多く提案されている.

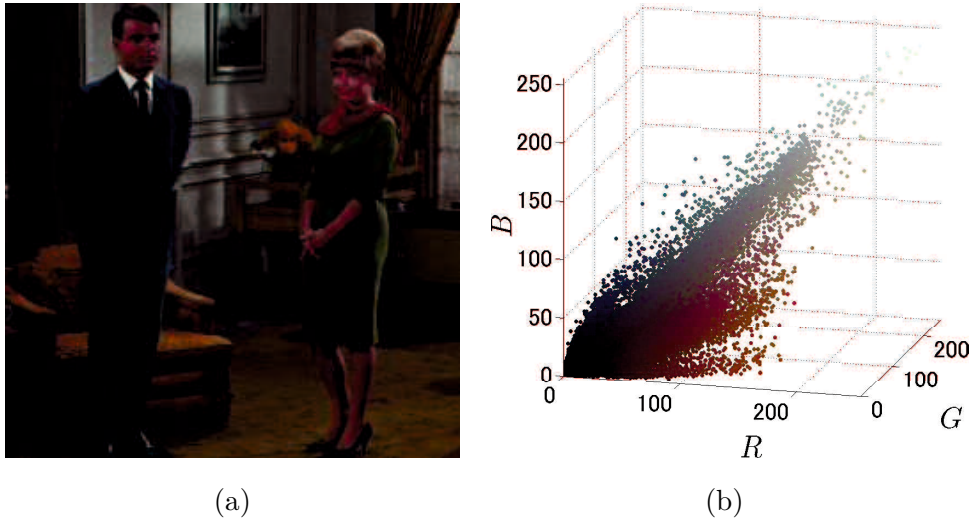


図 2.3: 画像 “Couple” に対するコントラスト強調処理結果とそのヒストグラム.
 Fig.2.3: Original image “Couple” and its pixel distribution. (a) Original image, (b) Pixel distribution of the original image in RGB Color Space

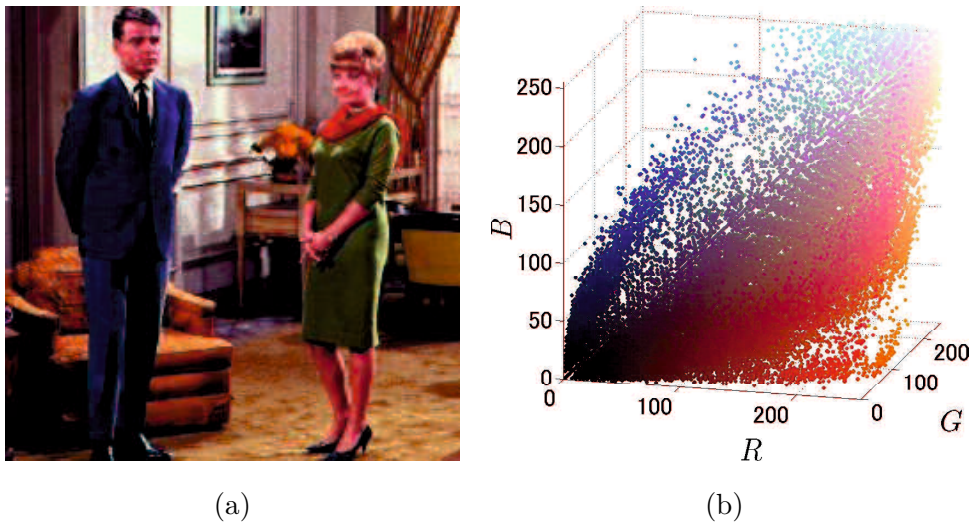


図 2.4: 画像 “Couple” に対するコントラスト強調処理結果とそのヒストグラム
 Fig.2.4: Resultant image of the contrast enhancement for “Couple” and its pixel distribution. (a) Resultant image, (b) Pixel distribution of the resultant image in RGB color space

コントラスト強調手法は、以下の3種類に大別される。

- (1) 変換曲線に基づく手法

(2) ヒストグラム指定法に基づく手法

(3) Retinex 理論に基づく手法

(1) 変換曲線に基づく手法では、線形引き伸ばし⁴やガンマ変換⁵、S字変換⁶等、あらかじめ変換関数の形状が定められているため処理が簡単であるという利点がある。図2.5に線形引き伸ばし、ガンマ変換、S字変換における変換曲線を示す。これらの変換曲線に基づいて明度に変換され、画像のコントラストが改善される。しかし、このような方法は変換曲線の形が関数ごとに決まっているため、変換曲線の細かな調整が困難であるという問題がある。また、画像編集ソフトにおいてコントラスト強調処理を施す場合も、線形引き伸ばしのパラメータを調節したり、トーンカーブをGUI上で設定するなどの操作が手動で行われている。しかし、これらの操作はユーザの勘や経験に頼った処理であり、画像に合わせて細かな調整が必要となる場合がある。

(2) ヒストグラム指定法に基づく手法では、原画像のヒストグラムを任意のヒストグラム(目標のヒストグラム)に近づける処理が自動で行われるという利点がある。ヒストグラム指定法において、一様分布を目標のヒストグラムとして設定すると、最も一般的なコントラスト強調処理であるヒストグラム均等化による処理と一致する。ヒストグラム指定法に基づく手法は計算量も小さく実用的であり、その発展手法が数多く提案されている。しかし、目標のヒストグラムを適切に設定しなければ過度な強調や不自然な強調によって良好な結果が得られない場合がある。

(3) Retinex 理論に基づく手法では、照明成分を除去することで被写体の反射率を抽出し、それを強調することによってコントラスト強調処理結果が得られる。具体的には、Singlescale Retinex(SSR)をマルチスケール処理に拡張した Multiscale Retinex(MSR)³⁴によって結果画像が求められる。Retinex 理論に基づく手法の利点は、光源の影響に左右されずに処理結果が得られるという利点があるものの、ハローなどのアーチファクトが発生しやすいことや、パラメータを適切に設定しなければ白飛びや黒つぶれが発生することなどの問題点がある。

本論文では、目標のヒストグラムを設定することによって自動でコントラスト強調が行われるヒストグラム指定法に着目する。

2.3 ヒストグラム指定法

画像処理において、ヒストグラム指定法とは、処理後の画像が特定のヒストグラムに近づくように画素値を変換する処理である^{7,8}。本論文では、スカラ量を取り扱う1次元ヒストグ

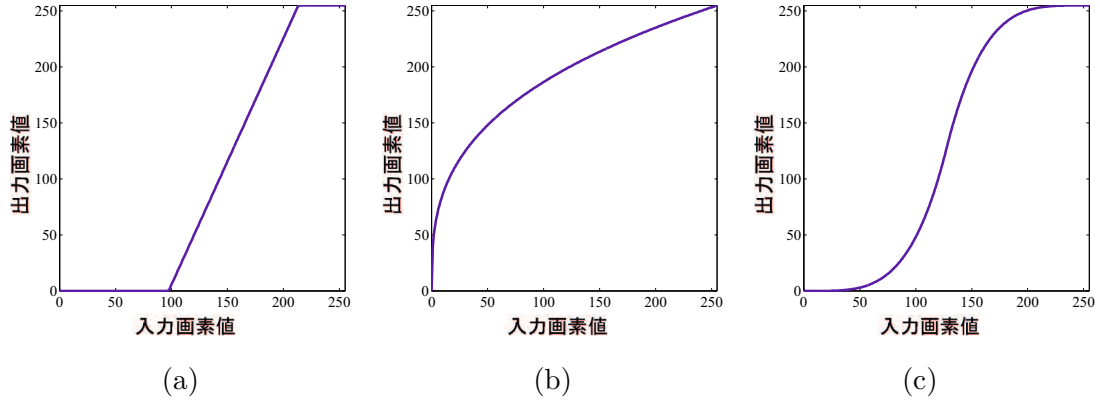


図 2.5: 変換曲線の例. (a) 線形引き伸ばし, (b) ガンマ変換, (c) S 字変換

Fig.2.5: Examples of transform curves. (a) Linear extension, (b) Gamma transform, (c) S-type transform

ラム指定法について述べる. ヒストグラム指定法では, 入力画像のヒストグラムと目標のヒストグラムを用いて処理が行われる. ここでは, 8ビットグレースケール画像に対し, ヒストグラム指定法を適用する手順について述べる.

$M \times N$ のグレースケール画像の画素 (i, j) における画素値を $x(i, j)$ とする. k は $[0, 255]$ の整数値である. グレースケール画像のヒストグラム h は以下の式で表される.

$$\forall k \in [0, 255], h(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \delta(k, x(i, j)). \quad (2.1)$$

ここで, $\delta(\cdot)$ はクロネッカーのデルタであり, 以下の式で表される.

$$\delta(k, x(i, j)) = \begin{cases} 1, & k = x(i, j) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.2)$$

ヒストグラムの度数の総和が1になるように, 度数の総和で正規化されたヒストグラムを正規化ヒストグラムと呼ぶ. ヒストグラム h の正規化ヒストグラム p は以下のように表される.

$$\forall k \in [0, 255], p(k) = \frac{h(k)}{\sum_{l=0}^{255} h(l)}. \quad (2.3)$$

画素値が k 以下の度数を足し合わせたものを累積度数と呼ぶ. また, 正規化された度数の累積度数を正規化累積度数と呼ぶ. 正規化ヒストグラム p の正規化累積ヒストグラム P は以下の式で求められる.

$$\forall k \in [0, 255], P(k) = \sum_{l=0}^k p(l). \quad (2.4)$$

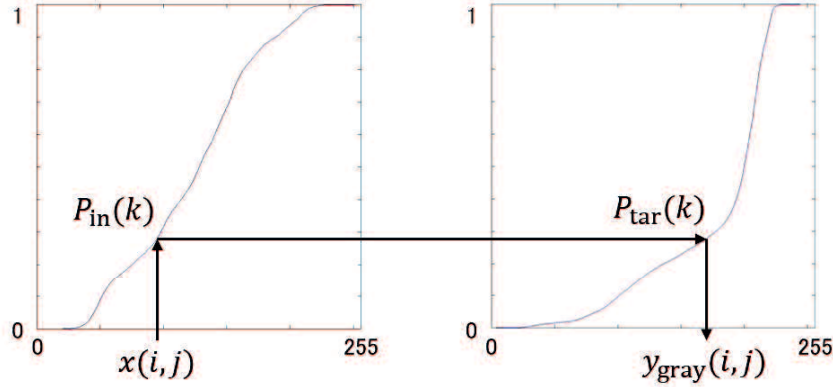


図 2.6: ヒストグラム指定法の概念図.

Fig.2.6: A conceptual sketch of histogram specification

式 (2.4) から，正規化累積ヒストグラムは単調増加関数であり，その最大度数は 1 であることがわかる。

ヒストグラム指定法によって変換された値 $y_{\text{gray}}(i, j)$ は，以下の式に従って求められる。

$$y_{\text{gray}}(i, j) = t(x(i, j)). \quad (2.5)$$

ここで，変換関数 $t(\cdot)$ は以下の通りである。

$$\forall k \in [0, 255], t(k) = P_{\text{tar}}^{-1}(P_{\text{in}}(k)), \quad (2.6)$$

$$P_{\text{tar}}^{-1}(P_{\text{in}}(k)) = \inf\{z \mid P_{\text{tar}}(z) \geq P_{\text{in}}(k)\}. \quad (2.7)$$

ここで， $P_{\text{in}}(\cdot)$, $P_{\text{tar}}(\cdot)$ はそれぞれ原画像の正規化累積ヒストグラム及び目標の正規化累積ヒストグラムである。図 2.6 に，ヒストグラム均等化において変換曲線 $t(\cdot)$ を求める際の例を示す。また，図 2.7 に示すように，変換関数は累積ヒストグラムと同様，単調増加関数である。したがって，変換関数によって変換された画素値と変換前の画素値を比較すると，それらの大小関係が入れ替わらないことがわかる。

2.4 ヒストグラム均等化

ヒストグラム均等化は，ヒストグラムを用いたコントラスト強調手法における最も基本的な手法である。ヒストグラム均等化では，結果画像の画素値のヒストグラムが一様分布に近

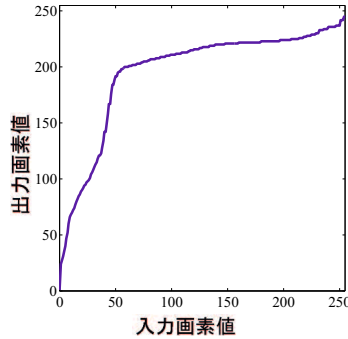


図 2.7: 変換関数の例.

Fig.2.7: An example of transform function

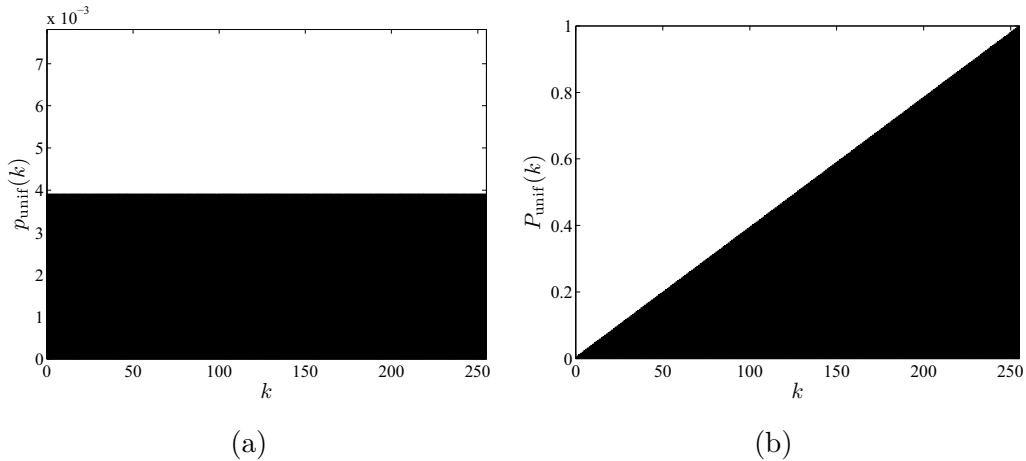


図 2.8: 一様分布のヒストグラムとその累積ヒストグラム. (a) ヒストグラム, (b) (a) の累積ヒストグラム

Fig.2.8: Histogram of a uniform distribution and its normalized cumulative histogram. (a) Histogram of uniform distribution, (b) Normalized cumulative histogram of (a)

づくように画素値の変換が行われる. 8ビットグレースケール画像のヒストグラム均等化では, 目標の正規化ヒストグラムを以下の一様分布 p_{unif} に設定する.

$$\forall k \in [0, 255], p_{\text{unif}}(k) = \frac{1}{256}. \tag{2.8}$$

一様分布を図 2.8 に示す. 図 2.8(a) は一様分布の正規化ヒストグラム, (b) は (a) の正規化累積ヒストグラムである. 式 (2.5) から (2.7) に示すヒストグラム指定法に基づき, 正規化累積ヒストグラム $P_{\text{in}}(k)$ 及び $P_{\text{unif}}(k)$ を用いて変換関数 $t(\cdot)$ を求め, コントラスト強調処理結果を得る.

図 2.9 および図 2.10 に, ヒストグラム均等化によるコントラスト強調結果を示す. 図 2.9

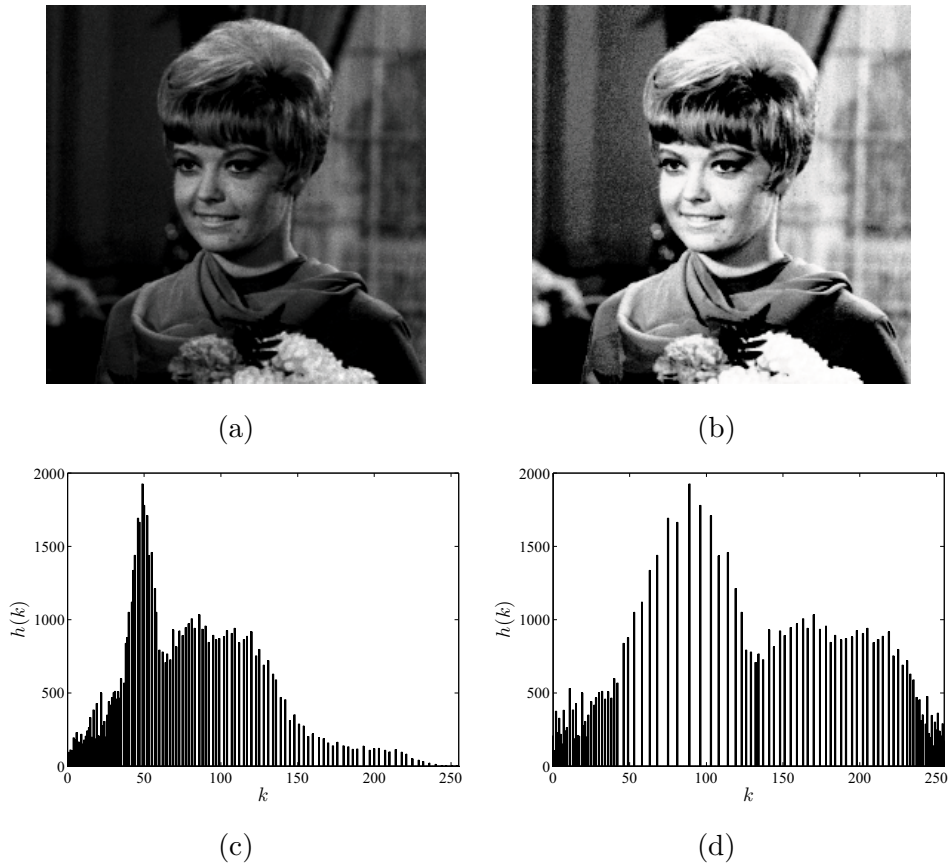


図 2.9: 画像 “Girl” の原画像および HE の処理結果. (a) 原画像, (b) HE の処理結果, (c) 画像 (a) のヒストグラム, (d) 画像 (b) のヒストグラム

Fig.2.9: Original and the resultant images of “Girl”. (a) Original image, (b) Resultant image of HE, (c) Histogram of image (a), (d) Histogram of image (b)

および図 2.10 において, (a) は原画像, (b) は HE の処理結果, (c) は原画像のヒストグラム, (d) は HE の処理結果のヒストグラムである. 図 2.9 では, 画像全体のコントラストが強調され, 画像の視認性が改善されたことがわかる. 特に, 被写体の衣服が明瞭になった. また, 全体的に白や黒など, 広範囲の画素値を取る画像に変換されたことが図 2.9(c) および図 2.9(d) からわかる. しかし, 図 2.10 では, 画像の背景の白い領域が黒みを帯び, 不自然な画像が出力された. また, 背景がざらついた印象を受ける. 画像全体の画素値が低下したことは, 図 2.10(c) および図 2.10(d) からわかる. このような問題は, HE によって原画像の明度分布に関わらず一様分布に近づけられ, 過度な強調が起こってしまったと考えられる.

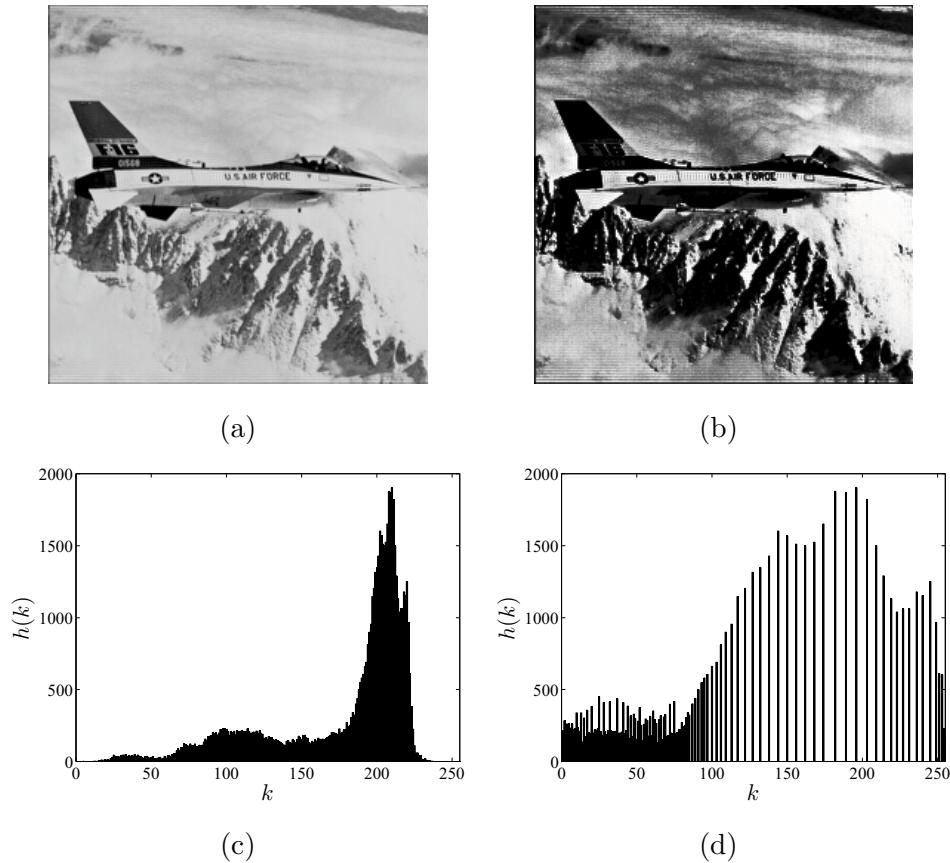


図 2.10: 画像 “Airplane” の原画像および HE の処理結果. (a) 原画像, (b) HE の処理結果, (c) 画像 (a) のヒストグラム, (d) 画像 (b) のヒストグラム

Fig.2.10: Original and the resultant images of “Airplane”. (a) Original image, (b) Resultant image of HE, (c) Histogram of image (a), (d) Histogram of image (b)

2.5 勾配ノルムに基づくヒストグラム均等化

前節で述べた通り, HE では過度な強調が起きるおそれがある. 井上らは, 勾配ノルムによって重みづけされた明度ヒストグラムを用いることで, 平坦部における過度な強調を抑制する枠組みを提案した²². 井上らの手法は HE と同様, グレースケール画像を対象としたコントラスト強調法である.

以下では, 井上らの手法の処理手順について述べる. まず, 入力画像の勾配ノルムを算出する. 入力画像の画素 i, j における勾配ノルム $w(i, j)$ を以下の式に従って算出する.

$$w(i, j) = \sqrt{dv^2(i, j) + dh^2(i, j)}. \quad (2.9)$$



図 2.11: 画像 “Airplane” の勾配ノルム画像

Fig.2.11: An image of gradient norm of “Airplane”

ここで, $dv(i, j)$ は垂直方向の差分であり, 以下の式で定義される.

$$dv(i, j) = \begin{cases} dv_B(i, j), & \text{if } |dv_B(i, j)| \geq |dv_F(i, j)| \\ dv_F(i, j), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$dv_B(i, j) = \begin{cases} x(i, j) - x(i-1, j), & \text{if } i-1 \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$dv_F(i, j) = \begin{cases} x(i, j) - x(i+1, j), & \text{if } i+1 \leq M \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.12)$$

同様に, $dh(i, j)$ は垂直方向の差分であり, 以下の式で定義される.

$$dh(i, j) = \begin{cases} dh_B(i, j), & \text{if } |dh_B(i, j)| \geq |dh_F(i, j)| \\ dh_F(i, j), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$dh_B(i, j) = \begin{cases} x(i, j) - x(i, j-1), & \text{if } j-1 \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.14)$$

$$dh_F(i, j) = \begin{cases} x(i, j+1) - x(i, j), & \text{if } j+1 \leq N \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.15)$$

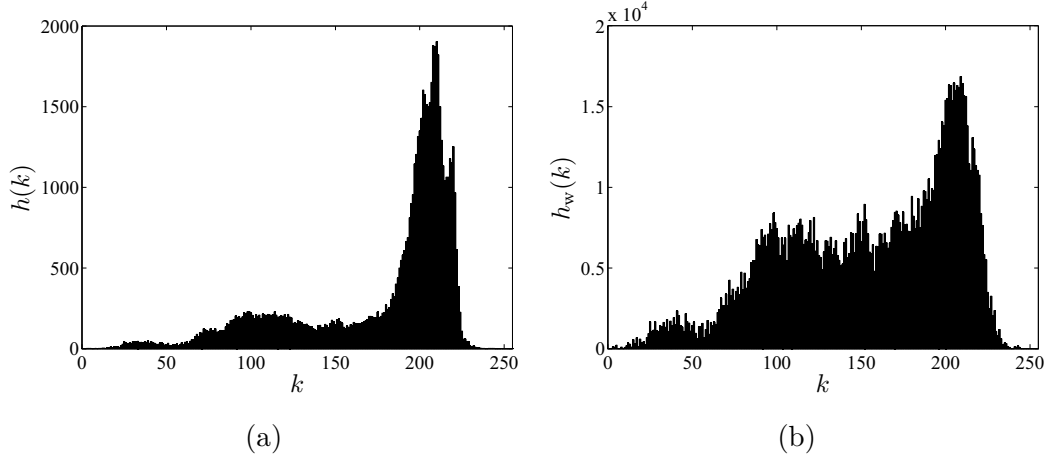


図 2.12: 画像 “Airplane” のヒストグラムおよび勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラム. (a) 重みなしのヒストグラム, (b) 勾配ノルムによる重み付きヒストグラム

Fig.2.12: Histogram and gradient norm-based weighted histogram of “Airplane”. (a) Non-weighted histogram, (b) Gradient norm-based weighted histogram

図 2.11 に画像 “Airplane” の勾配ノルム画像を示す. 図 2.11 では, 最大値が 255 になるように勾配ノルムを正規化したものを画像として表示したものである. 画素値の変化が大きな輪郭部分において, 勾配ノルムが大きな値をとっていることがわかる. 次に, 求めた勾配ノルムを用いて重み付きヒストグラムを作成する. 勾配ノルムによる重み付きヒストグラム h_w は以下の式で求められる.

$$\forall k \in [0, 255], h_w(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j) \delta(k, x(i, j)). \quad (2.16)$$

ここで, $\delta(\cdot)$ は式 (2.2) に示すクロネッカーのデルタである.

グレースケール画像 “Airplane” について, 式 (2.1) および (2.16) によって求められるヒストグラムを, 図 2.12 に示す. 図 2.12(a) は重みなしのヒストグラム, 図 2.12(b) は重み付きヒストグラムである. これらのヒストグラムを比較すると, 勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラムでは, 画素値が 100~150 付近の度数が相対的に高くなっていることが分かる. これは, 画像上部の平坦部において輝度変化が小さいため, 画素値が 200 付近の勾配ノルムが小さくなり, 相対的に画素値が 100~150 付近の重み付き度数が高くなったと考えられる. また, 図 2.12 の累積ヒストグラムをそれぞれ図 2.13 に示す. 図 2.13 から, 重み付き累積ヒストグラムでは累積ヒストグラムの傾きが小さいことが分かる.

ヒストグラム均等化において, 累積ヒストグラムの傾きはヒストグラム均等化におけるコ

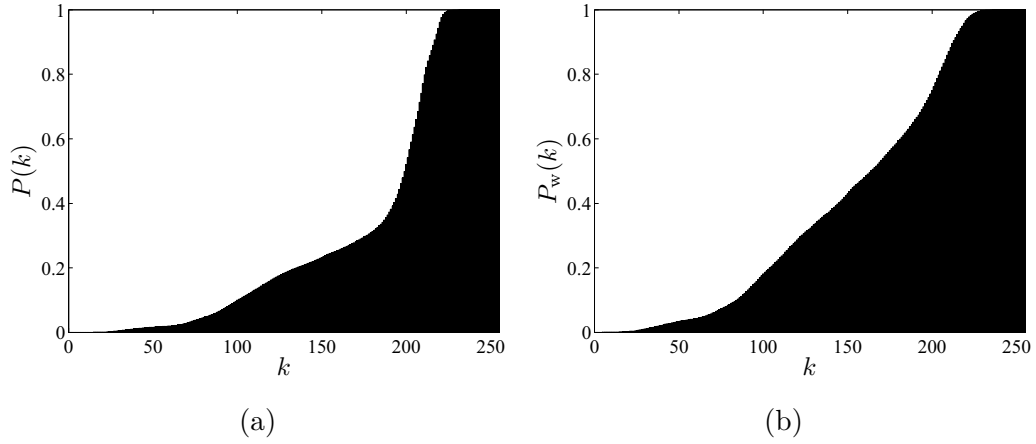


図 2.13: 画像 “Airplane” の正規化累積ヒストグラムおよび勾配ノルムに基づく重み付き正規化累積ヒストグラム. (a) 重みなし正規化累積ヒストグラム, (b) 勾配ノルムによる重み付き正規化累積ヒストグラム

Fig.2.13: Normalized cumulative histogram and gradient norm-based weighted normalized cumulative histogram of “Airplane”. (a) Non-weighted normalized cumulative histogram, (b) Gradient norm-based weighted normalized cumulative histogram

ントラスト強調度合いと直結している。したがって、累積ヒストグラムの傾きが小さいと、ヒストグラム均等化におけるコントラスト強調度合いが弱いことを示す。勾配ノルムによる重み付けを行うことで、平坦部の画素値の強調を抑制することが可能であることがわかる。

勾配ノルムによる重み付きヒストグラム h_w の正規化累積ヒストグラム P_w を求める。位置 (i, j) における出力画素値 $y_{\text{GNHE}}(i, j)$ は正規化累積ヒストグラム P_w と一様分布の正規化累積ヒストグラム P_{unif} を用いて、以下のように求められる。

$$y_{\text{GNHE}}(i, j) = \inf\{z \mid P_{\text{unif}}(z) \geq P_w(x(i, j))\}. \quad (2.17)$$

GNHE の結果画像を図 2.14 および図 2.15 に示す。図 2.14 および図 2.15 において、(a) は GNHE の結果画像、図 (b) は GNHE の結果画像のヒストグラムである。“Girl” に対する GNHE では、背景部分のざらつきの強調を抑制しつつ、コントラスト強調を行うことが出来た。また、HE で黒ずみが発生した “Airplane” においても、GNHE では過度な強調を抑制することで自然なコントラスト強調結果が得られたことがわかる。

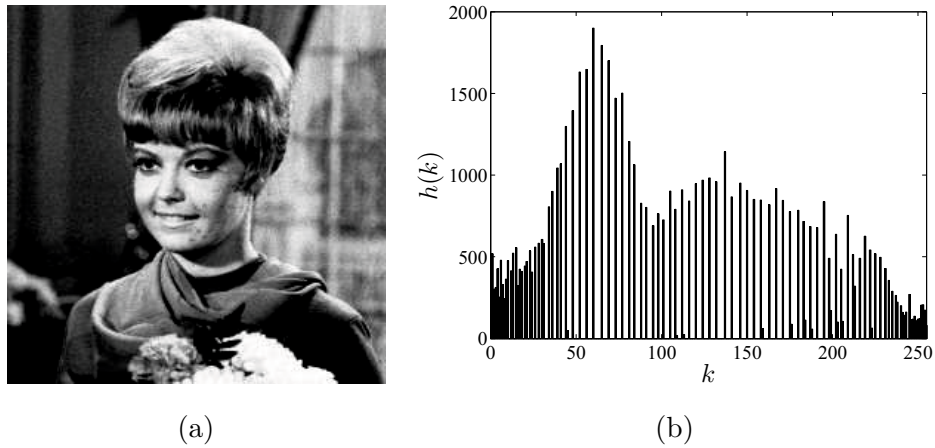


図 2.14: 画像 “Girl” の処理結果とそのヒストグラム. (a) GNHE の処理結果画像, (b) GNHE の処理結果画像のヒストグラム

Fig.2.14: Resultant image of “Girl” and its histogram. (a) Resultant image of the GNHE, (b) Histogram of resultant image of the GNHE

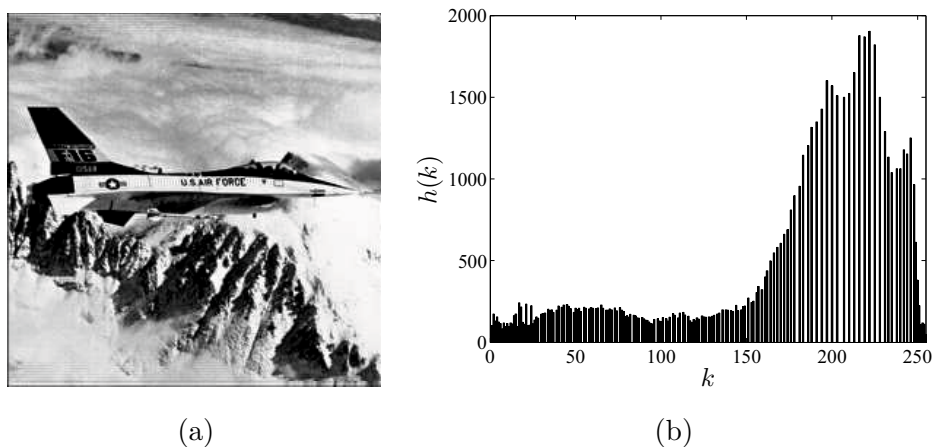


図 2.15: 画像 “Airplane” の処理結果. (a) GNHE の処理結果画像, (b) GNHE の処理結果画像のヒストグラム

Fig.2.15: Resultant image of “Airplane”. (a) Resultant image of the GNHE, (b) Histogram of resultant image of the GNHE

2.6 色空間の形状を考慮したカラー画像に対する従来のヒストグラム均等化

本節では、カラー画像に対する従来のコントラスト強調法として、HSI 色空間⁷の形状を考慮したヒストグラム均等化²⁸について述べる。村平らは、RGB 色空間から変換可能な HSI

色空間上で、明度分布に対し処理を施すことでカラー画像のコントラストを強調する方法を提案した。明度に対するコントラスト強調処理では、HSI 色空間における理想的な明度分布に基づいた変換が行われる。また、彩度成分に対しヒストグラムによる強調処理を行い、入力画像の鮮やかさが強調される。彩度の強調度合いは重みによって調節可能である。

村平らの手法では、まず、入力画像を RGB 色空間から HSI 色空間へ変換し、変換後の画素を $(H(i, j), S(i, j), I(i, j))$ とする。ここで、 $H_{in}(i, j)$, $S_{in}(i, j)$, $I_{in}(i, j)$ はそれぞれ色相、彩度、明度を表す。村平らの手法では、HSI 色空間において、彩度成分および明度成分に対しそれぞれコントラスト強調処理が行われる。ここでは、まず、彩度成分に対する処理について述べる。彩度成分の正規化累積ヒストグラムを P_s とする。ここで、ヒストグラムのビン数は 256 とする。入力画像の彩度成分 S_{in} の最小値を S_{min} , 最大値を S_{max} , とすると、変換後の彩度 $S'(i, j)$ は、 P_s を用いて以下の式で表される。

$$S'(i, j) = \inf\{z \mid P_{unif}(z) \geq P_s(S_{in}(i, j))\}. \quad (2.18)$$

上記の式によって画像の鮮やかさが強調される。しかし、彩度成分を過度に強調してしまうと、人物画像の肌色部分が赤みを帯びるなど、不自然な画像が出力される問題がある。そのため、村平らの手法では、彩度の強調度合いを重みによって調節し、過度な強調を抑制することが可能である。最終的な出力結果 $S_{out}(i, j)$ は、重みを α_m とすると、以下の式で表される。

$$S_{out}(i, j) = \alpha_m S'(i, j) + (1 - \alpha_m) S(i, j). \quad (2.19)$$

重み α_m は $[0, 1]$ の範囲で変更可能であり、重みの設定指針はユーザの好みに委ねられている。重み α_m が大きい場合、彩度の強調度合いが高くなる。

次に、明度成分に対する処理について述べる。図 2.16 に、HSI 色空間における色空間の形状を考慮した明度分布²⁸を示す。入力画像の明度成分を色空間の形状を考慮した明度分布に従って変換し、変換後の明度成分を $I_{out}(i, j)$ と表す。入力画像の色相 $H_{in}(i, j)$, 変換処理によって得られた彩度 $S_{out}(i, j)$, 明度 $I_{out}(i, j)$ を用いて HSI 色空間から RGB 色空間に逆変換を行う。

図 2.17 に村平らの手法による処理結果を示す。図 2.17 において (a) は原画像、(b) は村平らの手法の結果画像を示す。ここで、重み α_m は文献²⁸を参考に決定した。図 2.17 から分かるように、出力画像は少し青みを帯びた不自然な画像である。このような画像が出力された原因は、背景の白い領域がわずかに青みを帯びており、彩度が強調され青みが強調されてしまったためである。また、HSI 色空間における理想的な明度分布では、中間調の度数が最も

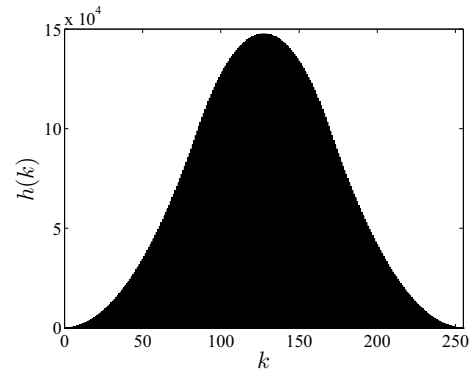
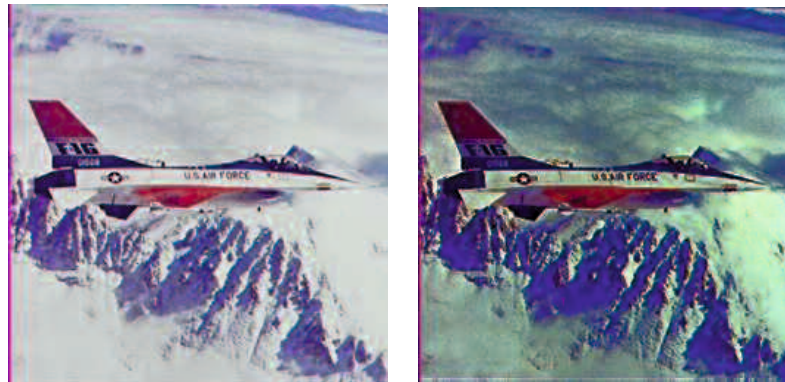


図 2.16: HSI 色空間の明度成分の分布

Fig.2.16: Ideal intensity distribution in HSI color space



(a)

(b)

図 2.17: “Airplane” に対する村平らの手法の処理結果. (a) 原画像, (b) 結果画像 ($\alpha_m = 0.3$)Fig.2.17: Resultant image of Murahira et al.’s method for “Airplane”. (a) Original image, (b) Resultant image ($\alpha_m = 0.3$)

高いことがわかる. HSI 色空間において, 中間調は赤, 緑, 青, シアン, マゼンタ, 色などの鮮やかな色が多く存在する. したがって, 彩度および明度に対するコントラスト強調によって, 画素が鮮やかな色に近づき彩度が上昇してしまったと考えられる.

2.7 結言

本章では, グレースケール画像に対するコントラスト強調法として HE を挙げ, その問題点について述べた. また, その問題を解決するために提案された GNHE についても述べた. さらに, カラー画像に対する色空間の形状を考慮したコントラスト強調法について述べ, 従

来手法では良好な結果が得られないことを示した。

種々の実験の結果，従来手法から得られる知見として，

- 明度分布の偏りをならすことで明暗差を強調することができる，
- 勾配ノルムによって重み付けされた明度ヒストグラムを用いることで，平坦部におけるざらつきの強調を抑制することができる，
- 色空間の形状を考慮した明度分布を用いることで，白や黒付近に過剰に集中することなく変換が行われる

ことを確認した。

一方，従来手法の欠点として，

- 原画像のヒストグラムを単純に一様分布に近づけるだけでは過度な強調が起きる場合がある，
- 彩度強調を行うと色みを帯びて不自然な画像が得られる場合がある，

ことを確認した。

第3章 HSV 色空間におけるコントラスト強調

3.1 緒言

一般的なコントラスト強調法である HE では、過度な強調によってざらついた画像が出力されるという問題があった。このような問題に対し、井上らは GNHE²² を提案し、平坦部における過度な強調の抑制を図った。カラー画像に対するコントラスト強調では、色空間の形状を考慮したコントラスト強調処理が提案されているものの、ざらつきの抑制や画質向上の面で改善の余地がある。

本章では、HSV 色空間の形状を考慮した新しい明度コントラスト強調法について述べる³⁷。HSV 色空間は RGB 色空間から直接変換可能であり、色相、彩度、明度を取り扱うことのできる色空間であるため、色相を保存した処理を簡単に実現できるという利点がある。また、HSV 色空間の特徴として、明度を変化させるだけでは色域外に色が飛び出ることはない。したがって、色域内での処理を保証した明度コントラスト強調処理が簡単に実現できる。提案手法では、色空間内で効果的に画素分布を広げるために、HSV 色空間における理想的な明度ヒストグラムを定義し、それに基づいてコントラスト強調を行う。また、過度な強調を抑制するために、勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラムを用いるとともに、明度コントラストの強調度合いを調節する仕組みを導入する。

3.2 節では、HSV 色空間について述べる。3.3 節では、HSV 色空間における理想的な明度分布について説明する。3.4 節では、理想的な明度分布に基づく新たな明度コントラスト強調法について述べる。3.5 節は比較実験である。3.6 節は結言である。

3.2 HSV 色空間

画像表示装置などで画像の色合いを調整する場合、R, G, B 成分の画素値を直接指定する方法が一般的である。しかし、R, G, B 成分の画素値を変化させて色調をコントロールすることは容易ではない。人間の感覚にとっては、色相 (H: Hue), 彩度 (S: Saturation), 明度 (V: Value) の 3 成分を扱う方が容易である。そこで、RGB 色空間から HSV 色空間へ変換を

行い、何らかの処理を施し、HSV 色空間から RGB 色空間へと逆変換する処理の流れが一般的である。Smith らは、6 角錐モデルである HSV 色空間を提案した³⁸。また、Joblove らは双 6 角錐モデルを提案した³⁹。しかし、これらの色空間では色相を保存することは簡単であるものの、色域内での処理を保証した処理を行うためには色域判定処理が必要となり、明度変換の処理に制約が課せられる。色相を保存し、色域内での処理を保証するためには、円柱モデルの HSV 色空間を用いることが考えられる。したがって、ここでは、円柱モデルの HSV 色空間について述べる。

カラー画像の画素 (i, j) における R, G, B 成分の画素値をそれぞれ $x_r(i, j)$, $x_g(i, j)$, $x_b(i, j)$ とする。また、色相 H , 彩度 S , 明度 V を $x_h(i, j)$, $x_s(i, j)$, $x_v(i, j)$ とする。色相 $x_h(i, j)$, 彩度 $x_s(i, j)$ の値域を $[0, 1]$ とし、明度 $x_v(i, j)$ の値域を $[0, 255]$ とする。RGB 色空間から HSV 色空間への変換は、以下の式に従って行われる。

$$x_{\max}(i, j) = \max\{x_r(i, j), x_g(i, j), x_b(i, j)\}, \quad (3.1)$$

$$x_{\min}(i, j) = \min\{x_r(i, j), x_g(i, j), x_b(i, j)\}, \quad (3.2)$$

$$x_v(i, j) = x_{\max}(i, j), \quad (3.3)$$

$$x_s(i, j) = \frac{x_{\max}(i, j) - x_{\min}(i, j)}{x_{\max}(i, j)}, \quad (3.4)$$

$$x_h(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{6}(x_b(i, j) - x_g(i, j)), & \text{if } x_r(i, j) = x_{\max}(i, j) \\ \frac{1}{6}(2 + x_r(i, j) - x_b(i, j)), & \text{if } x_g(i, j) = x_{\max}(i, j) \\ \frac{1}{6}(4 + x_g(i, j) - x_r(i, j)), & \text{if } x_b(i, j) = x_{\max}(i, j). \end{cases} \quad (3.5)$$

ただし、 $x_h(i, j) < 0$ のときは x_h に 1 を加えるものとする。

次に、HSV 色空間から RGB 色空間への逆変換について述べる。逆変換後の R, G, B 成分をそれぞれ $y_r(i, j)$, $y_g(i, j)$, $y_b(i, j)$ とする。 $x_s(i, j) = 0$ のとき、 $x_h(i, j)$ の値にかかわらず、各成分を以下のように定義する。

$$y_r(i, j) = x_v(i, j), \quad (3.6)$$

$$y_g(i, j) = x_v(i, j), \quad (3.7)$$

$$y_b(i, j) = x_v(i, j). \quad (3.8)$$

$x_s(i, j) \neq 0$ のとき、まず、以下のように $h(i, j)$, $U(i, j)$, $Q(i, j)$, $T(i, j)$ を求める。

$$h(i, j) = \lfloor H'(i, j) \rfloor, \quad (3.9)$$

$$H'(i, j) = \begin{cases} 0, & x_h(i, j) = 1 \\ 6x_h(i, j), & x_h(i, j) \neq 1, \end{cases} \quad (3.10)$$

$$U(i, j) = x_{\max}(1 - x_s(i, j)), \quad (3.11)$$

$$Q(i, j) = x_{\max}(1 - x_s(i, j)(H'(i, j) - h(i, j))), \quad (3.12)$$

$$T(i, j) = x_{\max}(1 - x_s(i, j)(1 - H'(i, j) + h(i, j))). \quad (3.13)$$

最後に、 $h(i, j)$ の値によって $y_r(i, j)$, $y_g(i, j)$, $y_b(i, j)$ を定める。

$$y_r(i, j) = \begin{cases} V(i, j), & h(i, j) = 0 \vee h(i, j) = 5 \\ Q(i, j), & h(i, j) = 1 \\ U(i, j), & h(i, j) = 2 \vee h(i, j) = 3 \\ T(i, j), & h(i, j) = 4, \end{cases} \quad (3.14)$$

$$y_g(i, j) = \begin{cases} T(i, j), & h(i, j) = 0 \\ V(i, j), & h(i, j) = 1 \vee h(i, j) = 2 \\ Q(i, j), & h(i, j) = 3 \\ U(i, j), & h(i, j) = 4 \vee h(i, j) = 5, \end{cases} \quad (3.15)$$

$$y_b(i, j) = \begin{cases} U(i, j), & h(i, j) = 0 \vee h(i, j) = 1 \\ T(i, j), & h(i, j) = 2 \\ V(i, j), & h(i, j) = 3 \vee h(i, j) = 4 \\ Q(i, j), & h(i, j) = 5. \end{cases} \quad (3.16)$$

HSV 色空間の概念図を図3.1に示す。図3.1に示すように、上記の式によって定義された HSV 色空間は円柱形の形状をしている。したがって、色相および彩度が $[0, 1]$ かつ明度が $[0, 255]$ であれば、画素の各成分がどのような組み合わせであっても色域内に画素が存在する。

3.3 HSV 色空間における理想的な目標ヒストグラム

前節で述べた HSV 色空間では、円柱型の色空間において色相、彩度、明度が定義された。本節では、HSV 色空間における色分布について述べ、HSV 色空間における理想的な明度分布について述べる。

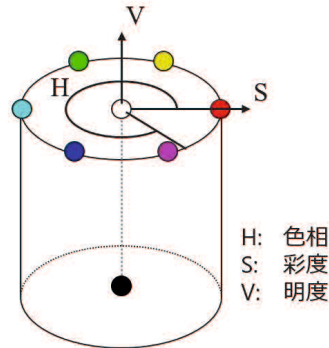


図 3.1: HSV 色空間の概念図

Fig.3.1: Schematic diagram of HSV color space

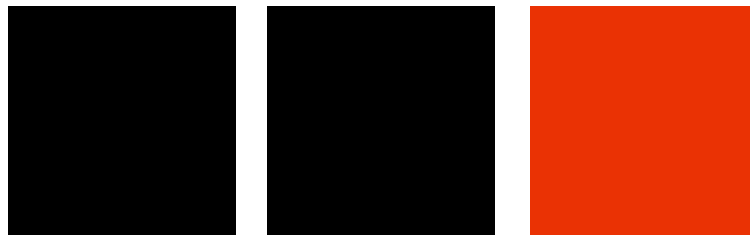
(a) $S = 0, V = 0$ (b) $S = 1, V = 1$ (c) $S = 1, V = 255$ 図 3.2: 単色画像の比較. (a) $S = 0, V = 0; (r, g, b) = (0, 0, 0)$, (b) $S = 1, V = 1; (r, g, b) = (1, 0, 0)$, (c) $S = 1, V = 255; (r, g, b) = (255, 0, 0)$ Fig.3.2: Comparison between unicolor images. (a) $S = 0, V = 0; (r, g, b) = (0, 0, 0)$, (b) $S = 1, V = 1; (r, g, b) = (1, 0, 0)$, (c) $S = 1, V = 255; (r, g, b) = (255, 0, 0)$

図 3.2 に, HSV 色空間における彩度 S , 明度 V とその色を示す. 図 3.2(a) の色は黒であり, 式 (3.3), (3.4) に従うと $S = 0, V = 0$ となる. 黒は無彩色であるため彩度と明度がいずれも 0 であることは容易に理解できる. 図 3.2(b) の色はわずかに赤みがかった黒である. したがって, RGB 色空間において最も黒に近い有彩色であり, その鮮やかさは低いと考えられる. しかし, 図 3.2(b) と図 3.2(c) の彩度はどちらも 1 であり, 図 3.2 のような赤みがかった黒は図 3.2(c) のような鮮やかな赤色と同じ彩度をもつ. このように, 円柱型の HSV 色空間において, 彩度は人間の感覚とは合致しない. 以下に理由を示す. HSV 色空間は円柱型の形状をしており, ある色相 H における S-V 平面は図 3.3 のようになる. 図 3.3 において, 平面の左側から右側にかけて彩度が上昇し, 平面の下から上にかけて明度が上昇する. この S-V 平面から, 彩度が高かったとしても明度が低い色 (平面の右下付近の色) は鮮やかさが低いことがわかる.

式 (3.1) から式 (3.5) によって変換される HSV 色空間は, 色域の関係上, 6 角錐モデルの彩

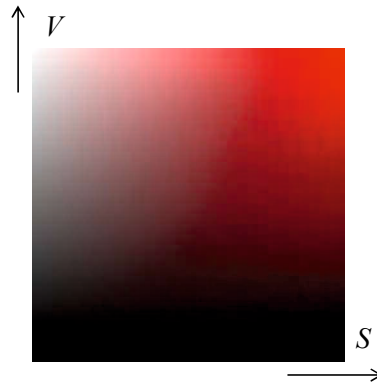


図 3.3: HSV 色空間の S-V 平面

Fig.3.3: S-V plane in HSV color space

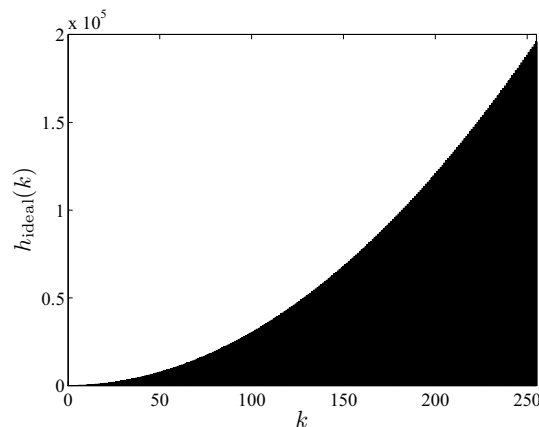


図 3.4: HSV 色空間における理想的な明度分布.

Fig.3.4: Ideal value distribution in HSV color space.

度を正規化によって広げ、円柱型の形状に変換したものである。具体的には、式 (3.4) の分母が明度成分であり、これにより明度が低い色においても最大彩度が 1 になるように正規化されている。したがって、円柱形ではあるものの、明度が低い部分では色分布が疎になっており、明度の高い部分では色分布が密になっている。このような色空間において、明度成分を一様分布に近づけると、明度が低い部分に画素が集中してしまう。HE とは異なる考え方ではあるが、明度の低い画素が少なく、明度の高い画素が多く存在する色分布であるとき、色空間内で画素が均等に分布していると言える。したがって、HSV 色空間における明度分布を考慮したコントラスト強調処理を行うことが望ましいと考えられる。

以下では、HSV 色空間における理想的な明度分布の形状について述べる。まず、グレースケール画像に対する HE では、画素値を一様分布に近づける処理が行われる。これをカラー

画像に対する処理へと拡張するには、RGB 色空間での一様分布を考慮する必要がある。そこで、RGB 色空間における一様分布（例えば、24 ビットフルカラー画像で取りうる全ての色（= 16,777,216 色）が1度ずつ出現する画像の色分布）を考える。このときの HSV 色空間における明度ヒストグラム h_{ideal} を図 3.4 に示す。図 3.4 から、RGB 色空間における一様分布には明度の低い画素が少なく、明度の高い画素が多いことがわかる。具体的には、HSV 色空間の形状を考慮した明度分布 h_{ideal} は以下の式で定式化される。

$$\forall k \in [0, 255], h_{\text{ideal}}(k) = 3k(k+1) + 1. \quad (3.17)$$

3.4 理想的なヒストグラムを用いた HSV 色空間におけるコントラスト強調

カラー画像のコントラスト強調では、RGB 色空間に戻したときに一様な明度分布を実現するためには、原画像の明度分布を HSV 色空間において前節で述べた明度分布に近づける処理を行うことが妥当である。また、GNHE²² の実験結果から、原画像のヒストグラムには勾配ノルムによる重み付けを施したほうが過度な強調を抑制できると考えられる。さらに、原画像の明度が低い画像においては、コントラストの強調度合いを自動的に調節できる仕組みを導入することで不自然な強調を抑制することが望ましい。ここでは、提案手法の処理手順について詳述する。

まず、24 ビットフルカラー画像を RGB 色空間から HSV 色空間へ変換し、各画素を $(x_h(i, j), x_s(i, j), x_v(i, j))$ とする。次に、明度成分の勾配ノルムによる重み付きヒストグラム h_{v_w} を、以下の式に従って求める。

$$\forall k \in [0, 255], h_{v_w}(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_v(i, j) \delta(k, x_v(i, j)). \quad (3.18)$$

$$w_v(i, j) = \sqrt{dv_v^2(i, j) + dh_v^2(i, j)}. \quad (3.19)$$

ここで、 $dv_v(i, j)$ は明度の垂直方向の差分であり、以下の式で定義される。

$$dv_v(i, j) = \begin{cases} dv_{v_B}(i, j), & \text{if } |dv_{v_B}(i, j)| \geq |dv_{v_F}(i, j)| \\ dv_{v_F}(i, j), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$dv_{v_B}(i, j) = \begin{cases} x_v(i, j) - x_v(i-1, j), & \text{if } i-1 \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.21)$$

$$dv_{v_F}(i, j) = \begin{cases} x_v(i, j) - x_v(i+1, j), & \text{if } i+1 \leq M \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.22)$$

同様に, $dh_v(i, j)$ は垂直方向の差分であり, 以下の式で定義される.

$$dh_v(i, j) = \begin{cases} dh_{v_B}(i, j), & \text{if } |dh_{v_B}(i, j)| \geq |dh_{v_F}(i, j)| \\ dh_{v_F}(i, j), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$dh_{v_B}(i, j) = \begin{cases} x_v(i, j) - x_v(i, j-1), & \text{if } j-1 \geq 1 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.24)$$

$$dh_{v_F}(i, j) = \begin{cases} x_v(i, j+1) - x_v(i, j), & \text{if } j+1 \leq N \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.25)$$

次に, HSV 色空間における理想的な明度ヒストグラム h_{ideal} を式 (3.17) に従って求める. ヒストグラム指定法において, 目標のヒストグラムを h_{ideal} とすると, 明度ヒストグラムが急激に変化してしまうため, 過度なコントラスト強調結果が得られるおそれがある. そこで, 原画像の平均明度および理想的なヒストグラムの平均明度に基づき, コントラスト強調度合いの調節を図る. HSV 色空間における理想的な明度ヒストグラム h_{ideal} の平均明度 $\overline{V_{\text{ideal}}}$ は以下の式によって求められる.

$$\begin{aligned} \overline{V_{\text{ideal}}} &= \frac{\sum_{k=0}^{255} kh_{\text{ideal}}(k)}{\sum_{k=0}^{255} h_{\text{ideal}}(k)} \\ &\approx 191.5 \end{aligned} \quad (3.26)$$

式 (3.26) から, h_{ideal} を目標のヒストグラムに設定した場合, 原画像の平均明度にかかわらず, 処理結果画像の平均明度は 191.5 程度になることがわかる. したがって, 原画像の平均明度が $\overline{V_{\text{ideal}}}$ より小さい場合, 画像が全体の明度が上昇することになる. このことから, 原画像の平均明度が低ければ低いほど, 変換前後での画像の印象の変化が大きくなり, 過度な強調結果が得られるおそれがある. これを防ぐために, 原画像の平均明度に応じて, コントラストの強調度合いを弱める処理を施す. 具体的には, 提案手法では目標の正規化明度ヒストグラ

△ $p_{v_{\text{mix}}}$ を, 以下の式によって求める.

$$\forall k \in [0, 255], p_{v_{\text{mix}}}(k) = w_{\text{mix}}p_{\text{ideal}}(k) + (1 - w_{\text{mix}})p_{v_w}(k), \quad (3.27)$$

$$w_{\text{mix}} = \Phi\left(\frac{\bar{V}}{\bar{V}_{\text{ideal}}}\right), \quad (3.28)$$

$$\Phi(x) = \begin{cases} x, & \text{if } x \leq 1 \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.29)$$

ここで, $p_{\text{ideal}}(k)$ および $p_{v_w}(k)$ は, $h_{\text{ideal}}(k)$ および $h_{v_w}(k)$ を以下の式によって正規化したものである.

$$\forall k \in [0, 255], p_{\text{ideal}}(k) = \frac{h_{\text{ideal}}(k)}{\sum_{k=0}^{255} h_{\text{ideal}}(k)}, \quad (3.30)$$

$$\forall k \in [0, 255], p_{v_w}(k) = \frac{h_{v_w}(k)}{\sum_{k=0}^{255} h_{v_w}(k)}. \quad (3.31)$$

処理対象ヒストグラムを p_{v_w} , 目標のヒストグラムを $p_{v_{\text{mix}}}$ とし, ヒストグラム指定法によって変換関数 t_{v_w} を求める. 求めた変換関数 t_{v_w} を用い, 以下の式によって原画像の明度を変換する.

$$y_{v_w}(i, j) = t_{v_w}(x_v(i, j)). \quad (3.32)$$

最後に, 原画像の色相, 原画像の彩度, 変換後の明度 $(x_h(i, j), x_s(i, j), y_{v_w}(i, j))$ を RGB 色空間へ逆変換し, 処理結果画像の各画素値 $(y_{r_{\text{out1}}}(i, j), y_{g_{\text{out1}}}(i, j), y_{b_{\text{out1}}}(i, j))$ を得る.

3.5 比較実験

3.5.1 実験準備

提案手法の有効性を検証するために, 従来手法との比較実験を行う. 実験には, 図 3.5 に示す明るさの異なる 4 枚の画像を用いた. 画像のサイズはそれぞれ, “Balloon” および “Girl”, “Keychain” は 256×256 , “Balboapark” は 384×512 画素である. 本実験では, 以下の 3 手法と提案手法の比較を行う.

カラー GNHE (CGNHE): HSV 色空間の明度成分に対し, HE を適用したもの.

色空間を考慮した HE (HECSS): HSV 色空間の明度成分に対し, 理想的な明度ヒストグラムを目標のヒストグラムとしてヒストグラム指定法を適用したもの.



図 3.5: 原画像. (a) Balloon, (b) Girl, (c) Balboapark, (d) Keychain

Fig.3.5: Original images. (a) Balloon, (b) Girl, (c) Balboapark, (d) Keychain

村平らの手法²⁸ (Murahira2012) : HSI 色空間の形状を考慮したコントラスト強調法. 処理結果に対し彩度強調も施される.

提案手法 (Prop.) : 前節で述べた手法.

これらの4手法について主観評価を行い, 提案手法の有効性を検証する. 客観評価として, 主観評価を定量化した一対比較法⁴⁰ および平均明度差を用いる.

3.5.2 実験結果

各手法の実行結果を図 3.6 から図 3.12 に示す. 図 3.6 および図 3.7 は画像 “Balloon” の実験結果およびその拡大図である. 図 3.8, 図 3.9, 図 3.10 は画像 “Girl” の実験結果およびその拡大図である. 図 3.11 は画像 “Balboapark” の実験結果である. 図 3.12 は画像 “Keychain” の実験結果である. また, 図 3.6~図 3.12 において, (a) は原画像, (b) はカラー GNHE, (c) は

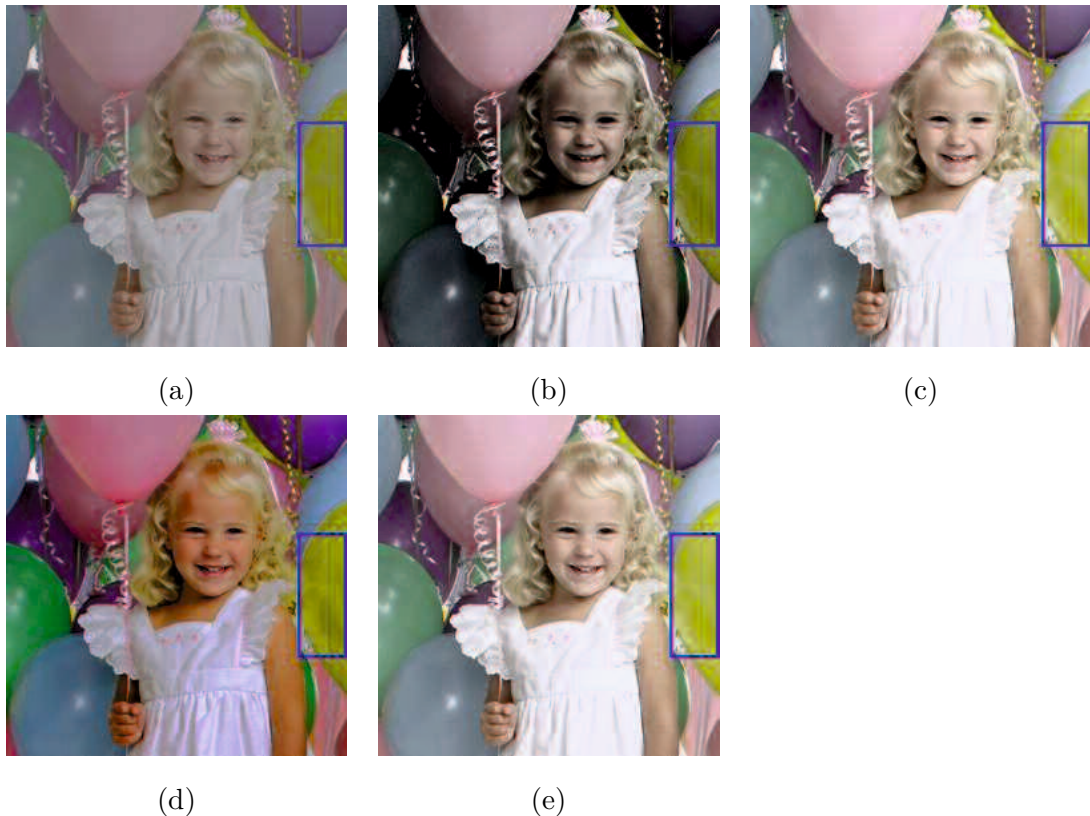


図 3.6: Balloon の実験結果. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.4$), (e) 提案手法.

Fig.3.6: Experimental results for “Balloon”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

色空間を考慮した HE, (d) は村平らの手法, (e) は提案手法である.

“Balloon” の結果 : 図 3.6 は実験結果および拡大図の位置を示している. 図 3.7 に, 青い四角で囲まれた領域の拡大図を示す. カラー GNHE(図 3.6(b)) では, 画像の輝度が低下し, 全体的に黒みを帯びた不自然な画像になった. また, 村平らの手法(図 3.6(d)) では, 全体的に色が鮮やかになった. しかし, 図 3.7 に示す拡大図では, 黄色い風船の平坦部においてざらつきが発生した. 色空間を考慮した HE(図 3.6(c)), 提案手法(図 3.6(e)) の処理結果には大きな差が無く, どちらも自然な画像となった.

“Girl” の結果 : 図 3.8 は実験結果および拡大図の位置である. 図 3.9 に, 緑色の四角で囲まれた領域の拡大図を示す. また, 図 3.10 に, 黄色い四角で囲まれた領域の拡大図を示す. 色空間を考慮した HE(図 3.10(c)) と村平らの手法(図 3.10(d)) では, 画像の左側の壁に着目すると, ざらつきが確認できる. 図 3.9 に示す拡大図では, 村平らの手法において, 人の肌が赤み

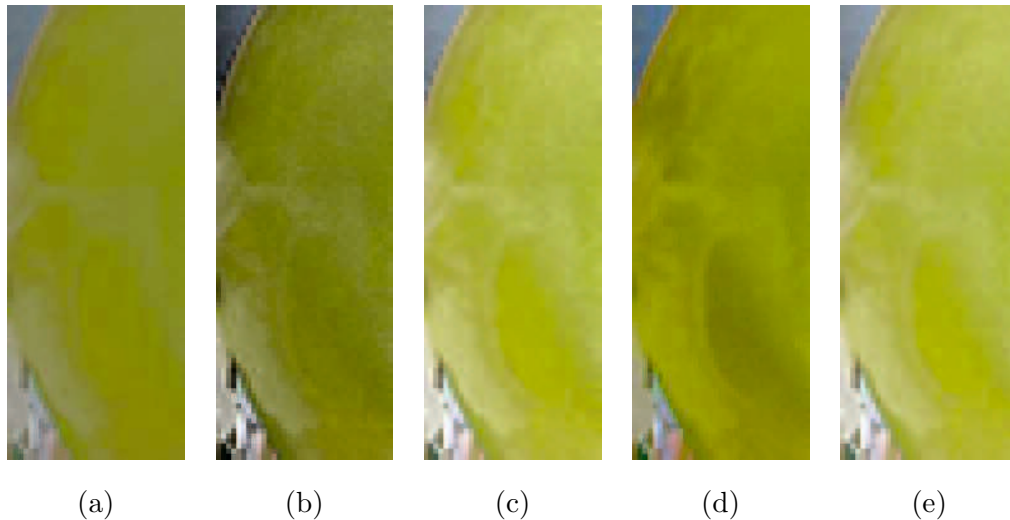


図 3.7: “Balloon” の実験結果の拡大図. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.4$), (e) 提案手法.

Fig.3.7: Enlarged images of “Balloon”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

を帯びたり目が青みを帯びたことがわかる. カラー GNHE(図 3.8(b)) や提案手法 (図 3.8(e), 図 3.9(e), 図 3.10(e)) では, 他の手法よりも画像のコントラストが自然に強調された.

“Balboapark” の結果: 画像の木や塔の模様に着目すると, 色空間を考慮した HE(図 3.11(c)), 村平らの手法 (図 3.11(d)) では, 詳細部の模様がつぶれたことがわかる. 一方, カラー GNHE(図 3.11(b)), 提案手法 (図 3.11(e)) では, 詳細部の模様が保たれたまま, 画像が自然に強調された.

“Keychain” の結果: カラー GNHE(図 3.12(b)) では, 画像全体の明度が低下し, 全体的に黒みを帯びた. 色空間を考慮した HE(図 3.12(c)), 村平らの手法 (図 3.12(d)) では, 画像上部の白い平坦部にざらつきが発生した. 提案手法 (図 3.12(e)) では, 画像全体が少し暗くなったが, 画像に不自然さは感じられない.

図 3.13 に, 画像 “Balloon” に対する各実験結果の明度ヒストグラムを示す. 図 3.13(b) のカラー GNHE では, 明度分布が均等に広げられたことがわかる. 一方, 図 3.13(c) の色空間を考慮した HE や (e) の提案手法では, 明度が上昇する方向に広げられており, HSV 色空間における理想的な明度分布に近づいたことがわかる.

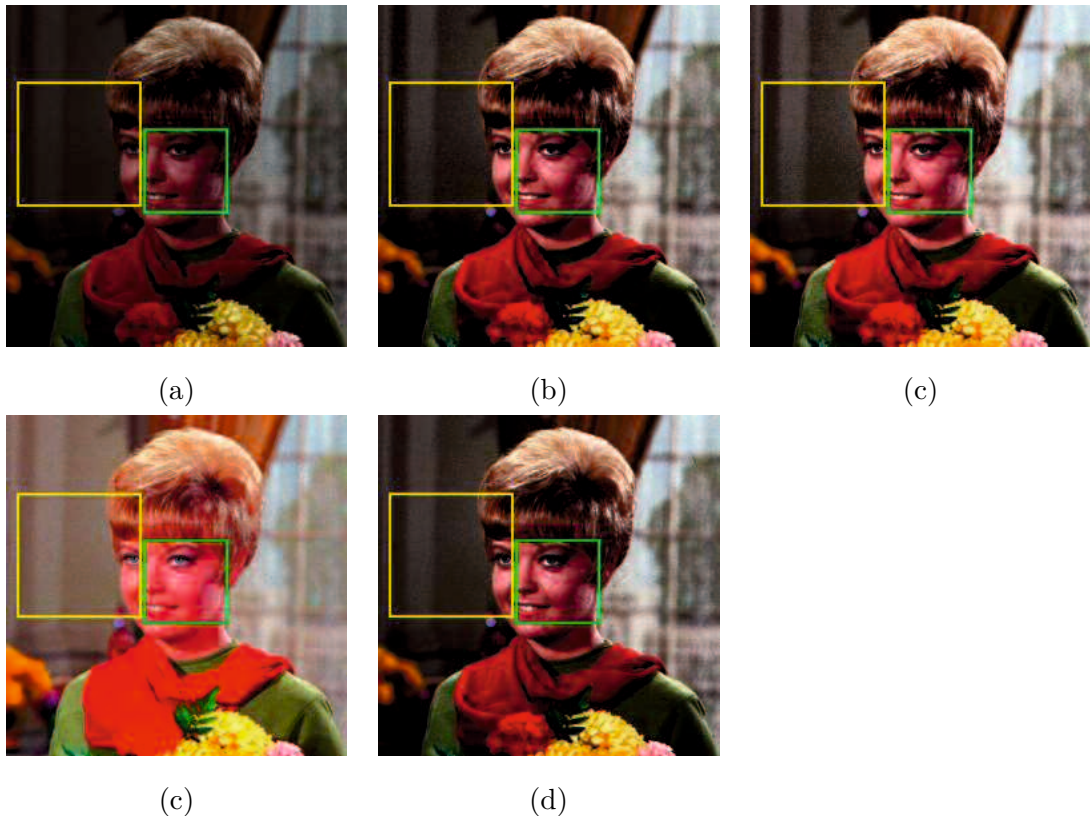


図 3.8: Girl の実験結果. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.1$), (e) 提案手法.

Fig.3.8: Experimental results for “Girl”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

3.5.3 実験結果の考察

カラー GNHE では、図 3.6(b) と図 3.12(b) からわかるように、全体的に黒みを帯びた不自然な画像になった。これは、色空間の形状が考慮されていないため、原画像よりも明度が低下したことが原因であると考えられる。このことは、図 3.13(b) に示すヒストグラムが理想的な明度分布とは異なっており、全体的に明度が低くなってしまったことから確認できる。

色空間を考慮した HE では、図 3.12(c) からわかるように、画像上部の白い平坦部にざらつきが発生した。また、図 3.11(c) では、木や塔の模様が崩れてしまった。これらの原因として、HE によって原画像の明度成分のわずかな違いが過度に強調されたことが挙げられる。

村平らの手法では、図 3.9(d) からわかるように、人の肌が赤みを帯びたり、目が青みを帯びた。色みを帯びた原因として、彩度成分に対する過度な強調が挙げられる。また、図 3.12(d)

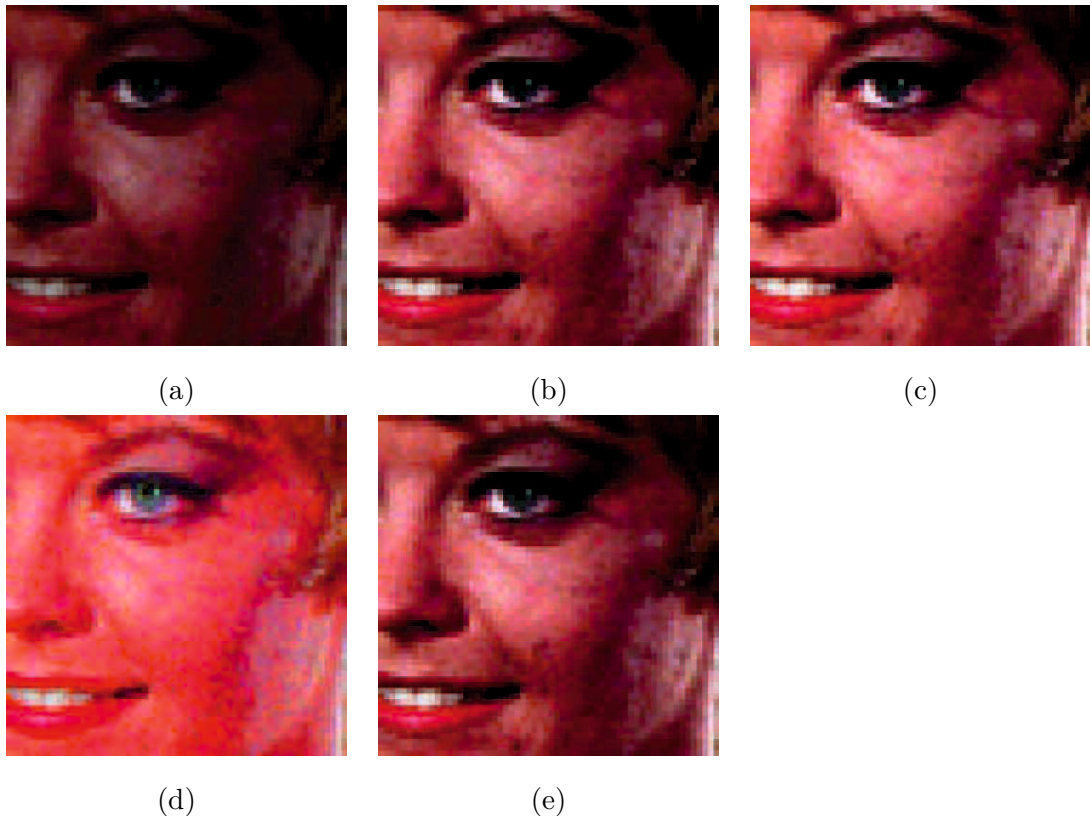


図 3.9: Girl の実験結果の拡大図 (顔周辺). (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.1$), (e) 提案手法.

Fig.3.9: Enlarged images of "Girl" (face). (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

では, 画像上部の白い平坦部でざらつきが発生した. これは, **HECSS** と同様, 明度成分のわずかな違いが過度に強調されたことが原因であると考えられる.

提案手法では, 全ての実験画像において自然なコントラスト強調が実現された. 図 3.13(e) に示す明度ヒストグラムが理想的な分布に近づいていることから, 理想的なコントラスト強調を実現できたことがわかる.

3.5.4 一対比較法による数値評価

実験結果の数値的な評価方法として, 一対比較法を用いた. 一対比較法とは, 複数の刺激の中から 2 つを左右に並べ, 比較を行う. ここで, 刺激とは比較する画像のことを指す. 被験者は, 左と右の刺激のうち, どちらが良いか $[-2, -1, 0, 1, 2]$ の値で点数をつける. 左より

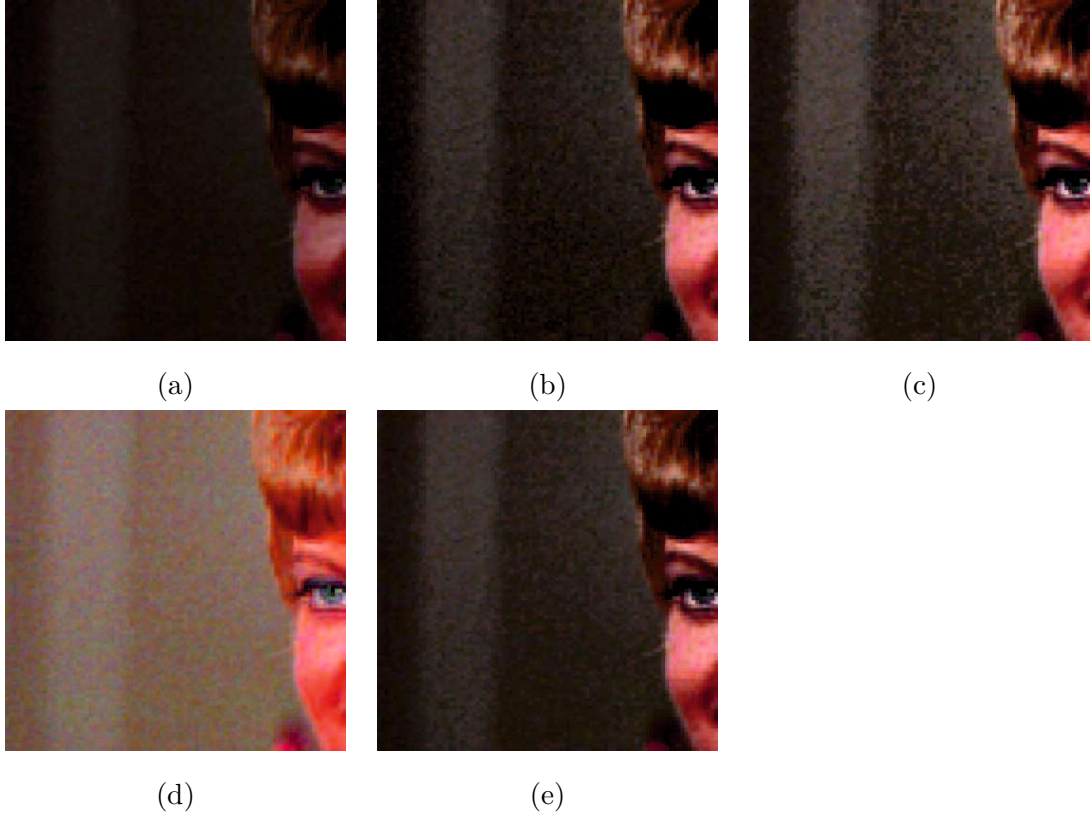


図 3.10: Girl の実験結果 (背景部分). (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.1$), (e) 提案手法.

Fig.3.10: Enlarged images of “Girl” (background). (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

も右の画像が良いと判断すれば正の値をとり、右よりも左の画像が良いと判断すれば負の値をとる。被験者には「不自然なコントラスト強調が起きていない」と感じた画像が高い評価になるように点数を入力してもらった。評価実験では、実験結果を 20 代の男女 20 人の被験者に比較してもらった。ヤードスティック法によって結果を 1 つの数直線上に配列し、どの結果が人間の感覚にあった自然な画像であるかを視覚的に示した。

ヤードスティック法の計算において、左側に手法 m_l を表示し、右側に手法 m_r を表示したとき、被験者 e_{sub} によって付けられた評価の値を $z_{m_r, m_l, e_{\text{sub}}}$ とする。また、刺激数 (画像数) を M_s 、被験者の数を N_t とすると、以下の式で表される。

$$\hat{\alpha}_s = \frac{1}{2M_s N_t} \sum_{e_{\text{sub}}=1}^{N_t} \sum_{m_r=1}^{M_s} (z_{m_r, m_l, e_{\text{sub}}} - z_{m_l, m_r, e_{\text{sub}}}). \quad (3.33)$$

ヤードスティック法では、 $\hat{\alpha}_s$ が大きいほど良いカラーコントラスト強調の手法であることを

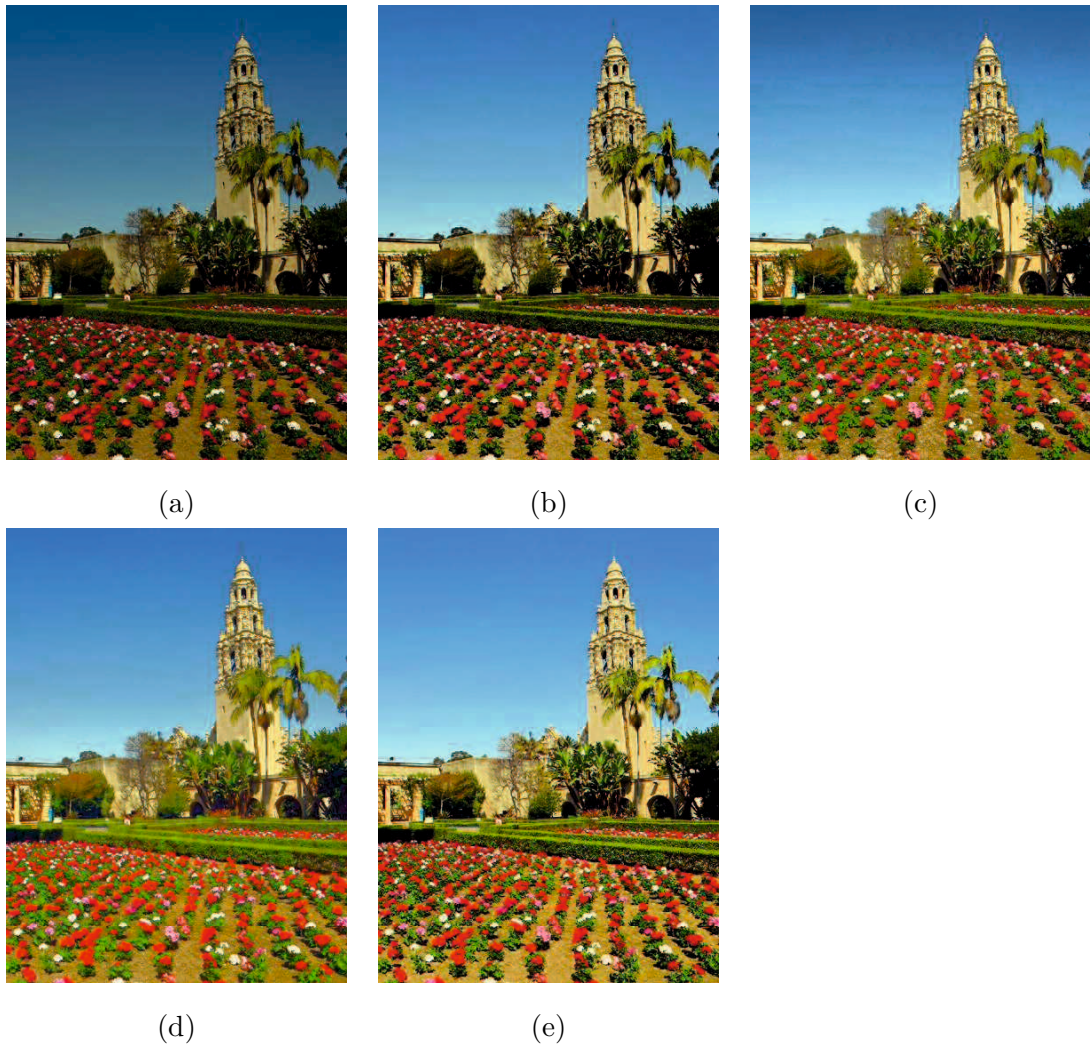


図 3.11: Balboapark の実験結果. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.2$), (e) 提案手法.

Fig.3.11: Experimental results for “Balboapark”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

示している.

ヤードスティック法による各手法の評価値 $\hat{\alpha}_s$ を表 3.1 に示す. 表 3.1 に示す通り, 提案手法が全ての画像において最も良い結果を示した. 村平らの手法は “Balloon”, 色空間を考慮した HE では “Girl” において提案手法と近い値を示した.

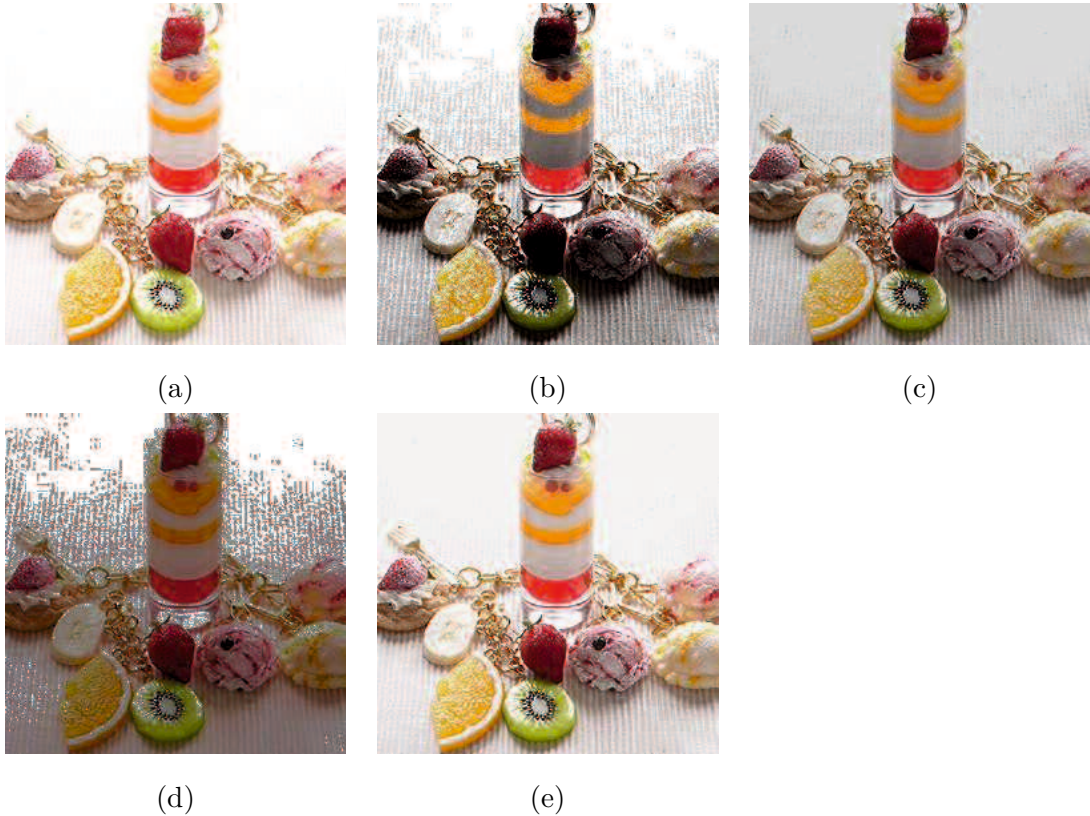


図 3.12: Keychain の実験結果. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法 ($\alpha = 0.2$), (e) 提案手法.

Fig.3.12: Experimental results for “Keychain”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012, (e) Prop.

表 3.1: ヤードスティック法による数値評価.

Table3.1: Quantitative evaluation by the yardstick method.

	CGNHE	HECSS	Murahira2012	Prop.
Balboapark	0.3250	-0.5875	-0.4063	0.6687
Balloon	-1.1250	0.2250	0.3812	0.5188
Girl	-0.0437	0.3312	-0.7125	0.4250
Keychain	-0.8375	0.2500	-0.3000	0.8875
平均	-0.4203	0.0547	-0.2594	0.6250

3.5.5 平均明度差に基づく客観評価

主観評価として, 原画像と結果画像の平均明度差による評価を行う. 平均明度差 E は以下の式によって求められる.

$$E = \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_v(i, j) \right) - \left(\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_v(i, j) \right). \quad (3.34)$$

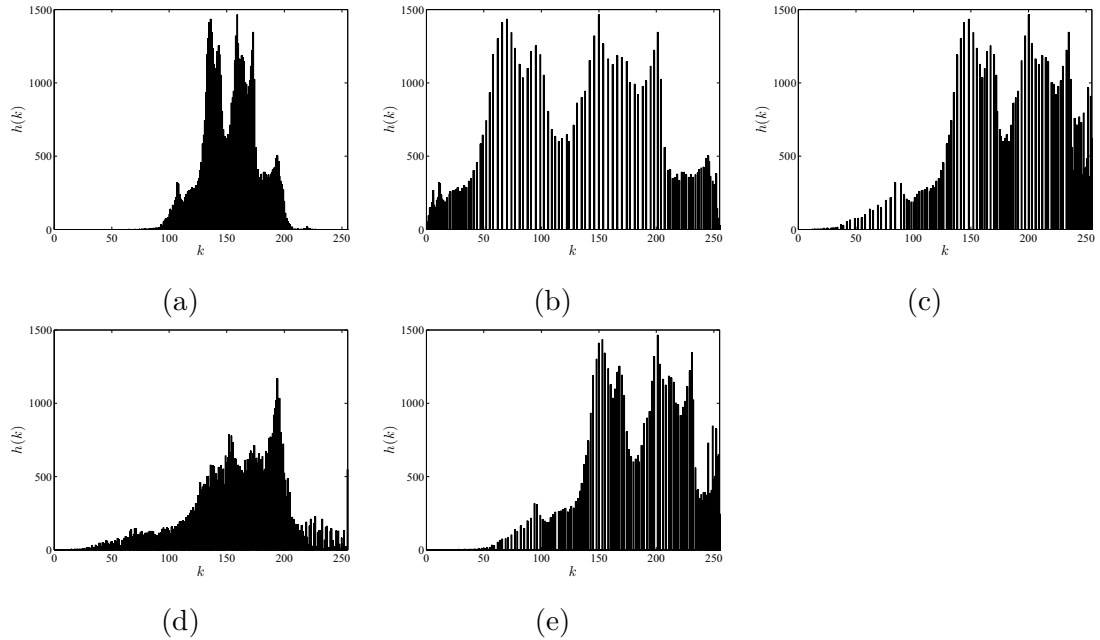


図 3.13: “Balloon” に対する実験結果の明度ヒストグラム. (a) 原画像, (b) カラー GNHE, (c) 色空間を考慮した HE, (d) 村平らの手法, (e) 提案手法

Fig.3.13: Intensity histograms of the resultant images for “Balloon”. (a) Original image, (b) CGNHE, (c) HECSS, (d) Murahira2012 ($\alpha = 0.2$), (e) Prop.

表 3.2: 平均明度差による数値評価.

Table3.2: Objective evaluation by average intensity difference

	CGNHE	HECSS	Murahira2012	Prop.
Balloon	-23	7	31	33
Girl	30	103	47	35
Balboapark	30	55	44	59
Keychain	-52	-75	-49	-17

ここで, $y_v(i, j)$ は結果画像の画素 (i, j) における明度, $x_v(i, j)$ は原画像の画素 (i, j) における明度である. 結果画像の平均明度が原画像のそれよりも高ければ, E は正の値を取る.

表 3.2 に, 各処理結果と原画像の平均明度差を示す. 表 3.2 から, 提案手法では, “Girl” 以外の画像において, 平均明度差が最も大きい結果となった. 画像 “Keychain” においては, 全ての手法において平均明度差が負の値をとった. 画像 “Girl” においては, 村平らの手法において最も明度が上昇した.

3.5.6 評価結果の考察

本実験では、明るさの異なる4つの画像を用いて各手法を比較した。

カラー GNHE では、出力画像の明度成分が大きく低下したため、低い評価となった。表 3.2 に示す平均明度差からも、“Keychain”以外の画像において平均明度が下がったことがわかる。ただし、“Balboapark”では、明度成分のコントラストが適度に強調されたため、高い評価が得られたと考えられる。

色空間を考慮した HE では、被験者による評価が高い結果となった。ただし、“Balboapark”では、詳細部の模様が崩れてしまったため、カラー GNHE や提案手法よりも低い評価が得られたと考えられる。

村平らの手法は、“Balloon”において、4手法のうち2番目に高い評価となった。“Balloon”の原画像は彩度成分の低い画像である。したがって、村平らの手法では、HE による彩度成分の強調によって鮮やかな画像が得られたと考えられる。しかし、“Balloon”以外の実験画像において、村平らの手法は低い評価になった。“Balloon”以外の実験画像は、彩度成分が比較的高く、彩度成分の強調が不要である。そのため、村平らの手法による彩度成分の強調が有効に働かなかったものと考えられる。

提案手法では、全ての実験画像において、自然なコントラスト強調が行われたために、最も高い評価が得られたと言える。

3.6 結言

本章では、HSV 色空間の形状を考慮した明度コントラスト強調処理について述べた。まず、RGB 色空間と HSV 色空間の変換式について述べた。次に、RGB 色空間における一様分布が HSV 色空間においてどのように分布しているかについて述べた。これに基づき、HSV 色空間における理想的な明度分布を定式化し、それに基づいたコントラスト強調法を提案した。

種々の実験の結果、提案手法が、

- HSV 色空間において理想的な明度分布を定式化し、それを用いることで効果的なコントラスト強調を実現できる、
- 勾配ノルムによって重み付けされた明度ヒストグラムを用いることで、平坦部におけるざらつきの強調を抑制することができる、
- コントラストの強調度合いを調節することで、過度な強調を抑制することができる、

ことを確認した。

第4章 RGB色空間におけるコントラスト強調

4.1 緒言

RGB色空間におけるコントラスト強調では、Naikらの手法³をはじめ、様々な手法が提案されている^{29,31}。これらの手法では、色相を保存することが可能であり、色域内での処理を保証しつつRGB色空間内で画素分布が広げられる。しかし、

- (1) 彩度が自由に調節できない、
- (2) 明度コントラストの強調処理にどの手法を用いるかがユーザに委ねられているため、場合によっては画像に応じてコントラスト強調処理を複数回適用し、適切な強調処理を選定する必要がある、

という欠点があった。特に、(1)に関して、Naikらの手法では結果画像の彩度が必ず低下するという問題点がある。(2)に関して、明度コントラストの強調度合いを調節可能な方法がNikolovaらによって提案されている³¹ものの、画像の明度ヒストグラムを目視で確認しパラメータを決定する方針の説明のみにとどまっている。

本章では、色相を保存することが可能であり、色域内での処理を保証した明度コントラストと彩度の同時強調法を提案する^{41,42}。提案手法は強調度合い及び画像の鮮やかさを容易に調節可能である。

本章の構成を以下に示す。4.2節では、RGB色空間における色相保存条件について説明し、等色相平面について述べる。4.3節では、画像の各画素を白、黒、純色の凸結合に分解する方法について述べる。4.4節では、色相保存条件および白、黒、純色の凸結合における係数を用いた新たな枠組みによるコントラスト強調法を提案する。4.5節は比較実験である。4.6節では、本章を総括する。

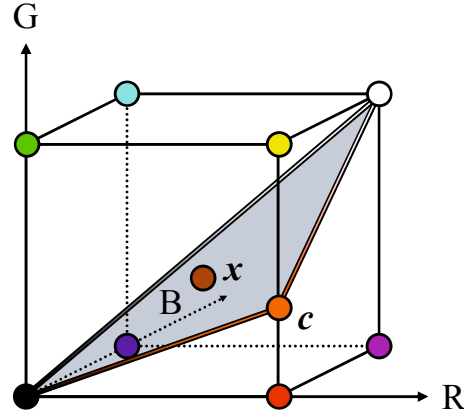


図 4.1: RGB 色空間の概念図

Fig.4.1: The schematic diagram of the RGB color space.

4.2 RGB色空間における等色相平面

入力画像を 24 ビットのフルカラー画像とし、画素 (i, j) における R, G, B 成分の画素値を $\mathbf{x}(i, j) = (x_r(i, j), x_g(i, j), x_b(i, j)) \in [0, 1]^3$ とする. R, G, B 成分の組み合わせによって各画素の色み, すなわち色相が決まる.

Naik らは, RGB 色空間における色相保存の変換を以下のように定義した³.

$$\begin{aligned} x'_r(i, j) &= \alpha(i, j)x_r(i, j) + \beta(i, j), \\ x'_g(i, j) &= \alpha(i, j)x_g(i, j) + \beta(i, j), \\ x'_b(i, j) &= \alpha(i, j)x_b(i, j) + \beta(i, j). \end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで, $x'_r(i, j)$, $x'_g(i, j)$, $x'_b(i, j)$ は $\mathbf{x}(i, j)$ と同じ色相をもつ変換後の画素 $\mathbf{x}'(i, j)$ の各成分を表す. また, $\alpha(i, j)$ および $\beta(i, j)$ はそれぞれスケールリング及びシフティングに関するパラメータである. Naik らの手法³や, その発展手法²⁹⁻³¹では, 式(4.1)を満たすように明度が変換される.

RGB 色空間の概念図を図 4.1 に示す. RGB 色空間上では, 等しい色相をもつ画素の集合はひとつの平面上に存在する. 本論文ではこの平面を等色相平面と呼ぶ. 図 4.1 における灰色の領域は RGB 色空間における等色相平面の一例である. 図 4.2 より, RGB 色空間内における等色相平面は白, 黒, 純色で囲まれる三角形内の領域である. ここで, 白は $(1, 1, 1)$, 黒は $(0, 0, 0)$, 純色は最大値が 1, 最小値が 0 の 3 次元ベクトルであり, 画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と等しい色

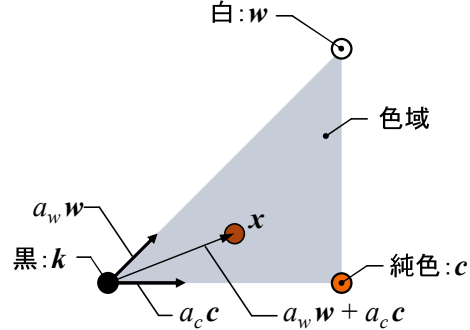


図 4.2: RGB 色空間における等色相平面

Fig.4.2: Constant hue plane in the RGB color space.

相をもつ．純色 $\mathbf{c}(i, j) = (c_r(i, j), c_g(i, j), c_b(i, j))$ は以下の式に従って算出される．

$$\begin{aligned} c_r(i, j) &= \frac{x_r(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))}, \\ c_g(i, j) &= \frac{x_g(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))}, \\ c_b(i, j) &= \frac{x_b(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで， $\max(\mathbf{x}(i, j))$ 及び $\min(\mathbf{x}(i, j))$ は画素 $\mathbf{x}(i, j)$ における各成分の最大値及び最小値である．式 (4.2) から， $\alpha(i, j) = 1/(\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j)))$ ， $\beta(i, j) = -\min(\mathbf{x}(i, j))/(\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j)))$ とすると，式 (4.1) と同様の式になり，画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と純色 $\mathbf{c}(i, j)$ の色相が等しいことが確かめられる．

式 (4.2) より，画素 $\mathbf{x}(i, j)$ における最大の成分は，純色 $\mathbf{c}(i, j)$ では 1 である．一方，画素 $\mathbf{x}(i, j)$ における最小の成分は，純色 $\mathbf{c}(i, j)$ では 0 である． $x_r(i, j) = x_g(i, j) = x_b(i, j)$ の場合，画素 $\mathbf{x}(i, j)$ は色相を持たず，その純色も定義されない．色相を持たない画素については， $\mathbf{c}(i, j) = (0, 0, 0)$ とする．

4.3 等色相平面上での画素の表現

RGB 色空間における等色相平面は，白，黒，純色の三点を通る平面によって構成される．ここで，白，黒，純色によって構成される三角形の内点は RGB 色空間の色域内である．本章では，文献⁴³に従って，画素 $\mathbf{x}(i, j)$ を白，黒，純色の凸結合を表現する方法と，凸結合の係数の性質について述べる．

RGB 色空間から切り出した等色相平面を図 4.2 に示す。ここで、白を $\mathbf{w} = (1, 1, 1)$, 黒を $\mathbf{k} = (0, 0, 0)$, 画素 $\mathbf{x}(i, j)$ と等色相の純色を $\mathbf{c}(i, j)$ とする。純色 $\mathbf{c}(i, j)$ は式 (4.2) に従って算出される。

画素 $\mathbf{x}(i, j)$ は以下の凸結合によって表される。

$$\mathbf{x}(i, j) = a_w(i, j)\mathbf{w} + a_k(i, j)\mathbf{k} + a_c(i, j)\mathbf{c}(i, j). \quad (4.3)$$

ここで, $a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)$ はそれぞれ白, 黒, 純色の係数である。凸結合の係数 $a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)$ は, 以下の式に従って算出される。⁴³

$$a_w(i, j) = \min(\mathbf{x}(i, j)), \quad (4.4)$$

$$a_c(i, j) = \max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j)), \quad (4.5)$$

$$a_k(i, j) = 1 - \max(\mathbf{x}(i, j)). \quad (4.6)$$

画素 $\mathbf{x}(i, j)$ が $[0, 1]^3$ であること, 式 (4.4)~(4.6) から, 各係数は以下の性質を満たす。

$$a_w(i, j) + a_k(i, j) + a_c(i, j) = 1, \quad (4.7)$$

$$0 \leq a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j) \leq 1. \quad (4.8)$$

このとき, $\mathbf{w}, \mathbf{k}, \mathbf{c}(i, j), \mathbf{x}(i, j)$ は一つの平面上に存在し, $\mathbf{x}(i, j)$ は $\mathbf{w}, \mathbf{k}, \mathbf{c}(i, j)$ の内点にあることが保証される。 $(a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)) = (0, 0, 1)$ のとき, 画素 $\mathbf{x}(i, j) = \mathbf{c}(i, j)$ となり, $\mathbf{x}(i, j)$ は純色である。 $(a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)) = (0, 1, 0)$ のとき, 画素 $\mathbf{x}(i, j) = \mathbf{k}$ となり, $\mathbf{x}(i, j)$ は黒である。 $(a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)) = (1, 0, 0)$ のとき, 画素 $\mathbf{x}(i, j) = \mathbf{w}$ となり, $\mathbf{x}(i, j)$ は白である。

4.4 ヒストグラム指定法によるコントラスト強調

上で述べた等色相平面上で, 色相保存かつ色域内での処理を保証したコントラスト強調を実現する方法について述べる。提案手法では, 後述のヒストグラム指定法を用いることで強調度合いの変更可能なコントラスト強調を実現する。

画素 $\mathbf{x}(i, j)$ に対応する係数ベクトルを $\mathbf{a}(i, j) = (a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j))$ とする。式 (4.7), (4.8) から, 入力画像の各係数ベクトル $\mathbf{a}(i, j)$ は図 4.3 に示す平面上に分布する。

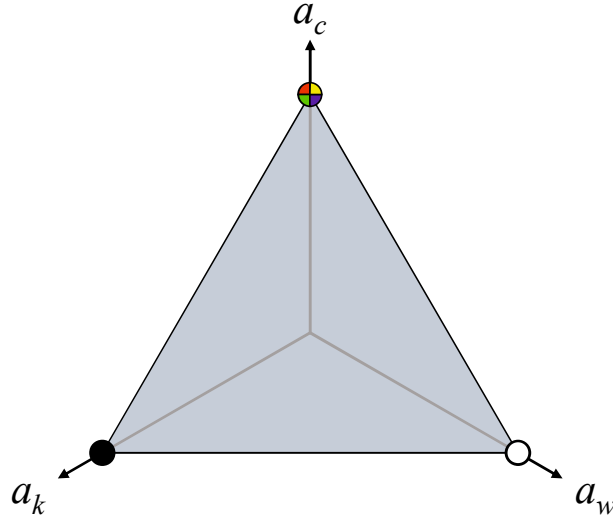


図 4.3: 係数ベクトル空間

Fig.4.3: Coefficient vector space.

提案するコントラスト強調処理では、ヒストグラム指定法を用いることで図 4.3 に示す三角形上で係数ベクトルの分布が広げられる。基本的には、各頂点色方向に画素分布を広げることによってコントラスト強調が実現できる。しかし、原画像のコントラストが極端に低い場合、画素分布を広げすぎると過度な強調につながってしまう。したがって、元の分布の広がり度合いをある程度維持しつつ、白、黒、純色の方向に画素分布を広げることが理想的な変換である。提案手法では、各係数ヒストグラムの平滑化パラメータによってコントラスト強調度合いを調節する。まず、白の係数 a_w の正規化ヒストグラムを求め、これを f_w とする。次に、白の係数ヒストグラム f_w に対して標準偏差 σ_w のガウシアンカーネルによる平滑化を施し、これを g_{w,σ_w} とする。白の係数ヒストグラム f_w 、白の平滑化係数ヒストグラム g_{w,σ_w} の正規化累積ヒストグラムをそれぞれ F_w, G_{w,σ_w} とする。同様の手順で、黒の係数 a_k 、純色の係数 a_c についても $F_k, G_{k,\sigma_k}, F_c, G_{c,\sigma_c}$ を求める。入力画像の係数ベクトルの各要素を、以下の式に従って変換する。

$$a'_w(i, j) = G_{w,\sigma_w}^{-1}(F_w(a_w(i, j))), \quad (4.9)$$

$$a'_k(i, j) = G_{k,\sigma_k}^{-1}(F_k(a_k(i, j))), \quad (4.10)$$

$$a'_c(i, j) = G_{c,\sigma_c}^{-1}(F_c(a_c(i, j))), \quad (4.11)$$

$$G^{-1}(u) = \inf\{z \mid G(z) \geq u\}. \quad (4.12)$$

ただし, $a_c(i, j) = 0$ の画素は無彩色であり純色が定義されないため, $a'_c(i, j) = 0$ とする. 本来, $a_w(i, j), a_k(i, j), a_c(i, j)$ にはそれらの総和が1であるという制約があった (式 (4.7)) が, 式 (4.9) から式 (4.12) ではそれぞれ独立に変換される. したがって, $a'_w(i, j), a'_k(i, j), a'_c(i, j)$ の総和が1と等しいとは限らない. そこで, 変換後の係数ベクトルの和を1にするために, 以下の正規化処理を行う.

$$a''_w(i, j) = \frac{a'_w(i, j)}{a'_w(i, j) + a'_k(i, j) + a'_c(i, j)}, \quad (4.13)$$

$$a''_k(i, j) = \frac{a'_k(i, j)}{a'_w(i, j) + a'_k(i, j) + a'_c(i, j)}, \quad (4.14)$$

$$a''_c(i, j) = \frac{a'_c(i, j)}{a'_w(i, j) + a'_k(i, j) + a'_c(i, j)}. \quad (4.15)$$

最後に, 提案手法の処理結果の画素 $\mathbf{y}_{\text{out2}}(i, j)$ を以下の式によって算出する.

$$\mathbf{y}_{\text{out2}}(i, j) = a''_w(i, j)\mathbf{w} + a''_k(i, j)\mathbf{k} + a''_c(i, j)\mathbf{c}(i, j). \quad (4.16)$$

4.5 比較実験

4.5.1 実験準備

複数の実験画像を用い, 提案手法の有効性を検証する. 本実験では, 図 4.4 に示す 4 枚の画像を実験に用いた. 画像のサイズはそれぞれ, “Balloon” および “Couple” は 256×256 , “Botanicalbuilding” および “Fuchsia” は 384×512 画素である. 比較手法として Naik らの手法³, 村平らの手法²⁹, Nikolova らの手法³¹, 第3章で述べた手法³⁷を用いた. Naik らの手法, 村平らの手法では, 明度の変換処理としてヒストグラム均等化を採用し, これらを Naik+HE, 村平+HE と表す. また, Nikolova らの手法において, 目標のヒストグラムを一樣分布にしたものを Nikolova+HE, ガウス分布にしたものを Nikolova+Gauss と表す. 目標のヒストグラム h_G は以下の式で表される.

$$h_G(k) = \exp\left(-\frac{(k - \mu_G)^2}{\sigma_G}\right), \quad k \in [0, L - 1], \quad (4.17)$$

$$\mu_G = \frac{-(L - 1)(\ln l - \sqrt{\ln l \ln r})}{\ln r - \ln l}, \quad (4.18)$$

$$\sigma_G = \frac{(L - 1)^2(\sqrt{-\ln l} - \sqrt{-\ln r})^2}{(\ln r - \ln l)^2}. \quad (4.19)$$

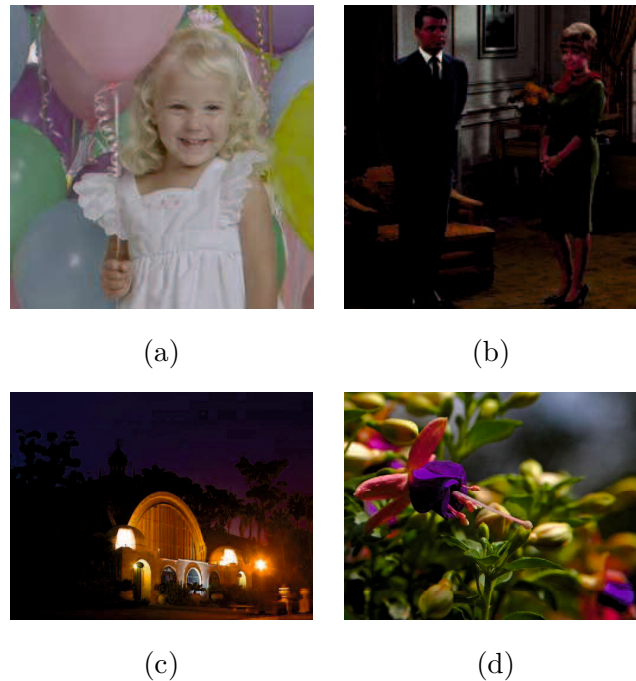


図 4.4: 原画像. (a) Balloon, (b) Couple, (c) Botanical building, (d) Fuchsia

Fig.4.4: Original images. (a) Balloon, (b) Couple, (c) Botanical building, (d) Fuchsia

ここで、 L は 256 である。Nikolova+HE では、文献³¹に従って $l = 1$, $r = 0.99$ とした。Nikolova らの手法では目標のヒストグラムと原画像のヒストグラムを混合する処理が行われるが、Naik らの手法や村平らの手法と同じ条件で実験を行うために、混合のパラメータを 0 とし、処理結果の明度分布が一様分布になるように実験を行った。また、Nikolova+Gauss では、文献³¹の決定指針に基づき、 l, r を画像ごとに決定し、ヒストグラムの混合のパラメータを 0.5 とした。提案手法では、ヒストグラム指定法におけるパラメータ $\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c$ を実験的に決定した。各手法におけるヒストグラムのビン数はすべて 256 とした。

結果画像の評価として、目視による主観評価および CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間における L^* の標準偏差および CIE1976ab クロマ C^* の平均に基づく客観評価を行う。なお、 L^* および C^* への具体的な変換式^{44,45}を付録に記載した。また、係数空間上での画素分布に基づき、出力結果の考察を行う。

4.5.2 実験結果

図 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 に、各手法の結果画像を示す。また、図 4.6, 4.8, 4.10, 4.12 は図 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 の係数空間上における画素分布を表す。図 4.5 から図 4.11 において、(a) は原画像、

(b)はNaikらの手法(Naik+HE)，(c)は村平らの手法(Murahira+HE)，(d)はNikolovaらの手法(Nikolova+HE)，(e)はNikolovaの手法(Nikolova+Gauss)，(f)は第3章で述べた手法，(g)は本章の提案手法である。

Naikらの手法では，どの実験画像においても明度のコントラストが強調された一方で，画像の鮮やかさが低下した印象を受ける．このことは，比較的鮮やかな画像“Fuchsia”において，画素分布が純色から離れ，無彩色軸に近い色へ変換されてしまったことから確認できる(図4.11(b))．村平らの手法では，“Balloon”以外の画像において，彩度が上昇し，明度コントラストが強調されたことが分かる．ただし，“Balloon”においては，原画像(図4.5(a))と比較して，彩度がさほど上昇せず，黒みを帯びた印象を受ける．Nikolovaらの手法においてヒストグラム均等化を用いた場合，村平らの手法と同様，彩度が上昇し，明度コントラストが強調されたことが分かる．しかし，“Botanicalbuilding”では，過度な強調により，空の領域に擬似輪郭が発生していることが分かる．また，“Balloon”では，明度コントラスト強調の影響で被写体の肌が黒みを帯びたことも確認できる．Nikolovaらの手法においてガウス分布を目標のヒストグラムとした場合，過度な強調を防ぎ，かつ鮮やかさを保ったコントラスト強調が実現された．しかし，“Balloon”において被写体の白い服の明度コントラストが強調され，一部分(特に服のシワの明るい部分)だけが不自然に明るくなってしまった．第3章で述べた手法では，どの処理結果においても画像の鮮やかさが不自然に低下することなく，明度のコントラストが強調されたことが分かる．“Botanicalbuilding”においては，Nikolovaらの手法とは異なり，空の領域に輪郭線が現れることなくコントラストが強調された．これは，勾配ノルムによって重み付けされたヒストグラムを用いたことで，平坦部の過度な強調を抑えられたためであると考えられる．しかし，“Balloon”においては結果画像の彩度が十分高いとは言えない．この理由として，第3章で述べた手法は従来手法と同様，画像の鮮やかさを直接調節することができない(明度の変化に伴い鮮やかさが変化する)ことが挙げられる．提案手法では，全ての実験画像において画像の鮮やかさを保ったコントラスト強調が実現できた．特に，“Balloon”においては画像が黒みを帯びることなく，全体が鮮やか，かつ自然にコントラスト強調された結果画像が得られた．また，“Couple”や“Botanicalbuilding”のように，極端に暗い画像に対する処理の場合でも，過度な強調を抑制した処理結果画像が得られた．しかし，“Botanicalbuilding”については，第3章で述べた手法(図4.9(f))よりも提案手法(図4.9(g))のほうが平坦部のざらつきが目立つ結果となった．

表4.1および表4.2に，各手法の定量評価を示す．これらの定量評価値が同じ値であっても，画像が異なれば受ける印象が異なる．したがって，値が高ければ高いほど良い結果画像であ

表 4.1: 定量評価の結果 (L^* の標準偏差)Table4.1: Result of quantitative evaluation (Standard deviation of L^*).

	Balloon	Couple	Botanicalbuilding	Fuchsia
原画像	10.0	13.7	16.2	17.6
Naik+HE	29.1	29.1	28.9	28.5
村平+HE	28.5	29.9	27.5	29.5
Nikolova+HE	28.9	30.3	25.2	29.5
Nikolova+Gauss	18.5	24.2	23.6	23.5
第3章で述べた手法	16.9	22.6	18.9	21.9
提案手法	21.9	24.5	16.0	19.1

表 4.2: 定量評価の結果 (C^* の平均値)Table4.2: Result of quantitative evaluation (Mean of C^*).

	Balloon	Couple	Botanicalbuilding	Fuchsia
原画像	13.5	8.8	21.2	27.7
Naik+HE	8.2	3.1	7.3	15.3
村平+HE	15.6	29.6	42.0	35.0
Nikolova+HE	15.4	29.0	50.0	38.9
Nikolova+Gauss	19.1	16.6	32.3	32.6
第3章で述べた手法	15.5	12.5	28.7	35.9
提案手法	17.9	16.8	25.2	32.2

るという保証はなく、あくまで参考程度の値として評価を行う必要がある。また、画像によって適切な強調度合いは異なるため、評価値の大小によってどの結果が良いかを判断することは困難である。

表 4.1 は、各画像を CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間へ変換し、 L^* 成分の標準偏差を求めたものである。一般に、 L^* が大きいほど明るい画素、 L^* が小さいほど暗い画素である。したがって、 L^* は明度軸に対応しており、この標準偏差が高いほど、明度のコントラストが高いと言える。表 4.1 から、従来手法では明度のコントラストが大幅に上昇したことが分かる。従来手法と比較すると、提案手法は明度コントラストの定量評価値が低い傾向にある。しかし、“Botanicalbuilding”以外の画像においては、原画像と比較すると明度コントラストは上昇したことが分かる。

表 4.2 は、各画像を CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間へ変換し、 a^* および b^* から以下の式によって求められる CIE1976ab クロマ C^* の平均値を求めたものである。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}. \quad (4.20)$$

C^* は値が大きいほど鮮やかな画素であり、 C^* が小さいほど無彩色に近い画素である。したがって、 C^* の平均値が高い画像は全体的に鮮やかな画像である。表 4.2 から、Naik らの手法では画像の鮮やかさが低下してしまったことが分かる。村平らの手法、Nikolova らの手法、第 3 章で述べた手法、提案手法では、すべての実験画像において画像の鮮やかさが上昇したことが分かる。特に、村平らの手法、Nikolova らの手法において、画像の鮮やかさが大幅に上昇したことが分かる。

従来手法において明度のコントラスト強調にヒストグラム均等化を用いた場合、原画像と比較すると過度な強調によって結果画像の L^* の標準偏差や C^* の平均値が高い値をとることが分かる。一方、提案手法では、パラメータを調節することで過度なコントラスト強調を防ぎつつ、良好な処理結果を得ることができた。

4.5.3 パラメータの変化に応じた処理結果の変化

図 4.13 および図 4.14 に、提案手法のパラメータ $\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c$ を変化させた際の処理結果の変化を示す。図 4.13 および図 4.14 において、(a), (b), (c) はそれぞれのパラメータにおける結果画像、(d), (e), (f) はそれぞれ (a), (b), (c) の画素分布である。

図 4.13 では、3つのパラメータ $\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c$ の内、いずれか1つのパラメータのみを 0.6 にし、それ以外のパラメータを 0（係数の分布を変化させない設定）とした場合の結果画像である。図 4.13(a) は、 $\sigma_w = 0.6$ とした場合の結果画像である。図 4.13(a) の画素分布（図 4.13(d)）から、画素分布は左上方向（三角形の右下頂点から離れる方向）に分布が広がり、黒に近い画素（被写体の目など）がより黒に近づく結果となった。図 4.13(b) は、 $\sigma_k = 0.6$ とした場合の結果画像である。図 4.13(b) の画素分布（図 4.13(e)）から、画素分布は右上方向（三角形の左下頂点から離れる方向）に分布が広がり、白に近い画素（被写体の服など）がより白に近づく結果となった。図 4.13(c) は、 $\sigma_c = 0.6$ とした場合の結果画像である。図 4.13(c) の画素分布（図 4.13(f)）から、画素分布は縦方向（三角形の頂点方向）に分布が広がり、画像の鮮やかさが上昇したことが分かる。原画像の画素（図 4.5(a)）は三角形の下部（彩度の低い領域付近）に分布していたため、係数分布が頂点方向へ広がったと考えられる。

表 4.3: 計算量と実行時間 (sec.)

Table 4.3: Computational complexity and computational time (sec.)

	Naik+HE	Murahira+HE	Nikolova+HE	第3章で述べた手法	提案手法
計算量	n	n	$n \log n$	n	n
計算時間	0.32	0.51	1.99	0.63	0.59

図 4.14 は、3つのパラメータを全て同じ値に設定し、それらを 0.2, 0.4, 0.6 と変化させた際の結果画像である。図 4.14(a) から (c) にかけて、各パラメータは徐々に大きい値となる。各結果画像から、パラメータの上昇に伴い、結果画像のコントラストや鮮やかさが上昇していることが確認できる。したがって、各パラメータは画素分布をどの方向へ広げるかを表しており、各パラメータの大きさは分布の広げる度合いを表していることが分かる。

4.5.4 計算量および計算時間の比較

各手法の計算量および計算時間の比較を行う。実験には、 1312×2000 画素の 24 ビットフルカラー画像を用いた。また、提案手法のパラメータ $\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c$ を全て 0.3 とした。実験に用いたコンピュータの CPU は Intel Core i7-6700 3.40GHz であり、メモリは 16GB である。OS は Windows 10 であり、アルゴリズムの実装には MATLAB 2018b を用いた。実験では各アルゴリズムを 5 回実行し、それらの平均を実行時間とした。

表 4.3 に各アルゴリズムの計算量と実行時間を示す。表 4.3 から、Nikolova らの手法以外は全て $O(n)$ である。Nikolova らの手法では、Exact Histogram Specification⁹ においてソーティングアルゴリズムが用いられるため、他の手法よりも計算量が多くなってしまった。計算時間においては、単純なアルゴリズムによって実現される Naik らの手法が最も短いことがわかる。村平らの手法や第 3 章で述べた手法、提案手法は Naik らの手法と計算量が同じであるため、これらの手法においては計算時間に大きな差は見られない。一方、Nikolova らの手法は最も計算時間が長い結果となった。

4.6 結言

本章では、色相を保存することが可能であり、色域内での処理を保証した新しいコントラスト強調法を提案した。ここでは、RGB 色空間における等色相平面および色相保存条件につ

いて述べた。次に、各画素を白，黒，純色の凸結合で表現する方法について述べ、係数の性質について述べた。また、色相保存条件および係数ヒストグラムの平滑化に基づいた新たなコントラスト強調法について述べた。

種々の実験の結果、

- 白，黒，純色の凸結合によって画素を表現し、各係数の分布を広げることによってコントラスト強調を実現できる、
- 各係数ヒストグラムの平滑化度合いを調節することによって、コントラストの強調度合いを調節できる、
- 係数空間上で画素分布を拡げることで色空間内で効果的に画素分布が広げられる、

ことを確認した。

第3章で述べた手法と第4章で述べた手法の違いとして、

- 画像にノイズが重畳している場合、第3章で述べた手法が有効である、
- 画像の明度が高く彩度が低い画像や、画像のノイズがほとんど重畳していない画像においては第4章で述べた手法が有効である、

ことを確認した。また、これらのどちらにも該当しない画像については、どちらの手法も概ね良好な結果を得られることも確認した。



図 4.5: “Balloon” の実験結果. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.15$)

Fig.4.5: Experimental result for “Balloon”. (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.15$).

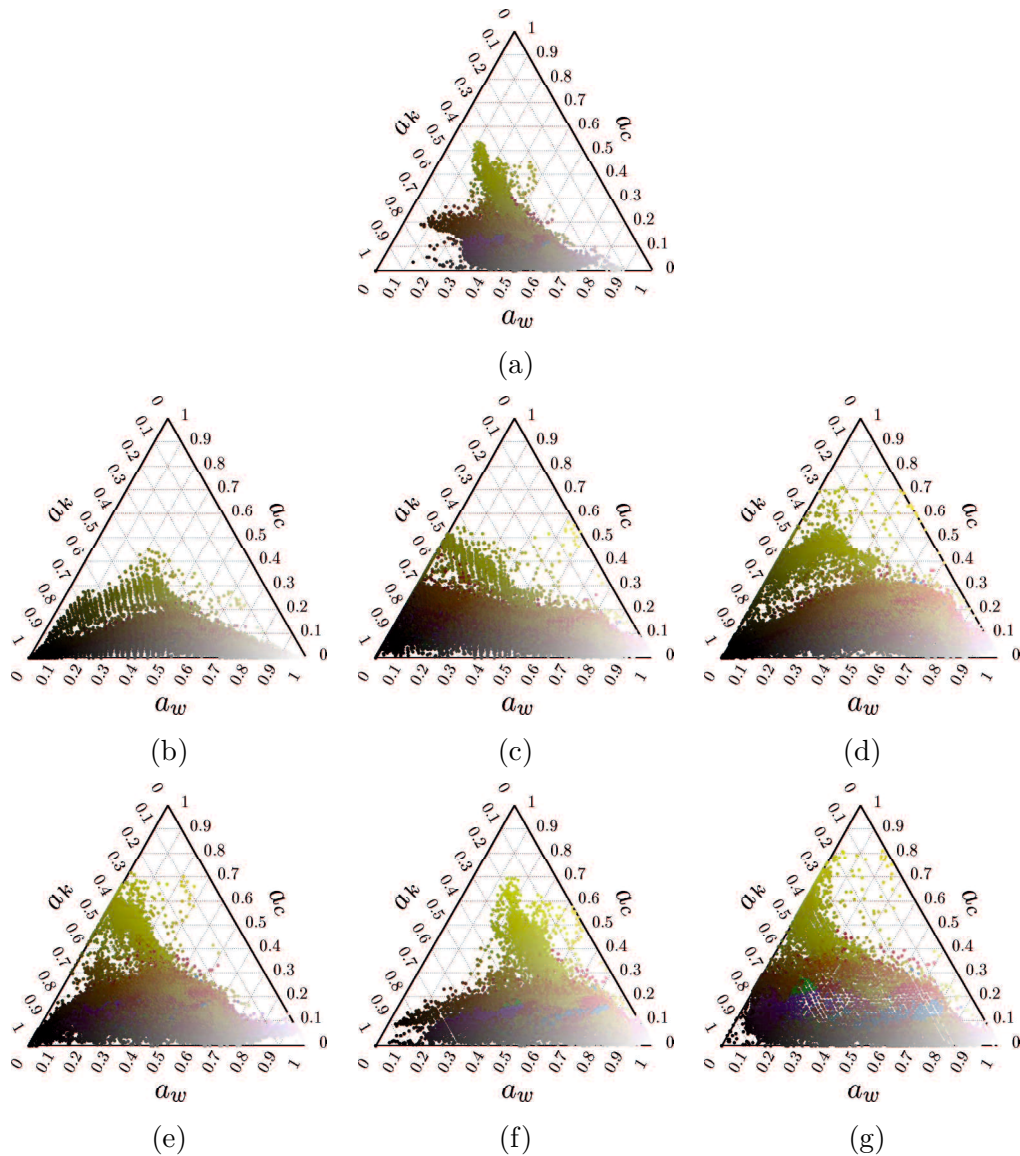


図 4.6: “Balloon” の実験結果の画素分布. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) 第 3 章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.15$)

Fig.4.6: Pixel distributions of experimental results for “Balloon” in the coefficient vector space, (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.15$).



図 4.7: “Couple” の実験結果. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 1, r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.5, \sigma_k = 0.5, \sigma_c = 0.2$)

Fig.4.7: Experimental result for “Couple”. (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.5, \sigma_k = 0.5, \sigma_c = 0.2$).

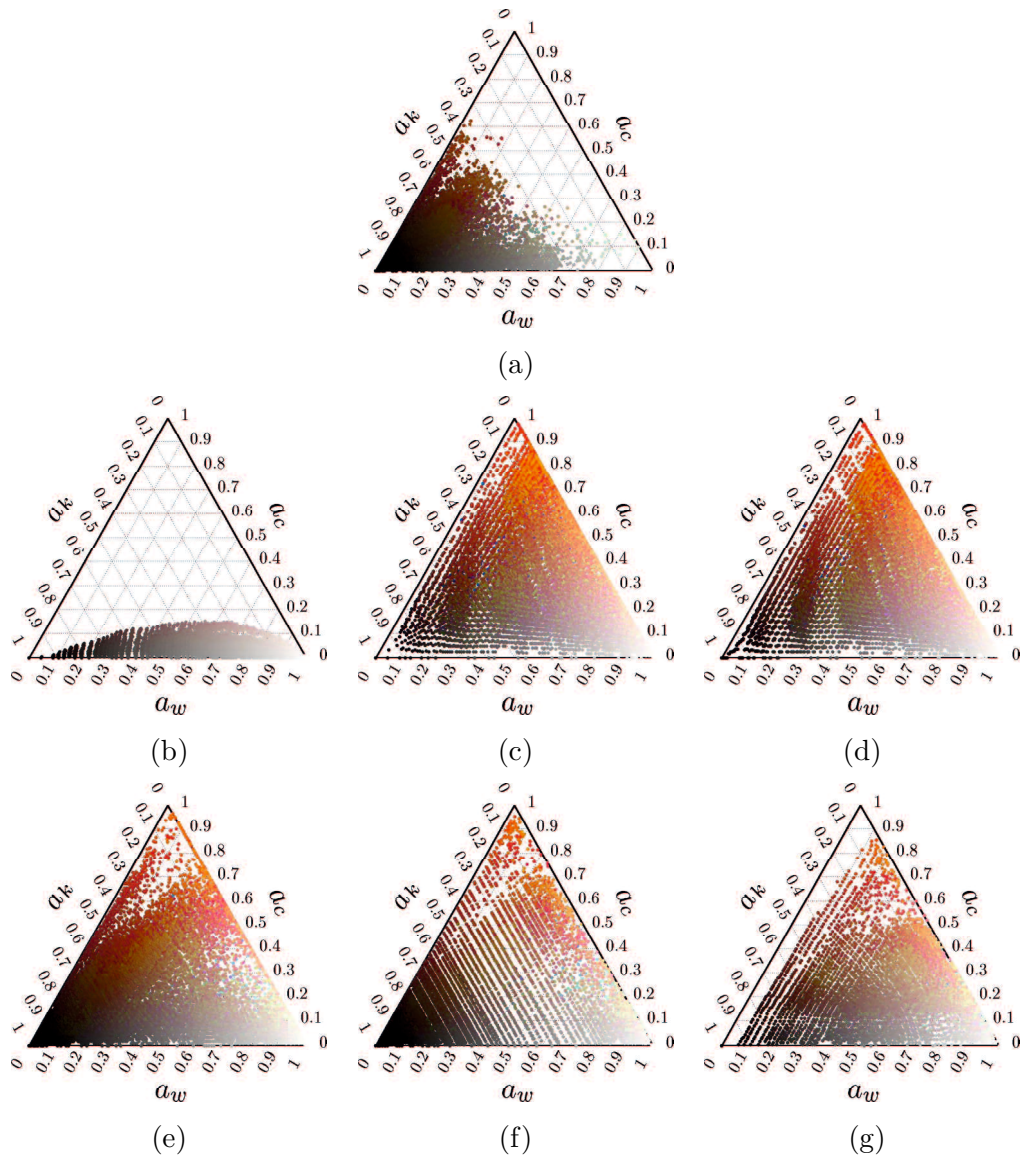


図 4.8: “Couple” の実験結果の画素分布. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 1, r = 0.1$), (f) 第 3 章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.5, \sigma_k = 0.5, \sigma_c = 0.2$)

Fig.4.8: Pixel distributions of experimental results for “Couple” in the coefficient vector space, (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.5, \sigma_k = 0.5, \sigma_c = 0.2$).

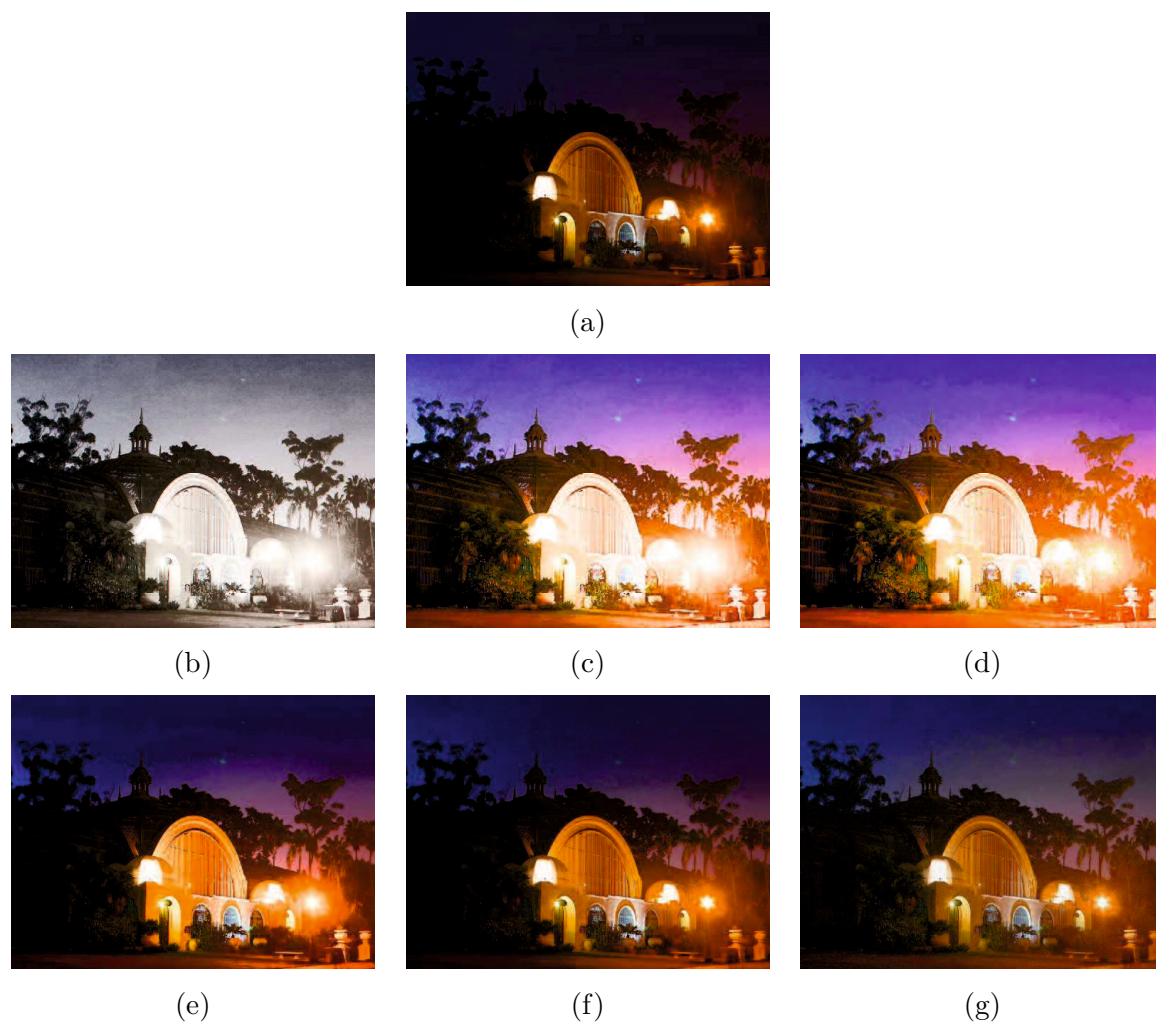


図 4.9: “Botanicalbuilding” の実験結果. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8$, $r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.2$, $\sigma_k = 0.2$, $\sigma_c = 0.2$)

Fig.4.9: Experimental result for “Botanicalbuilding”. (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8$, $r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.2$, $\sigma_k = 0.2$, $\sigma_c = 0.2$).

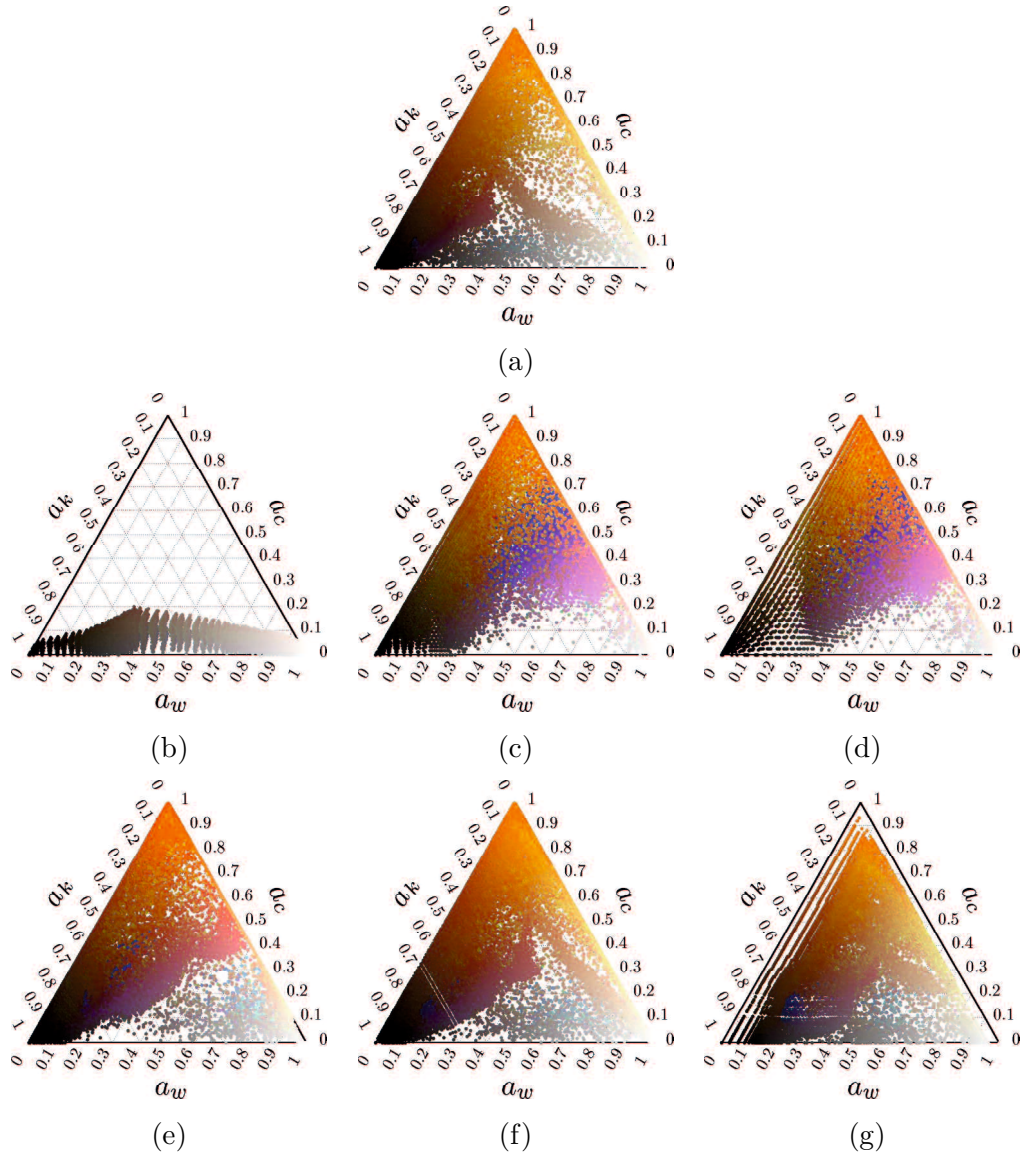


図 4.10: “Botanicalbuilding” の実験結果の画素分布. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8, r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.2, \sigma_k = 0.2, \sigma_c = 0.2$)

Fig.4.10: Pixel distributions of experimental results for “Botanicalbuilding” in the coefficient vector space, (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.2, \sigma_k = 0.2, \sigma_c = 0.2$).

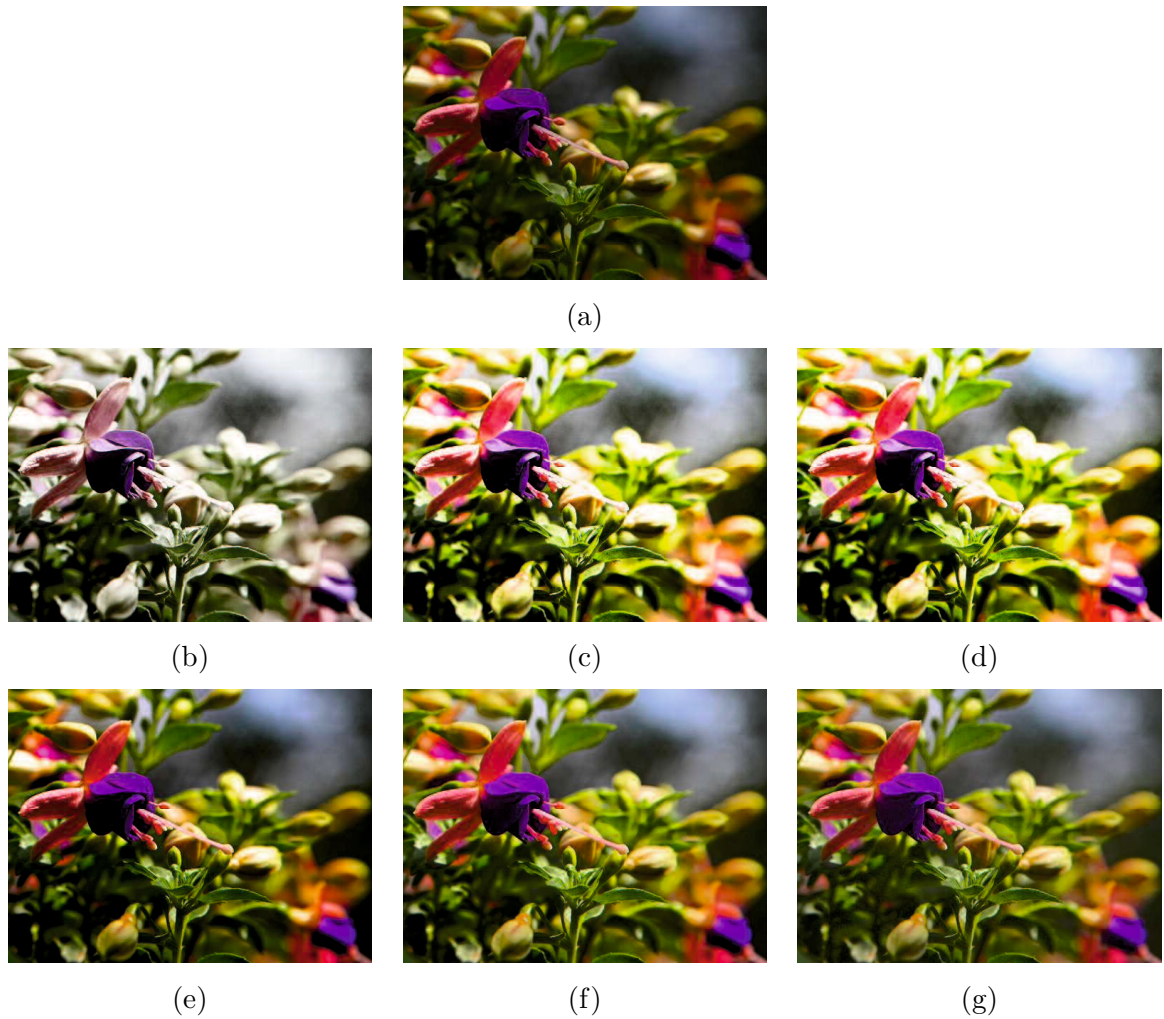


図 4.11: “Fuchsia” の実験結果. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8, r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.3$)

Fig.4.11: Experimental result for “Fuchsia”. (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.3$).

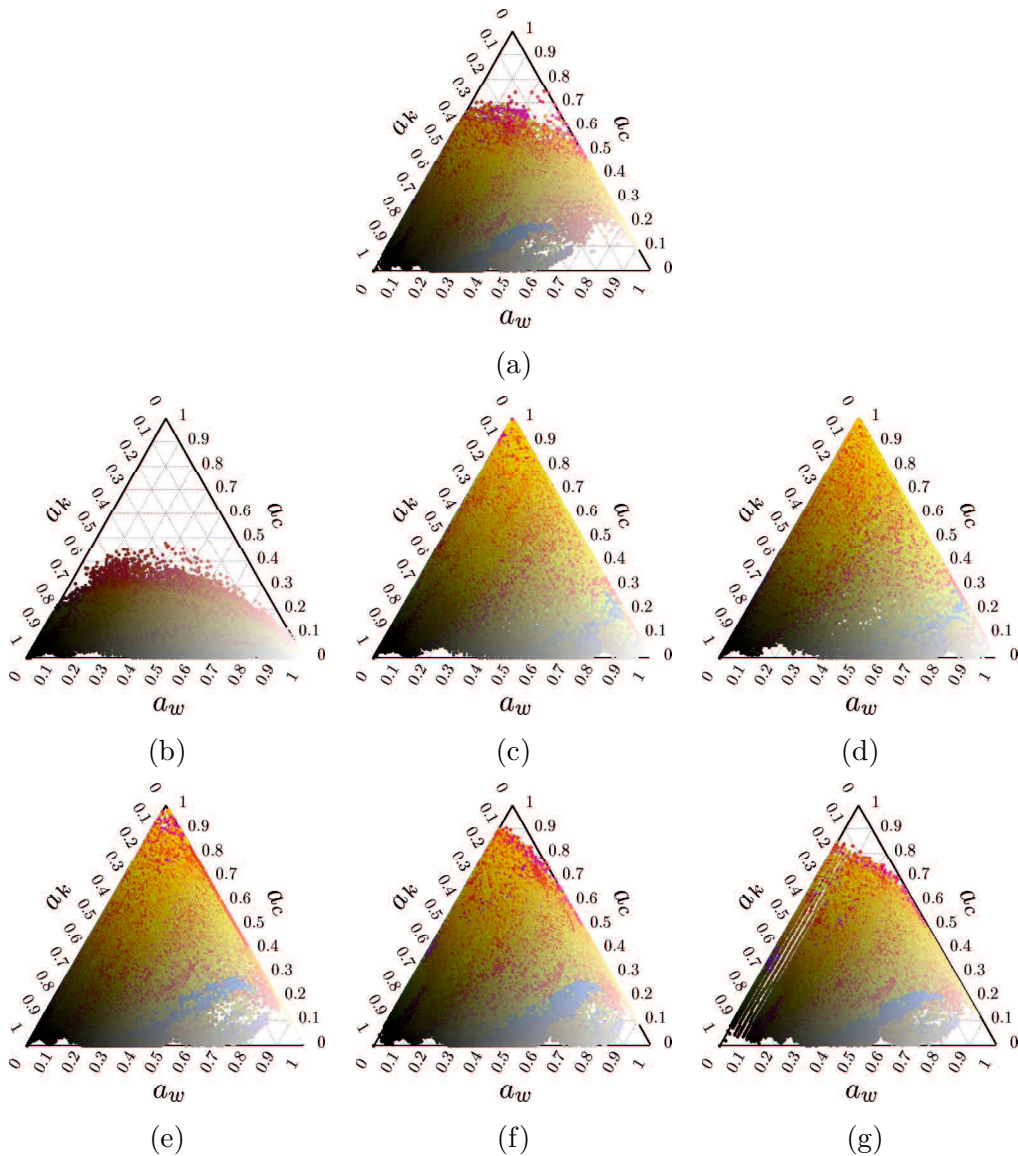


図 4.12: “Fuchsia” の実験結果の画素分布. (a) 原画像, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.8, r = 0.1$), (f) 第3章で述べた手法, (g) 提案手法 ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.3$)

Fig.4.12: Pixel distributions of experimental results for “Fuchsia” in the coefficient vector space, (a) Original, (b) Naik+HE, (c) Murahira+HE, (d) Nikolova+HE, (e) Nikolova+Gauss ($l = 0.1, r = 0.1$), (f) the proposed method in Chap.3, (g) proposed method ($\sigma_w = 0.3, \sigma_k = 0.3, \sigma_c = 0.3$).

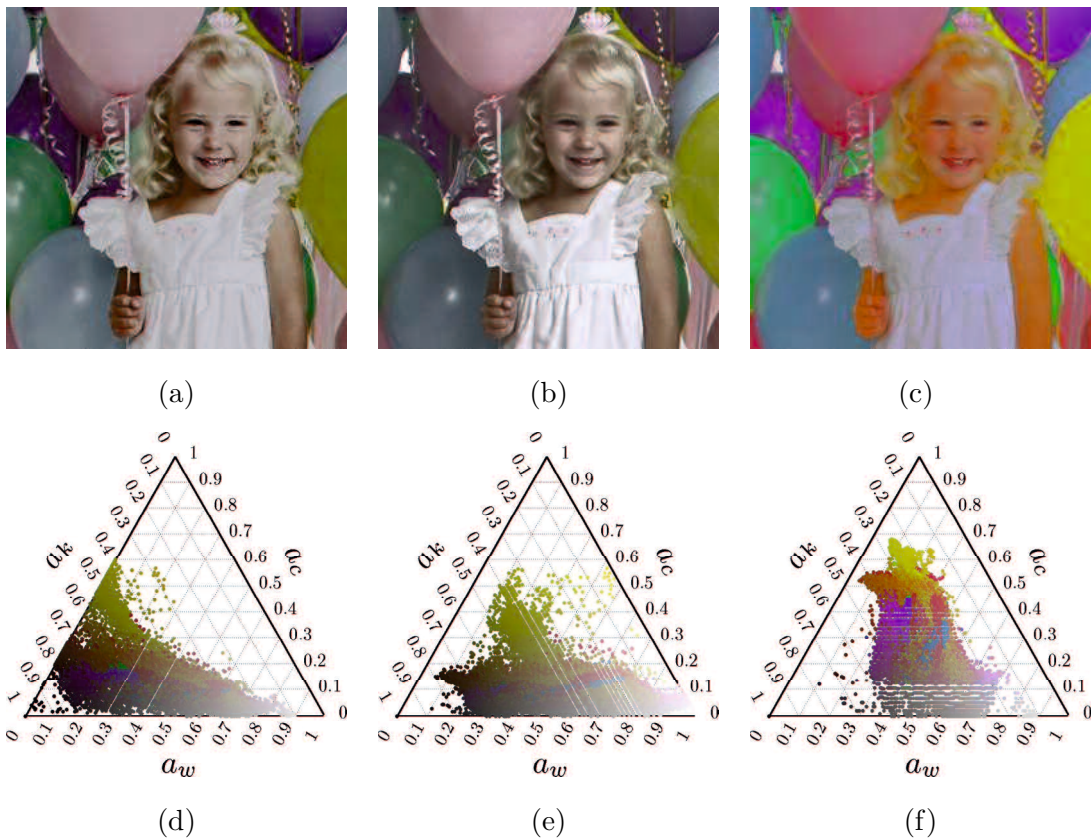


図 4.13: “Balloon” のパラメータに応じた処理結果の変化. (a) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.6, 0, 0)$, (b) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0.6, 0)$, (c) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0, 0.6)$, (d) (a) の画素分布, (e) (b) の画素分布, (f) (c) の画素分布

Fig.4.13: Comparison of various settings of parameters for “Balloon”. (a) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.6, 0, 0)$, (b) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0.6, 0)$, (c) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0, 0.6)$, (d) color distribution of (a), (e) color distribution of (b), (f) color distribution of (c).

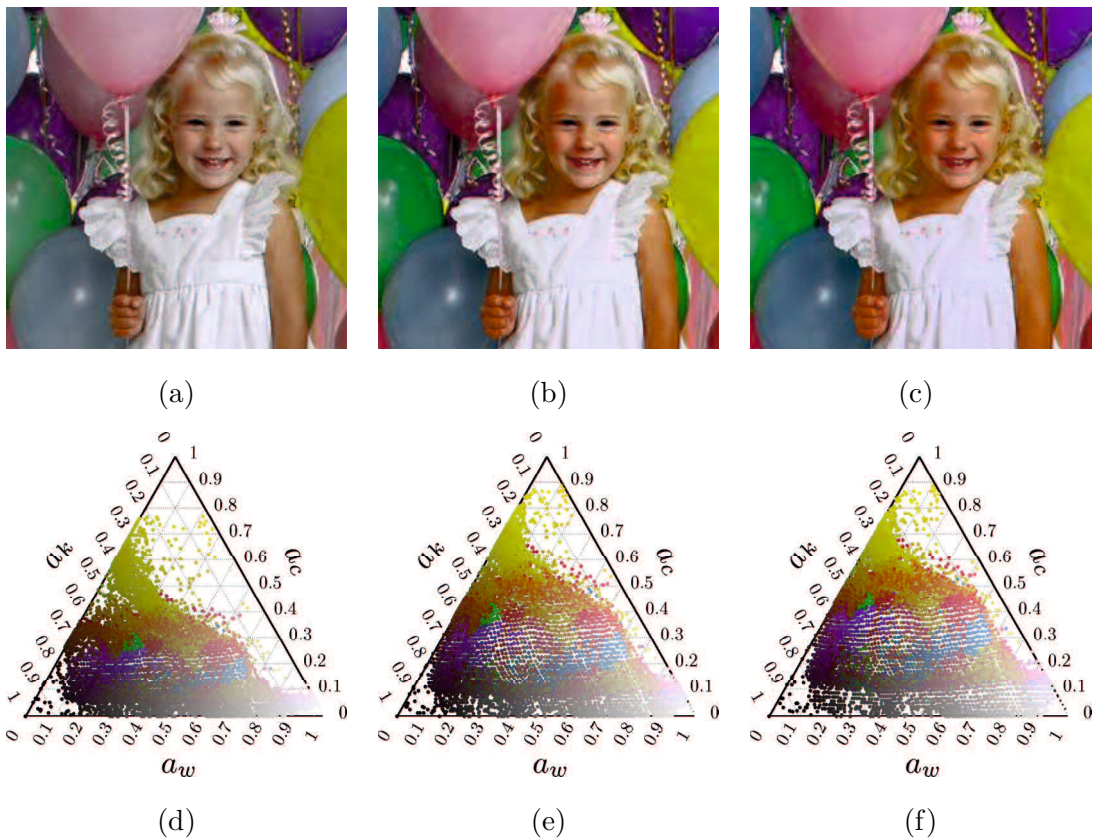


図 4.14: “Balloon” のパラメータに応じた処理結果の変化. (a) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.2, 0.2, 0.2)$, (b) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.4, 0.4, 0.4)$, (c) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.6, 0.6, 0.6)$, (d) (a) の画素分布, (e) (b) の画素分布, (f) (c) の画素分布

Fig.4.14: Comparison of various settings of parameters for “Balloon”. (a) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0.6, 0, 0)$, (b) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0.6, 0)$, (c) $(\sigma_w, \sigma_k, \sigma_c) = (0, 0, 0.6)$, (d) color distribution of (a), (e) color distribution of (b), (f) color distribution of (c).

第5章 結論

本論文では，色空間の形状を考慮したヒストグラム指定法に基づくコントラスト強調法として，新しい2つの方法論について述べた．以下に，各章で得られた成果について述べる．

第2章では，コントラスト強調の目的および主要な方法，ヒストグラムを用いた従来のコントラスト強調法について述べた．グレースケール画像に対するヒストグラム均等化については，過度な強調によって画像のざらつきが強調されてしまう問題点について言及した．次に，勾配ノルムに基づくヒストグラム均等化について述べた．実験により，勾配ノルムによって重み付けされたヒストグラムを用いることで従来のヒストグラム均等化における過度な強調の問題点が解決されていることを確認した．また，カラー画像に対する従来のヒストグラム均等化およびその問題点について述べた．従来手法では，色空間の形状を考慮した処理が提案されていたものの，過度な明度コントラスト強調や彩度強調により，良好な結果が得られていないことを確認した．従来手法から得られる知見として，

- ヒストグラムの偏りをならし，画素分布を広げることによって画像のコントラストが強調されること，
- 勾配ノルムによって重み付けされた明度ヒストグラムを用いることで，平坦部におけるざらつきの強調を抑制することができる，
- カラー画像に対するコントラスト強調処理では，色空間の形状を考慮した目標ヒストグラムを用いる必要がある，

ことを確認した．

第3章では，HSV色空間の形状を考慮した，過度な強調を抑制可能なコントラスト強調法について述べた．まず，色相，彩度，明度からなるHSV色空間について説明した．次に，HSV色空間の形状を考慮した明度ヒストグラムを定義した．従来の知見を活かし，勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラムを用いることで，平坦部のざらつきの強調を抑制したコントラスト強調処理を実現した．また，原画像の平均明度に基づき，コントラストの強調度合いを調節する仕組みを導入した．種々の実験の結果，第3章で述べた手法では，

- HSV 色空間の形状を考慮した明度ヒストグラムを用いることで、不自然な明度低下を起すことなくコントラスト強調が実現できる,
- 明度の勾配ノルムに基づく重み付きヒストグラムを用いることで、カラー画像のコントラスト強調においても平坦部のざらつきの強調を抑制できる,
- 原画像の平均明度に応じてコントラストの強調度合いを調節することで、急激な明度変化を防ぐことができる,

ことが確認された。

第4章では、RGB 色空間における従来のコントラスト強調として、色相保存条件に基づくコントラスト強調法について述べた。提案手法では、新たな枠組みにおいて色相保存条件を満たしつつコントラスト強調を実現することを目的とし、色空間の形状を考慮した手法について述べた。具体的には、まず、各画素を白、黒、純色の凸結合に分解する手法を述べた。次に、凸結合の係数ヒストグラムおよびその平滑化ヒストグラムについて述べた。係数ヒストグラムおよび平滑化係数ヒストグラムを用いてヒストグラム指定法を適用し、係数分布を広げることでコントラストを強調する処理について述べた。最後に、正規化を行うことで、色相を保存可能であり、色域内での処理を保証したコントラスト強調を実現した。種々の実験の結果、第4章で述べた手法では、

- 凸結合の係数空間上で画素分布を広げることで、色相を保存可能であり、かつ色域内での処理を保証したコントラスト強調が実現できる,
- 係数ヒストグラムの平滑化パラメータを調節することで、コントラストの強調度合いを調節することが可能である,
- 平滑化の際、純色の係数ヒストグラムの平滑化度合いを調節することで、結果画像の鮮やかさを調節することができる,

ことが確認された。また、第3章で述べた手法と第4章で述べた手法の使い分けとして、

- 明度が低い場合や画像にざらつきがある場合、第3章で述べた手法によってざらつきを抑制した明度コントラスト強調が有効である,
- 明度が高く彩度が低い画像の場合、もしくは画像にノイズがほとんど重畳していない場合、第4章で述べた手法による明度コントラストと彩度の同時強調が有効である,

ことを確認した。

以上のように，本論文では，色空間内で効果的に画素分布を広げつつ，色相を保存可能であり色域内での処理を保証したコントラスト強調法について述べた．また，提案手法はどちらも過度な強調を抑制するための仕組みを有しており，自然なコントラスト強調が実現可能であることを，比較実験を通して確認した．

謝 辞

本論文は、著者が山口大学大学院 創成科学研究科 博士後期課程在学中に、同大大学院 創成科学研究科 末竹規哲教授の指導のもとに行った研究のうち、コントラスト強調に関する研究をまとめたものです。本研究を遂行するにあたり、熱心な御指導を賜り、研究者への道を示してくださいました山口大学大学院 創成科学研究科 末竹規哲教授に深謝申し上げます。また、懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました山口大学大学院 創成科学研究科 内野英治教授に厚くお礼申し上げます。本論文の副査をお引き受け下さいました山口大学大学院 創成科学研究科 菊政勲教授、同研究科 野崎浩二教授、同研究科 韓先花准教授に心より感謝申し上げます。本論文をまとめるにあたり、有意義な御助言・御討論を頂いた徳山工業高等専門学校 電子情報工学科 古賀崇了准教授、宇部工業高等専門学校 電気工学科 三澤秀明准教授、鹿児島工業高等専門学校 情報工学科 古川翔大講師に深く感謝申し上げます。著者が宇部工業高等専門学校在学中に熱心な御指導、ならびに多くの励ましを賜り、研究の世界へ導いて下さった同校 制御情報工学科 久保田良輔教授に深謝致します。

最後に、博士後期課程への進学に理解を示して下さい下さった両親、ならびに多くの励ましを頂いたシステム・画像情報科学研究室の皆様深くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 田口 亮, “カラー画像・映像の復元・強調に関する研究の現状,” 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, vol.3, no.2, pp.54–64, 2009.
- [2] 蚊野浩, “デジタルカメラのしくみと画像処理,” 画像電子学会誌, vol.41, no.3, pp.288–295, 2012.
- [3] S.K. Naik and C.A. Murthy, “Hue-preserving color image enhancement without gamut problem,” IEEE Trans. Image Processing, vol.12, no.12, pp.1591–1598, 2003.
- [4] 精密工業会画像応用技術専門委員会 編, 画像処理応用システム 基礎から応用まで, 東京電機大学出版局, 東京, 2000.
- [5] 高木幹雄, 下田陽久 監修, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 東京, 2004.
- [6] 田中 豪, 末竹規哲, 内野英治, “S 字関数を用いた多重スケール画像強調,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J91-D, no.6, pp.1684–1688, 2008.
- [7] R.C. Gonzalez and R.E. Woods, Digital image processing 2nd edition, New Jersey, Prentice Hall, 2002.
- [8] F. Pitié, A. Kokaram, and R. Dahyot, “Automated colour grading using colour distribution transfer,” Journal of Computer Vision and Image Understanding, Feb. 2007.
- [9] M. Nikolova and G. Steidl, “Fast Ordering Algorithm for Exact Histogram Specification,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.23, no.12, 2013.
- [10] S.M. Pizer, E.P. Amburn, J.D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer, B.H. Romeny, J.B. Zimmerman, and K. Zuiderveld, “Adaptive histogram equalization and its variations,” Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol.39, no.3, pp.355–368, 1987.

- [11] K. Zuiderveld, "Contrast limited adaptive histogram equalization," *Graphic gems IV*, pp.474–485, Cambridge, Academic Press, 1994.
- [12] Y. T. Kim, "Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.43, no.1, pp.1–8, Feb. 1997.
- [13] Y. Wang, Q. Chen, and B. Zhang, "Image enhancement based on equal area dualistic sub-image histogram equalization method," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.45, no.1, pp.68–75, Feb. 1999.
- [14] Hui Zhu, Francis H.Y. Chan, and F. K. Lam, "Image Contrast Enhancement by Constrained Local Histogram Equalization," *Computer Vision and Image Understanding*, vol.73, no.2, pp.281–290, Feb. 1999.
- [15] J. Alex Stark, "Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol.9, no.5, pp.889–896, May 2000.
- [16] S. D. Chen and A. R. Ramli, "Minimum Mean Brightness Error Bi-Histogram Equalization in Contrast Enhancement," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.49, no.4, pp.1310–1319, Nov. 2003.
- [17] H. D. Cheng and X. J. Shi, "A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement," *Digital Signal Processing*, vol.14, no.2, pp.158–170, Mar. 2004.
- [18] S.-D. Chen, A.R. Ramli, "Preserving brightness in histogram equalization based contrast enhancement techniques," *Digital Signal Processing*, vol.14, no.5, pp.413–428, Sep. 2004
- [19] C. Wang and Z. Ye, "Brightness preserving histogram equalization with maximum entropy: a variational perspective," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol.51, no.4, pp.1326–1334, 2005.
- [20] K. S. Sim, C. P. Tso, and Y. Y. Tan, "Recursive sub-image histogram equalization applied to gray scale images," *Pattern Recognition Letters*, vol.28, no.10, pp.1209–1221, July 2007.

- [21] C. H. Ooi, N. S. P. Kong, and H. Ibrahim, “Bi-histogram equalization with a plateau limit for digital image enhancement, ” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.55, No.4, pp.2072–2080, Nov. 2009.
- [22] 井上光平, 原健二, 浦浜喜一, “勾配ノルムに基づくヒストグラム均等化, ” *映像情報メディア学会誌*, vol.67, no.8, pp.J296–299, 2013.
- [23] P. Getreuer, “Automatic color enhancement (ACE) and its fast implementation,” *Image Processing On Line (IPOL)*, vol.2, pp.266–277, 2012.
- [24] Z. Yao, Q. Zhou, Z. Lai, Z. Ren, and L. Liu, “Image enhancement based on bi-histogram equalization with non-parametric modified technology,” *Proceedings of 2016 IEEE 22nd International Conference on Parallel and Distributed Systems*, 5 pages, 2016.
- [25] 村平宏太, 川上昂, 田口亮, “強調度が可変なヒストグラム平坦化,” *電気学会論文誌 C*, vol.130, no.1, pp.158–159, Jan. 2010.
- [26] C.H. Ooi and N.A.M. Isa, “Adaptive contrast enhancement methods with brightness preserving,” *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol.56, no.4, 2010.
- [27] P.E. Trahanias, A.N. Venetsanopoulos, “Color image enhancement through 3-D histogram equalization,” *Proceedings of 11th IAPR International Conference on Pattern Recognition. vol.III. Conference C: Image, Speech and Signal Analysis*, pp.545–548, 1992.
- [28] 村平宏太, 田口亮, “ヒストグラム均等化に基づくカラー画像強調法,” *電子情報通信学会 論文誌 A*, vol.J95-A, no.12, pp.817–821, Dec. 2012.
- [29] 村平宏太, 田口亮, “色相を保存した RGB 色空間におけるカラー画像処理形態の一提案, ” *信学論 (A)*, vol.J96-A, no.5, pp.264–272, 2013.
- [30] 井上光平, 原 健二, 浦浜喜一, “明度ヒストグラム均等化と等色相面における彩度最大化によるカラー画像強調, ” *映像情報メディア学会 2013 年年次大会講演予稿集*, pp.1–7, 2013.

- [31] M. Nikolova and G. Steidl, “Fast hue and range preserving histogram specification: theory and new algorithms for color image enhancement,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol.23, no.9, pp.4087–4100, 2014.
- [32] C.-L. Chien and D.-C. Tseng, “Color image enhancement with exact HSI color model,” *International Journal of Innovative Computing and Applications*, vol.7, no.12, pp.6691–6710, 2011.
- [33] H. Endo and A. Taguchi, “Color image enhancement method with adjustable emphasis degree,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E101-A, no.4, pp.713–722, 2018.
- [34] 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, 1997.
- [35] Z. Rahman, D.J. Jobson, G.A. Woodell, “Retinex processing for automatic image enhancement,” *Proceedings of SPIE 4662, Human Vision and Electronic Imaging VII*, 12 pages, 2002.
- [36] 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 2008 16th European Signal Processing Conference*, 5 pages, 2008.
- [37] Y. Ueda, T. Koga, H. Misawa, N. Suetake, and E. Uchino, “Gradient Norm-based Histogram Equalization Taking Account of HSV Color Space Distribution,” *Optical Review*, vol.24, no.3, pp.406–415, 2017.
- [38] A.R. Smith, “Color gamut transformation pairs,” *Computer Graphics*, vol.12, pp.12–19, 1978.
- [39] G.H. Joblove and D. Greenberg, “Color spaces for computer graphics,” *Computer Graphics*, vol.12, pp.20–27, 1978.
- [40] 福田忠彦（監修），人間工学ガイド，株式会社サイエンティスト社，東京，2004.

- [41] Y. Ueda, H. Misawa, T. Koga, N. Suetake, and Eiji Uchino, “Hue-preserving color contrast enhancement method without gamut problem by using histogram specification,” Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Image Processing, pp.1123–1127, 2018.
- [42] 植田祥明, 三澤秀明, 古川翔大, 古賀崇了, 末竹規哲, 内野英治, “平滑化係数ヒストグラムを用いた RGB 色空間における色相保存かつ色域を保証したコントラスト強調法,” 電子情報通信学会論文誌, 2019. (採録決定済)
- [43] 玉垣庸一, 宮崎紀郎, 小原康裕, “HSV カラーモデルとオストワルト表色系の類縁性: コンピュータグラフィックスにおける色立体 (3), ” デザイン学研究, vol.54, no.3, pp.9–18, 2007.
- [44] 谷口慶治, 張小忙, デジタル色彩工学, 共立出版株式会社, 東京, 2012.
- [45] 篠田博之, 藤枝一郎, 色彩工学入門, 森北出版株式会社, 東京, 2007.

付録A 式(4.4), (4.5), (4.6)の導出

画素 $\mathbf{x}(i, j) \in [0, 1]^3$ の各要素を $(x_r(i, j), x_g(i, j), x_b(i, j))$ とする. 式(4.3)を $\mathbf{c}(i, j)$ について変形すると,

$$\mathbf{c}(i, j) = \frac{(\mathbf{x}(i, j) - a_w(i, j)\mathbf{w})}{a_c(i, j)}, \quad (\text{A.1})$$

となる. ここで, 純色 $\mathbf{c}(i, j)$ の色相は画素 $\mathbf{x}(i, j)$ の色相と等しいため, 純色 $\mathbf{c}(i, j)$ は画素 $\mathbf{x}(i, j)$, 白 \mathbf{w} , 黒 \mathbf{k} を通る平面上に存在し, かつ色域内で無彩色直線から最も遠い色である. したがって, 純色 $\mathbf{c}(i, j)$ は RGB 色空間の Red–Yellow–Green–Cyan–Blue–Purple–Red を結ぶ辺の上の一点に対応する. この辺の上の色は, R, G, B 成分の最大値が 1 であり, 最小値が 0 である. 色相保存条件³に基づいて画素 $\mathbf{x}(i, j)$ を純色 $\mathbf{c}(i, j)$ へ変換すると, 係数 $\alpha(i, j)$ が正の数であるため, RGB 成分の大小関係は保たれる. したがって, 式(A.1)によって画素 $\mathbf{x}(i, j)$ の最大値 $\max(\mathbf{x}(i, j))$ は 1 に, 最小値 $\min(\mathbf{x}(i, j))$ は 0 に変換される. $\mathbf{x}(i, j)$ の最大値 $\max(\mathbf{x}(i, j))$, 最小値 $\min(\mathbf{x}(i, j))$, 中央値 $\text{med}(\mathbf{x}(i, j))$ の要素それぞれについて展開すると,

$$1 = \frac{1}{a_c(i, j)}(\max(\mathbf{x}(i, j)) - a_w(i, j)), \quad (\text{A.2})$$

$$0 = \frac{1}{a_c(i, j)}(\min(\mathbf{x}(i, j)) - a_w(i, j)), \quad (\text{A.3})$$

$$c_{\text{med}}(i, j) = \frac{1}{a_c(i, j)}(\text{med}(\mathbf{x}(i, j)) - a_w(i, j)), \quad (\text{A.4})$$

となる. 式(A.3)より,

$$a_w(i, j) = \min(\mathbf{x}(i, j)), \quad (\text{A.5})$$

が得られる. また, 式(A.2), (A.5)より,

$$a_c(i, j) = \max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j)), \quad (\text{A.6})$$

が得られる. 凸結合の性質(式(4.7))および式(A.5), (A.6)より,

$$\begin{aligned} a_k(i, j) &= 1 - a_w(i, j) - a_c(i, j) \\ &= 1 - \max(\mathbf{x}(i, j)), \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

が得られる。したがって、式 (4.4), (4.5), (4.6) が,

$$a_w(i, j) = \min(\mathbf{x}(i, j)),$$

$$a_c(i, j) = \max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j)),$$

$$a_k(i, j) = 1 - \max(\mathbf{x}(i, j)),$$

であることが確かめられた。

付録B 式(4.2)の導出

式(4.3)に式(4.4), (4.5), (4.6)を代入し, \mathbf{c} について変形すると, 以下の関係が得られる.

$$\mathbf{c}(i, j) = \frac{\mathbf{x}(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))\mathbf{w}}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))}. \quad (\text{B.1})$$

各要素について展開すると, 式(4.2)である

$$c_r(i, j) = \frac{x_r(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))},$$

$$c_g(i, j) = \frac{x_g(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))},$$

$$c_b(i, j) = \frac{x_b(i, j) - \min(\mathbf{x}(i, j))}{\max(\mathbf{x}(i, j)) - \min(\mathbf{x}(i, j))},$$

が得られる.

付録C L^* および C^* の求め方

RGB 色空間から CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間への変換について述べる⁴⁴. $E \in \{R, G, B\}$ を 24 ビットのフルカラー画像における画素の RGB 値, すなわちノンリニア RGB 信号とする. まず, これをリニア RGB 信号 E_{sRGB} へ変換する.

$$\forall E \in \{R, G, B\},$$

$$E_{sRGB} = \begin{cases} \frac{E}{12.92}, & E \leq 0.04045 \\ \left(\frac{E+0.055}{1.055}\right)^{2.4}, & E > 0.04045. \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

次に, リニア RGB 信号 E_{sRGB} から CIEXYZ 色空間へ変換する.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix}. \quad (\text{C.2})$$

ここで, X, Y, Z は CIEXYZ 色空間の各成分である. 次に, CIEXYZ から CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間へ変換する.

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \quad (\text{C.3})$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right), \quad (\text{C.4})$$

$$b^* = 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right). \quad (\text{C.5})$$

ここで, L^*, a^*, b^* は CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間の各成分である. ここで, D65 白色点の三刺激値を $Y_n = 1$ に正規化し, $X_n = 0.9505, Y_n = 1.0000, Z_n = 1.089$ とした. $f(\alpha)$ は以下の通りである.

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{3}}, & \alpha > 0.008856 \\ 7.787\alpha + \frac{16}{116}, & \alpha \leq 0.008856. \end{cases} \quad (\text{C.6})$$

次に，CIE1976ab クロマ C^* への変換について述べる⁴⁵．CIE1976 $L^*a^*b^*$ 色空間における a^* , b^* を用いて，CIE1976ab クロマは以下のように求められる．

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}. \quad (\text{C.7})$$